



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil

**‘CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE UN CONCRETO ESPECIAL DE ALTA
DURABILIDAD PARA UN PUERTO DEL CARIBE MEXICANO’**

Presenta:

IVÁN RUBIO SALDAÑA

Asesor de Tesis:

M. A. ING. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Co-asesor de Tesis:

DR. ANDRÉS A. TORRES ACOSTA

Morelia, Michoacán. Agosto de 2016



Dedico mi tesis de licenciatura a mi padre, que también fue Ingeniero Civil, de intachable moral, fue un gran profesionalista, siempre supo guiarse por el camino de la bondad y de la humildad.

A mi madre, luchadora incansable con un enorme corazón movido por el amor; ellos siempre han sabido darnos el mejor de los ejemplos a mí y a mis hermanos, todos ellos profesionistas titulados, sin su apoyo y sin inculcarnos la buena ética y costumbres nunca hubiéramos podido llegar a culminar nuestros estudios de grado, el sendero siempre ha sido iluminado y forjado con buenos principios, siendo la mejor herencia que se puede dejar a los hijos.

A mi familia.

A quienes han confiado en mí.



AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mis padres **Aidé Saldaña y Arturo Rubio** que me han dado todo el apoyo posible y más para poder terminar mi carrera profesional, que me permitieron siempre tener todo lo que necesité para continuar estudiando hasta ahora, que tanto han creído en mí y que quiero tanto.

A mis hermanos **Claudia, Ricardo y Arturo**, que siempre me han dado apoyo en todos los sentidos y que me han motivado y servido de ejemplo también para seguir haciendo lo que tanto me gusta y para continuar superándome. También a **Benjamín Mora**, esposo de mi hermana, quien siempre me ha apoyado en lo que he necesitado.

A **Julissa Basilio**, quien todo el tiempo me ha apoyado, motivado para el crecimiento en todos los aspectos y para creer en mí mismo, ella es quien me ha ayudado a convertirme en una mejor persona, quien me ha enseñado a amar y ser feliz.

Al **M.A. Ing. Wilfrido Molina Martínez** que es asesor de este trabajo de tesis, que me apoyó mucho desde el retiro de las muestras en el Instituto Mexicano del Transporte, hasta la culminación de dicho trabajo de investigación. Por guiarme desde la planeación, protocolo y realización de todas las pruebas que se llevaron a cabo.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán** que siempre confió en mí, desde el inicio de mi carrera, tanto como su alumno, como dentro de los trabajos que llevé a cabo dentro del laboratorio de materiales con trabajos para presentar en congresos y al experimentar para mi tesis.

Al **Dr. Andrés Torres Acosta** por confiarnos el trabajo de realización de pruebas de laboratorio en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por su apoyo con las dudas en este trabajo, con respecto a métodos de ensayo, siendo experto en durabilidad.

A los ingenieros, jóvenes ingenieros, colaboradores en laboratorio de Materiales **Isaías Trujillo, Noel Díaz y Marco**, porque me apoyaron desde la planeación de pruebas, e inclusive en la realización de algunas en mi periodo de movilidad estudiantil.

A mis amigos **José Luis, Naim, Cristobal, Mauricio, Karewit**, por su apoyo incondicional en las situaciones más difíciles, y también en las mejores etapas que he vivido.

Al **Tango** que me ha dado el equilibrio entre la ciencia y el arte. A **Zé Tango y Ritmo Latino**. A **Ángeles Carrión y Diego Pagaza** que han sido tan generosos y nos han apoyado tanto.

A todos los profesores que he tenido en todos los ámbitos, porque me han hecho una persona más preparada, pensante, capaz, libre e independiente.



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DEL PUERTO EN EL CARIBE MEXICANO	4
1.1 JUSTIFICACIÓN DE PROYECTO ERIGIDO	4
1.2 NUEVO MUELLE INOXIDABLE Y DURABLE CONSTRUÍDO	5
1.3 PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO MUELLE	6
1.4 MATERIALES UTILIZADOS PARA EL MUELLE	9
1.5 RESULTADOS DE INSPECCIÓN VISUAL AL CONCLUIR CONSTRUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO 2. EL NUEVO PROYECTO DEL PUERTO DEL GOLFO	18
2.1 PREÁMBULO DEL CONTEXTO CONTEMPORÁNEO DEL PUERTO	18
2.2 INSPECCIONES DE LA OBRA DEL PUERTO REALIZADAS POR EL IMT	19
2.3 GESTIÓN DE RECURSOS PARA CONSTRUCCIÓN DE UN VIADUCTO NUEVO	30
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	32
3.1 OBSERVACIONES DE ETAPAS CONSTRUCTIVAS	32
3.2 PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN Y MANEJO DE CILINDROS PARA PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DE MATERIALES	49
CAPÍTULO 4. NORMATIVIDAD DE MÉTODOS DE ENSAYO.....	55
4.1 ABSORCIÓN DE CILINDROS Y VACÍOS TOTALES [NMX-C-263-ONNCCE-2010].....	57
4.2 MÉTODO DE PRUEBA PARA RESISITIVIDAD ELÉCTRICA	59
4.3 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A TRAVÉS DE LOS ESPECÍMENES [NMX-C-275-ONNCCE- 2004]	61
4.4 CABECEO DE CILINDROS DE CONCRETO [NMX-109-ONNCCE-2013]	67
4.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO [NMX-C-083-ONNCCE-2002].....	70
CAPÍTULO 5. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO.....	78
5.1 RECEPCIÓN DE TESTIGOS	78
5.2 PROTOCOLO DE ENSAYOS E INVENTARIO DE NÚCLEOS	81
5.2.1 CORAZONES PARA PRUEBAS FÍSICAS	84
5.2.2 CORAZONES PARA PRUEBAS MECÁNICAS (COMPRESIÓN).....	85
5.2.3 DETALLES GENERALES Y CUIDADOS CON LOS CILINDROS	86
5.3 PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS PARA LOS TESTIGOS	92



5.3.1	PREPARACIÓN DE CORAZONES PARA ENSAYOS	92
5.3.2	OBTENCIÓN DE PORCENTAJE DE VACÍOS: PRUEBA DE POROSIDAD TOTAL DEL MATERIAL.....	96
5.3.3	ENSAYOS ELÉCTRICOS: RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)	99
5.3.4	PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	108
5.3.5	ESTUDIO DE ABSORCIÓN CAPILAR: ENSAYO DE GÖRAN FAGERLUND.....	115
CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE PRUEBAS Y DISCUSIÓN		122
6.1	PRUEBA DE PORCENTAJE DE VACÍOS.....	122
6.2	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	126
6.3	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	132
6.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	138
6.5	ENSAYO DE FAGERLUND	142
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		153
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS.....		155



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Contenidos máximos de cada elemento para aleación de acero 18/8	11
Tabla 2	Resultados de prueba de resistividad eléctrica practicada en las caras del cabezal	14
Tabla 3	Proporcionamientos de mezclas a ser probadas para conocer su comportamiento mediante comparación de resultados. Reproducida con base en el informe de supervisión	37
Tabla 4	Normas base para métodos de ensayo	56
Tabla 5	Criterio de calidad de acuerdo al porcentaje de vacíos	59
Tabla 6	Criterio Red DURAR (1998) de riesgo de armaduras por corrosión	61
Tabla 7	Criterio de calidad de concreto con base en velocidad de pulso ultrasónico	67
Tabla 8	Resistencia a la compresión y espesor máximo del compuesto para cabeceo	69
Tabla 9	Diámetro para placa superior de carga, establecidos por la Norma	71
Tabla 10	Factores de corrección por esbeltez extraídos de la Norma	72
Tabla 11	Tolerancias de tiempo para aplicación de prueba. Propuestas en la Norma	74
Tabla 12	Criterio de riesgo por sorción capilar	77
Tabla 13	Relación de cilindros recibidos provenientes de pilas del Viaducto	79
Tabla 14	Inventario de especímenes, realizado de dos entregas de cilindros provenientes de pilas de Viaducto	
	Parte 1	82
Tabla 15	Inventario de especímenes, realizado de dos entregas de cilindros provenientes de pilas de Viaducto	
	Parte 2 (continuación)	83
Tabla 16	Selección de pruebas para cada probeta. Primer bloque	86
Tabla 17	Selección de pruebas para cada probeta. Segundo bloque. Parte 1	88
Tabla 18	Registro de Características Físicas de Testigos. Primer Bloque	96
Tabla 19	Resultados de testigos extraídos de pilas, primer bloque, ejes 82-70	122
Tabla 20	Resultados de testigos extraídos de pilas, primer bloque, ejes 70-55	123
Tabla 21	Resultados prueba de Porcentaje de Vacíos. Segundo Bloque	124
Tabla 22	Guía de calidad relativa con base en porosidad total (DURAR, 1998)	125
Tabla 23	Resultados de mediciones a testigos primer bloque, ejes 82-70	126
Tabla 24	Resultados de mediciones a testigos primer bloque, ejes 70-55	126
Tabla 25	Porcentaje de variación entre últimas lecturas, cuando se aprueba detener las pruebas	127
Tabla 26	Resistencia eléctrica de testigos, primer bloque, ejes 70-55	127
Tabla 27	Variaciones entre mediciones de resistencia eléctrica de testigos, primer bloque, ejes 70-55	127
Tabla 28	Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 1, ejes 82-67, muestras II-XIII	128
Tabla 29	Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 1, ejes 67-55, muestras XIV-XXII	129
Tabla 30	Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 2, muestra 1-14	130
Tabla 31	Resultados de Resistividad en Cabezales y pilas, bloque dos, muestras 15-28	130
Tabla 32	Resultados de Resistividad en pilas, bloque dos, muestras 29-40	131
Tabla 33	Tabla de Criterio de riesgos, de acuerdo a valores proporcionados por DURAR (1998)	132
Tabla 34	Valor de resistividad estipulado en el diseño de mezcla de concreto	132
Tabla 35	Resultados de Velocidad de Pulso ultrasónico, primer bloque, ejes 82-70	132
Tabla 36	Resultados de Velocidad de Pulso ultrasónico, primer bloque, ejes 70-55	133
Tabla 37	Variaciones entre lecturas de VPU, primer bloque, ejes 70-55	133
Tabla 38	Últimas lecturas tomadas a testigos, primer bloque, ejes 70-55	134
Tabla 39	Resultados de prueba VPU primer bloque, ejes 82-67, muestras II-XIII	134
Tabla 40	Resultados de prueba VPU primer bloque, ejes 67-55, muestras XIV-XXII	135
Tabla 41	Resultados de prueba VPU para testigos de cabezales, muestras 1-14	135
Tabla 42	Resultados de prueba VPU para testigos de cabezales y pilas, muestras 15-28	136
Tabla 43	Resultados de prueba VPU para muestras 29-40	136
Tabla 44	Criterio de calidad relativa con base en resultados de ensayo VPU. (DURAR, 1998)	138



Tabla 45. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple, primer bloque, ejes 82-70.	138
Tabla 46. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple, primer bloque, ejes 70-55.	139
Tabla 47. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de cabezales, muestras 1-14.	139
Tabla 48. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de cabezales y pilas, muestras 15-28.	140
Tabla 49. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de pilas, muestras 29-40.	140
Tabla 50. Resistencia estipulada en el diseño de la mezcla del concreto.	142
Tabla 51. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 1.	142
Tabla 52. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 2.	143
Tabla 53. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 3.	143
Tabla 54. Resultados de porosidad efectiva y succión capilar en testigos, primer bloque, muestras I - XXI.	144
Tabla 55. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de cabezales y pilas, segundo bloque. Parte 1.	146
Tabla 56. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de cabezales y pilas, segundo bloque. Parte 2.	147
Tabla 57. Resultados de porosidad efectiva y succión capilar en testigos extraídos de viaducto, segundo bloque. Parte 1.	147
Tabla 58. Criterio de límites de tolerancia de sorción capilar propuestos por Fagerlund (DURAR, 1998).	152
Tabla 59. Resumen de resultados de las pruebas practicadas al concreto en laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas. ...	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de arco tipo utilizado para viaducto diseñado por la empresa ganadora.	7
Figura 2. Proceso de construcción de caballete, cabezal y dos pilas. Procedimiento constructivo de arcos de viaducto de la obra.	8
Figura 3 Resultados de prueba de concretación de cloruros.	12
Figura 4 Máquina Universal Instron del Instituto Mexicano del Transporte. Imagen tomada de la página del IMT donde se muestran instalaciones y equipos. (IMT, Página Oficial del Instituto Mexicano del Transporte, 2013).	13
Figura 5 Espectro de señal obtenido por el barrido electrónico.	14
Figura 6 Reproducción de Modelo de Wegner.	15
Figura 7. Diagrama vista inferior de un arco fisurado. Sistema de refuerzo estructural usado en el 2003 para reforzar de manera localizada grietas existentes.	22
Figura 8. Diagrama de sistema de refuerzo de estructural utilizado en 2008 y 2009 en grietas existentes de forma generalizada. Vista horizontal inferior de uno de los arcos con el sistema de refuerzo.	26
Figura 9. Aparición de nuevas fisuras en partes del arco donde el refuerzo CFRP no alcanzaba a cubrir.	28
Figura 10. Aparición de nuevas fisuras en apoyo 30 de viaducto, que 3 años antes ya había sido reforzado. Causado por continuo tránsito de grandes cargas sobre el Viaducto.	29
Figura 11 Preparación y armado de acero para pilotes del Viaducto de la obra.	40
Figura 12 Armado de acero para pilas.	40
Figura 13 Armado de acero estructural casi terminado, el cual fue destinado para las pilas del nuevo viaducto.	40



Figura 14 Colocación de escantillón, cimbra metálica y armado de acero para pilotes de Viaducto.	41
Figura 15 Suministro, prueba in situ de trabajabilidad y colocación de tubo Tremie para verter el concreto de pilas.	42
Figura 16 Capturas fotográficas el 2 y 3 de junio mientras se realizaba la quinta visita de inspección.	42
Figura 17 Colocación del concreto para pila con tubo Tremie y tolva.	42
Figura 18 Asiento de pilas de concreto en fondo marino.	43
Figura 19 Pre-perforación con bote tipo corona y perforación inicial con broca helicoidal.	43
Figura 20 Depósito de material producto de perforación y retiro de material proveniente de excavación. ...	44
Figura 21 Colocación de cimbra para el armado del cabezal.	44
Figura 22 Nivelación y revisión de armado. Cimbra prefabricada para colar cabezales.	45
Figura 23 Vista avances de obra, algunos de los cabezales ya colados.	46
Figura 24 Revisión, protección de colado terminado para primera parte de cabezales.	46
Figura 25 Cabezales completamente colados. Avance de la obra para el día 15 de marzo de 2015. Subestructura casi terminada.	47
Figura 26 Vista de cabezales casi terminados, detalle de los restantes por colar.	48
Figura 27. En la figura e observa el área de donde fueron extraídos los corazones de las pilas.	51
Figura 28. Montaje para prueba de Resistividad Eléctrica.	60
Figura 29. Diagrama de aparato medidor de pulso. (ASTM, 2002).	65
Figura 30. Diagrama de plato metálico utilizado para la prueba.	68
Figura 31 Diagramas de fallas de cilindros sometidos a compresión. Obtenidos de la Norma en cuestión. .	74
Figura 32 Ejemplo de registro fotográfico de especímenes recibidos para pruebas. Primero y segundo bloque.	84
Figura 33. Diagramas de corte de testigos de primer bloque de pruebas.	90
Figura 34. Diagramas de requerimientos para corte de testigos de cabezales.	91
Figura 35. Diagramas de requerimientos para corte de testigos de pilas.	91
Figura 36 Testigos recibidos para probar. Primera recepción.	92
Figura 37. Manipulación de máquina cortadora de concreto usada con probetas recibidas e imagen de remanente de cilindro producto de corte empaquetado para enviar a probar químicamente al IMT.	93
Figura 38 Remanente de cilindro empaquetado para enviar a probar químicamente al IMT.	94
Figura 39 Testigos cortados, partes destinadas para pruebas tipo Co2.	94
Figura 40 Rodajas de testigos provenientes de corte de dos entregas, destinadas para pruebas de tipo Co3, Co4 y Co5.	95
Figura 41 Horno para secar probetas con funcionamiento a los 50°C.	96
Figura 42 Pesaje de especímenes para registro en tablas.	97
Figura 43 Máquina destinada a ensayo de resistividad eléctrica utilizada para el concreto a caracterizar.	102
Figura 44 Aparato para medición de Velocidad de Pulso Ultrasónico en especímenes.	106
Figura 45 Colocación y acoplamiento de especímenes para realizar ensayos de Velocidad de Pulso Ultrasónico.	107
Figura 46 Colocación de material de cabeceo para pruebas de compresión simple y especímenes ya listos para ensayar.	110
Figura 47 Medición de longitud de especímenes con material de cabeceo para registro en las tablas y probeta colocada en placa de máquina lista para prueba de compresión simple.	111
Figura 48 Manipulación de controles de máquina universal durante prueba de compresión simple y espécimen tronado.	112
Figura 49 Imagen de especímenes que ya han sido probados por compresión en la máquina Universal. ...	113
Figura 50 Testigos ensayados sin material de cabeceo empacados para enviar a IMT.	113
Figura 51 Testigos ensayados sin material de cabeceo empacados para enviar a IMT con anotaciones dentro de las bolsas.	114
Figura 52 Material de reciclaje para cabeceo de cilindros de concreto.	114
Figura 53 Rodajas de concreto puestas dentro de horno para secado.	117



Figura 54 Imagen de rodajas de cilindros a probar.....	117
Figura 55 Especímenes durante la prueba de Fagerlund.	118
Figura 56 Testigos en proceso de aplicación de la prueba de Fagerlund.	119
Figura 57 Especímenes siendo secados superficialmente para pasar a pesaje y posteriormente a registro de datos.	119
Figura 58. Gráfica de barras de resultados de Porcentaje de vacíos, primer bloque.	123
Figura 59 Resultados de segundo bloque, cabezales.	124
Figura 60. Resultados de segundo bloque, pilas.	125
Figura 61. Gráfica de variaciones de resistencia eléctrica, practicada a especímenes en saturación, primer bloque, ejes 70-55.....	128
Figura 62. Gráfica de barras de resultados de prueba de Resistividad eléctrica, muestras II-XXII.....	129
Figura 63. Gráfica de barras con resultados en Cabezales.....	131
Figura 64. Gráfica de barras con resultados en Pilas.	131
Figura 65. Gráfica de variaciones de VPU, para especímenes en saturación, primer bloque, ejes 70-55. ...	133
Figura 66. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU, primer bloque, ejes 82-55, muestras II-XXII.	137
Figura 67. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU para corazones extraídos de cabezales.	137
Figura 68. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU para corazones extraídos de pilas. .	137
Figura 69. Gráfica de barras de resultados en testigos de primer bloque, ejes 82-55, muestras II-XXII.	141
Figura 70. Gráfica de barras de resultados de prueba de resistencia a compresión simple de testigos extraídos de cabezales.	141
Figura 71. Gráfica de barras de resultados de prueba de resistencia a compresión simple de testigos extraídos de pilas.	141
Figura 72. Gráfica de resultados en testigos, primer bloque, muestras I – XXI.	144
Figura 73. Coeficiente de absorción capilar, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.....	145
Figura 74. Porosidad efectiva, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.	145
Figura 75. Succión capilar, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.	146
Figura 76. Gráfica de barras de resultados absorción capilar de testigos extraídos de cabezales.	148
Figura 77. Gráfica de barras de resultados absorción capilar de testigos extraídos de pilas.	149
Figura 78. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de cabezales.	149
Figura 79. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de pilas.	150
Figura 80. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de pilas y cabezales.	150
Figura 81. Gráfica de barras de resultados succión capilar de testigos extraídos de cabezales.	151
Figura 82. Gráfica de barras de resultados succión capilar de testigos extraídos de pilas.	151



RESUMEN

El objetivo principal este trabajo es el de dar a conocer los resultados de las pruebas practicadas a probetas de concreto elaboradas respetando un diseño especial con el propósito de utilizarse para la obra de un puerto ubicado en el caribe mexicano. Se trata de un material denominado esencialmente como concreto autocompactable gracias a su comportamiento al momento de colocarse en obra, cabe destacar que este tipo de concretos es escaso en México. La idea inicialmente fue dada por investigadores japoneses y fue producido por las necesidades de sismicidad que se dan en ese país tan susceptible a ese tipo de actividad de movimiento de la tierra. Se trata de un material que tiene que ser muy controlado en cuanto a la dosificación de sus componentes y el costo es mayor al de un concreto convencional, pero es más sencillo operar con él debido a que no es necesario el uso de maquinaria de vibración ni compactadores para su colocación. Para poder definir las características del comportamiento y propiedades del material compuesto se ha realizado una serie de pruebas de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas oficiales en vigencia que se utilizan para el ámbito de la construcción, tomando en cuenta ciertas consideraciones por tratarse de un material no convencional y con objetivos de durabilidad. Se usaron las máquinas disponibles en el laboratorio de materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, donde se ha recibido ayuda de técnicos de laboratorio e investigadores para guiar las pruebas solicitadas por el IMT.

Palabras clave: concreto, autocompactable, durabilidad, puerto, caribe



ABSTRACT

The main objective of this paper is to present the results of tests performed on concrete specimens prepared in compliance with a special design in order to be used for the work of a port in the Mexican Caribbean. It is essentially a material called self-compacting concrete thanks to its behavior when placed in work, it should be noted that this type of concrete is scarce in Mexico. The idea initially was given by Japanese researchers and was produced by the needs of seismicity occurring in that country so susceptible to such activity motion of the earth. It is a material that has to be very controlled in terms of dosage of components and the cost is higher than a conventional concrete, but is easier to operate with it because it is not necessary to use machinery vibration or compactors for placement. In order to define the performance characteristics and properties of the composite material has conducted a series of tests as established in the official Mexican standards in place that are used for the field of construction, taking into account considerations because it is a unconventional and targeted durability material. The available machines were used in the materials laboratory of the Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, which has received aid from laboratory technicians and researchers to guide the evidence requested by the IMT.

Key words: concrete, self-compacting, durability, harbor, Caribbean



INTRODUCCIÓN

Para este trabajo de tesis de licenciatura se han recibido probetas por parte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), para practicarles una serie de pruebas, y así poder caracterizarles, en el Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

Estos especímenes provienen de la obra de un puerto en el Caribe Mexicano, planeada e iniciada hace un poco más de un par de años, han sido extraídos de la parte de las pilas y cabezales de dicha obra, construida recientemente.

Este tipo de obras, debe cumplir con ciertas exigencias, como resistencia a la penetración de cloruros en la matriz del concreto, los cuales ocasionan corrosión del acero y deterioro del concreto con el que entran en contacto. Adicionalmente, se requirió diseñar una mezcla que cumpliera con adecuada cohesión y permanencia para poder ser bombeado desde la playa hasta mar adentro, donde se colaron los elementos estructurales, esto requiere específica relación de agua-cemento (en este caso de 0.32), extensibilidad específica, revenimiento y permanencia óptimos, parámetros que se deben tener controlados para que el material compuesto se comporte de acuerdo a las necesidades.

Con base en las características requeridas se determinó un diseño para la mezcla del concreto que sería utilizado para construir el viaducto del puerto, tomando en cuenta, además, que debía comportarse sin sangrado ni segregación al momento del colado, con un contenido de cemento de resistencia rápida para alcanzar una compresión mayor a 400kg/cm² a los 7 días, con resistividad eléctrica mínima de 50 kΩ-cm. Todos estos parámetros funcionando como indicadores de durabilidad de las estructuras.

Para que la mezcla cumpliera con estos objetivos fue necesario adicionar sustancias, retardante, súper-fluidificante y reductor de agua de alto desempeño.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DEL PUERTO EN EL CARIBE MEXICANO

Es importante hacer mención que durante este trabajo se maneja información de una obra, de la cual no puede revelarse el nombre exacto del Puerto del que se trata, solo se menciona que se trata de uno ubicado en el Caribe de nuestro país, y que no se menciona datos específicos de referencias por las mismas cuestiones de confidencialidad y secrecía, por esta cuestión son escasas, así como se han omitido menciones de la empresa que llevó a cabo los procesos constructivos por la misma protección y apoyo a los participantes.

1.1 JUSTIFICACIÓN DE PROYECTO ERIGIDO

Se trata de un puerto que ha sido erigido por necesidad para hacer más fácil el transporte e intercambio de productos que llegaban por medio marítimo, a través de la parte del Golfo de México

Se registraba un aumento en demanda de productos, como la carne salada, palo de tinte, pescado salado (pámpano y robalo), derivados de algodón y henequén. Desde España llegaba ferretería, papel, telas de algodón y lana, clavos, alambre, lienzos de lino y gran variedad de productos de otros países.

Existía otro puerto cercano, al que sustituyó, aun siendo el antiguo considerado de altura y cabotaje; la sustitución se debió a que había que recorrer unas distancias muy grandes por caminos complicados de transitar y en épocas de lluvia se volvía imposible utilizarlo.

Fue necesario buscar una alternativa para recibir los barcos en la costa, aunque esta no gozara de las condiciones adecuadas de protección para navíos.

Se trata de un proyecto desarrollado desde el siglo XIX que ha ido sufriendo modificaciones por cuestiones de adaptación a la demanda de los usuarios, para



reducir distancias, y evitar los inconvenientes suscitados en un inicio por los factores climáticos que restringían su utilización. Alrededor del año 1870, se abre al público para disposición de los usuarios.

1.2 NUEVO MUELLE INOXIDABLE Y DURABLE CONSTRUIDO

Hubo que lanzar una convocatoria para un nuevo proyecto, debido al aumento en el movimiento por la distribución de fibra de henequén, los habitantes pidieron que se erigiera un nuevo muelle considerando que debería tener entre 5.4 – 6 metros de profundidad y cerca de 2 kilómetros de longitud para cumplir con esta condición.

La convocatoria se dio conocer en los años treinta y fue lanzada a nivel internacional, lo interesante fue la importancia que se le otorgó a la durabilidad de la estructura y además, gracias a las malas experiencias previas, se pedía una construcción que demandara costos bajos para su manutención, pues habían perdido mucho dinero en mantenimiento y reparación de lo hecho hasta entonces en el muelle, a causa de las condiciones a las que se ve sometido el lugar. De hecho, se solicitó una póliza de garantía por cien años a la empresa ganadora de tal convocatoria.

Entraron en la convocatoria empresas mexicanas, una estadounidense y una danesa, resultando ganadora la empresa de Europa, con un costo pronosticado de 4 millones de pesos. Corría el año de 1936 cuando se comenzaron los trabajos de construcción del nuevo muelle, donde antiguamente se encontraba el muelle Francisco Cantón, ocurrió durante el gobierno del general Lázaro Cárdenas.

Uno de los motivos por los que la empresa danesa resultó ganadora de la convocatoria, fue que en el proyecto estipulaba que el acero convencional iba a verse reducido en cantidades, debido a que consideraron el uso de concreto masivo para las sub y superestructuras. El diseño era simple, sería apoyado sobre pilares para permitir las corrientes de flujo de agua pasar a través de la construcción, así no se



causaría erosión y tampoco permitiría acumulación de arena en la costa. Adicionalmente, por ser construido de concreto y sin acero de refuerzo se podría utilizar la roca caliza que era originaria de la región en forma de agregado grueso y fino, ya que este tipo de roca tiene alta porosidad, las ventajas de no utilizar acero recaerían en evitar su deterioro a causa de los cloruros.

1.3 PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO MUELLE

El proyecto del muelle constaba de tres partes: el acceso de 415 metros, un viaducto de 1752 metros y el muelle fiscal de 50 metros de ancho y un largo de 205 metros. El viaducto consistía de 146 entre-ejes de longitud de 12 metros y unos 9.5 metros de ancho, cada uno con dos pilares, cabezal de acero inoxidable y un arco construido de concreto simple.

El viaducto contaba con carril donde podía transitar un ferrocarril y otro carril donde podían transitar vehículos motorizados. En el extremo del viaducto se construyó la plataforma del muelle fiscal y en medio un edificio aduanal que constaba de tres niveles.

El proyecto original del viaducto contemplaba dos líneas de ferrocarril corriendo paralelas, esto calculado por cargas aplicadas en ambas líneas. La distribución de cargas se hizo considerando el peso la locomotora de 85 toneladas con 5 ejes separados cada 1.50 metros y un vagón de 80 toneladas con tres ejes con espacios de 1.50 metros.

Para la construcción de la plataforma se tomó en cuenta cargas de 4 ton/m². Los esfuerzos de diseño permisibles aplicados de pilas al terreno era de 15 kg/cm² y los esfuerzos generados por la aplicación de cargas externas hacía los arcos y las pilas fue de 25 kg/cm².

Los pilares se colocaron de forma que estuvieran descansando directamente sobre el suelo marino, no anclados, uno de los argumentos de la empresa era que la propia estructura por su peso y por las fuerzas de gravedad soportarían los embates



marinos. Además, sin acero de refuerzo evitando también la degradación del concreto con el que tuviera contacto, se reportó un aproximado de 65m^3 de material en cada pilar y un alto de unos 7.6 metros, considerando el pilar más elevado.

En los cabezales de la subestructura se utilizó un acero inoxidable de tipo 304 (con una cuantía de acero, $\rho = \text{área transversal del acero} / \text{área transversal de concreto}$, del 0.15%), más o menos unas 220 toneladas de un material de 30 milímetros de diámetro, cosa que fue gran avance para la época porque era la primera vez que se usaba ese tipo de material pensando como principal criterio el diseño por durabilidad.

En cuanto a la superestructura, consta de arcos tri-articulados y muros en los laterales, construidos de concreto simple, relleno de productos de trituración de roca y con una losa de concreto armado. La estructura quedó erguida y lista para utilizarse para el año de 1937 y para el mes de marzo del año 1941, ya estaban construidos todos los arcos, la plataforma estaría lista para septiembre.

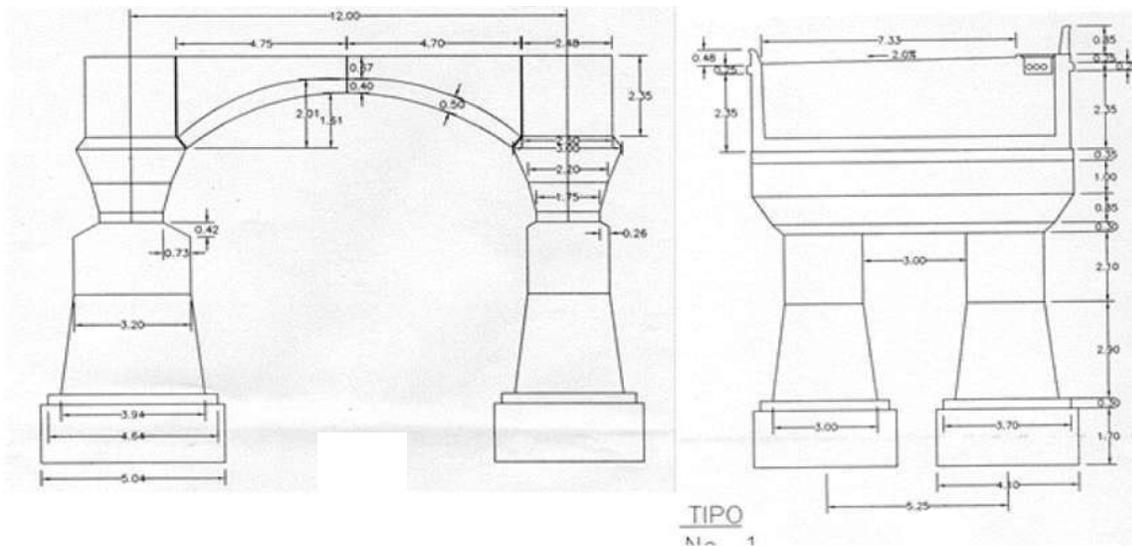


Figura 1. Diagrama de arco tipo utilizado para viaducto diseñado por la empresa ganadora.

Los arcos de concreto simple se construyeron de tal forma que salven un claro de 9.20 metros y se elevaron 1.70 m con un espesor de 40 centímetros. Se



diseñaron como arcos tri-articulados, dos de las articulaciones colocadas a los extremos del arco y una colocada en la clave del arco, fueron construidas con tiras de plomo y corcho. A lo largo de los arcos se colocaron unos muros de un espesor de 40 cm para poder contener el relleno que estaba proyectado colocar, se utilizaron estructuras metálicas para poder erguir todas estas partes de la gran estructura.

En un inicio se diseñó una estructura conformada por dos carriles, uno para que pudiera correr el ferrocarril y otro para los vehículos con motor. En el carril que estaba destinado para ferrocarril, los rieles utilizados fueron colocados y fijados en la losa continua de acero reforzado.

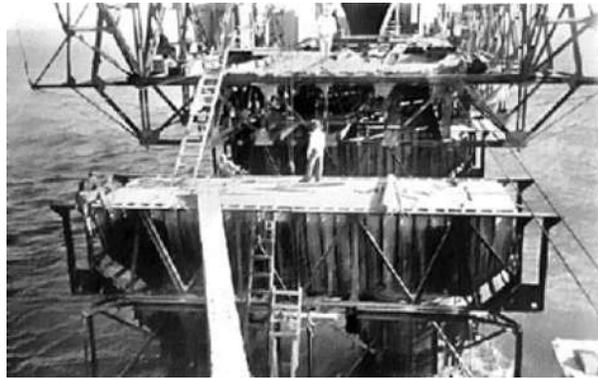


Figura 2. Proceso de construcción de caballete, cabezal y dos pilas. Procedimiento constructivo de arcos de viaducto de la obra.

En el extremo, finalizando el muelle, se construyó la plataforma con una longitud de ancho de 50 metros y un largo de 205 metros y posee elementos similares a los del viaducto en cuestión estructural, es decir, tiene pilas de concreto simple, además arcos y cabezales de concreto reforzado utilizando también acero inoxidable. Constituye una parte muy importante de la estructura porque es donde se llevan a cabo recepción y maniobra de los productos que llegan y salen del puerto, ahí mismo se acomodan los contenedores que se utilizan para el transporte de la mercancía, además debe contar con grúas y lo necesario para su movimiento.

En el centro de la plataforma, ese construyó posteriormente (terminado seis años después) un edificio que funcionaba como parte de la aduana y tenía 3 niveles,



construido a base de concreto reforzado en todos los elementos, traveses, columnas y la losa maciza.

El relleno sería colocado para el año de 1941 para que pudieran ingresar vehículos, pero ese año la empresa tuvo que salir del país a causa de la Segunda Guerra Mundial.

Cinco años después los años siguientes, se erigió el edificio aduanal usando materiales convencionales, como el concreto, acero de refuerzo al carbón e inoxidable como se utilizó en el viaducto y en la plataforma. Años después fueron desmantelados un par de muelles construidos con pilotes y vigas de acero y madera, sirvieron mucho para periodos importantes en la historia del puerto, porque tuvieron importante colaboración para servicios de comercio marítimo durante las dos guerras mundiales.

1.4 MATERIALES UTILIZADOS PARA EL MUELLE

Como parte de la investigación entregada para el proyecto ya se había descartado el uso de la arena de playa como agregado fino para el concreto, por las pruebas de laboratorio realizadas se concluyó que no tenían adecuada distribución granulométrica, además, se conoció en los estudios su alto porcentaje de concentración de cloruros.

La arena que decidió utilizarse fue el agregado producto de la trituración de roca caliza encontrada en la zona de la obra.

La piedra caliza fue obtenida de agregado grueso de lajas. Poseían un área entre 1 y 5 m² y espesores de entre 20 y 50 cm, y fueron extraídas por medios manuales con el uso del marro, pico y barreta, en pocos casos llegó a necesitarse de explosivos para su obtención. Fueron transportadas por vagones de tren hacia una trituradora con capacidad de 20 m³/h.



Los estudios practicados a la roca caliza triturada arrojaron resultados para la prueba peso específico de entre 1.9 y 2.0 kg/m³.

Se sabe que se consumieron 23,000 toneladas de cemento, de este material provenían de Dinamarca 17,500 ton y el restante, de México y Estados Unidos entregado en bultos de 50 kg, se utilizó el agua de un pozo ubicado a unos 150 m de la costa y poseía una profundidad de 8 m, se utilizó una tubería de 15 cm de diámetro para poder bombear el líquido hasta el lugar donde se ubicó la máquina mezcladora, con una longitud total de 2km. Aunque nunca se reportaron resultados de pruebas químicas para el cemento.

La empresa encargada del proyecto del nuevo muelle, reportó una fabricación y utilización de concreto de 72,500 m³. Fueron utilizados 32,000 ton para la colocación llevada a cabo bajo agua en los pilares, 30,000 ton usadas para fabricar los cabezales, arcos y muros laterales. 10,500 m³ se emplearon para erigir el edificio aduanal y para la losa sobre los rieles del ferrocarril.

El acero inoxidable es una alternativa constructiva para obras de ingeniería civil que exijan sus propiedades en el medio donde se construya, en los puertos se llega a utilizar para que no se dañen las estructuras, pues a veces es difícil y costoso el esfuerzo de evitar que existan daños en los aceros convencionales, cuando se utilizan para construir en ambientes hostiles, tal es el caso de la obra.

Así que se optó por utilizar el material inoxidable, que posee características antioxidantes y durabilidad. La base técnica de estos nuevos aceros es la combinación del níquel (Ni), cromo (Cr) y el manganeso (Mn), además las aleaciones se corrigen con cobre (Cu) y con nitrógeno (N) para mejorar sus propiedades.

El acero inoxidable utilizado para la construcción ha sido denominado de aleación 304 según la clasificación AISI (American Iron and Steel Institute o Instituto Americano del Hierro y el Acero) y forma parte de un grupo de aceros llamados austeníticos, por su estructura cristalina.



Tabla 1 Contenidos máximos de cada elemento para aleación de acero 18/8

Elemento	Contenido Máximo
Cr (cromo)	18 - 20%
Ni (níquel)	8 - 11%
Mn (manganeso)	2.00%
Si (silicio)	0.75%
C (carbono)	0.08%
P (fósforo)	0.04%
S (azufre)	0.03%

Por sus porcentajes de contenido de cromo y níquel ha sido denominado también 18/8. Con una densidad de 7.8 g/cm^3 (0.28 lb/in^3).

Este metal es el más versátil y uno de los aceros inoxidable más usados de la serie 300. Tiene unas propiedades excelentes para el conformado y para el soldado. Se puede utilizar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte, además tiene buen comportamiento cuando se recurre a la soldadura, pues no presenta recocido luego del procedimiento, así se desempeña bien en variadas condiciones corrosivas, incluso en ambientes de exposición a productos derivados de petróleo calientes o con ciertos vapores de combustión de gases. Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta $870 \text{ }^\circ\text{C}$ y en servicio continuo hasta 925°C . No se recomienda para uso continuo entre $425 - 860^\circ\text{C}$. Ha tenido gran variedad de usos anteriormente, para equipos de la industria química y naval, refinería de petróleo, instalaciones criogénicas, almacenes de alimentos y bebidas, tuberías de vapor, contenedores en fábricas nucleares, entre otras. Sabiendo de su buen comportamiento ante este tipo de condiciones, se ha decidido utilizar para construcción.

Se llevó a cabo un estudio metalográfico en una muestra de la misma varilla en los laboratorios del Instituto Mexicano del Transporte, con una preparación, todo de acuerdo a la prueba IMT-EQ-N-03, se realizó el procedimiento de la norma ASTM E-112 y se determinó que el acero inoxidable poseía un tamaño nominal de grano ASTM del número 8, medido por el número de granos contenidos en un área de un milímetro cuadrado.



También fueron practicados ensayos de laboratorio en algunas muestras extraídas del concreto utilizado en la obra, para ver cómo se comportaba realmente el material una vez colado.

De los testigos, se trataba de 12 de ellos provenientes de los cabezales sobre la playa del acueducto (cabezal 9) obtenidos con un extractor manual y se realizaron pruebas para determinar varias propiedades, como la densidad y porosidad de cuatro testigos, resistencia a la compresión y frente a carbonatación de cuatro testigos más, además del perfil de concentración de cloruros, utilizando los cuatro testigos restantes. Las pruebas fueron practicadas en los laboratorios del IMT y de instituciones colaboradoras del proyecto. Más adelante también se realizaron estudios de profundidad de carbonatación, resistividad eléctrica del concreto y obtención del perfil de concentración de cloruros.

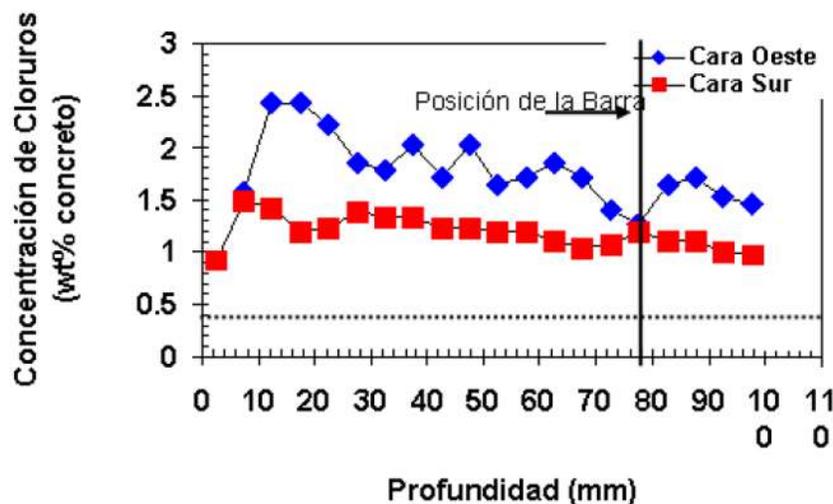


Figura 3 Resultados de prueba de concentación de cloruros..

Al darse por terminadas las pruebas se presentaron algunos resultados, se observó que el cabezal 9, del que se obtuvieron los 4 testigos destinados a esta prueba, tenía una densidad seca de tres valores: 2.304, 2.198, 2.221 y 2.238 g/cm³, obteniéndose un promedio de 2.24 g/cm³. Un volumen de vacíos de 19.5, 18.7, 21.8, 23.6% dando un promedio de 20.9% y fabricado con roca caliza triturada. Por los



resultados se conoció que el concreto estaba dentro de los valores normales en cuanto al peso, pero también que el porcentaje de vacíos estaba sobre los estándares, tratándose de un ambiente tropical húmedo, pudiendo contribuir a que los cloruros y otro agentes que podrían resultar agresivos ingresen fácilmente al compuesto, por eso es que se decidió corroborar con pruebas químicas.

El ensayo de compresión se llevó a cabo en laboratorios del IMT, utilizando una máquina universal Instron y fue aplicada tratando de utilizar la parte remanente más profunda de las probetas para conocer la afección por la carbonatación, se utilizaron porciones de dos testigos para esto; uno de los testigos estaba agrietado y se rompió, de manera que no pudo utilizarse por no cumplir con las características necesarias de tamaño que se exige en las normas. Así que los resultados arrojados por lo practicado al único espécimen restante, es una carga máxima resistente de 38.1 kN y dividido por el área transversal del testigo se obtuvo una resistencia a compresión de 24.3 MPa.



Figura 4 Máquina Universal Instron del Instituto Mexicano del Transporte. Imagen tomada de la página del IMT donde se muestran instalaciones y equipos. (IMT, Página Oficial del Instituto Mexicano del Transporte, 2013)

En el análisis químico cualitativo realizado con microscopio de barrido electrónico, llevado a cabo por Oladis Troconis de la Universidad de Zulia en Venezuela. Donde 'wt%' se refiere al porcentaje en peso y 'at%' al porcentaje atómico



del material de cada elemento encontrado. De lo obtenido del barrido se demuestra que la composición química es la misma a la reportada en la norma para un acero AISI 304, que contiene aproximadamente 18% en peso de cromo, 8% en peso de níquel, se confirma que fueron verídicos los resultados entregados por la empresa Danesa ARMINOX.

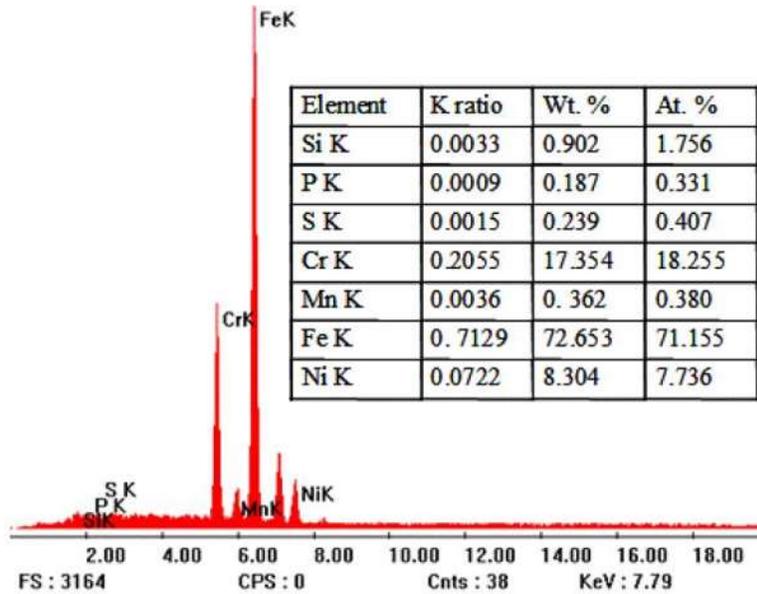


Figura 5 Espectro de señal obtenido por el barrido electrónico.

Para medir la resistividad eléctrica es posible emplear todos los testigos que llegan al laboratorio, pues es una prueba no destructiva, utilizando método de Wegner. Los testigos fueron extraídos de las cuatro caras del cabezal en dirección al norte (N), este (E), oeste (O) y sur (S), así que se tiene resultados distintos para cada cara.

Tabla 2 Resultados de prueba de resistividad eléctrica practicada en las caras del cabezal.

Cara	Mediciones (KΩ·cm)	Promedio (KΩ·cm)
N	1.63	1.0
	0.63	
	0.63	



E	2.2	1.9
	1.88	
	1.63	
S	1.57	2.1
	2.51	
	2.2	
O	0.94	0.9
	1.26	
	0.63	

Los valores obtenidos resultan en alarma, pues cuando el valor de resistividad es menor de $10 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$, se dice que está corriendo grave riesgo de ser corroído el acero de refuerzo.

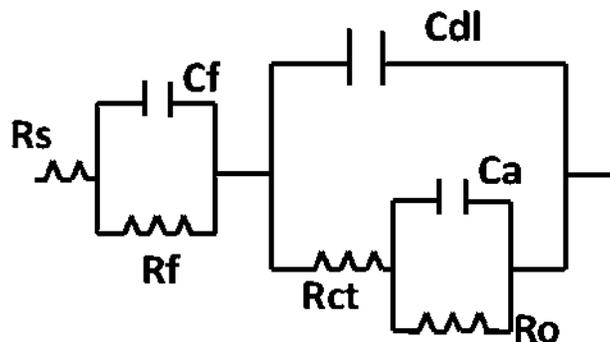


Figura 6 Reproducción de Modelo de Wegner.

Para la prueba de profundidad de carbonatación, fue utilizado un procedimiento denominado de vía húmeda con solución de indicador ácido-base. Fueron utilizados cuatro de los testigos para esta prueba y se realizó en laboratorio de Concertación Industrial del IMT obteniendo valores de 15, 0, 0 y 2.5 mm y un promedio de 7.3 mm. Aunque el volumen de vacíos por arriba de lo normal, la profundidad de carbonatación resultó ser despreciable, esto debe ser debido a que el concreto se encuentra saturado, entonces impide la entrada de dióxido de carbono, por eso no se produce el fenómeno de carbonatación, y con los resultados se demuestra.



También se realizó la prueba de concentración de cloruros en el concreto, se utilizó el procedimiento de la RED DURAR, presentando resultados de dos de los cuatro cilindros ensayados, mostrando concentración típica de concretos que son muy porosos por el agregado calizo originario de la zona que se utilizó.

El clima clasificado como tropical marino de la costa del estado se caracteriza por su agresividad atmosférica como número 5, donde 1 representa ambiente con condiciones secas, y 5 ambientes marinos agresivos en la escala de la ISO (International Organization for Standardization) (Perepérez Ventura, Barbera Ortega, & Andrade Perdrix, 1987). Para relación a/c reportada del muelle entre 0.5 y 0.6, se encontraron umbrales de 1.12 y 4.26% de peso del cemento para la varilla de acero al carbón.

Según los resultados obtenidos, en el cabezal analizado, se supera el umbral superior reportado para los materiales de la zona y acero convencional a la profundidad de la varilla de refuerzo, por eso, se sabe que no se utilizaron barras normales, de lo contrario se presentaría propagación de corrosión en los cabezales y además patologías que pudieran apreciarse a simple vista como delaminaciones o grietas.

1.5 RESULTADOS DE INSPECCIÓN VISUAL AL CONCLUIR CONSTRUCCIÓN

Para corroborar el adecuado desarrollo de los procesos constructivos, con ayuda de una lancha provista por la Administración del Puerto, se visualizó cien arcos, 21 de ellos presentaron grietas estructurales en dirección paralela al eje del proyecto. Seis de los arcos con grietas se calificaron de un ancho más grande que 3mm y los otros quince presentaban grietas no mayores a 1mm, sin embargo, como los arcos son de concreto convencional, no hay riesgo que por las grietas se pueda presentar corrosión. De igual forma es recomendable procurar hacer alguna



evaluación estructural posterior cuando se crea pertinente, para evitar futuros peligros por daños estructurales.

En la inspección visual no se apreció corrosión en el acero de cabezales, es decir, no se observaron varillas expuestas a corrosión ni manchas o signos de óxido; solo algunas partes de la plataforma aduanal dejaba ver algunas delaminaciones que tenían relación con el impacto de embarcaciones.

Esta inspección fue realizada 60 años después de su construcción, no dejando ver señales de deterioro, aunque las autoridades del puerto reportaran que la subestructura y la superestructura habían tenido alguna reparación mayor en dicho periodo de tiempo.

Esta construcción fue única en el mundo por sus avances tecnológicos y también porque era la primera construida con criterios de durabilidad y no de resistencia. Usando la geometría estructural, sería visible que solo trabaja a compresión, por eso no se requería el uso de acero de refuerzo. El único metal utilizado fue una aleación tipo 304 de acero inoxidable.

Algunos países, como Japón, Inglaterra, Francia y Estados Unidos, en los años ochenta recién comenzaban estudios para saber cómo podían utilizar el acero inoxidable para hacer más durables las estructuras, se llevaron la sorpresa de saber que en México ya había una estructura así, de una antigüedad de más de cincuenta años, aunque fuera de hechura extranjera.



CAPÍTULO 2. EL NUEVO PROYECTO DEL PUERTO DEL GOLFO

Se darán unos detalles, pero nuevamente se trata de guardar confidencialidad en datos más específicos que den referencias de la obra particular.

Por cuestiones de necesidad en el muelle tuvo que pensarse nuevamente en ajustar la obra a las exigencias que el puerto tiene por parte de los usuarios, ya que la demanda cada vez es mayor y ya no soportaba más cargas pesadas sin sufrir daños continuos.

2.1 PREÁMBULO DEL CONTEXTO CONTEMPORÁNEO DEL PUERTO

A finales de 1970 y principios de los años de 1980 la infraestructura del Puerto, se amplió construyéndose una extensión de casi 4.5 km mar adentro. Esto para poder el Puerto recibir embarcaciones de mayor calado (profundidad de eslora) ya que éstas no podían atracar en el antiguo muelle (plataforma al final del viaducto) al no poder fondear adecuadamente. Esta extensión se construyó en base, no de un viaducto tipo puente que permitiera el paso de las corrientes, sino mediante un relleno tipo carretero con diferentes capas de piedra (pedraplén) y relleno compactable de la región (sascab, adaptada al término maya que significa 'tierra blanca' y así denominado el material para realizar mezclas en construcción, una piedra calcárea descrita como caliza compuesta) (GlobalTurf Network, 2014).

Esta ampliación permitió que el acceso del flujo vehicular sea a cuatro carriles, duplicando la capacidad de tráfico vehicular, pero quedando la zona original (viaducto de arcos) restringido a solo dos carriles. Esta modificación, por obvias razones, incrementó el flujo de bienes y servicios a las zonas de embarque y desembarque en el Puerto, por lo que incrementaron sustancialmente las cargas



aplicadas a lo largo del acceso de casi 6 km al puerto de altura, incluidos los 2 km iniciales del viaducto de arcos y plataforma del antiguo muelle fiscal.

La modernización decidió realizarse para prevenir que hubiera un momento en el que el Puerto pudiera dejar de prestar sus servicios a clientes, basándose sobre todo de acuerdo a inspecciones realizadas que se tienen registradas desde el año 2002 y que enseguida serán descritas.

2.2 INSPECCIONES DE LA OBRA DEL PUERTO REALIZADAS POR EL IMT

Se aclara que la información de este subcapítulo se obtuvo del informe de inspección de la Obra, realizado por el IMT.

El IMT es un órgano descentralizado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y como parte de sus actividades se encuentra el apoyar en los proyectos de investigación o servicios al Sector de Transporte.

Por lo anterior es que el Instituto presta sus servicios de consultoría de varias ramas de la ingeniería y una de las formas de hacerlo es a través de las Administraciones Portuarias Integrales, como es el caso de la que se encuentra en el Puerto del Caribe Mexicano, además colabora con la Coordinación de Puertos y Marina Mercante cuando se suscitan problemas que haya que resolver en lo relacionado a la operación de los puertos.

Desde el año 2001 se ha realizado un esfuerzo conjunto para determinar el estado en el que se ha encontrado la infraestructura sobre todo del concreto en el viaducto, con mayor atención en la arcada porque para ese entonces ya tenía 70 años funcionando.



Lo anterior llevó al acuerdo de realizar inspecciones por lo menos anualmente para determinar cómo se encuentra la estructura. Se han elaborado reportes desde entonces donde se plasma la información obtenida de estas visitas a la obra. Los puntos de mayor interés son relativos a funcionamientos estructurales y la cuestión de la durabilidad del viaducto de arcos con el fin de que pueda seguir funcionando con la debida seguridad, confiabilidad y durabilidad para sus usuarios.

Por instrucción de la Administración del Puerto (AP), se han hecho recuentos de la información de los Reportes Finales de Investigación para conocer los hallazgos más importantes realizados a partir de las inspecciones del viaducto de arcos antiguo, además de las recomendaciones expuestas para hacer que se mantenga siendo confiable estructuralmente a pesar de sus ahora más de 8 décadas de servicio.

Inspección del año 2002. El plan de esta inspección se enfocó en conocer los materiales con los que se construyó, sus propiedades y la etapa de la vida útil en la que estaban hasta ese momento.

Se indagó de las características del concreto que había sido utilizado, la corrosión que pudiera presentar el acero inoxidable, pero además de eso se observó estado de agrietamiento en algunos de los arcos, cosa que llamó la atención y se recomendó realizar inspecciones posteriores más detalladas para saber exactamente los arcos que, a primera vista, parecían dañados estructuralmente.

Además se recomendó aligerar la carga estática sobre el viaducto, y siguiendo la indicación, esto podía hacerse cambiando la zona de la revisión de los camiones que cargaban a una posición ubicada cerca del edificio fiscal, ya que las filas que se formaban llegaban a medir hasta 200m mar adentro, abarcando unos 15 arcos que estaban siendo afectados.

Inspección del año 2003. En el periodo de los meses de julio a noviembre se ubicó bien a los arcos que se encontraban dañados por agrietamiento, se llevó a cabo un levantamiento y además unas pruebas de carga de para conocer su



resistencia a cargas de aplicación. Se contó en total 56 arcos dañados estructuralmente que fueron visibles y se recomendó hacer reforzamiento a arcos y cabezales con compuestos poliméricos reforzados con fibras de carbono (CFRP, carbon fiber reinforced polymer) que ayudan mucho cuando existe cierto deterioro causado por los efectos ambientales, el daño causado por el impacto, una mayor demanda de carga a causa de códigos más severos, especialmente en el campo sísmico, cambios en el uso de estructuras, y una mayor resistencia y ductilidad para corregir errores de diseño o construcción. Se pueden utilizar como una alternativa a los métodos convencionales para la reparación y la actualización estática de todo tipo de elementos de concreto y estructuras de acero, reforzado y pretensado, especialmente en las zonas donde los métodos convencionales no son adecuados o podrían causar problemas adicionales. Además, es una alternativa a las técnicas de fortalecimiento adicional basadas en la aplicación de placas de acero, son mucho más ligeros que un metal. Algunas reparaciones que pueden llevarse a cabo con este tipo de compuestos es son: envolvimiento de los elementos de concreto con exigencia de carga axial, tales como columnas, pilares, puentes y muelles, con el fin de mejorar la capacidad para soportar cargas de compresión o de mejorar la ductilidad de los elementos de concreto. Así el problema pudo remediarse a finales del año una vez que se aprobó y gestionó recurso para poder aplicar medidas para la totalidad de los arcos agrietados por medio de un sistema de unas láminas con las que se cubrió los defectos.

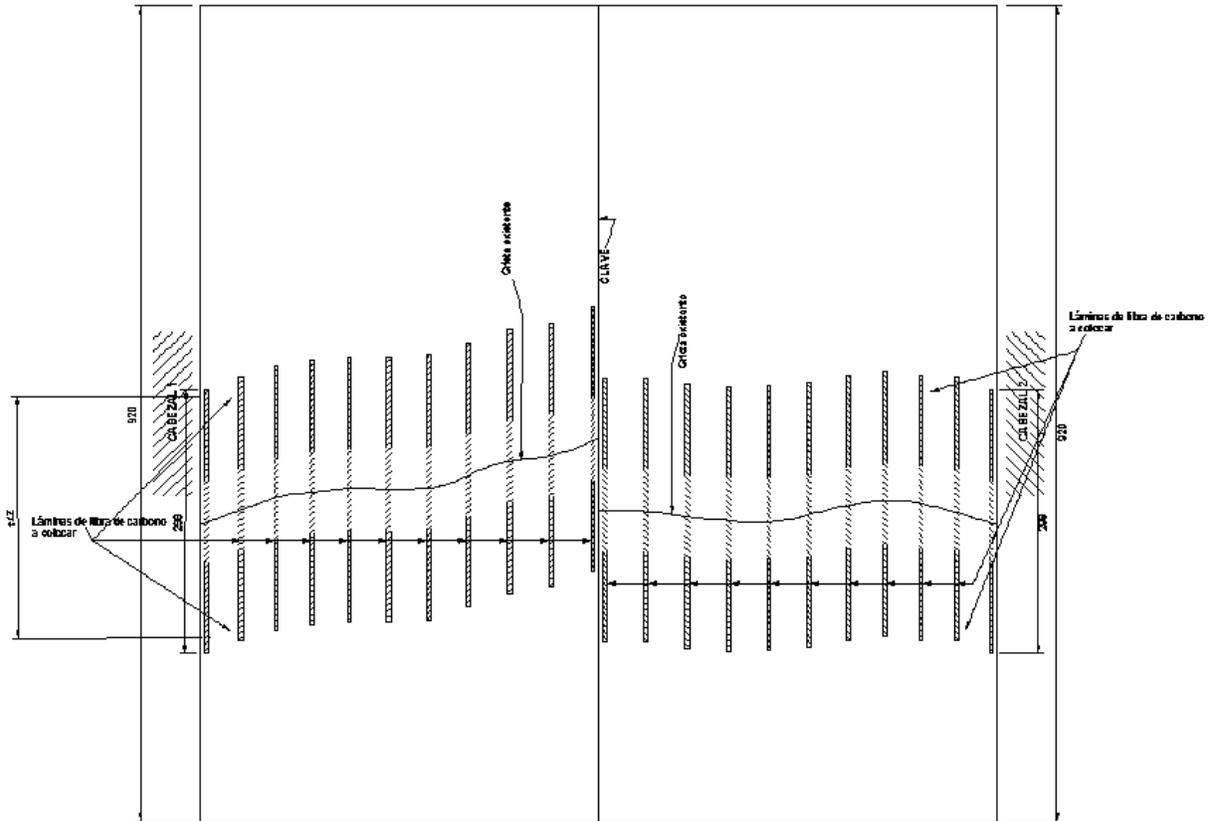


Figura 7. Diagrama vista inferior de un arco fisurado. Sistema de refuerzo estructural usado en el 2003 para reforzar de manera localizada grietas existentes.

Inspección del año 2004. Se aceptaron y realizaron pruebas de carga para tres de los arcos sobre la playa para conocer su capacidad de carga en los meses de julio y agosto. En estas pruebas se llegó a la conclusión de que están sometidos a cargas de tensión que el mismo arco no puede sostener, como son de concreto simple, no tienen refuerzos de acero que se encarguen de soportar las tensiones, por eso se estaban agrietando y en algunos de ellos llegó a extenderse incluso hasta los cabezales, por ello se hizo la recomendación de que se disminuyeran la velocidad y la carga de los tráiler para poder así frenar también el ritmo de la formación de estos daños y que no sufrieran los arcos un colapso. De todas formas quedó pendiente hacer revisión para buscar otras grietas que pudieran haber sido generadas nuevamente.



Inspección del año 2005. Nuevamente fueron realizadas pruebas de carga a algunos de los arcos, ahora dos encontrados en el mar y uno sobre la playa como los anteriormente probados. Se encontraron otros 19 arcos más con fisuras, razón por la que se recomendó a la AP que destinara mayor presupuesto para enmendar daños en arcos.

Como recomendación urgente, se le avisó a la AP mostró daños considerables en el cabezal 35 (arcos 34 y 35) que, aún en reportes anteriores realizados en el trabajo de inspección de dos años atrás se recomendó reparar el cabezal y se entregaron las especificaciones de la reparación. Lo anterior vino a constatar, que el daño mecánico en el concreto del cabezal 35 afecta la integridad estructural del muelle, disminuyendo significativamente su capacidad de carga.

Inspección del año 2006. Se encontró otros 48 arcos más con grietas, cosa que generó mucha preocupación porque seguían cediendo ante las cargas que se veían sometidos y además esto reduciendo considerablemente la capacidad del viaducto, por eso se vio la necesidad urgente actuar ante estos daños, aun así y conociendo que iba en aumento el número de arcos dañados, hasta la fecha desde dos años antes no se procedió a hacer nada para hacer reparaciones.

Ahora en un nuevo levantamiento y por vez primera se analizó algunos de los arcos que formaban parte de la estructura de la plataforma y también se encontró fisuras en algunos donde se resiste directamente carga de vehículos pesados y no en la zona que resiste el edificio aduanal, es entonces cuando hubo completa seguridad de que las cargas por tránsito eran las responsables de generar los daños encontrados en los arcos.

También se probó por carga un par de arcos, el 31 y el 32 porque se encontró discontinuidad el año anterior, y este hecho causó cierta preocupación. De nueva cuenta se recalcó la urgencia de reforzar los arcos dañados, para que con los compuestos y las láminas de fibra de carbono, pudiera ayudarse su concreto con esfuerzos externos y no tuviera que valerse por sí mismo con sus esfuerzos internos.



Inspección del año 2007. Sabiendo que después de ver que 58 arcos más que la anterior inspección estaban agrietados, y que la AP no hacía nada por repararlos, entonces se hizo llamado urgente para que se tomara algunas medidas de seguridad y reparación. Pero tratándose de un volumen considerable el que hay que rehabilitar, entonces se recomendó también dar mayor prioridad todavía a ciertas acciones para que fueran paso a paso en función de la capacidad económica de su restauración, así como enseguida se describe.

Con una prioridad urgente, la propuesta número 1 se trata de la recomendación de reparar todos los arcos fisurados en un periodo de tiempo de no mayor a un año con el mismo procedimiento que se utilizó en los años anteriores desde el año 2003 para dar reforzamiento localizado sobre las grietas que ya existían. Para que se dieran cuenta de la magnitud del problema se les presentó un proyecto para esta fase, que se entregó junto con un plano constructivo, catálogo de conceptos conteniendo volúmenes aproximados de la obra y un antepresupuesto para que la AP fuera considerando un aproximado de lo que los trabajos le costarían. Por lo menos habría que reparar 46 de los arcos, se indicó específicamente cuáles sería mejor reforzar. Tomando las medidas correspondientes se estimó que la estructura del viaducto podría seguir usándose normalmente unos 5 años aún. Los gastos aproximados para el reforzamiento estipulado se contaban en alrededor de \$ 5'004,320 pesos y que duraran un promedio de tres y medio meses.

En la segunda propuesta con una alta prioridad se recomendó reforzar todos los arcos que el viaducto poseía, que eran 145, con el sistema que ya se había estado utilizando de materiales compuestos con fibra de carbón para evitar que el problema persistiera y continuara agravándose. La manera sería colocar los compuestos en todo el ancho de los arcos, midiendo aproximadamente 9.5m. Mientras estas recomendaciones sean seguidas, entonces se pronosticaba que el viaducto pudiera ser útil a lo largo de unos 10 o incluso hasta 20 años más, aunque si continuaban aumentando las cargas que transitaban diariamente sobre la estructura, existía la posibilidad de reducirse el periodo a la mitad de lo estimado. Dicho más



precisamente, si las cargas aumentaban un 30% de lo que en ese entonces transitaba, o sea, 2 vehículos pesados de 56 toneladas en cada dirección del viaducto, entonces el periodo de tiempo se vería dramáticamente disminuido. Los costos del proceso de reforzamiento localizado se estimaron en \$35'518,248 pesos con un tiempo de trabajo de unos cinco y medio meses.

En la propuesta número tres de prioridad media **se propuso que se hiciera transitar las cargas más pesadas sobre un viaducto distinto al que ya existía**, precisamente de aquí es donde salió la idea de construir el nuevo viaducto, y para todo esto fue necesario que se fuera planteando un proyecto que constara de una nueva estructura que cumpliera con las cargas estáticas y dinámicas, pero además que se considerara la carga ambiental, es decir, la influencia de las condiciones climáticas, por ejemplo, que fuera resistente a los huracanes, adicionalmente resistente al medio potencialmente corrosivo para la parte metálica que formaría parte de la obra.

Se sabía de antemano que la tercer propuesta se encontraba fuera del alcance de la Administración Portuaria, pero si se llegaran a observar interesados entonces se buscaría la forma de entregar una propuesta técnico-económica para poder crear un viaducto nuevo que cumpliera con las exigencias funcionales, por capacidad de carga, resistente a corroerse, además factible ambientalmente y que tuviera cierta estética en el sentido de que no desentonara con el viaducto inicialmente construido. Si sucedía que la solicitud se aprobara y se apoyara la moción, entonces la propuesta comenzaría a prepararse para la primer parte del año siguiente, es decir, para comenzar en el primer trimestre del año 2008.

Era un hecho que el Puerto tendría que seguir siendo funcional por el bien del comercio e industria de la zona, ya que representa un importante ingreso para la zona del caribe y el país. Así que si se quería continuar sirviendo y viendo a futuro que había que crecer, tendría que buscarse alcanzar la meta de construir el nuevo viaducto, es por esto que se planteó a la AP como opción casi inevitable llevar a cabo una obra nueva. Debido a la gran cantidad de daños por los vehículos pesados,



habría que pasarlos por otro lado y dejar para la estructura antigua solo sostener el tráfico de los automotores ligeros.

Inspección del año 2008. Luego de dar nuevamente recomendaciones de reforzamiento de arcos, la AP decidió llevarlo a cabo por medio del mismo procedimiento, el IMT solicitó ser el inspector de calidad de los materiales utilizados para reforzar.

El problema encontrado al momento de realizar los trabajos nuevos, es que se encontró que algunos arcos a los que ya se les había practicado el procedimiento de reforzamiento localizado, seguían empeorando en su estado de agrietamiento pero en zonas donde no se había aplicado el material de fibra de carbono. Por lo anterior la instrucción modificada de los trabajos era de colocar el reforzamiento a todo lo ancho de los elementos estructurales.

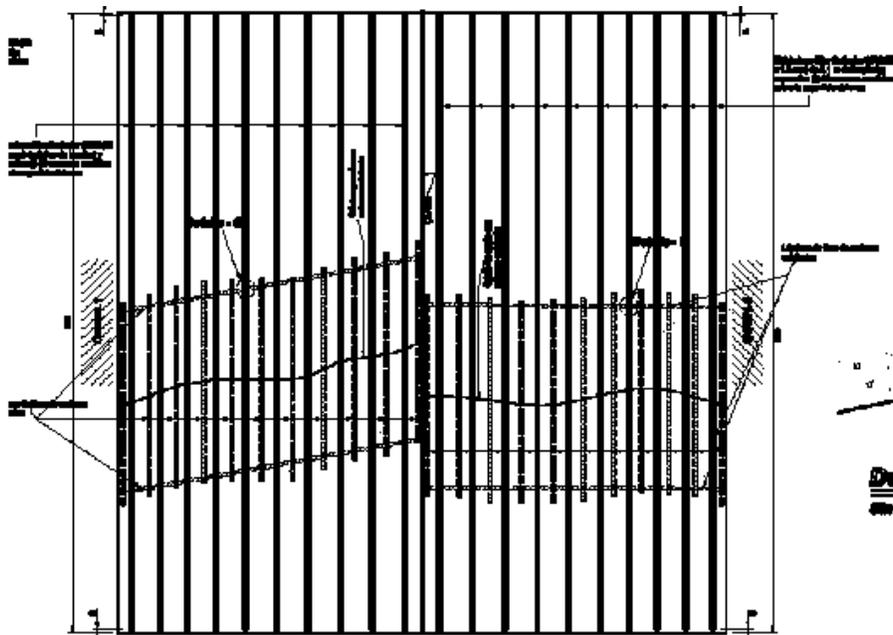


Figura 8. Diagrama de sistema de refuerzo de estructural utilizado en 2008 y 2009 en grietas existentes de forma generalizada. Vista horizontal inferior de uno de los arcos con el sistema de refuerzo.



Así se inicia con el refuerzo estructural generalizado de todos los 146 arcos del viaducto y 16 arcos de la plataforma, trabajos que se realizarían durante el transcurso de ese mismo año y parte del 2009 porque de acuerdo a la suficiencia presupuestal de la Administración, se contemplaba solamente 55 arcos en total.

Mientras se supervisaba la calidad de la aplicación del material puesto en obra como refuerzo, fue notado que el apoyo 34 entre arcos 34 y 35, seguía en movimiento aún con el reforzamiento. Como resultado de un análisis se llegó a la conclusión que se encontraba en un movimiento cinemático continuo. Se creyó que la razón de este problema era por la cimentación por el mismo estado de las cargas descentradas en la estructura que superaban las 120ton. Por esto toma todavía más peso la recomendación de construir un viaducto nuevo como lo decía la propuesta tercera de la anterior inspección del año 2007.

Inspección del año 2009. Este año se continuó con refuerzo de arcos ubicados debajo de la plataforma bajo el antiguo edificio aduanal y los otros pendientes del viaducto. Adicionalmente, se insistió nuevamente acerca de construir con urgencia un viaducto nuevo para las cargas más pesadas o en todo caso si no se hacía, deberían impedir el tránsito de cargas mayores a las 40ton sobre la estructura existente que obviamente afectaría a las empresas involucradas en el transporte de cargas que usaban para los productos manejados en este puerto, así que se quedó en proceso la solicitud de construcción de nuevo viaducto en la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante.

No se había resuelto para este año aún nada con relación al movimiento del apoyo 34, encontrando que también el número 31 sufría del mismo problema.

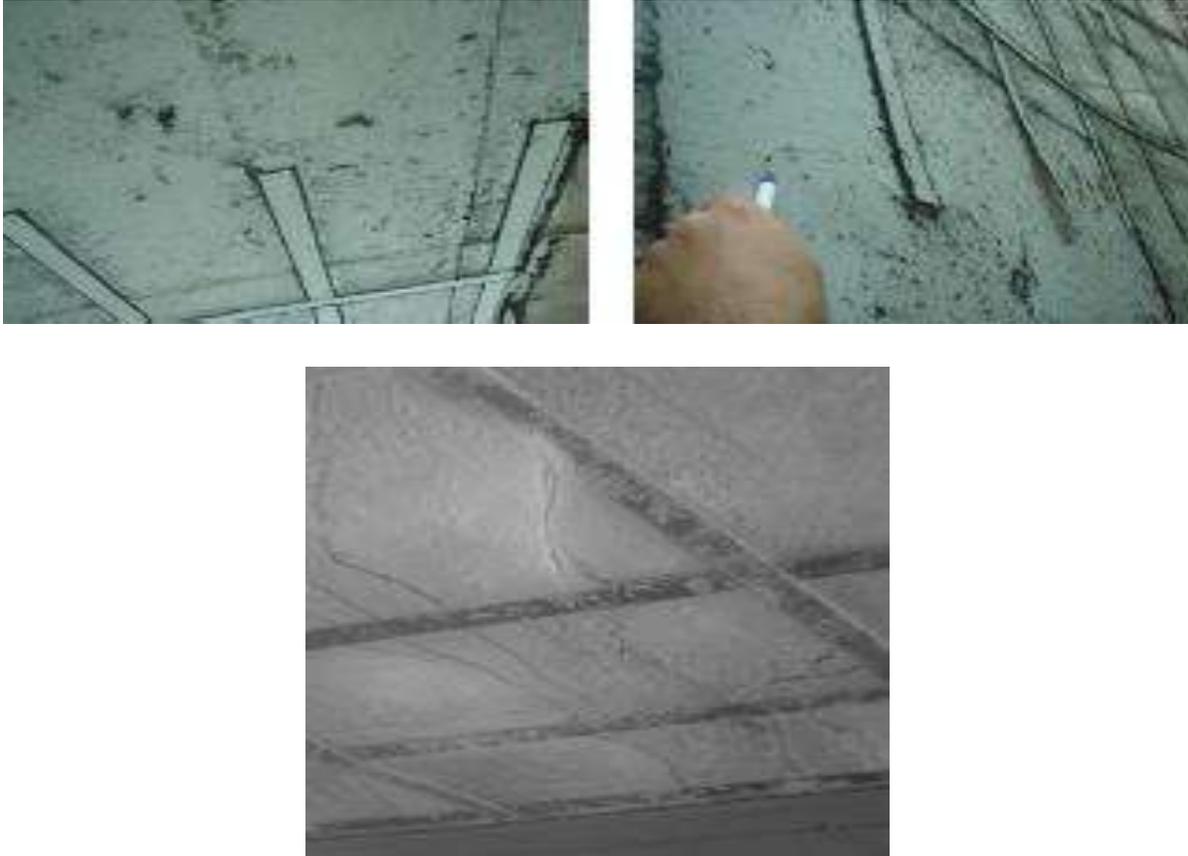


Figura 9. Aparición de nuevas fisuras en partes del arco donde el refuerzo CFRP no alcanzaba a cubrir.

Inspección del año 2010. Se llevaron a cabo dos inspecciones visuales del viaducto, con personal de la Subgerencia de Ingeniería de la Administración Portuaria en mayo y octubre con carácter de ser rápidos, con una duración de 3 - 6 horas, con el objetivo de revisar los refuerzos nuevamente para saber si existían daños del recubrimiento protector o de las tiras que fueron colocadas sobre las fisuras. En estos recorridos no se encontró ningún tipo de daño de los materiales reforzadores, no tenía ninguna afección.

Inspección del año 2011. En este año también se llevó a cabo una inspección visual rápida en el mes de diciembre hallándose que el apoyo número 30 (y anteriormente reforzado en 2008) con unas grietas por las cargas por debajo de las tiras de material fibroso colocadas (a continuación se muestra figura). Por esta



situación se comprobó que gracias a que seguían transitando cargas tan grandes sobre el viaducto, se seguía afectando con riesgo de aparición de nuevas grietas en elementos estructurales que ya habían sido reforzados, como lo sucedido en el apoyo número 34. Así que nuevamente se comentó que era necesario el viaducto alternativo porque ya se encontraba excedida la capacidad máxima de cargas del viaducto antiguo.



Figura 10. Aparición de nuevas fisuras en apoyo 30 de viaducto, que 3 años antes ya había sido reforzado. Causado por continuo tránsito de grandes cargas sobre el Viaducto.

Inspección del año 2012. En ese año los recursos de la Administración no fueron suficientes para poder realizar inspección, ya que se habían destinado para otra actividad en el Puerto.

Inspección del año 2013. Para mayo, se llevó a cabo una visita a la obra con el personal de Ingeniería de la Administración. Se observó cada arco para saber que no había nuevos daños, pero lo único que se encontró fue que en el apoyo 30 en la parte del arco 31 se había formado recién una nueva grieta. En este apoyo se encontró que la fisura era de tipo pasante, es decir, que atraviesa de un lado hasta el otro opuesto del elemento, en este caso de la cara norte a la cara sur en el cabezal del apoyo 30. Lo que permitió que resistiera un poco más es que ya se encontraba reforzado, porque es muy probable que si no se pudiera haber ocasionado una falla por fatiga debido al exceso de carga máxima.



De acuerdo a lo encontrado y comprobado en las inspecciones realizadas al Viaducto fue muy evidente que sí era vital construir otro viaducto que pudiera soportar las cargas pesadas para permitir continuar con su evolución al puerto, porque el antiguo ya se encontraba en etapa final de su vida útil.

La única solución distinta a la construcción de un viaducto nuevo, hubiera sido colocar apoyos entre los apoyos o sino construir muros laterales y rellenar para convertir en una estructura con un apoyo continuo de 1.7km de largo a través de la obra, pero todo esto afectaría las corrientes en el mar, hubiera causado movimiento del material asentado en el fondo y hubiera generado problemas graves, obviamente nada viable. El seguir atendiendo nuevos problemas que pudieran surgir, era para la Administración del Puerto un gasto innecesario que no podía seguir soportando, por lo que no se veía otra alternativa, lo mejor era construir un viaducto alternativo para soportar las cargas pesadas que transitaban de camino a la plataforma donde se encuentra el edificio antiguamente utilizado como aduana fiscal.

2.3 GESTIÓN DE RECURSOS PARA CONSTRUCCIÓN DE UN VIADUCTO NUEVO

Para seguir manteniendo la conectividad carretera de la población con el Puerto, finalmente, la AP decidió a emprender uno de los proyectos más grandes de inversión, se optó por la construcción del viaducto nuevo para comenzar a inicios del año 2014, se había estimado un costo de alrededor de los 400 millones de pesos. Esto para poder contar con instalaciones modernas con la capacidad de satisfacer las necesidades de sus clientes, para adaptarse a la demanda futura de los usuarios de sus servicios, por su seguridad y ser parte de la modernización de la industria, y así poder crecer comercialmente.

El contrato del Proyecto fue adjudicado por la API a una empresa mexicana, que ganó el concurso realizado por la misma Administración y pensando finalmente en una inversión de 740 millones de pesos, con la generación de 1500 empleos, una obra consistente en un viaducto nuevo de 2.5 kilómetros de longitud y 14 de ancho,



el cual se construyó con el objetivo de incrementar y modernizar la infraestructura existente y aumentar la capacidad de transporte. La empresa en ganadora fue contratada para realizar todos los estudios necesarios, para la entrega del Proyecto Ejecutivo del Nuevo Viaducto dentro del Recinto Portuario, que comprende un puente o viaducto de dos carriles de circulación en dos sentidos de 2,100 m de longitud, incluyendo su cimentación con desplante en el fondo marino, así como su sistema de iluminación. Todo esto requiriendo una inversión, en números más exactos, de 7 millones 497 mil 946.62 pesos. El plazo establecido para realizarlo fue del 6 de noviembre y debía concluir el 31 de agosto de 2013.

Para la elaboración de los estudios previos al Proyecto Ejecutivo del Viaducto, fue necesario obtener la siguiente información: climatológica, recopilando información del clima regional, incluyendo información de intensidad de los vientos reinantes y dominantes, y precipitaciones pluviales. Oceanográfica, para el análisis del oleaje en la zona de influencia; de las corrientes litorales, oceánicas y las que cruzan por la zona; con datos de las mareas astronómicas y las de tormentas. Además, se realizaron: levantamientos topo-hidrográficos, batimetrías topográficos, de mecánica de suelos, sondeos con muestras alteradas e inalteradas. La información recabada de los estudios oceanográficos y meteorológicos, contribuyeron para presentar alternativas de solución con algunos anteproyectos, que permitieron al Cliente, hacer una elección definitiva.

Para la etapa de construcción, a la AP se le tomó en cuenta para llevar la supervisión de la construcción del nuevo viaducto, tomando en cuenta la Revisión y Seguimiento del Proyecto Ejecutivo, el Control y Seguimiento de los Avances Físicos-Financieros, la Verificación Topográfica y la Verificación del cumplimiento de Calidad de la Obra.



CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

3.1 OBSERVACIONES DE ETAPAS CONSTRUCTIVAS

Se decidió abordar una parte bastante interesante, que es lo referente a los procedimientos constructivos y los cuidados que se tuvieron al momento de la ejecución de la obra de nuevo Viaducto. Se tomó también algunos datos del proyecto, e igualmente contiene imágenes captadas en el laboratorio de la UMSNH.

Como ya se comentó anteriormente, la AP tuvo que preparar el proyecto de inversión del Viaducto al recinto portuario para satisfacer las necesidades de sus usuarios, se buscó que tuvieran unas instalaciones modernas que además fueran suficientes para poder adaptarse a la futura demanda y también continuar con la modernización de la industria.

Por medio de un comunicado, la AP dio a conocer que el contrato fue adjudicado a una empresa constructora, que ganó el concurso realizado por la Administración del Puerto, y requería de una inversión de 7 millones 497 mil 946.62 pesos.

Se encargó a la empresa que realizara el proyecto completo de la obra, mismo del que les dieron plazo para comenzar desde el 6 de noviembre. Se llevó a cabo el análisis y elaboración del Proyecto arquitectónico del viaducto de dos carriles, (uno de ida y otro de vuelta), de aproximadamente 2.5 kilómetros de longitud, con iluminación adecuada, desplantado sobre subsuelo marino.

Para este trabajo se incluyó a las ingenierías básicas y especiales para el diseño, como la topografía, batimetría, mecánica de suelos, cálculo estructural, planos arquitectónicos, planos estructurales, planos de detalle, planos constructivos, plantas, alzados, secciones, perspectivas, números generadores, catálogo de conceptos, presupuesto general de obra, análisis de precios unitarios, programas de obra, procedimiento constructivo, especificaciones generales, especificaciones



particulares por concepto y términos de referencia, así como sus memorias descriptivas y de cálculo.

Firmado el Contrato, con un periodo de ejecución estipulado de trabajos de la obra de construcción, del día 25 de febrero del año 2014 al 31 de marzo del año 2015, al iniciar el año civil, se comienzan reuniones de planeación de pormenores, acordarlos entre las partes, antes de comenzar con la ejecución.

Siguiendo con el plan de la obra, se realizaron algunas visitas a la AP, siendo esta la sociedad mercantil encargada del uso, aprovechamiento y explotación del puerto, terminales e instalaciones, y como encargada de la planeación, programación, desarrollo, operación y administración de los bienes y la prestación de los servicios. (IFAI, 2004)

Las visitas fueron realizadas durante todo el año 2014 por el IMT que fue designado para hacer las inspecciones periódicas, en toda parte de los procesos, hasta completar la sub-estructura, desde armados de acero para pilas, cabezales, en los colados, para proceder de acuerdo a Normas vigentes correspondientes y cumplir condiciones estipuladas en el contrato del proyecto.

Se realizaron reuniones con la empresa que se encargó de la supervisión, y con la empresa Contratista responsable de los trabajos constructivos. En estas reuniones se daban a conocer los progresos que se tenían, se discutían algunos puntos en los cuáles se tenían que hacer cambios o mejoras, basándose en los acuerdos, y sin descuidar el objetivo de durabilidad de la obra.

Se comenzó con las reuniones de planeación a los días 23 al 25 de enero, donde se comenzó a definir la composición de la mezcla que tendría el concreto, usado en las pilas de la obra y en los cabezales. Se debían llevar a cabo pruebas físicas en laboratorio de materiales, para conocer valores de resistividad eléctrica húmeda, resistencia a la compresión simple y además la permeabilidad rápida de cloruros en el concreto, usados como parámetro para ajustar o modificar si la mezcla era o no adecuada, el plazo dado a la empresa constructora para realizar todas las



actividades fue de dos semanas, después había que discutir los resultados en la sesión posterior.

La segunda reunión fue del 11 al 13 de febrero donde se verificó las condiciones para el concreto en estado fluido y endurecido. Se hicieron visitas a los laboratorios de *CEMEX*, siendo encargados de llevar a cabo la mezcla para poder realizar algunas pruebas, pero era un concreto donde se había utilizado materiales de la región. El tema de la durabilidad fue uno de los criterios fundamentales para que la mezcla fuera adecuada para la estructura, esto se lograría también en base a la resistividad del concreto.

Se cuidó la cuestión de la permeabilidad de los cloruros, para prevenir daños al concreto y riesgo de corrosión del acero, además su difusión dentro del material, porque el material de la región muy poroso y debe tenerse cuidado en la penetración y propagación dentro del mismo. Para medir la difusión había que evaluar los elementos colados en donde se aplicó el silano y otro grupo de elementos donde no se aplicó.

El *silano* en el concreto es utilizado como sellador, para evitar cloruros y otras especies de sustancias agresivas, tiene una penetración profunda de hasta unos 3mm de la superficie debido a su pequeño tamaño molecular, se trata del homólogo del metano en los alcanos pero contiene silicio e hidrógeno, y por eso son menos susceptibles a su pérdida de efectividad por abrasión o por desgaste normal por la intemperie (BASF Construction Chemicals Latin America, 2006). Mejora durabilidad y resistencia al ambiente agresivo, pero no sustituye las propiedades de los materiales utilizados en construcción, se recurre mucho a este monómero cuando se corre riesgo de corrosión del acero de refuerzo (Sika, s.f.). Tiene un efecto hidrofóbico. El hidrofugante que se acordó usar era marca Sika, uno líquido para pilotes y en pasta para los cabezales del viaducto.

La constructora declaró haber practicado pruebas a un concreto con una relación agua/cemento de 0.38, se utilizó cemento Holcim CPO 30R, ideal contra la



acción de sulfatos (Apasco), C3A (aluminato tricálcico) (Neville & Aïtcin, 1999) de 3.5, policarboxilatos de nueva generación, humo de sílice y retardante.

El *policarboxilato* es sintetizado a partir de criterios nanotecnológicos y es un elemento de los aditivos superfluidificantes utilizados en la mezcla de concretos, es responsable de funcionalidades dispersantes, regula el proceso de hidratación y por eso aporta las funcionalidades deseadas en cada momento. Normalmente mejora la calidad de las nanoestructuras de la pasta del cemento, puede contribuir a la resistencia a tracción y por consiguiente reducir el riesgo de la fisuración (ESTIIC, 2006).

El *humo de sílice* (sílica fume o microsílíce o HS) es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferrosilicio. Debido a su finura, incluso a veces superior a la del cemento, este compuesto mineral en la mezcla de concreto permite una mayor y mejor oclusión de los poros, mejorando la interfase matriz agregado, y ofreciendo de esta manera un producto más estable, resistente y duradero. (IMCYC, 2011)

Los *retardantes* se emplean en ocasiones para compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del concreto, demorar el fraguado inicial del concreto o lechada cuando se presentan condiciones de colado difíciles o poco usuales (ARQHYS, s.f.), como puede ocurrir al colar estribos o cimentaciones de gran tamaño, cementar pozos petroleros, o bombear lechada o concreto a distancias considerables, o también retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabado especiales, como puede ser el caso de las superficies de agregado expuesto.

Más adelante se determinó que el proceso de colado utilizado para la construcción, sería el de bombear el concreto utilizando una planta colocada en el muelle y con ayuda de un par de un par de chalanés en el lugar del colado.

Para el manejo de uso de agregados se acordó que no hubiera exceso de material en el lugar, sino que iría llevándose día con día dependiendo de las cantidades que fueran requiriéndose para no tener montones y que se taparon con



lonas para protegerlo, y así evitaron que el riesgo de contaminación con sales del lugar.

El agua usada se almacenó en contenedores, fue agua analizada y verificada para descartar alto contenido de cloruros cumpliendo con especificación de que no se excedieran las 10 ppm.

En cuanto a la calidad del agregado grueso, era necesario que fuera un material sano que resistiera lo suficiente la prueba de los Ángeles que mide su dureza, y además que tiene que tener una adecuada densidad según las pruebas de laboratorio. Además que no tendrían que tener un alto contenido de cloruros.

Se tuvo posibilidad de encontrar y utilizar material de tres bancos de materiales, Trimex, Mitza que era el más cercano y el banco Mayutza no tan cercano, pero con una mejor calidad basada en su mayor dureza y densidad.

Antes de comenzar cualquier trabajo de movimiento importante en la obra hubo que tener bien en claro la mezcla óptima, pero además cada uno de los componentes del concreto tenían que estar ya aceptados para poder realizar pruebas a algunas probetas.

Este tipo de obras, debe cumplir con ciertas exigencias, como resistencia a la penetración de cloruros en la matriz del concreto, los cuales ocasionan corrosión del acero y deterioro del concreto con el que entran en contacto. Adicionalmente, se requirió diseñar una mezcla que cumpliera con adecuada cohesión y permanencia para poder ser bombeado desde la playa hasta mar adentro, donde se colaron los elementos estructurales, pensando en esto, se propuso que tuviera las siguientes características:

Aspecto	Sin sangrado, ni segregación
Relación agua-cemento	≤ 0.38
Contenido de cementantes	$\geq 480 \text{ kg/m}^3$
Resistencia a la compresión	$\geq 400 \text{ kg/cm}^2$ a 7 días



Resistividad eléctrica	≥ 50 kΩ-cm
Revenimiento inicial	2 - 5 cm
Extensibilidad lograda	65 ± 5 cm con caída máxima de 10 cm
Permanencia	≈ 3 horas
Tiempo de fraguado	≈ 10 horas
Tiempo de curado mínimo	21 días

El pre-diseño propuesto por metro cúbico para la mezcla, usando relación agua-cemento de 0.36, quedó así:

Cemento (CPO 40R)	480 kg/m ³
Adición de microsílíce	≈ 30 kg/m ³ (5%)
Agua	183 lts/m ³
Arena	≈ 860 kg/m ³
Grava t.m.a. 3/4"	≈ 775 kg/m ³
Reductor de agua y retardante R	≈ 2 a 4 ml/kg de cemento
Súper-plastificante y reductor de agua de alto desempeño	≈ 12 a 14 ml/kg de cemento

Tabla 3 Proporcionamientos de mezclas a ser probadas para conocer su comportamiento mediante comparación de resultados. Reproducida con base en el informe de supervisión.

M.P.	Diseño No1 Muestra 1 (SSS)	Diseño No1 Muestra 2 (SSS)	Diseño No1 Muestra 3 (SSS)	Diseño No2 Muestra 1 (SSS)	Diseño No2 Muestra 1 (SSS)
Cemento CPO 30R RS kg/m ³	480	480	480	480	480
Grava Caliza 20mm kg/m ³ (Trimex)	703	703	703	-	-
Grava Caliza 20mm kg/m ³ (Mitza)	-	-	-	694	694
Arena Caliza kg/m ³ (Mitza)	859	859	859	848	848
Agua	171	177	177	177	177
Eucon MSA	24	24	24	24	24



Plastol Precast	12.0 cc				
HP21H	5.0 cc				

Resistencia 5 día kg/cm ²					
Resistencia 7 día kg/cm ²					
Resistencia 28 día kg/cm ²					
Extensibilidad Inicial (cm)	71	71	71	67	72
Trabajabilidad a 60 minutos (cm)	61		ND	ND	ND
Trabajabilidad a 120 minutos (cm)	22		ND	ND	ND
Trabajabilidad a 180 minutos (cm)	19.5		ND	ND	ND
Colocando 2 cc de Plastol Precast a 180 minutos (cm)	63				
Contenido de Aire (%)	ND	1.5	ND	1.6	ND
Rendimiento (Its/m ³)	996	1007	ND	1029	ND
Peso Volumétrico	2265	2246	ND	2177	ND

Mientras se encontraban en búsqueda de la mezcla óptima para el colado de la estructura de concreto, había cuadrillas trabajando con el armado de acero para los pilotes y otros elementos estructurales a colar.

A finales del mes de febrero se llevó a cabo otra reunión con la AP para revisar algunos puntos a discutir del proyecto acerca de las mezclas de las que se elaboraría algunos testigos para poder caracterizarlos en laboratorio, ya que hasta esa fecha aún no se había definido la mezcla exacta que se utilizaría, se dieron recomendaciones y trataron de solucionar problemas que presentaban, porque no fue al primer intento de diseño de mezcla que haya funcionado, hubo que hacer varias modificaciones hasta encontrar una óptima. Las pruebas de laboratorio se hicieron por la unidad de Mérida del CINVESTAV (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados)

Se hizo unas probetas con la mezcla número 1 propuesta, pero las pruebas de resistividad eléctrica no resultaron favorables, entonces hubo que cambiar algunas proporciones para ajustar y probar si funcionaban.



Con base en los resultados obtenidos de los testigos, para el 2° diseño de mezcla de concreto, se propuso modificar la relación agua-cemento de 0.36 a 0.32, usar solo material con t.m.a. de 19 a 13mm y el microsílíce cambiarlo de 5% a 8%.

Posteriormente lo que se hizo fue probar por cloruros los agregados de un par de bancos de materiales que se había considerado como candidatos para obtener el material y el agua de distintas procedencias que tenían como opciones. Las conclusiones fueron que el banco de la Mitza no se aceptaba y el banco Trimex sí era aceptable; del agua todas las opciones resultaron buenas para utilizar en la mezcla.

Igualmente se realizaron probetas con la nueva mezcla propuesta y en los resultados que arrojó una prueba de penetración rápida de cloruros, la mezcla 2 se aceptó.

La cuarta visita fue el día 30 de marzo donde se entregó información por personal del CINVESTAV de los resultados de las pruebas realizadas a los testigos elaborados con la mezcla propuesta en la reunión número 3. Se dio a conocer que la mezcla había cumplido con la prueba de compresión simple y que además había resultados también del ensayo de resistividad eléctrica húmeda de entre 70-90 k Ω -cm y aunque no se cumple con los 100 k Ω -cm que se había autorizado para esa prueba, de todas formas se llegó al acuerdo de utilizar esa proporción de materiales para fabricar el concreto de la subestructura.

Se llevó a cabo una visita de obra para corroborar la correcta aplicación del anticorrosivo colocado en las varillas de acero de refuerzo. También se presencié el proceso de la colocación del armado de una de las pilas que iban a ser coladas en playa.



Figura 11 Preparación y armado de acero para pilotes del Viaducto de la obra.



Figura 12 Armado de acero para pilas.



Figura 13 Armado de acero estructural casi terminado, el cual fue destinado para las pilas del nuevo viaducto.



La visita a obra número cinco fue llevada a cabo en los días 2 y 3 de junio también en las instalaciones de la AP.

Se declaró que de acuerdo a los ensayos químicos de laboratorio de las concentraciones de cloruros de concreto usando agregados del banco Trimex y agua potable local, agua de garrafón, agua de cárcamo de bombeo de un fraccionamiento cercano, demostraron que cualquiera de esas agua probada es apta para poder utilizarla en la construcción para fabricar el concreto.



Figura 14 Colocación de escantillón, cimbra metálica y armado de acero para pilotes de Viaducto.

Además se hizo una inspección de procedimientos de colado de algunas pilas en el mar.



Figura 15 Suministro, prueba in situ de trabajabilidad y colocación de tubo Tremie para verter el concreto de pilas.



Figura 16 Capturas fotográficas el 2 y 3 de junio mientras se realizaba la quinta visita de inspección.



Figura 17 Colocación del concreto para pila con tubo Tremie y tolva.

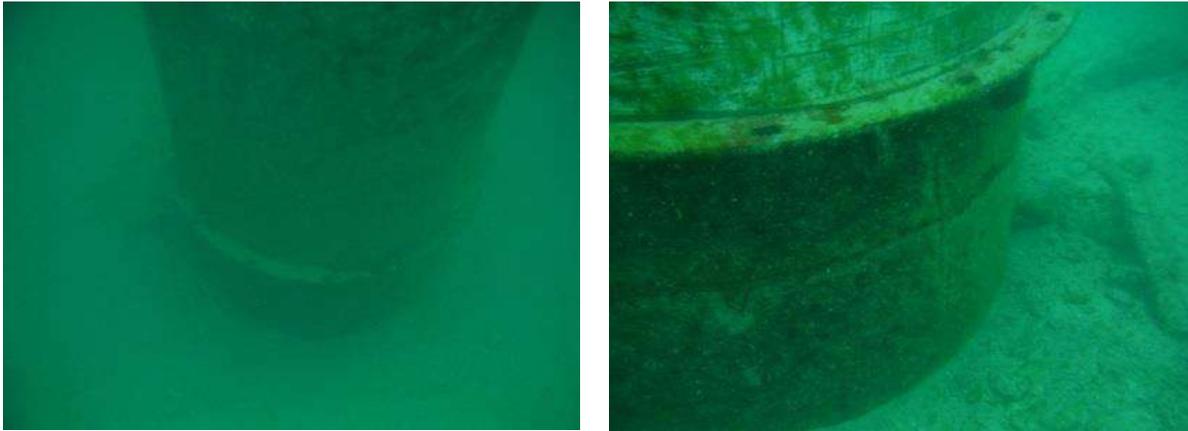


Figura 18 Asiento de pilas de concreto en fondo marino.

Al momento de la inspección de las pilas que ya estaban construidas, se notó que como se aplicó un material anticorrosivo en el ademe de metal, entonces el concreto quedó impregnado de esta protección, por eso parecía que la pila estuviera sufriendo de corrosión. Se tendría que definir bien el cimbrado de las pilas para poder seleccionar mejor materiales, habría que hacer consideraciones en caso de requerir modificaciones.



Figura 19 Pre-perforación con bote tipo corona y perforación inicial con broca helicoidal.



Figura 20 Depósito de material producto de perforación y retiro de material proveniente de excavación.

Para la sexta visita de inspección realizada el 24 y 25 de julio se solicitó que se realizara un levantamiento minucioso de detalles constructivos observados en pilas ya coladas (figura siguiente).

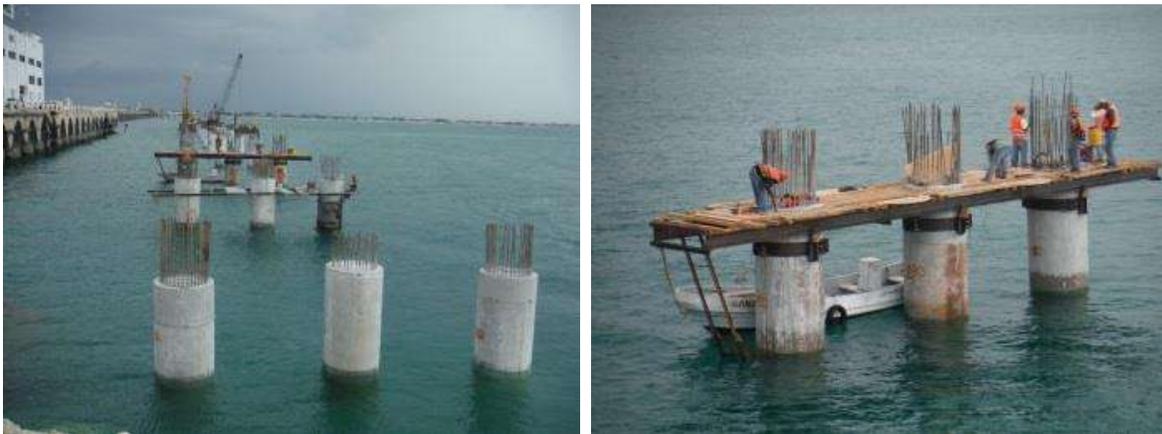


Figura 21 Colocación de cimbra para el armado del cabezal.

Los detalles que se observaron fueron debidos al mal uso de la cimbra, ya que hubo segregación de material durante el procedimiento de colado de las pilas, además del anticorrosivo que se utilizó para la cimbra metálica usada para estos elementos, ya que aún vistos en la visita anterior, todavía no había sido retirado de algunas pilas.



Como ya se había comentado anteriormente, para el colado de las pilas de este concreto de diseño autocompactable se tomaba en cuenta que fue utilizado un polímero más denso que el agua salada para que pudiera el líquido ser desplazado fuera de los moldes y que además no fuera reactivo en el contacto con el agua, así se evitaría que el agua marina afectara al fraguado del concreto por su composición.

Se extrajo corazones de concreto de las pilas de los ejes 82 al 55 que fueron coladas entre la fecha 11 de junio y el 8 de septiembre. Estos fueron los testigos que probamos en el laboratorio de materiales de la UMSNH. Se realizaron los paquetes de pruebas correspondientes, las cuales son explicadas más adelante; luego se mandó remanentes al IMT para practicar pruebas faltantes para ensayar por cloruros el material. Todo con el fin de caracterizar el material y así poder comprobar que estaba cumpliendo con su función y estaba reaccionando como se tenía proyectado y esperado.



Figura 22 Nivelación y revisión de armado. Cimbra prefabricada para colar cabezales.



Figura 23 Vista avances de obra, algunos de los cabezales ya colados.



Figura 24 Revisión, protección de colado terminado para primera parte de cabezales.



Figura 25 Cabezales completamente colados. Avance de la obra para el día 15 de marzo de 2015. Subestructura casi terminada.

En los días 14 y 15 de octubre se llevó a cabo la séptima inspección de obra de construcción del viaducto.

Se observó para estas fechas que algunos caballetes todavía estaban en proceso de ser colados, pero también que algunos otros ya se encontraban colados.





Figura 26 Vista de cabezales casi terminados, detalle de los restantes por colar.

En relación a la superficie de las pilas; se notó un cambio cuando se comenzó a utilizar otro tipo de desmoldante y anticorrosivo, notando un desempeño mejor en los moldes metálicos.

Se entregó además el levantamiento que se solicitó de la construcción, para darse cuenta de detalles a corregir, usando otro equipo de trabajo adicional para ocuparse de reparaciones, para que no se afectara el desempeño de las cuadrillas que se encargaban, simultáneamente, de colados pendientes.

Fueron encontradas grietas por el secado en la cara superior de cabezales, debido a cambios de temperatura bruscos, además por la intensa radiación del Sol. Por esto, se consideró no utilizar membranas químicas de curado para tomar precauciones con los cabezales, se vio que lo mejor era utilizar agua libre de cloruros y barreras físicas que evitaran su evaporación en las caras donde se observe anomalías.



Todos los cambios o modificaciones a procesos constructivos fueron avalados por todas las partes involucradas en la construcción, evaluando lo que resultaba mejor.

Se llevó a cabo una octava visita de obra como forma de inspección, la última que se acordó, ya que se encargaron solo del proceso de la subestructura, las probetas extraídas, solo eran correspondientes a las partes que se inspeccionó, por eso se especifican detalles de lo que nos compete.

La última visita se realizó para poder hacer extracción de los corazones de concreto de las pilas coladas. Estos fueron enviados al Área de Materiales de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del IMT y fueron recibidos registrándolos en un inventario para tener el control de las existencias. Se definió las pruebas que serían realizadas a cada uno de ellos. Los procedimientos y resultados de los ensayos se entregarían cuando estuvieran listos a principios del año siguiente, 2015.

De la otra parte pendiente se planteó la construcción de una segunda etapa de construcción del viaducto, la cual comprendería principalmente la construcción de la súper estructura del viaducto (trabes, losas, muros de contención, equipamiento). Se realizaron los trámites para que la segunda etapa se iniciara a principios del año 2015.

3.2 PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN Y MANEJO DE CILINDROS PARA PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DE MATERIALES

Vale la pena dar una pequeña síntesis del proceso que se utiliza para la extracción de los núcleos de concreto en obra para poder ser ensayados en laboratorio:



1. Hacer limpieza en la zona del elemento estructural donde se extrae el espécimen.
2. Se puede utilizar un metal escáner para conocer la ubicación exacta del acero que contiene el mismo concreto, ya que lo mejor es no tocarla y así evitar el ingreso de agentes agresivos que puedan corroer el material, además si se daña una varilla puede traer consecuencias de fallas constructivas.
3. Colocar la máquina extractora para realizar el procedimiento de extracción, se debe agregar agua para evitar un calentamiento excesivo de la broca. Asegurarse que la perforación tenga la profundidad necesaria para obtener un corazón con las medidas requeridas para las pruebas que se programe en laboratorio.
4. Una vez que la perforación ha sido concluida se retira la muestra de material, se tiene que enjuagar, hay que registrar el espécimen y se marca con datos pertinentes de la zona donde se llevó a cabo la extracción,
5. Colocar el núcleo dentro de una bolsa que sea hermética para prevenir posible contaminación de la muestra, después se coloca en una caja protegido correctamente para que pueda ser trasladado sin daños.
6. Realizar un listado de todas las extracciones que se realizaron, se indica la zona donde se extrajo, las medidas de longitud tomadas de la muestra, si es posible mejor que sea con vernier para una mayor exactitud. Cuando se tiene la medida de longitud entonces se procede a hacer una propuesta para las pruebas que sería posible ensayarle en el laboratorio, luego se manda propuesta al IMT y si entonces parecen correctas se aceptan por personal del Instituto y se comienza con preparación de testigos para las pruebas.



Figura 27. En la figura e observa el área de donde fueron extraídos los corazones de las pilas.

En el laboratorio lo más común es que se practiquen las pruebas organizadas en grupos: Fagerlund, tensión indirecta (incluye, carbonatación y concentración de cloruros), y compresión simple (incluye, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, % de vacíos).

Una vez determinado que pruebas se van a realizar a cada muestra se procede a cortar las muestras usando la menor cantidad de agua posible.

Los grupos de las pruebas tienen un procedimiento designado en laboratorio para operar de la misma manera regularmente. Se tiene un protocolo de pruebas establecido, a menos que se indique que tenga que modificarse por alguna situación o bajo condiciones que sean más particulares.

Para llevar a cabo la prueba de tensión indirecta, se siguen los siguientes pasos:



- a) Se determina la longitud de las muestras, por medio de un vernier o cinta métrica.
- b) Se coloca la muestra en la maquina universal y se lleva la muestra hasta la falla, se registra la carga en la bitácora.
- c) Se parte la muestra para proceder a rociar la muestra con fenolftaleína, y así determinar el grado de carbonatación, midiendo con una cinta métrica.
- d) Se unen las partes del núcleo y se encintan para proceder a cortarlas.
- e) Se cortan en rodajas de 2cm para realizar el estudio de concentración de cloruros. Se cortan usando la menor cantidad de agua, se dejan orear un poco las muestras.
- f) Se colocan dentro de bolsas herméticas cada una de las muestras cortadas, marcando la profundidad a la que corresponde y el nombre del espécimen.
- g) Ya cortadas las muestras se empaquetan para ser trasladadas al IMT, donde son mandadas a realizar el estudio de concentración de cloruros. Con este paso termina esta prueba.

Para la prueba de Fagerlund, ya que se tienen las muestras cortadas se realiza lo siguiente:

- I. Se enumeran las muestras para tener un control sobre ellas.
- II. Se determinan las dimensiones de las muestras usando el vernier.
- III. Se colocan las muestras en el horno a una temperatura de 50°C hasta masa constante, pasado ese lapso de tiempo se comienza el registro de las masas de las muestras, hasta que la masa varíe 0.1grs durante dos días consecutivos.



- IV. Ya que se tiene la masa seca, se pone a calentar parafina con brea, ya que este líquida, se procede a cubrir las caras laterales de las muestras para Fagerlund.
- V. Se colocan las muestras cubiertas con parafina sobre una esponja, a la cual se le agregara agua hasta tener un tirante de 3mm.
- VI. Ya que se tiene el tirante de 3 mm, se procede a determinar las masas de las muestras a 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 6 horas, 1 días, 2 días..... hasta que la masa de las muestras no varíen o.1 gramo durante 2 días consecutivos. Por lo general se necesita entre 30 y 50 días para terminar la prueba.
- VII. Ya que la masa no varía se proceden a realizar los cálculos correspondientes.

Para las pruebas no destructivas y de compresión se sigue el siguiente procedimiento:

- A. Ya que se tienen cortados los núcleos de concreto se ponen a saturar durante el tiempo necesario. Pasado dicho tiempo se realiza un registro de las masas para determinar que el núcleo este saturado, cuando la muestra no varía se determina la masa saturada.
- B. Por medio de una báscula y una canastilla se determina la masa seca sumergida.
- C. En lo que se refiere a las pruebas no destructivas (Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistividad eléctrica), las pruebas se realizan varias veces si se cree necesario para verificar que los resultados no varíen en días consecutivos y descartar anomalías.
- D. Se retiran las muestras del agua y de dejan secar a temperatura ambiente, para posteriormente colocarlas en el horno a una temperatura de 50 °C y secarlos hasta que los núcleos no varíen y así determinar la masa seca.



- E. Con las masas obtenidas en los pasos anteriores es posible determinar el porcentaje de vacíos del concreto.
- F. Cuando las muestras están secas, se retiran del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente.
- G. Se miden las muestras con el vernier o flexómetro, (diámetro y altura)
- H. Se calienta el azufre para proceder a cabecear los núcleos.
- I. Se cabecean los núcleos
- J. Se determina la altura con cabeceo.
- K. Al término del cabeceo, se dejan pasar 2 horas para realizar la prueba de compresión.
- L. Se coloca es espécimen en la maquina universal y se le aplica carga, hasta la falla, se realiza el registro de todos los núcleos.
- M. Se realizan las operaciones correspondientes.



CAPÍTULO 4. NORMATIVIDAD DE MÉTODOS DE ENSAYO

Antes de abordar el capítulo, hay que mencionar que la información proviene de las Normas mencionadas enseguida, así como los diagramas y tablas han sido reproducidos con base en otros contenidos similares en dichos documentos y no se pretende hacerlos pasar como propios.

El papel de un Ingeniero Civil conlleva mucha responsabilidad consigo, y un compromiso grande con la sociedad, es su deber construir estructuras y elementos constructivos seguros para los usuarios de cada obra civil, por eso tiene que preocuparse por actuar con precaución, esto solo se logra apegándose a las Normas pertinentes que han sido creadas a partir de la experimentación en conjunto con la parte empírica de la ingeniería, pero siempre basándose en principios de la ciencia.

En cada territorio las reglas o imposiciones de la Ingeniería varían de acuerdo al contexto geográfico – social – cultural en el que se encuentra, así como los objetivos buscados con ciertas construcciones.

En algunos países, la normatividad que se sigue, es la que ha sido gestada dentro de sus mismos límites, pero hay lugares donde trata de imitarse lo que funciona para otros lugares caracterizados por su trabajo de alta calidad, o por lo menos tratando de adaptarlo a la situación que se vive dentro de cada región.

En el caso de México, se utilizan normas que han sido redactadas por organismos, asociaciones y entes que se dedican, y son especialistas en cada rubro del conocimiento donde se apliquen, como es el caso del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C. Pero también suele darse otro tipo de caso; en la industria de la construcción se siguen normas de diseño de pavimentos que son españolas, tal es el caso del Método del Catálogo Español.



Sin embargo, también existe una constante búsqueda de hacer lo propio, llegando a desarrollar los métodos que sea posible utilizar dentro de nuestra realidad de desarrollo, y un ejemplo es el método de diseño de secciones estructurales de pavimentos expuesto por la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), que todavía no está completamente ajustado, tiene algunas limitaciones, pero es una buena alternativa.

Para el ámbito que nos compete, de los materiales de construcción y métodos de ensayo de laboratorio, existe una buena diversidad de Normativa en la que nos podemos apoyar, como en este caso, que para poder diseñar el proyecto del Viaducto, fue necesario consultar estas normas, recomendaciones y especificaciones, previos al proporcionamiento del concreto, para poder cumplir con todos los requerimientos, que se verifican por medio de las inspecciones.

Por lo anterior, es necesario incluir algunas de las normas de procedimientos de pruebas de laboratorio para lograr la caracterización de material que llevamos a cabo, para comprobar que se llevaron a cabo de una forma adecuada con base en lo establecido.

Adicionalmente, existen criterios para dar idea de la calidad de los materiales, con base en sus propiedades y características que se determinan por los resultados de las pruebas de laboratorio; así nos percatamos de sus posibilidades de utilización de acuerdo a su comportamiento y sus límites, lo anterior nos ayuda a poseer un criterio, preventivo y ejecutivo, para los procesos en nuestro labor profesional.

Las normas principales, a las que se apegaron los métodos de pruebas de laboratorio, son las siguientes:

Tabla 4. Normas base para métodos de ensayo.

Prueba realizada a los testigos	Norma de método de ensayo
Absorción y Vacíos	NMX-C-263-ONNCCE-2010
Resistividad Eléctrica	ASTM-G-57-2012 (Sin equivalente mexicana)
Velocidad de Pulso Ultrasónico	NMX-C-275-ONNCCE-2004



Absorción Capilar (Fagerlund)	ASTM C1585-2004 (Sin equivalente mexicana)
Cabeceo de Cilindros	NMX-109-ONNCCE-2013
Resistencia a Compresión Simple	NMX-C-083-ONNCCE-2002

4.1 ABSORCIÓN DE CILINDROS Y VACÍOS TOTALES [NMX-C-263-ONNCCE-2010]

Esta norma es parte del compendio de Normas y Reglamentación del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Industria de la Construcción y la Industrialización, S.C. (ONNCCE).

Con nombre oficial: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CONCRETO HIDRÁULICO ENDURECIDO – DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y VACÍOS. Entró en vigencia en el año 2010.

Esta norma tiene como objetivo establecer método de prueba para determinar la masa específica, porcentaje de absorción y de vacíos en el concreto hidráulico ya endurecido.

Requerimientos para realizar la prueba:

- Balanza
- Canastilla de malla metálica que soporte el testigo
- Horno con capacidad mínima de 110° C
- Desecador capaz de alojar probetas
- Franela

No es necesaria la práctica bajo condiciones específicas de ambiente.

Deben ser probadas de una a tres probetas separadamente, serán fragmentos de cilindro, corazones de concreto, vigas o cualquier forma o tamaño pero sin exceder los 350cm³ que son aproximadamente equivalentes a 800grs; cuando la probeta esté agrietada, fisurada o despostillada de bordes debe desecharse, no sirve para practicar la prueba de una manera adecuada.



Es necesario obtener la masa seca del núcleo, con ayuda de un horno se lleva las probetas a masa constante, estado en el cual se debe introducir las muestras por 24 horas a unos 100°C, cuando se sacan hay que tomar lectura de pesaje, luego se deja enfriar en aire seco, se vuelve a meter al horno un día entero, se vuelve a sacar y pesar; este proceso se repite hasta que las lecturas entre ese día y el anterior tengan una diferencia de máximo 0.5% de la masa. La última cifra de pesaje se designa con una letra "A".

Una vez que se encuentren a peso constante, se comienzan a saturar mediante un proceso de rociado de cilindros, que se debe aplicar por lo menos una vez al día, este procedimiento se explica más adelante con detalle.

Cada día se pesan los testigos para tener control de sus pesos, una vez más se buscará llegar a tener un peso constante con mediciones consecutivas con una diferencia de menos de 0.5% de la masa. Hay que secar superficialmente las muestras cada vez que se pesen. El peso final se designa ahora con la literal "B".

Para obtener la masa de la probeta sumergida, es necesario llenar una cubeta donde quepa la canastilla con el testigo dentro, que se encuentre colgando de la balanza y el agua a una temperatura entre los 20°C y los 25°C. Se coloca la canastilla en la balanza y luego se coloca el testigo en la canastilla, se toma el dato de la masa y se designa como letra "D".

Con el uso de los datos obtenidos y registrados habrá que aplicar unas fórmulas de cálculo para obtener los datos que buscamos.

Utilizando las masas obtenidas con los procedimientos realizados, se realiza los cálculos siguientes:

- Porcentaje de absorción después de la inmersión: $\frac{B-A}{A} \times 100$
- Masa específica seca: $\frac{A}{C-D} = g_1$
- Masa específica después de la inmersión: $\frac{B}{C-D}$



- Masa específica aparente: $\frac{A}{A-D} = g_2$

Finalmente se obtiene el volumen de poros permeables, el porcentaje de vacíos. El dato se compara con el criterio sugerido para conocer su calidad relativa.

Tabla 5. Criterio de calidad de acuerdo al porcentaje de vacíos.

% Vacíos o Poros	Clasificación del concreto (DURAR)
≤ 10%	Concreto de buena calidad y compacidad
10% al 15%	Concreto de moderada calidad
> 15%	Concreto de durabilidad inadecuada

4.2 MÉTODO DE PRUEBA PARA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

No existe Norma mexicana que especifique un procedimiento para la obtención de la resistividad eléctrica, pero en el laboratorio nos basamos en la Red Temática DURAR y la Norma norteamericana ASTM-G-57-2012.

Este parámetro es una propiedad de un material, es recíproco de la conductividad correspondiente, la unidad de medida es $\Omega - \text{cm}$ u $\Omega - \text{m}$. Está relacionada con el grado de saturación de los poros del concreto, además con la hidratación de la mezcla y la presencia de sales disueltas en la fase líquida del compuesto. Es función del tipo de cemento, adiciones orgánicas, relación agua/cemento y la porosidad de la estructura.

Materiales y equipos necesarios para toma de lecturas:

- Equipo para toma de núcleos cilíndricos
- Medidor de Resistividad eléctrica. Método de Wenner (ASTM, 2012). 4 electrodos tipo pines.
- Equipo de medición para testigos, flexómetro y Vernier.

Se debe tener en cuenta que las mediciones no deben hacerse sobre la armadura, ni en superficies afectadas por el fenómeno de la carbonatación, porque estas alteraciones pueden sesgar los resultados.



Para llevar a cabo la prueba se prepara el equipo de medición bajo el siguiente procedimiento: hay que conectar los electrodos del extremo de pin en la máquina, los cables con punta caimán hay que acoplarlos correctamente con las laminillas que se colocan en las caras opuestas de los especímenes, para asegurar el contacto y las buenas lecturas. Se coloca un pedazo de fieltro húmedo entre cada laminilla y el testigo, para facilitar el paso de la corriente eléctrica. Verificamos que las perillas se encuentren apuntando en “ceros”. Se tiene que asegurar que las laminillas estén en contacto con la probeta, así que en nuestro caso, aseguramos este contacto poniendo una pequeña pesa de balanza encima de la que se encuentra encima del corazón. El equipo ya está listo para tomar lecturas con el procedimiento descrito anteriormente.

Para ensayos en laboratorio se establece procedimiento de muestreo en la estructura, extraídos los testigos, se toman medidas de las dimensiones de diámetro y altura promedio, con el diámetro se calcula el área transversal.

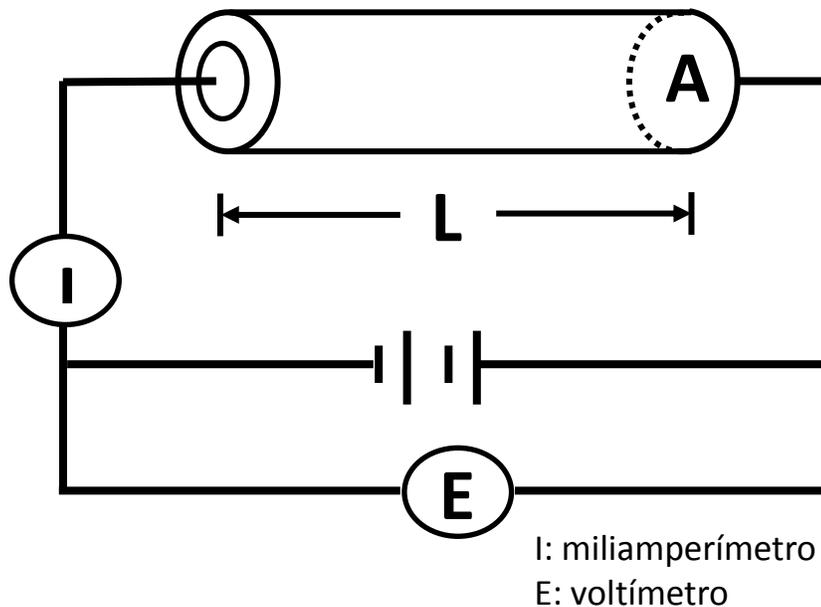


Figura 28. Montaje para prueba de Resistividad Eléctrica.



Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras opuestas del cilindro, se somete a una corriente dada (I), se registra el voltaje E . La resistencia eléctrica Re se calcula como E / I y se expresa en Ω . Así la resistividad eléctrica está dada por la fórmula:

$$\rho = Re \frac{A}{L} \Omega\text{-cm} (\Omega\text{-m})$$

Donde ρ : Resistividad eléctrica

Re : Resistencia

A : Área

L : Longitud

No existe un criterio general en común entre los investigadores, acerca del valor límite de resistividad por encima del cual el riesgo de corrosión en armaduras puede ser considerado despreciable, sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general:

Tabla 6. Criterio Red DURAR (1998) de riesgo de armaduras por corrosión.

Riesgo de corrosión de acuerdo a la resistividad (DURAR)	
$P > 200 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > P > 10 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Riesgo moderado
$P < 10 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Alto riesgo

4.3 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A TRAVÉS DE LOS ESPECÍMENES [NMX-C-275-ONNCCE-2004]

El nombre oficial de esta norma es: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CONCRETO – DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO – MÉTODO DE ULTRASONIDO. Entró en vigencia en el año 2004.

Esta norma mexicana establece el método de procedimiento para aplicación de prueba y determinar la velocidad de pulso, de propagación de ondas inducidas



por medio de ultrasonido longitudinal en el concreto. No se aplica a otras vibraciones dentro del concreto.

Antes de explicar la prueba es conveniente dar algunas definiciones.

Generador de pulso: circuito formado para producir pulsaciones de voltaje.

Transductores: transmisor – receptor colocados en contacto con el testigo, para hacerle pasar por su matriz, la ondas y medir tiempo que recorre la distancia de longitud de los especímenes. Transforman las pulsaciones producidas por el generador en ondas intermitentes de energía mecánica.

Se explica un poco de las ondas ultrasónicas longitudinales, que en esta prueba sirven para saber el tiempo que tardan en atravesar el compuesto endurecido. El aparato de medición cuenta con unos transductores electroacústicos que son unos transmisores que se deben mantener en contacto con la superficie del testigo que se quiera probar.

Luego que las pulsaciones atraviesan el concreto, se reciben en el transductor del otro extremo y son convertidas en energía eléctrica, la longitud del cilindro es la distancia que viajan las ondas, en este caso llamaremos a esta medida “D”, el tiempo que recorre esa distancia se denomina con la letra “T” y es medido electrónicamente, para obtener “V” (velocidad de pulso), se recurre a la ecuación:

$$V = \frac{D}{T}$$

Esta prueba determina la velocidad de pulso, que podemos utilizar como indicador para verificar que la mezcla del compuesto sea uniforme o que tenga cambios en las propiedades, además es útil para estimar una calidad relativa del concreto, para descubrir la presencia de vacíos o grietas, y estimar la profundidad de las mismas.

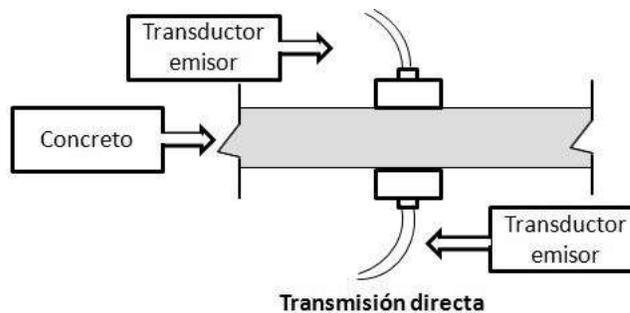


Hay que tener claro que este ensayo no es sustituto del de resistencia a la compresión, ni tampoco para obtener un módulo elástico del concreto. Puede obtenerse solamente relación velocidad – resistencia o velocidad – módulo; puede establecerse determinando la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión o módulo de elasticidad, en un número mínimo de 30 muestras. Estas relaciones pueden servir como un índice para estimar resistencia, o módulo en función de esta prueba practicada.

Este ensayo puede aplicarse en laboratorio, pero también puede utilizarse en campo mientras que la forma y tamaño de muestra se encuentren dentro de los límites apropiados.

Existen tres formas distintas para realizar las mediciones con la máquina:

- Medición directa: colocando los transductores en los extremos del testigo, encontrándose sus caras paralelas entre sí. Con esta forma se obtienen los mejores resultados.
- Medición semidirecta: se utiliza si y solo si no puede aplicarse la medición directa para los testigos. Los transductores se colocan en los extremos opuestos del espécimen, pero no alineados, así se toma una lectura menos precisa.
- Medición indirecta o transmisión superficial: se utiliza cuando solamente una cara de la estructura es accesible. Esos resultados obtenidos son solo indicativos, no puede dárseles demasiado peso.



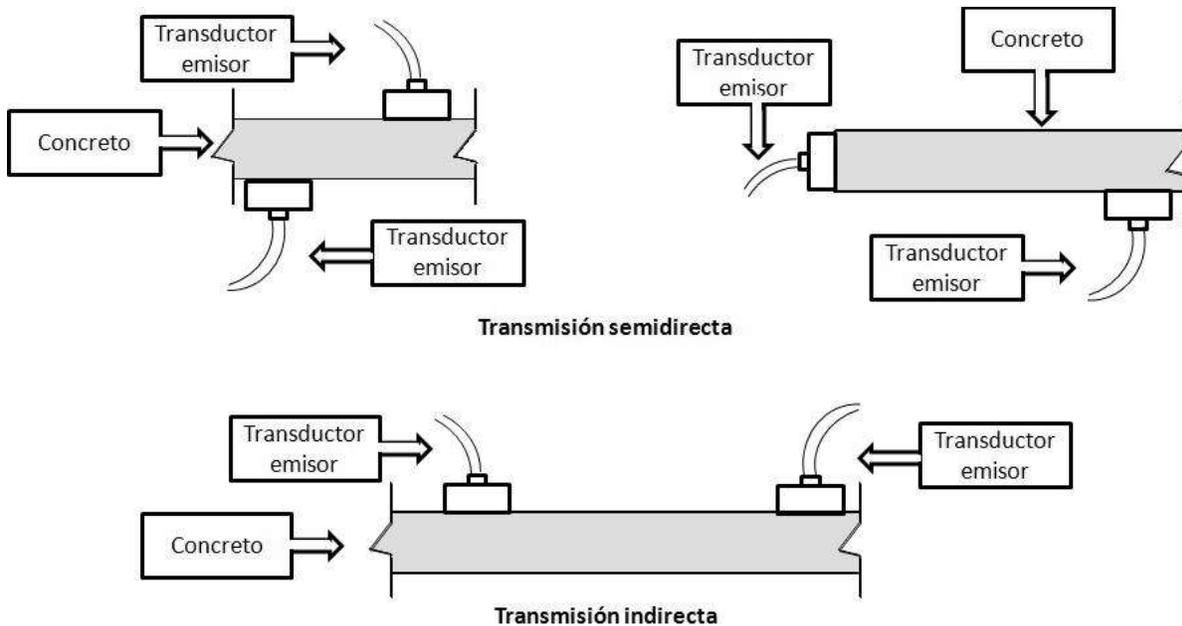


Figura 33. Diagramas que muestran formas de colocar los transductores, para los distintos tipos de medición del Método de Velocidad de Pulso Ultrasonico. Tomados de Norma Mexicana mencionada.

La velocidad de pulso es independiente a las dimensiones del espécimen o el elemento estructural que se decida ensayar y está dada por la siguiente ecuación que relaciona sus propiedades físicas:

$$V_2 = (K) \frac{E}{d}$$

Donde: K es la constante

E es el módulo de elasticidad del concreto

D es la densidad del material

Es bueno destacar que esta relación es independiente a frecuencia de las vibraciones.

Se debe tener en cuenta que necesitamos un agente de acoplamiento, que será colocado entre el transductor y la cara del testigo. Con este material se asegura el contacto, y además se evita el aire atrapado entre las superficies del elemento bajo



prueba y los transmisores. Puede ser usado un gel o una grasa, incluso se puede utilizar miel de abeja y da muy buenos resultados.

Para esta prueba, en el laboratorio utilizamos como agente de acoplamiento un gel modelador de cabello, de preferencia debe utilizarse uno que sea más viscoso.

El aparato que se utiliza consiste de un generador de pulso, un amplificador, un circuito para medir el tiempo, cables para conexión a la electricidad y dos transductores: transmisor – receptor.

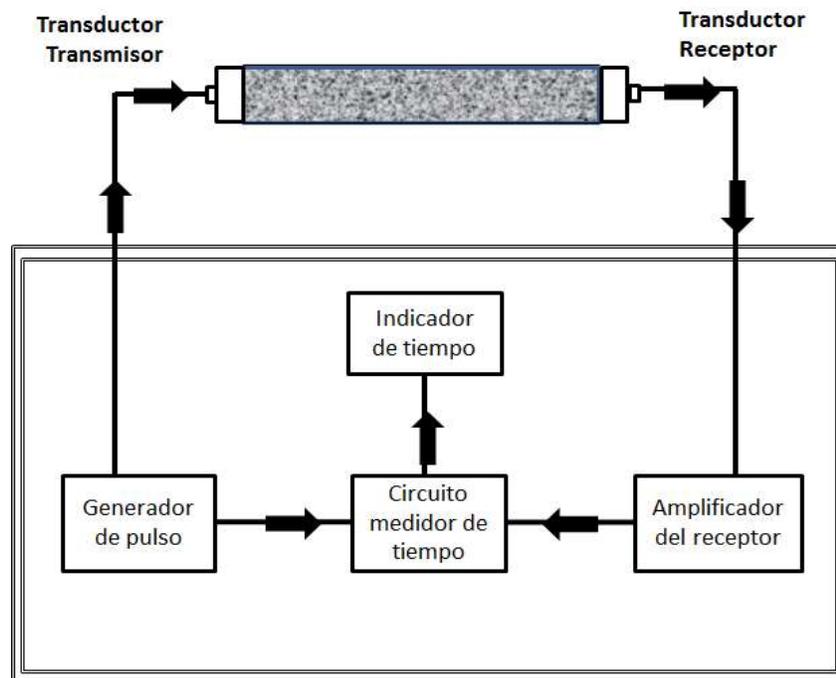


Figura 29. Diagrama de aparato medidor de pulso. (ASTM, 2002)

El generador de pulso transmisor – transmisor tiene un circuito que produce ciertas pulsaciones de voltaje. El transductor transforma estas pulsaciones en unas ondas de energía mecánica, deben tener una frecuencia de resonancia con intervalos de 10kHz a 15kHz. El generador mencionado debe producir pulsaciones repetitivamente con valores comprendidos entre los 10kHz y los 150kHz cada segundo.



El transductor debe de ser construido con materiales que sean comportamiento piezoeléctrico o magnético con camisas protectoras.

Pueden utilizarse diafragmas de metales delgados en superficies planas. Para superficies rugosas lo ideal es que se utilicen transmisores que contengan un recipiente lleno de aceites a baja presión con un diafragma de hule.

El transductor debe tener un mecanismo de conexión para tener un contacto completo con la superficie del testigo de concreto. Por necesidad de la suficiente potencial, los cables que conecten los transmisores con el generador no deben ocasionar una caída de voltaje mayor al 0.5%.

El amplificador es necesario porque el voltaje generado debe ser potenciado tanto como sea necesario, para producir pulsaciones que puedan ser captadas fácilmente por el circuito que mide el tiempo. El amplificador debe tener una respuesta clara entre los 5kHz y 10 veces la frecuencia de resonancia del transductor – receptor.

En cuanto al circuito que se encarga de medir el tiempo, debe ser capaz de tener una precisión de 0.5%. El proceso inicia con una descarga de voltaje emitida por el generador de los pulsos ultrasónicos, operando así repetitivamente con cierta frecuencia, el circuito debe de tener una salida acoplada a una unidad de respuesta de tiempo. Debe ser insensible a la temperatura de operación y al cambio de voltaje de la fuente de poder, es decir, que no debe de ser alterable por esos factores externos al circuito.

De la unidad de respuesta. Puede utilizarse dos tipos de unidades, uno que usa un tubo de rayos catódicos, y en este los pulsos emitidos y recibidos son transformados en deflexiones de trayectoria para una escala de tiempo; el otro que usa un cronómetro con respuesta digital.

Para los dispositivos de calibración. Podrá utilizarse un dispositivo que tenga un oscilador de cristal de cuarzo con una frecuencia equivalente a una frecuencia de



100kHz, además que se encuentre sincronizado con el circuito generador de pulso o barras de testigo, así como la que contiene el aparato disponible para pruebas en el laboratorio que se realizaron las pruebas, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se utiliza para verificar la operación apropiada a la medida del tiempo, para saber que los resultados de medición son correctos.

Lo más recomendable antes de utilizar la máquina de pulso directamente para pruebas de testigo, es utilizar la barra de calibración para que estemos seguros de la precisión de las mediciones. Se utiliza un proceso específico para poder hacer la correcta calibración del aparato. Una vez realizado el procedimiento de calibración, así ya se puede tener mayor seguridad de que los resultados obtenidos son confiables.

Tabla 7. Criterio de calidad de concreto con base en velocidad de pulso ultrasónico.

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Clasificación del concreto (DURAR)
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

4.4 CABECEO DE CILINDROS DE CONCRETO [NMX-109-ONNCCE-2013]

Su nombre oficial es: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CONCRETO HIDRÁULICO – CABECEO DE ESPECIMENES. Entró en vigencia en el año 2013.

Esta norma contiene una explicación para lograr planicidad y perpendicularidad del espécimen con las placas por medio del cabeceo en las bases donde se coloca para ensayarlo.



Aplicable para moldeados, extraídos o prefabricados compuestos de concreto hidráulico.

El material para cabeceo puede estar compuesto de cenizas, silicios, puzolanas y mezclados con azufre que cumplan con las condiciones de resistencia a compresión, plasticidad y adherencia.

Las placas para cabeceo de especímenes deben estar constituidas con vidrio o metal pulido con un espesor mínimo de 6mm, sino con un material granítico, o algún otro material pétreo, plástico o acrílico de por lo menos 12mm.

Los platos metálicos para cabeceo deben tener por lo menos 5mm más de diámetro que el cilindro. La planicidad no debe ser más de 0.05mm en 150mm y los platos deben estar completamente lisos, el espesor del plato donde se cabecea debe ser de por lo menos 11mm para evitar choques térmicos y que el material de azufre se quiebre o se dañe.

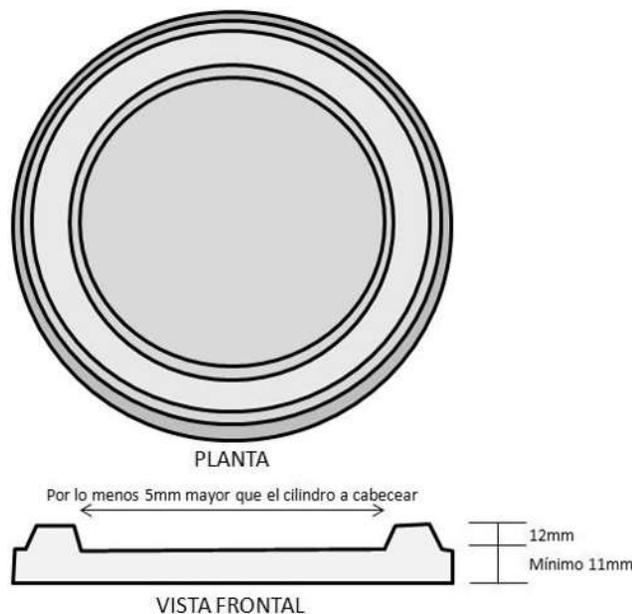


Figura 30. Diagrama de plato metálico utilizado para la prueba.



Existe un dispositivo que está unido a la base, que es el alineador, una especie de guía para el testigo que asegura su perpendicularidad con el plato, no debe ser mayor su inclinación a 0.5°.

Los recipientes para fundir el material azufroso deben ser especiales para eso, es decir, no debe reaccionar con el material de fundición, tendrá que ser uno donde se pueda estar controlando la temperatura, tener una parte para poder sostenerlo sin quemarse, para esto necesitamos las herramientas de seguridad: bata, lentes, guantes de carnaza para evitar accidentes. Además tener a la mano el aceite para que no se pegue el azufre al plato, así cuando sea necesario se coloca con una pequeña brocha, estopa o algún otro material, y también hay que tener un paño por si hay que remediar excesos de grasa.

La resistencia del compuesto para cabeceo y espesor de capa se especifican en la tabla siguiente.

Tabla 8 Resistencia a la compresión y espesor máximo del compuesto para cabeceo.

Resistencia del concreto en MPa (kgf/cm ²)	Resistencia mínima del compuesto para cabeceo, en MPa (kgf/cm ²)	Espesor promedio de cada capa de cabeceo en mm	Espesor máximo de cada capa de cabeceo en cualquier punto de oquedad en la misma en mm
3,5 a 50 (35 a 500)	35MPa (350) o la del concreto, cualquiera que sea mayor	6	8
Más de 50 (más de 500)	No menor que la resistencia del concreto	3	5

El compuesto debe cumplir con lo anterior, de lo contrario, conviene buscar alternativas, actualmente también se están usando almohadillas de neopreno para cabeceo, ya que otorgan más practicidad, y no necesita ninguna preparación especial para poder usarlas en sustitución del azufre.



El material de cabeceo no puede reusarse tantas veces, lo ideal es tener control y atención para poder comprobar su resistencia antes de ser reusada. Al terminar la prueba se recolectarán trozos de este mismo, para poder obtener, por medio de mediciones un promedio que preferentemente debe registrarse.

El plato debe estar ligeramente precalentado para evitar choque térmico al entrar en contacto el compuesto y se agriete. Debemos recordar aceitar el plato antes de vaciar el fluido. El mortero debe ser calentado a una temperatura de $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ colocando una cantidad necesaria para poder formar la capa sobre las caras de los testigos, también debe estar libre de contacto con humedad porque su comportamiento y resistencia pueden variar.

La forma correcta de realizar el cabeceo es que el material se vacíe mientras el cilindro se levanta un poco, asegurando que exista un contacto suave con la superficie del espejo de mortero, pero cuidando que el testigo nunca se despegue de las guías, para mantenerlo perpendicular. Una vez que la fundición se solidifique, entonces se voltea para poder repetir el procedimiento con la otra cara.

Existen algunas otras consideraciones para concreto endurecido seco en la Norma, pero nuestros especímenes se probaron justo después de terminar el proceso de saturación, así que no hubo problema por falta de humedad suficiente antes de cabecear.

4.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO [NMX-C-083-0NNCCE-2002]

También es parte del compendio de Normas y Reglamentación del ONNCCE. Su nombre oficial es: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CONCRETO – DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DEL CONCRETO – MÉTODO DE PRUEBA. Entró en vigencia en el año 2002.



Establece método de prueba del ensayo en laboratorio para determinar la resistencia a la compresión del concreto en especímenes cilíndricos y corazones de concreto.

En ella se contienen detalles de lo que se considera correcto para equipos y máquinas, para aplicar la prueba y que nos otorgue resultados de mediciones reales.

Nos da guía de los requisitos que debe cumplir la máquina Universal con la cual se aplica la compresión a los especímenes, hay que asegurar la aplicación de la carga lo más uniforme posible, para esto las platinas de la máquina deben de tener un tamaño que abarque toda la sección transversal de los cilindros, pero debe estar previamente la máquina bien calibrada, cosa que se hizo poco tiempo antes de practicar la prueba, para evitar una mala aplicación de la carga o sesgos en los resultados.

Hay que cabecear los cilindros porque debido a la posible rugosidad, porosidad o discontinuidades en las caras de material, podrían afectarse las lecturas en la carátula durante las mediciones.

Para la aplicación de carga, los discos metálicos deben tener unas medidas máximas de acuerdo al diámetro de los especímenes que se ensayen.

Tabla 9 Diámetro para placa superior de carga, establecidos por la Norma.

Diámetro de los especímenes de prueba (mm)	Diámetro máximo de la placa (mm)
50	100
75	125
100	165
150	250
200	280

Se exige que se haga bajo ciertas condiciones para una buena práctica, es decir, la máquina debe ser completamente apta, lubricada con un aceite mineral



delgado y no con una grasa lubricante. Que los discos para aplicación de carga estén completamente paralelos. Que la máquina disponga de una carátula graduada donde irá midiéndose la carga aplicada con una aproximación de 2.5%. Debe estar provista de una aguja indicadora y una aguja de arrastre, y las máquinas con un sistema digital deben tener un dispositivo que quede indicando carga máxima que se aplica. El error máximo permitido será de 3% de la carga aplicada.

Los diámetros deben obtenerse con el promedio de varias mediciones a altura media y a los extremos del espécimen, igualmente debe tratarse la altura media del cilindro, ese será el dato registrado para las probetas.

Cuando la altura promedio del cilindro es menor a 1.8 veces el diámetro, el resultado de la resistencia debe corregirse por esbeltez, así como muestra la siguiente tabla de valores de corrección.

Tabla 10 Factores de corrección por esbeltez extraídos de la Norma.

Relación Altura - Diámetro del espécimen	Factor de Corrección de la resistencia
2	1
1.75	0.99
1.5	0.97
1.25	0.94
1	0.91

Previo a la aplicación de carga, los especímenes deben cumplir con la perpendicularidad al eje, no variará más de un 0.5%, por eso se asegura por medio del cabeceo. La Norma que contiene información acerca del Cabeceo es la *NMX-109-ONNCCE-2013* que ya se abordó.

El ensayo debe ser realizado enseguida de ser retirados del cuarto húmedo del laboratorio, de la pileta, o en nuestro caso, de los recipientes donde se saturaron las probetas. Durante el lapso que se retiran los corazones, se cabecea y se aplica la carga debe evitarse excesiva pérdida de humedad.



Previo a la aplicación de la prueba, se deben limpiar las placas, las del testigo y debe colocarse con cuidado lo más centrado posible en la placa inferior, entonces la placa superior debe bajarse cuidadosamente hasta que tenga un suave contacto con la probeta, listo para comenzar con las lecturas de las mediciones.

La velocidad de la aplicación de la carga debe encontrarse dentro de un rango de 84 – 210 kgf/cm²/min y mantenerla hasta que se produzca la falla del material y se registra todo esto en el informe final.

Los especímenes deben de probarse durante el rango de 14 a 28 días de haber sido colados, pero si se trata de concreto endurecido se especifica la edad del testigo.

De acuerdo a la forma de la falla presentada en los cilindros, pueden deducirse deficiencias en su práctica, existe una serie de diagramas para las formas de fallas, así como indicaciones de las razones a las que se pueden deber al ser observadas.



1. Se observa cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparada



2. Se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de tolerancia especificada o excediendo ésta.



3. Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia del material de cabeceo: también por concavidad del plano de cabeceo o convexidad en una de las caras de carga.



4. Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencias en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.



5. Se observa cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga por deficiencias en el material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.



6. Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias en el material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.



7. Se observa cuando las caras de aplicación de carga del espécimen se desvían ligeramente de las tolerancias de paralelismo establecido, o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen para la aplicación de carga.

Figura 31 Diagramas de fallas de cilindros sometidos a compresión. Obtenidos de la Norma en cuestión.

Cuando se tiene interés en ensayar cilindros a edades específicas, habrá que cumplir lo más exacto posible con el rango de tiempo que dan para desfasarse de dicho tiempo como lo muestra la tabla siguiente.

Tabla 11. Tolerancias de tiempo para aplicación de prueba. Propuestas en la Norma.

Edad de Prueba	Tolerancia Permisible*
24 h	± 0.30 h
3 días	± 2 h
7 días	± 6 h
14 días	± 12 h
28 días	± 24 h

(*) Para pruebas sin previa prescripción de edad de prueba, se ensayará con tolerancias fijadas por acuerdo común entre interesados

Para cilindros en los que la edad de ensayo no se encuentre prescrita, se llevarán a cabo de acuerdo tolerancias establecidas con los interesados.

Se calcula la resistencia del espécimen a tensión, dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba con la máquina Universal, entre el área determinada con fórmula utilizando el dato del diámetro promedio medido antes de realizar la prueba, y el resultado se expresa con aproximación de 100kPa (1kgf/cm²).

El informe de la prueba debe contener ciertos datos:

- Clave de identificación del espécimen
- Edad nominal del testigo
- Diámetro y altura en centímetros con una aproximación a mm
- Área de sección transversal calculada con aproximación al décimo



- e) Masa de probeta en kg
- f) Carga máxima en N (kgf)
- g) Resistencia a la compresión calculada con aproximación a 100 KPa (1 kgf/cm²)
- h) Defectos observados en espécimen o en sus cabezas
- i) Descripción de falla de ruptura

4.6 MÉTODO DE LA RED TEMÁTICA DURAR PARA ENSAYO DE FAGERLUND DE ABSORCIÓN CAPILAR

No existía en la normatividad mexicana, alguna parte que contemplara un método de ensayo para determinación del parámetro de absorción por capilaridad, sin embargo, en la Red DURAR se recomienda basarse en el método presentado en un ensayo publicado por el noruego Görah Fagerlund en el año de 1982, llamado "On the Capillarity of Concrete".

Actualmente ya existe en México una Norma establecida para regular este tipo de prácticas denominada NMX-C-504-ONNCCE-2015 bajo el título INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR EN CONCRETO HIDRÁULICO-MÉTODO DE ENSAYO. Es aplicable al concreto hidráulico en general, endurecido y en cualquier etapa de su vida de servicio, tanto en el laboratorio como en el campo. Fue publicada el 9 de septiembre del año 2015 y entró en vigor 60 días después de esta fecha. No tuvimos acceso para revisar la Norma vigente ahora, pero nos basamos en el proceso descrito por la Red DURAR (1998).

El parámetro S que significa *sorción* en el documento de Red DURAR del CYTED, se refiere al ritmo o velocidad de absorción capilar, se obtiene utilizando lo establecido por el método de prueba de Fagerlund, sin embargo, ese parámetro nunca fue indicado en este método.



El método de ensayo de absorción capilar propuesto por Fagerlund (de normativa sueca) se utiliza para describir la cinética de absorción del agua en concreto, con ayuda de tres coeficientes: (ϵ_e) porosidad efectiva, (k , también llamado S_m en algunas fuentes) absorción capilar, y (m) resistencia a la penetración del agua (Fagerlund, 1982); el valor de m está en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

La sorción fue establecida conceptualmente en el método de ensayo de la Norma Norteamericana ASTM C1585-04, donde se conoce como *Sorptivity* (ASTM, 2004), traducido al español como *Sorptividad*, es interpretado como la velocidad de absorción del testigo, se encuentra directamente relacionada con el diámetro del espécimen, la forma, la tortuosidad o comunicabilidad entre los poros capilares con acceso al exterior de la matriz del concreto, es decir, la porosidad efectiva.

Para las estructuras expuestas a ambientes agresivos y menos agresivos, la Red DURAR tiene como objetivo utilizar los parámetros de porosidad efectiva y sorptividad, también llamada *sorción*, para medir el desempeño por durabilidad del concreto en las estructuras.

El procedimiento debe llevarse a cabo como sigue:

1. Secado a masa constante de los testigos,
2. Luego que la condición se cumpla, se cubre con parafina de las paredes laterales, y se pesan.
3. Se colocan en recipientes grandes con fondo plano y base de esponja, con 3mm de espejo de agua arriba del asiento, para que la absorba poco a poco.
4. Mientras llega a la masa constante de saturación se tiene que ir haciendo pesaje con báscula electrónica de las probetas, todos los datos deben ser registrados, a tiempo de 5, 10, 15 y 30 minutos, 1, 2, 3, 4, 6, 24 y 48 horas, después cada 24 horas hasta llegar a masa constante.

De los resultados obtenidos se calcula absorción capilar considerada como masa de agua por unidad de área absorbida por los vacíos, cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva, lo accesible que es para los líquidos y para los agentes agresivos ambientales.



Los coeficientes se pueden calcular con los datos obtenidos de mediciones, con las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{t}{z^2} \text{ (s / m}^2\text{)}$$

Donde m : resistencia a la penetración del agua

z : profundidad de penetración del agua en el tiempo t

$$k = \frac{(Wt - Wo) / A}{\sqrt{t}} \text{ (kg / m}^2 \text{ s}^{0.5}\text{)} = Sm$$

Donde Wt : masa de testigo al tiempo t

Wo : masa inicial de testigo

$$\epsilon_e = \frac{k \sqrt{m}}{1000} \text{ (\%)}$$

El coeficiente Sm puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(Wt - Wo) / A$ en función de \sqrt{t} .

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$.

Con la información anterior, la absorción capilar, S , se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \text{ (mm / h}^{0.5}\text{)} \text{ o (m / s}^{0.5}\text{)}$$

Tabla 12. Criterio de riesgo por sorción capilar.

Hostilidad del ambiente	Sorción capilar propuesta respecto al tiempo	Sorción capilar propuesta respecto a profundidad
Ambientes severos	5 x 10⁻⁵ m / s^{0.5}	3 mm / h^{0.5}
Ambientes menos severos	1 x 10⁻⁴ m / s^{0.5}	6 mm / h^{0.5}



CAPÍTULO 5. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO

5.1 RECEPCIÓN DE TESTIGOS

Una vez que el proyecto fue realizado, había que ver que los materiales tuvieran el buen desempeño que se había previsto, para así tener idea de que la obra sería realmente de la calidad que se tenía planeada. Para esto fue necesario llevar a cabo una serie de pruebas en un laboratorio de materiales, para poder caracterizar el material y concluir analizando los resultados obtenidos. Para esto se extrajeron testigos del concreto de la obra de diferentes elementos estructurales.

Las probetas extraídas y ensayadas, fueron retiradas el día 30 de octubre del año 2014, en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), ubicadas en la Carretera El Colorado - Galindo Km. 12, Colonia San Fandila, en el municipio Pedro Escobedo, Querétaro.

Al momento de recibir los cilindros se nos explicó de lo qué trataba, a grandes rasgos, el proyecto que se había llevado a cabo en un Puerto; nos indicó que se hizo un diseño especial de un concreto para que resistiera las inclemencias climáticas que subsisten en el área de la obra, tratándose de una zona tropical.

Se trataba de un diseño de un concreto esencialmente autocompactable, que es mucho más fluido a comparación de las mezclas ordinarias, además tenía ciertos agregados (indicados más adelante) que cubrieran las necesidades del Proyecto.

Los especímenes facilitados fueron obtenidos de las pilas del Viaducto de la obra ubicada en el caribe mexicano, con un número total de 20 corazones de concreto, en esta primer entrega, de los cuales algunos fueron sometidos a pruebas físicas destructivas y no destructivas y los a otros se les aplicó pruebas químicas para determinar la concentración de cloruros.



Se aclaró que la forma de la subestructura perteneciente a la obra, consta de 3 pilas y un cabezal, se numeró las pilas con fines prácticos para la experimentación y recopilación de datos de las pruebas con el número 1 correspondiente al poniente, el número 2 a la pila del centro y el 3 a la pila del oriente según la ubicación del viaducto, y además que se encuentra dividido longitudinalmente en 82 ejes en total, numerados a partir del 1 que es el correspondiente a la playa. Fue entregado un formato de captura de datos de los especímenes, que contiene datos del eje del cual se extrajeron, la estación, el número de la pila, la longitud del corazón, la cota promedio de los corazones de cada eje, la fecha de colado y la fecha de extracción, han sido resaltados con color los especímenes que son los que nos han entregado, el patrón observado fue que los dos de mayor longitud se enviaron de Yucatán a Querétaro, y posteriormente, a Morelia. Lo siguiente a esclarecer, era las pruebas que serían practicadas para cada uno de esos especímenes.

Tabla 13 Relación de cilindros recibidos provenientes de pilas del Viaducto

EJE	NÚMERO	ESTACIÓN	PILA	ALTURA CORAZÓN (LONGITUD, cm)	COTA PROMEDIO (m)	FECHA DE COLADO	FECHA DE EXTRACCIÓN
82	1	12+102.569	1	19.0	1.4	05-jul-14	05-ago-14
	2			16.0			
	3			15.7			
79	1	12+031.011	2	14.4	1.65	11-jun-14	05-ago-14
	2			13.7			
	3			15.3			
76	1	11+959.011	3	18.3	1.97	20-jun-14	02-sep-14
	2			15.8			
	3			13.1			
73	1	11+887.011	2	14.4	1.73	14-jul-14	02-sep-14
	2			14.0			
	3			18.4			
70	1	11+815.011	1	14.0	1.75	04-ago-14	14-sep-14
	2			17.2			
	3			19.8			
	1	11+743.011		15.2	1.61	31-jul-14	14-sep-14



67	2		2	14.4			
	3			16.0			
64	1	11+671.011	3	13.6	1.48	15-ago-14	14-sep-14
	2			27.8			
	3			13.6			
61	1	11+599.011	2	15.7	1.48	27-ago-14	19-sep-14
	2			14.3			
	3			13.7			
58	1	11+527.011	1	23.6	1.42	09-sep-14	19-sep-14
	2			19.1			
	3			14.8			
55	1	11+455.011	2	17.6	1.92	08-sep-14	19-sep-14
	2			15.6			
	3			8.8			

 Corazones enviados a Querétaro.

Se comentó que la profundidad de la cimentación es de 7 metros en roca y además otros 4 metros en conchuela (material sascab, un tipo de tepetate, con la característica de ser compresible), así que funcionarían las pilas del Viaducto como pilas de fricción, el colado se hizo usando ademes metálicos; luego de hacer las perforaciones se sacaba la broca y se comenzó a colocar el llamado “lodo polimérico”, creado para poder sacar toda el agua contenida en el orificio de la perforación, pero lo más importante es que no dejaba nada de la sal contenida en el líquido, y es relevante porque se pretendía corroborar la existencia o ausencia de cloruros en la estructura.

SE recibió explicación de los parámetros que se tomaron mayormente en cuenta para el diseño, pensando en la característica del concreto de la durabilidad, cuidando parámetros de resistividad eléctrica, la cantidad de cemento, la relación agua-cemento, el uso exclusivamente del Cemento Portland Ordinario (CPO) para poder controlar las adiciones a la mezcla, para colocar *microsílice*, usar un



superplastificante de alto comportamiento, además de un retardante de fraguado y *carboxilato* para que la mezcla fuera autocompactable.

La resistencia a la compresión simple esperada para los corazones en el momento del diseño era de hasta 400 kg/cm² a 28 días, el concreto fue diseñado con cemento Holcim y un agregado muy pequeño (3/8”), como medida de seguridad, ya que es demasiado poroso el de Yucatán.

Se acordó primero redactar un documento donde se estableciera la planeación de la serie de pruebas destructivas y no destructivas a realizar, de acuerdo a los resultados buscados del concreto, había ciertos parámetros que interesaba conocer, y con base en eso, se planificó hacer la mayoría de ensayos en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y la parte restante de pruebas químicas se realizaría en un laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte donde hubiera las condiciones y equipo necesario para realizarlas.

5.2 PROTOCOLO DE ENSAYOS E INVENTARIO DE NÚCLEOS

Enseguida se da a conocer el procedimiento establecido para las pruebas.

Había que hacer pruebas físicas y a cloruros, así que debíamos administrar correctamente los especímenes. Para tenerlo claro, se identificó la “parte lisa”, que es la parte superficial de la pila, y la que tiene un “corte irregular” como lo más profundo de la pila.

Se hizo un inventario de los corazones enviados, con el procedimiento para identificación de testigos fue siguiente:

1. Para ordenar este inventario se midieron los corazones en lo alto en cuatro partes para obtener el promedio de la altura.



2. En su diámetro se obtuvieron dos diámetros en tres alturas diferentes, para tener seis medidas por corazón y obtener el promedio del diámetro.
3. Los corazones también se pesaron para obtener el peso inicial antes de cortarlos.
4. Se hizo una tabla inventario con los resultados de cada medición así como el promedio obtenido, mostrada enseguida dividida en dos partes para mejor visibilidad.

Tabla 14 Inventario de especímenes, realizado de dos entregas de cilindros provenientes de pilas de Viaducto. Parte 1

EJE	NUEVA NOM.	NÚMERO	FECHA DE COLADO	PILA	Peso inicial (grs)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	hprom (cm)
82	I	1a	05-jul-14	1	368.8ext	9.2	10.2	9.6	9.5	9.63
	II	1b			385.2int	9.7	8.9	9.2	9.6	9.35
	III	2			627.7	16.1	15.7	15.6	15.7	15.78
79	IV	1	11-jun-14	2	638.8	14.5	14.6	14.6	13.7	14.35
	V	3			653.1	15.1	15.4	15.6	15.5	15.40
76	VI	1	20-jun-14	3	723.8	18.2	18.1	18.5	18.1	18.23
	VII	2			629.1	15.5	16	16.1	16	15.90
73	VIII	1	14-jul-14	2	592.9	13.9	14.4	14.6	14.2	14.28
	IX	3			744.8	18.2	17.9	17.7	18.6	18.10
70	X	2	04-ago-14	1	682.3	17.1	17	16.5	17	16.90
	XI	3a			336.5ext	8	7.9	7.7	7.6	7.80
	XII	3b			475.2int	11.7	11.7	12.1	12	11.88
67	XIII	1	31-jul-14	2	658.5	15.3	15	14.7	15.2	15.05
	XIV	3			695.6	15.5	15.9	15.7	15.4	15.63
64	XV	2	15-ago-14	1	1249.3	27.7	27.6	27.8	27.6	27.68
	XVI	3			601.8	13	13.4	13.2	13.7	13.33
61	XVII	1	27-ago-14	2	605.9	15.1	15	15.3	15.3	15.18
	XVIII	2			584.5	14.2	14.1	13.9	14	14.05
58	XIX	1	09-sep-14	3	1053.8	23.1	23.2	23.6	23.6	23.38
	XX	2			831.4	18.9	19.1	18.9	19.1	19.00
55	XXI	1	08-sep-14	2	745.3	17.6	17.8	17.6	17.3	17.58
	XXII	2			651.8	15.7	14.5	15.6	15.5	15.33



Tabla 15 Inventario de especímenes, realizado de dos entregas de cilindros provenientes de pilas de Viaducto. Parte 2 (continuación).

EJE	NUEVA NOM.	NÚMERO	PILA	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	D5 (cm)	D6 (cm)	Dprom (cm)	Área (cm ²)	Altura necesaria Co2 (cm)
82	I	1a	1	5.04	5.01	5.01	5.02	5.02	5.03	5.02	19.81	10.0
	II	1b		5.03	5	5.02	5.02	5.03	5.03	5.02	19.81	10.0
	III	2		4.96	5.01	4.98	5	4.98	4.93	4.98	19.45	10.0
79	IV	1	2	5.02	5.01	5.02	5.01	5.01	5	5.01	19.73	10.0
	V	3		5.01	5	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	19.75	10.0
76	VI	1	3	5.02	5.02	5.04	5.02	4.94	4.88	4.99	19.53	10.0
	VII	2		5.03	5.02	5.03	5.02	4.96	4.92	5.00	19.61	10.0
73	VIII	1	2	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	19.81	10.0
	IX	3		5.01	5.03	5.04	5.03	5.03	5.02	5.03	19.84	10.1
70	X	2	1	4.98	5	4.95	5.03	5.02	5.02	5.00	19.64	10.0
	XI	3a		5.03	5.02	5.01	5.03	5.01	5.01	5.02	19.78	10.0
	XII	3b		5.03	5.02	5	5.01	5	5.01	5.01	19.73	10.0
67	XIII	1	2	5	5.02	5.02	5	5.03	4.99	5.01	19.71	10.02
	XIV	3		5.02	5.03	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	19.81	10.043333
64	XV	2	1	5.03	5.03	5.02	5.03	5.02	5.02	5.03	19.83	10.05
	XVI	3		5.03	5.03	5.02	5.05	5.03	5.06	5.04	19.92	10.073333
61	XVII	1	2	5	5.03	5.03	5.06	5.02	5.05	5.03	19.88	10.063333
	XVIII	2		5.01	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	5.02	19.79	10.04
58	XIX	1	3	4.97	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	5.01	19.74	10.026667
	XX	2		5.01	5.02	5.03	5.03	5.02	5.03	5.02	19.82	10.046667
55	XXI	1	2	5.03	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	19.81	10.043333
	XXII	2		5.02	5.03	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	19.81	10.043333

Se realizó un levantamiento fotográfico de cada corazón, colocando la etiqueta original que venía en cada bolsa de plástico enviada desde el Puerto. Algunos ejemplos de las fotografías se contienen más adelante como parte de la información del reporte.



Figura 32 Ejemplo de registro fotográfico de especímenes recibidos para pruebas. Primero y segundo bloque.

5.2.1 CORAZONES PARA PRUEBAS FÍSICAS

Había que cortar uno de los cilindros de cada pila, de su parte irregular y conservar bien referenciado, el sobrante del corte para más adelante. Se le designó como Co1. Más adelante se presentan fotografías de cada una de las partes de los testigos.

Luego cortarse desde la cara del primer corte hasta una longitud que cumpla la relación H/D de 2, para realizar la prueba de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple. Llamándose Co2.

De la parte restante del corazón (la parte más superficial del mismo), habría que cortar una o dos rodajas del corazón de unos 5 cm de altura para realizar las pruebas físicas que incluirían el porcentaje total de vacíos y absorción capilar (Fagerlund). Se les llamaría Co3 y Co4.

Para el corte que se hizo para obtener una superficie, Co1, se empacó para ser enviado al IMT para pulverizarlo y ser practicadas pruebas químicas con la pequeña porción. Cabe destacar que no de todos los núcleos fue posible rescatar el



remanente, ya que a veces era casi solo polvo y se quedaba disperso por la máquina cortadora de concreto.

Para las porciones que servirían para las pruebas físicas, Co3 y Co4 se introdujeron a un horno a 50°C a pesos constante, es decir, hasta que se encontraron completamente libres de humedad. Sacados del horno se calculaba el peso seco. Después se colocaban en un recipiente con tapa (de preferencia bien sellado para evitar se escape la humedad) o Tupperware, donde se mantuvieron rociando con agua hasta peso constante. Cuando esto sucediera se sabía que se había llegado a la saturación de humedad, y con esto se obtuvo el dato del peso saturado superficialmente seco. Medido este peso, se llevaron a una balanza con canastilla para poder medir el peso saturado sumergido. Teniendo estos resultados puede obtenerse el porcentaje de vacíos de los cilindros.

Llegado a este peso constante saturado, se procedió a realizar pruebas de resistencia eléctrica y de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

Nuevamente se secaron las rodajas en el horno con el mismo procedimiento hasta peso constante. Llegado esto, se les recubren las caras laterales (perimetrales) con parafina (o cera de vela) para realizar la prueba de Fagerlund, para luego obtener los parámetros de absorción capilar. Todo el material se recupera y se conserva en bolsas, usando una nomenclatura correcta para evitar confusiones o extravíos.

5.2.2 CORAZONES PARA PRUEBAS MECÁNICAS (COMPRESIÓN)

Para la porción de corazón que se realiza la prueba de compresión (Co2), se saturaron los cilindros y se mantuvieron en medición de la resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Estas mediciones paran hasta que tengan valores constantes (más menos 5% de diferencia de una medición a otra). Llegando a valores constantes de resistividad y VPU, procedió a cabecear especímenes, y después se



sometieron a la prueba de compresión uniaxial con ayuda de las máquinas universales del laboratorio.

5.2.3 DETALLES GENERALES Y CUIDADOS CON LOS CILINDROS

Así como las partes Co1, se conservó en bolsas herméticas toda la cantidad de material inicial, rescatando lo posible para poder aprovecharlo para aplicar más pruebas de ser necesario, así que se guardaron los restos no contaminados de los cilindros probados a compresión, para poder aplicarle pruebas de presencia de cloruros.

Se decidió tener cierta flexibilidad en cuanto a la cantidad de núcleos utilizada para algunas de las pruebas, es decir, se aplicaban a los cilindros que presentaban características más convenientes cumpliendo con las condiciones para su realización.

Un ejemplo de los criterios utilizados es que las Normas dictan que para la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) se deben utilizar testigos de por lo menos 100mm, y como al cortarlos no todas las partes de los especímenes cumplían con la distancia, solo se destinaron algunos para las pruebas de compresión, siendo las partes que cumplieron también con la relación altura/diámetro de 2 o cercana.

Tabla 16. Selección de pruebas para cada probeta. Primer bloque.

EJE	NUEVA NOM.	NÚMERO	FECHA DE COLADO	PILA	PARTES RESULTANTES DE CORTES	
82	I	1a	05-jul-14	1	I	Co3
		1b			I	Co4
	II	II			Co2	
		III			Co2	
		III			Co3	
79	IV	1	11-jun-14	2	IV	Co2
					IV	Co3



	V	3			V	Co2		
					V	Co3		
76	VI	1	20-jun-14	3	VI	Co2		
					VI	Co3		
					VI	Co4		
	VII	Co2						
	VII	Co3						
73	VIII	1	14-jul-14	2	VIII	Co2		
					VIII	Co3		
	IX	3			IX	Co2		
					IX	Co3		
70	X	2	04-ago-14	1	X	Co2		
					X	Co3		
					X	Co4		
	XI	3a			XI	Co2		
					XII	3b	XII	Co3
							XII	Co4
67	XIII	1	31-jul-14	2	XII	Co5		
					XIII	Co2		
	XIV	3			XIII	Co3		
					XIV	Co2		
64	XV	2	15-ago-14	1	XIV	Co3		
					XV A	Co2		
					XV B	Co2		
					XV	Co3		
	XVI	3			XV	Co4		
					XVI	Co2		
61	XVII	1	27-ago-14	2	XVI	Co3		
					XVII	Co2		
	XVIII	2			XVII	Co3		
					XVIII	Co2		
58	XIX	1	09-sep-14	3	XVIII	Co3		
					XIX A	Co2		
					XIX B	Co2		
	XX	2			XIX	Co3		
					XX	Co2		
					XX	Co3		
55	XXI	1	08-sep-14	2	XX	Co4		
					XXI	Co2		



				XXI	Co3
				XXI	Co4
	XXII	2		XXII	Co2
				XXII	Co3

Tabla 17. Selección de pruebas para cada probeta. Segundo bloque. Parte 1.

Muestra	N° elemento	Elemento	Eje	Clave	Propuesta IMT			Propuesta Umich		
					CL	VF	RV	CL	VF	RV
1	1	Cabezal	82	1		x	x		x	x
2	2	Cabezal	82	3			x			x
3	3	Cabezal	79	2			x	x	x	x
4	4	Cabezal	79	3			x			x
5	5	Cabezal	76	2			x			x
6	6	Cabezal	76	*3(1)			x			x
7	7	Cabezal	73	2			x			x
8	8	Cabezal	73	3	xx,x		x	xx,x		x
9	9	Cabezal	70	2	xx,x		x	xx		x
10	10	Cabezal	70	3		x	x		x	x
11	11	Cabezal	51	1		x	x		x	x
12	12	Cabezal	51	2	xx,x		x	xx,x		x
13	13	Cabezal	49	1	xx,x		x	xx,x		x
14	14	Cabezal	49	3		x	x		x	x
15	15	Cabezal	46	1		x	x		x	x
16	16	Cabezal	46	2	xx,x		x	xx,x		x
17	17	Cabezal	43	2		x	x		x	x
18	18	Cabezal	43	3	xx,x		x	xx,x		x
19	19	Cabezal	38	2		x	x		x	x
20	20	Cabezal	38	3	xx,x		x	xx		x
21	1	Pila 3	52	1	xx		x	x		x
22	2	Pila 3	52	2		x	x		x	x
23	3	Pila 2	49	1		x	x		x	x
24	4	Pila 2	49	3	xx		x	xx		x
25	5	Pila 1	46	1		x	x		x	x
26	6	Pila 1	46	2	xx		x	xx		x
27	7	Pila 3	43	2		x	x		x	x
28	8	Pila 3	43	3	xx		x	xx		x
29	9	Pila 2	40	2	xx		x	xx		x
30	10	Pila 2	40	3		x	x		x	x
31	11	Pila 1	37	1	xx		x	xx		x



32	12	Pila 1	37	2			x			x
33	13	Pila *3(2)	34	1			x	x		x
34	14	Pila *3(2)	34	3	xx		x	xx		x
35	15	Pila *3(1)	30	2		x	x		x	x
36	16	Pila *3(1)	30	3	xx		x	xx		x
37	17	Pila 3	28	1	xx		x	xx		x
38	18	Pila 3	28	3		x	x	x	x	x
39	19	Pila 2	25	2	xx		x	xx		x
40	20	Pila 2	25	3		x	x		x	x

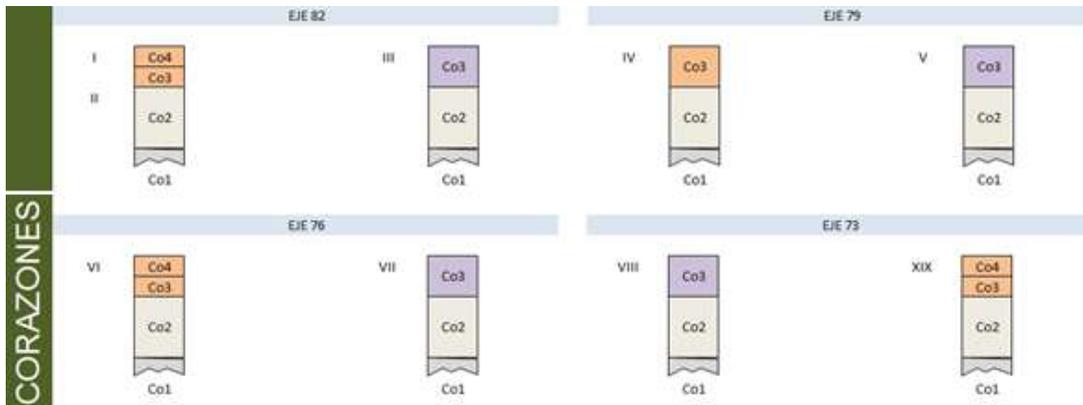
- El número 3 no cumplió para esas pruebas porque el poro era de tamaño considerable.
- El número 21 y 33 no alcanzan para cloruros, pero se garantizó relación 1:2 para compresión
- Del 38 se agrega una muestra para cloruros, ya que el remanente es de 2cm

Simbología de profundidad de las partes (por forma)

-  Parte más superficial
-  Parte más profunda (remanente)

Simbología de acuerdo a la propuesta de las prueba de destino (por color)

-  << Prueba de Fagerlund
-  << Pruebas de cloruros
-  << Pruebas de compresión y eléctricas
-  << Para pulverizar



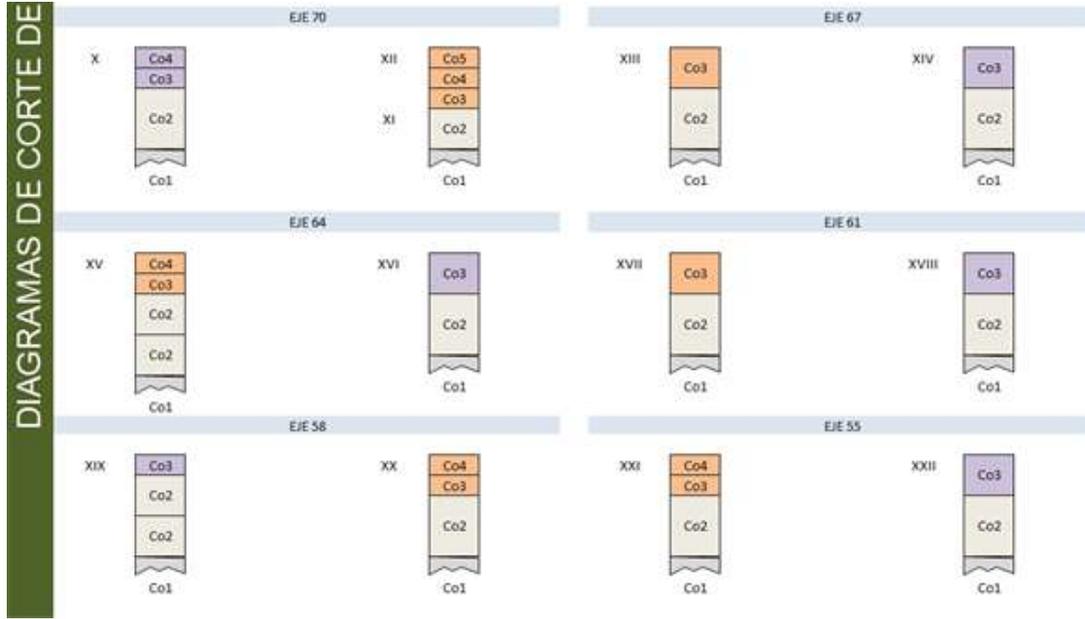
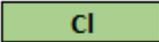
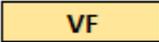
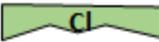
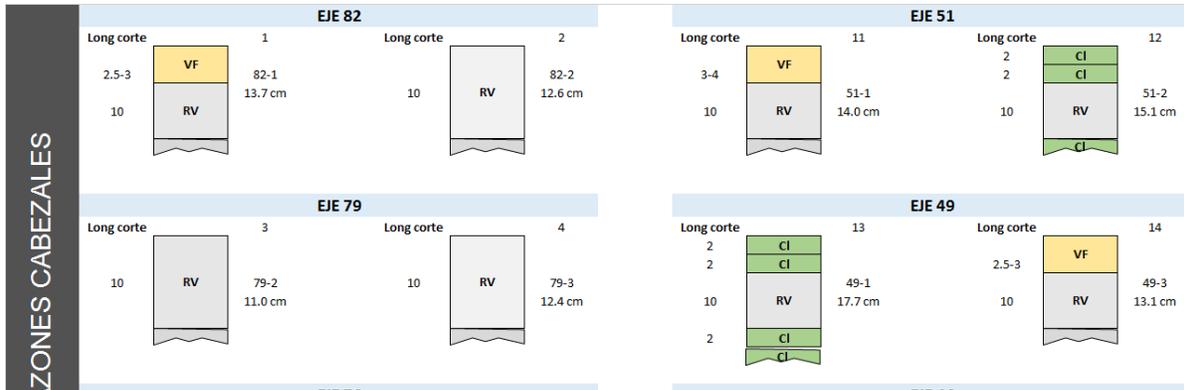


Figura 33. Diagramas de corte de testigos de primer bloque de pruebas.

Simbología de acuerdo a la propuesta de las prueba de destino

-  << Prueba de Cloruros (2-3 cm)
-  << Pruebas de % Vacíos y Fagerlund (4-5 cm)
-  << Pruebas de compresión, VPU y resistividad (10 cm)
-  << Para pulverizar



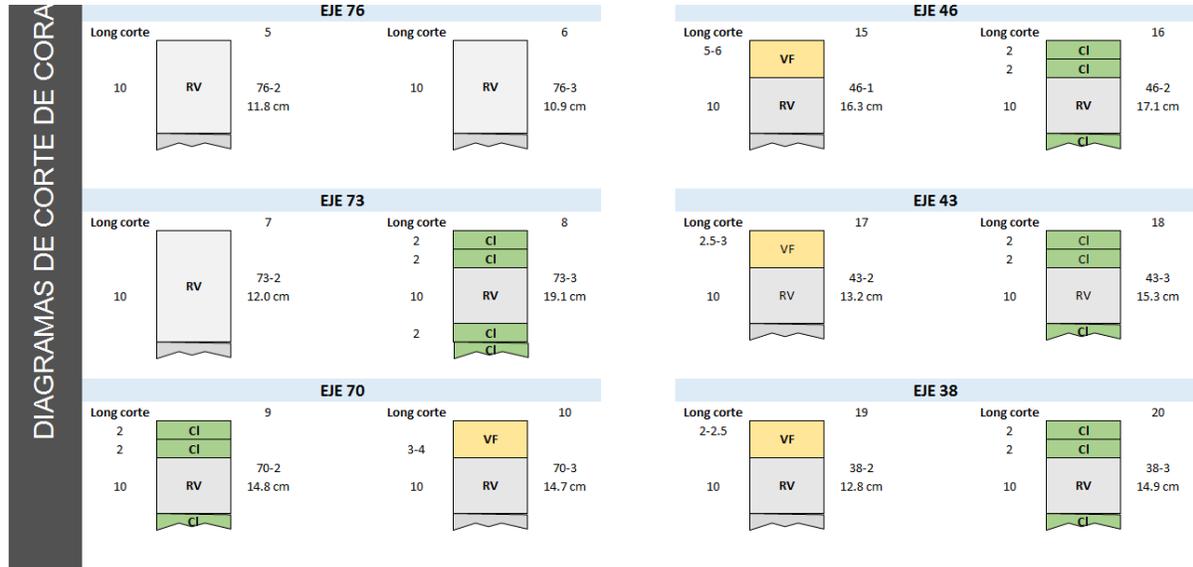


Figura 34. Diagramas de requerimientos para corte de testigos de cabezales.



Figura 35. Diagramas de requerimientos para corte de testigos de pilas.



No se sumergieron los especímenes en agua, para evitar que de los mismos salga calcio o entren otros iones a ellos. Por eso se dio la indicación de que se rociaran dentro de un tupper cerrado para evitar se contaminaran. Aunque sea más tardado, es mejor este procedimiento porque permite mayor precisión y evita sesgo de resultados.

Durante este proceso, las pruebas de VPU y resistividad eléctrica se practicaron cada 24 horas, hasta tener un valor constante. Los ensayos se detuvieron al llegar a este valor.

5.3 PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS PARA LOS TESTIGOS

5.3.1 PREPARACIÓN DE CORAZONES PARA ENSAYOS

Una vez inventariados los núcleos con sus datos requeridos, y además aprobado el protocolo de las pruebas que se practicarían, se comenzaron los ensayos.



Figura 36 Testigos recibidos para probar. Primera recepción.



Se cortó cada uno de los cilindros recibidos, con ayuda de una máquina cortadora de concreto que hay en el Laboratorio, de acuerdo a la metodología explicada anteriormente, cuidando utilizar solo el agua suficiente para que no se calentara para evitar excesos, para la conservación y no hubiera contaminación de los sobrantes; se conservó el remanente del corte que se pudo rescatar, e inmediatamente fue referenciado, se guardó en bolsitas plásticas resellables y se les identificó como Co1 para tenerlos bien ubicados. Se empacó en la caja que recibimos los corazones, para ser enviados de vuelta al IMT, para pulverizarlo y ser practicadas pruebas químicas con las pequeñas porciones.



Figura 37. Manipulación de máquina cortadora de concreto usada con probetas recibidas e imagen de remanente de cilindro producto de corte empaquetado para enviar a probar químicamente al IMT.

Se marcaron los cilindros a ciertas longitudes, desde la cara del primer corte, hasta una longitud que cumpla la relación H/D de 2 para realizar la prueba de compresión, para obtener su longitud exacta había que recurrir al inventario donde se anotó las medidas del diámetro obtenidos de los testigos, también había que tomar en cuenta que se pierde un poco de material por el mismo corte, se trató de hacer las divisiones un poco más amplias de lo que debían medir, para procurar cumplir con las condiciones de dimensiones que las Normas de las pruebas nos indican.



Donde fueron marcados se hizo los cortes lo más preciso posible. Se llamó Co2 a los obtenidos en esta ocasión.



Figura 38 Remanente de cilindro empaquetado para enviar a probar químicamente al IMT.



Figura 39 Testigos cortados, partes destinadas para pruebas tipo Co2.



De lo restante del corazón, la parte más superficial del mismo, se marcaron con un plumón, con el mismo cuidado que antes, y cortar una o dos rodajas del corazón procurando que fueran lo más cercanas a 5 cm de altura para realizar las pruebas físicas que incluirían el porcentaje total de vacíos, absorción capilar o Fagerlund. Se les marcó como Co3 y Co4, y en algunos casos Co5 a una tercer rodaja.



Figura 40 Rodajas de testigos provenientes de corte de dos entregas, destinadas para pruebas de tipo Co3, Co4 y Co5.

Cada porción obtenida de los cortes fue pesada en una báscula electrónica, así como se hizo al principio cuando se recibieron los testigos de la extracción. Se colocaron los datos necesarios en los inventarios, para tener control de los pesos de iniciales de los especímenes, también fueron medidos. Todos los resultados de mediciones fueron vaciados en tablas de control elaboradas.



Tabla 18. Registro de Características Físicas de Testigos. Primer Bloque.

EJE	NUEVA NOM.	NÚMERO	FECHA DE COLADO	PILA	Peso inicial (grs)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	hprom (cm)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	D5 (cm)	D6 (cm)	Dprom (cm)	Área (cm2)	Altura necesaria Co2 (cm)
82	I	1a	05-jul-14	1	368.8ext	9.2	10.2	9.6	9.5	9.63	5.04	5.01	5.01	5.02	5.02	5.03	5.02	19.81	10.0
	II	1b			385.2int	9.7	8.9	9.2	9.6	9.35	5.03	5	5.02	5.02	5.03	5.03	5.02	19.81	10.0
	III	2			627.7	16.1	15.7	15.6	15.7	15.78	4.96	5.01	4.98	5	4.98	4.93	4.98	19.45	10.0
79	IV	1	11-jun-14	2	638.8	14.5	14.6	14.6	13.7	14.35	5.02	5.01	5.02	5.01	5.01	5	5.01	19.73	10.0
	V	3			653.1	15.1	15.4	15.6	15.5	15.40	5.01	5	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	19.75	10.0
76	VI	1	20-jun-14	3	723.8	18.2	18.1	18.5	18.1	18.23	5.02	5.02	5.04	5.02	4.94	4.88	4.99	19.53	10.0
	VII	2			629.1	15.5	16	16.1	16	15.90	5.03	5.02	5.03	5.02	4.96	4.92	5.00	19.61	10.0
73	VIII	1	14-jul-14	2	592.9	13.9	14.4	14.6	14.2	14.28	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	19.81	10.0
	IX	3			744.8	18.2	17.9	17.7	18.6	18.10	5.01	5.03	5.04	5.03	5.03	5.02	5.03	19.84	10.1
70	X	2	04-ago-14	1	682.3	17.1	17	16.5	17	16.90	4.98	5	4.95	5.03	5.02	5.02	5.00	19.64	10.0
	XI	3a			336.5ext	8	7.9	7.7	7.6	7.80	5.03	5.02	5.01	5.03	5.01	5.01	5.02	19.78	10.0
	XII	3b			475.2int	11.7	11.7	12.1	12	11.88	5.03	5.02	5	5.01	5	5.01	5.01	19.73	10.0
67	XIII	1	31-jul-14	2	658.5	15.3	15	14.7	15.2	15.05	5	5.02	5.02	5	5.03	4.99	5.01	19.71	10.02
	XIV	3			695.6	15.5	15.9	15.7	15.4	15.63	5.02	5.03	5.02	5.02	5.02	5.02	19.81	10.0433333	
64	XV	2	15-ago-14	1	1249.3	27.7	27.6	27.8	27.6	27.68	5.03	5.03	5.02	5.03	5.02	5.02	5.03	19.83	10.05
	XVI	3			601.8	13	13.4	13.2	13.7	13.33	5.03	5.03	5.02	5.05	5.03	5.06	5.04	19.92	10.0733333
61	XVII	1	27-ago-14	2	605.9	15.1	15	15.3	15.3	15.18	5	5.03	5.03	5.06	5.02	5.05	5.03	19.88	10.0633333
	XVIII	2			584.5	14.2	14.1	13.9	14	14.05	5.01	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	5.02	19.79	10.04
58	XIX	1	09-sep-14	3	1053.8	23.1	23.2	23.6	23.6	23.38	4.97	5.02	5.02	5.02	5.03	5.02	5.01	19.74	10.0266667
	XX	2			831.4	18.9	19.1	18.9	19.1	19.00	5.01	5.02	5.03	5.03	5.02	5.03	5.02	19.82	10.0466667
55	XXI	1	08-sep-14	2	745.3	17.6	17.8	17.6	17.3	17.58	5.03	5.02	5.02	5.03	5.02	5.02	5.02	19.81	10.0433333
	XXII	2			651.8	15.7	14.5	15.6	15.5	15.33	5.02	5.03	5.02	5.02	5.02	5.02	19.81	10.0433333	

5.3.2 OBTENCIÓN DE PORCENTAJE DE VACÍOS: PRUEBA DE POROSIDAD TOTAL DEL MATERIAL

Las porciones Co3, Co4 y Co5 fueron introducidas a uno de los hornos de laboratorio que se encuentra en la Sección de Corrosión, se ajustó a una temperatura de 50°C como fue indicado en un inicio.



Figura 41 Horno para secar probetas con funcionamiento a los 50°C.



Se colocaron dentro del horno, y se pesaron cada 24 horas en la misma báscula electrónica que inicialmente se pesaron, se tomó registro, hasta que se cumplió con la condición para la ecuación del cambio de peso.

$$\Delta P = \frac{P(t) - P_o}{P_o} \leq 5\%$$

Donde: ΔP es el cambio de peso medido en el tiempo t

$P(t)$ es el valor en el tiempo t

P_o es el valor del peso original (medición anterior)

Para visualizar mejor los cambios en las mediciones también se realizaron gráficas de dispersión con ayuda de Excel donde se vaciaron los datos de los especímenes. Son presentadas más adelante en el capítulo de resultados.



Figura 42 Pesaje de especímenes para registro en tablas.

Sacados del horno se calculó el peso seco de cada rodaja, un dato muy importante de registrar, ya que después se someterían de nuevo a saturación y comenzarían a ganar humedad.



Después, en un recipiente plástico con tapa, se colocaron unas esponjas bastante grandes como para que dieran soporte a los corazones y además para evitar que se perdiera humedad, se rociaron también de agua para que se saturaran y que no absorbieran la humedad del concreto, los testigos fueron colocados encima de las esponjas, con cuidado de que no quedaran sumergidos de ninguna de sus partes en el líquido que se iba debajo a las esponjas del recipiente. Este tupper se mantuvo sellado y dentro del cuarto húmedo ubicado dentro de las mismas instalaciones del laboratorio, por el ambiente húmedo, también se evitó retroceso en el procedimiento. Como estaba sellado no podría escapar el agua que se evaporaba y además se encontraban libres de contaminación del laboratorio, se evitaba que le cayera otro tipo de partículas.

Diariamente se rociaron estos especímenes con el atomizador para que llegaran a un peso constante, es decir, hasta que llegaran a quedar saturados. Esto también fue debidamente registrado en tablas y también en gráficas para llevar correcto control de datos.

Nuevamente se utilizó la fórmula para cambio de peso en el tiempo:

$$\Delta P = \frac{P(t) - P_o}{P_o} \leq 5\%$$

Donde: ΔP es el cambio de peso medido en el tiempo t

$P(t)$ es el valor en el tiempo t

P_o es el valor del peso original (medición anterior)

Una vez llegado el punto de la saturación de humedad de las rodajas de concreto, se registró el dato como 'Peso saturado superficialmente seco'. Se llevaron los especímenes a una balanza, con ayuda de la canastilla se pudo medir el peso saturado sumergido. Teniendo estos resultados puede obtenerse el porcentaje de vacíos de los cilindros.

La porosidad total del concreto es determinada por medio de una fórmula donde se utilizan como datos los pesos obtenidos con los ensayos.



$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{50^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \times 100$$

Donde: W_{saturado} es el dato de peso saturado superficialmente seco

$W_{105^{\circ}\text{C}}$ es el peso secado al horno a 50°C

$W_{\text{sumergido}}$ es el dato que se toma del pesaje de las rodajas con la báscula, sumergido en el agua y saturadas

5.3.3 ENSAYOS ELÉCTRICOS: RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

El concreto puede sufrir fenómenos que pueden ocasionarle microfisuras en su masa, y que afectan su estructura interna. Por ello es necesario diagnosticar con precisión los daños en la estructura. Algunos de los métodos que se pueden utilizar en este diagnóstico son la determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) y la Resistividad Eléctrica. Ambas técnicas permiten estimar la calidad del concreto de una forma no destructiva, rápida y económica.

Uno de los fenómenos causante de microfisuras es el siguiente. Durante el fraguado del concreto se produce una reacción exotérmica, esto quiere decir que se libera calor que favorece a la evaporación y pérdida de agua de constitución de la mezcla, si se pierde agua también el volumen se pierde, por lo que el compuesto se contrae. Las fuerzas de contracción pueden vencer la escasa resistencia a tracción con la que se caracteriza el concreto a edad temprana, lo que llevaría a su fisuración. Esto casi no ocurre porque el proceso exotérmico, la evaporación y exudación van un poco por detrás del incremento de la resistencia, es decir, el efecto de tracción se ve compensado por la resistencia inicial. Si existen factores externos que contribuyan a la pérdida de agua, este proceso se ve descompensado y la retracción adelanta a la resistencia a tracción y puede ocasionar fisuras (IBERTIS, 2014).



Las pruebas de VPU y la de resistividad eléctrica, son las dos pruebas eléctricas, son similares y son muy relacionadas entre sí, por eso se explican dentro del mismo subcapítulo de este trabajo.

Las pruebas eléctricas fueron practicadas con las porciones de los corazones denominadas Co2.

Mientras estas porciones de los testigos se saturaron en el recipiente que se puso en el cuarto húmedo del laboratorio, se tomaron las lecturas de las pruebas eléctricas para saber, también por ese medio, que estaban llegando a la saturación. Hay que recordar que se saturaron los testigos por rocío de agua, nunca fueron sumergidos. Fueron rociados hasta la saturación, cuando llegaron a peso constante se encontraron listos para practicar pruebas físicas destructivas, descritas en este mismo trabajo de investigación más adelante.

Las mediciones se practicaron en los testigos del primer bloque, solo un par de veces y para el segundo bloque de testigos, se llevaron a cabo todos los días, ya que se tenía acceso al laboratorio para no perder la continuidad de la experimentación. Era importante llevar a cabo las mediciones lo más constante posible.

El ensayo de resistividad eléctrica para concreto fue ideado por la necesidad de calcular su durabilidad, se creó pensando que sería capaz de cuantificar todas las fases del proceso, desde la fabricación del material hasta su curado y endurecimiento. Es una prueba que da una medición opuesta a la de la conductividad.

La resistividad es un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del concreto, y por ello del grado de curado y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas a su matriz. Finalmente, tiene una relación directa con la velocidad de corrosión, al indicar el grado de humedad del material. Por todo ello es un parámetro que permite relacionar a la microestructura con el comportamiento durable.



La resistividad eléctrica se mide en ohm-cm u ohm-m. Depende del grado de saturación de humedad en sus espacios vacíos, de la hidratación de la pasta y de la existencia de sales disueltas en el agua que contiene. (DURAR, 1998)

El concreto como material compuesto, es un material que ha demostrado ser muy durable, pero en ambientes complicados y condiciones climáticas hostiles, hay que tener más cuidado con el control de la calidad de las estructuras, en lugares donde estén muy susceptibles al contacto con cloruros, o cuando sobrepasen la edad de los 50 años y puede sufrir corrosión del acero.

Como se mencionó antes, una de las condiciones iniciales para el nuevo Proyecto, era que la durabilidad fuera garantizada por la empresa que ganara el concurso, así que tiene que haber un diseño adecuado, pero además mucho control en cada fase ejecutiva del proyecto, esto no es nada fácil de asegurar si se trata de economizar al máximo, ya que cualquier acción de protección para las armaduras resulta tener un costo considerable, es por eso que sigue buscándose formas rápidas y sencillas de determinar las características de hormigones no permeables.

Por necesidad de quien fabrica y quien adquiere el concreto es ideal disponer de un ensayo no destructivo que permita el autocontrol del fabricante y además continuar haciendo mediciones a lo largo de su ciclo de vida.

Una de las cosas para lo que se utiliza esta prueba es para saber un poco de la microestructura del material, para informar de su porosidad y además de su contenido de agua. Lo bueno de que no sea destructivo es que puede realizarse muchas veces sin modificar el material.

Es necesario que los especímenes sean medidos con la precisión alcanzada con un vernier. Se toman datos de medición del diámetro y longitud promedio, que para registrarla en tablas, estos constituyen la parte del factor geométrico de esta.

La prueba de la resistividad eléctrica se practica con un aparato capaz de medir la resistencia al paso de impulsos eléctricos a través del material, consta de



dos electrodos que se conectan a unos discos delgados metálicos a través de unas pinzas y a su vez estos discos se colocan a cada uno de los extremos de los cilindros de forma que encuentren sus caras. Tiene una carátula que tiene una pequeña aguja móvil dentro de un rango que se encuentra graduado con varias líneas, tiene una más gruesa al centro.

Así como los testigos se tienen que cabecear para practicar las pruebas de compresión, en esta prueba también hay que hacerlo para de alguna manera garantizar la aplicación de electricidad uniformemente en toda el área transversal. La forma de "cabecear" es colocar una fibra húmeda entre el testigo y cada uno de los discos para que pueda conducir bien las cargas.



Figura 43 Máquina destinada a ensayo de resistividad eléctrica utilizada para el concreto a caracterizar.

Una vez verificando que están bien conectadas las pinzas de ambos extremos del cable, se chequea que la máquina se encuentre marcando 'ceros', se pueden fijar al testigo los discos delgados con algún material que no sea conductor eléctrico para evitar movimiento y para que no pueda afectar las lecturas de las mediciones.



Ahora que verificamos que estamos en condiciones para comenzar la prueba, se procede a manipular la máquina, funciona mediante la medición de resistencia de los ohmios (Ω : unidad de resistencia eléctrica) de las cargas eléctricas (los iones) que pueden atravesar por la fase acuosa que se encuentra ocupando los poros del cilindro puesto a prueba.

Para hacer las lecturas, se coloca correctamente el interruptor que se encuentra en la esquina inferior izquierda de la carátula de la máquina, se coloca hacia arriba donde indica 'High' ('Alto'), una vez colocado el interruptor se comienza a girar la perilla pequeña de la esquina inferior derecha para que nos dé el resultado en múltiplos de 10000, giramos hasta que en la carátula graduada la aguja dé un salto y atraviere la línea central, cuando esto sucede vamos a regresar la perilla al número anterior, ahora el interruptor se mueve hacia abajo en 'Low' ('Bajo') y luego se va moviendo la perilla grande céntrica para leer más exactamente en múltiplos de cientos hasta hacer que la aguja coincida con la línea gruesa. Se registra el resultado de la lectura en una tabla, para después, utilizando las fórmulas correspondientes, se puedan obtener cifras de la Resistividad.

Con esto podría concluirse porosidad de un material, que es un aspecto interesante, esto relacionando la resistencia del paso de la corriente eléctrica por la fase acuosa por los poros. Se puede dar idea de la cantidad de poros y además de si se encuentran conectados en la matriz del concreto. Esa relación es igual a la resistividad por el factor geométrico que involucra la altura del testigo o distancia entre electrodos que tienen que recorrer los iones, y además considerando el área transversal de paso de la corriente.

$$Re = \rho \frac{L}{A}$$

Donde ρ : Resistividad

Re: Resistencia

A: Área

L: Longitud



Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del concreto y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además si el concreto no está saturado de agua, la resistividad crece, por eso es un indicador de su grado de saturación. Por tanto, la resistividad es un indicador de la calidad del concreto al indicar su porosidad, y puede servir para el control del grado de curado. (Andrade & D'Andrea, 2011)

Los resultados se obtuvieron usando la fórmula de Resistividad, y fueron vaciados en una tabla, y posteriormente graficados con ayuda de Excel para tener una mejor idea de su comportamiento, puede hacerse comparaciones entre testigos.

Las conclusiones se dan de acuerdo al riesgo a la corrosión. Se observó que las mediciones de esta prueba fueron más inestables que las de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

El ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) se comenzó a desarrollar como técnica para probar materiales desde hace aproximadamente medio siglo. En la actualidad se utiliza para evaluar estructuras de concreto debido a su simplicidad, versatilidad y sobretodo repetibilidad. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá, y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio. La heterogeneidad del concreto y el hecho de que las estructuras con este material sean, casi siempre, construidas sin estricto control industrial, provocan una importante variabilidad en sus propiedades físicas, lo mencionado da lugar a que no exista un único valor de la velocidad para cada valor de la resistencia a la compresión de este material. (Solis Carcaño, Moreno, & Castillo Pak, 2004).

Los ensayos no destructivos como este son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los destructivos.



En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea que estén afectadas por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al concreto, se suele aplicar esta técnica con el fin de efectuar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio.

Efectuado éste, se podrán investigar las zonas con mayor daño con técnicas destructivas, y emitir una opinión más fundada sobre la estructura. En general se puede señalar, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad, entre otras características, a través de mediciones de la velocidad ultrasónica.

Los materiales que se ensayan con este método son heterogéneos, como la madera y el concreto, no se lleva a cabo con los metales porque se sabe que provocan una serie de irregularidades que afectan las lecturas.

Además la distancia entre terminales o transductores no debe de exceder a los 400mm. Es necesario utilizar un agente de acoplamiento, ya sea miel, vaselina o gel para que las terminales y el material se pongan bien en contacto con la superficie del concreto que es rugosa. En nuestro caso se utilizó un gel modelador de cabello y funcionó bastante bien; mientras se toman las lecturas, debemos tener fijas las terminales.

El equipo hace posible conocer algunas cualidades del material como: homogeneidad, la presencia de fisuras, los huecos, los cambios debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como la calidad relativa del concreto.

Esta prueba se realiza con un aparato especial para hacer las mediciones, es una especie de caja cerrada aparentemente con botones y varios orificios para enchufar. A diferencia del equipo de resistividad eléctrica, este consta de un botón de encendido, ya que es un aparato que funciona con energía eléctrica, para que se cargue su batería tiene un enchufe para conectar un cable que va directo a un



conector ordinario de electricidad, así que hay que cuidar que siempre esté cargado para poder usarlo.

Además tiene dos cables que se conectan a un par de sus orificios para poder colocar los transductores del aparato que son los que emiten el pulso eléctrico. Tiene una carátula donde se observa las lecturas, ahí ver los microsegundos que tarda en ir el pulso de un transductor al otro, dato que se utiliza en unas fórmulas específicas para el ensayo.

El equipo debe estar calibrado, para esto contiene un kit con una barra de calibración, una vez prendido el equipo tenemos que seguir las instrucciones para poder hacerla correctamente, la barra marca un valor que tienes que igualarse a la lectura con ayuda de los botones en la carátula del aparato, se menciona y no se explica completamente este proceso, ya que no es la intención de este trabajo.



Figura 44 Aparato para medición de Velocidad de Pulso Ultrasónico en especímenes.

Hay algunas ventajas que pueden enumerarse acerca del uso de este equipo, entre ellas podemos mencionar su poco peso, fácil uso y manejo, pero sobre todo la confiabilidad en sus resultados, ya que una forma rápida y sencilla permite conocer el estado que guarda el concreto del elemento ensayado.



Presenta como desventaja, que los cables transmisores en varias ocasiones presentan falsos contactos debido al exceso de movimiento, solo hay que tener el cuidado pertinente.

Hay que saber que no debe haber contacto de la persona, o ningún objeto de cualquier naturaleza con el testigo que se está sometiendo a la prueba, preparada la máquina y una vez seguros que están bien acopladas las terminales y el corazón, se suelta todo, se hace la lectura lo más pronto posible y se registra el dato en nuestra tabla. (CivilGeek, 2011)



Figura 45 Colocación y acoplamiento de especímenes para realizar ensayos de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Terminadas las lecturas, hay que limpiar el testigo y los transductores del gel que utilizamos para acoplar, así prevenimos riesgos de daño del equipo, y que el cilindro pueda tener alteración por contacto de tiempo prolongado.

Los resultados fueron vaciados en las tablas de registro, anotando los datos de identificación exacta del espécimen con número de eje de obra del cual se extrajo, el número de pila de dicho eje, su altura, el diámetro, área transversal, el dato que se registró de las lecturas, que es el tiempo en microsegundos que marcaba el equipo. Además una tabla que muestra los cambios que se fueron dando en las



lecturas, para comprobar que se detuvieron al momento que la variación entre la última y la anterior era menor al 5% así como se estipulaba inicialmente.

Los resultados de esta prueba son más uniformes que los de la Resistividad Eléctrica, se encuentran cerca de los 3,5 km/s, teniendo una diferencia entre los valores menor y mayor de valores de $\pm 15\%$. Aunque el valor que regularmente se toma para concretos durables es de 4,0 km/s (DURAR, 1997).

Esto podría de nuevo darnos ciertas dudas si el material es lo suficientemente denso para que pueda considerarse un concreto durable.

Con base en las Normas Mexicanas vigentes, se hizo un análisis de interpretación de resultados obtenidos y concluir su clasificación de acuerdo a calidad del concreto.

5.3.4 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Esta prueba se realizó a los especímenes marcados con la denominación Co2 que son exactamente los mismos que se utilizaron para realizar los ensayos eléctricos de Resistividad Eléctrica y Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada, $f'c$, del proyecto. Los resultados se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto. (IMCYC, 2006)

Como se trata de una prueba destructiva, hay que esperar hasta que las pruebas eléctricas han sido revisadas y aceptadas. Una vez aceptadas, se sacan los especímenes de los recipientes de saturación, se secan superficialmente con una franela para poder cabecearlos y, posteriormente, se someten a compresión uniaxial.



El diámetro del cilindro debe ser por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplea en el concreto.

Se registra el dato de masa de testigo antes de ser ensayado. El cabeceo se recomienda hacerlo unas dos horas antes, o si es posible, un día anterior a la prueba y puede utilizarse almohadillas de neopreno u otros materiales de alta resistencia aceptados.

El cabeceo se realiza la mayoría de veces con azufre porque es un material que se puede derretir y después se solidifica en poco tiempo y además tiene la suficiente resistencia. Nosotros utilizamos un material de apariencia grisasea que se está utilizando últimamente para cabeceo en el laboratorio de la Universidad, ya que se estudió y se comprobó que es lo suficientemente resistente para poder utilizarlo en sustitución del azufre. Se trata de un material denominado *Humo de Sílice*. (UNISON, 2002)

Debemos tener los materiales y herramientas necesarias para comenzar a realizar el cabeceo. Precisamos del equipo de seguridad conformado por lentes, guantes y bata en caso de que pudiéramos salpicarnos del material de cabeceo en estado líquido, ya que podemos quemarnos. El tamaño del molde de cabeceo se elige conforme al tamaño de los testigos a probar, el material con el que se hará la capa, el recipiente metálico donde se funde este material azufroso, una parrilla para calentar, aceite y brocha para aplicarlo.

Una vez que tenemos todo el material necesario procedemos a hacer las pruebas y los especímenes listos para ser ensayados, se puede fundir el material de cabeceo. Hay que usar los guantes para tomar una varilla de acero con la que se mueve el azufre para fundir. No hay que olvidar usar lentes, y no podemos asomarnos directamente en vertical al recipiente, ya que puede entrar en los ojos, causa muchas molestias y es perjudicial para la salud. Se utiliza un recipiente metálico designado para fundir el material sometiéndolo al fuego de la parrilla,



tenemos que moverlo constantemente y no dejar que se queme, hay que manejarlo cuidadosamente para no quemarnos.

Cuando se encuentra fundido el material de azufroso, se aceita la placa en forma de disco que tiene el molde de cabeceo debajo de la guía, y se comienza a vaciar con mucha precaución, entonces una vez llenado hasta donde se considere pertinente, se coloca encima el cilindro sin despegarlo de la guía para asegurar una posición vertical, y asegurar una buena aplicación de la capa, se deja caer poco a poco el testigo y esperamos a que una vez en contacto con la fundición, comience a solidificarse, mientras tanto procuramos no moverlo, después se saca y se procede a hacer lo mismo con todos los testigos restantes antes de que el fundido se solidifique o se queme si sigue al fuego. Cuando tenemos todos los corazones cabeceados de un lado se procede a realizar el mismo procedimiento pero del otro lado que falta de aplicar la capa. Esperamos a que enfríen.



Figura 46 Colocación de material de cabeceo para pruebas de compresión simple y especímenes ya listos para ensayar.

Ya cabeceados los cilindros, estamos en condiciones de comenzar con la aplicación de la prueba de compresión con ayuda de la Máquina Universal Tinius-Olsen, ubicada en la zona de máquinas de pruebas mecánicas del laboratorio. Solo



hay que recordar que hay que tomar medidas de la altura de los cilindros ya aplicada la capa de cabeceo y registrar los datos en nuestras tablas.

Para la aplicación de la prueba, primeramente tenemos que prender la máquina para que comience con su precalentamiento. Luego hay que verificar la pantalla, como ahora es táctil, es más fácil porque hay que hacer solo algunos ajustes sencillos de escala, dependiendo de la carga esperada y se coloca en posición inicial, es decir, que se encuentre completamente descargada. Se coloca el espécimen justo en el centro de las placas en forma de disco, ubicadas en la máquina para asegurar una aplicación uniforme de fuerza de compresión sobre toda el área.



Figura 47 Medición de longitud de especímenes con material de cabeceo para registro en las tablas y probeta colocada en placa de máquina lista para prueba de compresión simple

Colocado el testigo, hay que acercar la platina superior de la máquina universal lo más posible, con ayuda de un botón que está colocado en un costado, el único fin es agilizar el comienzo de aplicación de carga.

Hay que ir regulando la palanca de liberación de aceite y el interruptor de las velocidades, para que vaya a una velocidad moderada y constante, una vez que



comienzan ambas placas a tocar y presionar el corazón, se comienza a mover la aguja del disco graduado que se encuentra en la pantalla del equipo, hay que estar atentos para tomar bien las lecturas.

Cuando la aguja comienza a tener complicación para aumentar la marca de la carga, podemos reducir la velocidad, hay un punto en el que la aguja retrocede y lo hace un poco bruscamente, ahí debemos frenar la máquina y cesar la carga, no es necesario ver el cilindro estallar y volar en pedazos para poder saber que ha fallado, la pantalla arroja el resultado máximo alcanzado en unidades de carga, se registra, ahora se pone la máquina en retroceso para poder limpiar, rescatar todos los trozos que sea posible del concreto y reservarlos en las bolsas. Cuando están limpias las platinas, se coloca el próximo cilindro y se prueba anotando la carga máxima soportada. El proceso se repite hasta que ensayemos todas las probetas.



Figura 48 Manipulación de controles de máquina universal durante prueba de compresión simple y espécimen tronado.



Figura 49 Imagen de especímenes que ya han sido probados por compresión en la máquina Universal.

Una vez los cilindros probados hay retirar la capa de cabeceo con cuidado de no destruir mucho el concreto. Hay que empaquetarlos rescatando todos los pedazos que sea posible, más adelante se enviaron en un paquete al IMT para que se realizaran las pruebas químicas que no podemos realizar en este Laboratorio Los resultados de dichas pruebas no son parte de esta tesis.



Figura 50 Testigos ensayados sin material de cabeceo empacados para enviar a IMT.



Figura 51 Testigos ensayados sin material de cabeceo empacados para enviar a IMT con anotaciones dentro de las bolsas.

El material de cabeceo utilizado que no se encuentre contaminado con el concreto se reutiliza después para otras pruebas, puede volverse a fundir, así que es bueno guardar lo que pueda servir para reciclarlo y así contribuir un poco a no producir tantos desechos que pueden ser después muy contaminantes para el medio ambiente.



Figura 52 Material de reciclaje para cabeceo de cilindros de concreto.



En la sección de resultados se han colocado las tablas con los datos del ensayo. Se construyeron gráficas de barras con los datos de las tablas para comparar resistencias de los testigos. La resistencia a la compresión se reporta en las unidades del Sistema Internacional de Unidades para comparar con la $f'c$ (resistencia especificada) estipulada en el proyecto.

5.3.5 ESTUDIO DE ABSORCIÓN CAPILAR: ENSAYO DE GÖRAN FAGERLUND

Este fue el último ensayo del protocolo de pruebas establecido por cuestión alcance del laboratorio, y la experiencia del personal del Laboratorio, se trata de una prueba llamada Ensayo de Fagerlund que sirve para tener resultados de la velocidad de absorción capilar, también llamada sortividad.

La porosidad en el concreto endurecido, es uno de los parámetros que más influyen en el mecanismo de transporte de agentes agresivos hacia el interior de una estructura y volverla vulnerable (DURAR, 1998). Más particularmente, la porosidad efectiva que es la porosidad interconectada, y conectada además con el exterior. Tiene influencia en el intercambio de humedad con el medio, y de que se lleve a cabo la penetración de agentes perjudiciales para el material.

El porcentaje de porosidad efectiva de la masa del compuesto, está considerado una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a los agentes agresivos. Además se ha comprobado que cuando el agregado utilizado para conformarlo es poroso (que puede absorber una importante cantidad de agua), se incrementará con ello la porosidad y permeabilidad general del concreto. (Howland & Martín, 2013)

La capacidad y la velocidad de succión del concreto, es un parámetro asociado con la durabilidad de las estructuras. El método es sensible a los cambios de las características de la mezcla y, principalmente, a las condiciones de curado.



Por lo tanto resulta una herramienta eficaz para especificaciones basadas en el desempeño, dependiendo el resultado del contenido de humedad inicial del concreto. Los valores de medición obtenidos deben ser adecuadamente interpretados, en función de las características propias del ensayo, el tamaño de las probetas o testigos, el acondicionamiento previo, entre otras cosas. Por este motivo, salvo que las condiciones establecidas se respeten estrictamente, los valores que se obtengan sólo tienen valor comparativo. (Sakurai, 2009)

Existe en México una Norma para regular este tipo de prácticas denominada NMX-C-504-ONNCCE-2015 bajo el título INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR EN CONCRETO HIDRÁULICO- MÉTODO DE ENSAYO. Establece el método de ensayo para la medición de las características de absorción capilar (sortividad) en el concreto hidráulico. Esta Norma Mexicana ya fue descrita en este trabajo de investigación.

Esta prueba describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos, a través de tres coeficientes: resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva.

Las rodajas que se utilizaron fueron las denominadas Co3, Co4 y Co5, que se mantuvieron en saturación y luego secado para obtener resultados de porcentaje de vacíos del concreto. Pero tiene que llevarse a cabo hasta que están completamente secados por el horno, y que tengan peso constante.

Debe de tomarse registro de pesos de especímenes completamente secos. A menos que ya se contara con el dato anteriormente.

Para la elaboración de esta prueba se recomienda un espesor de rodajas de 30mm aproximadamente para que entregue resultados confiables.



Figura 53 Rodajas de concreto puestas dentro de horno para secado.

En nuestro caso las alturas se presentaban adecuadas como para practicar sin problemas esta prueba, ya que fue prevista su aplicación a estas porciones.



Figura 54 Imagen de rodajas de cilindros a probar.

Las rodajas deben absorber el agua solamente por abajo, por lo cual, las caras laterales del testigo tienen que recubrirse con una capa de parafina, para esto



hay que derretirla y después aplicarla. Esa es una forma de evitar sesgos en la prueba, y medir realmente su capilaridad.

Una vez con la parafina colocada hay que pesar los especímenes también y anotar los datos en nuestras tablas de control.

Se prepara un recipiente plástico que no tenga fugas y que tenga capacidad suficiente para colocar todos los especímenes, considerando una pequeña separación entre ellos. En el fondo del recipiente se coloca unas esponjas que estarán saturadas en agua.

Se colocan en orden las rodajas dentro del recipiente en orden, planas sobre la esponja.



Figura 55 Especímenes durante la prueba de Fagerlund.

Una vez que se han colocado las rodajas, nos aseguramos de que, alrededor de las rodajas haya una altura de espejo de agua de aproximadamente 3 milímetros por encima de la cara inferior de los corazones, para que pueda irse absorbiendo poco a poco. Se tiene que estar cuidando mantener esta altura durante la realización hasta la última lectura. La báscula debe estar a disposición del que ensaya.



Figura 56 Testigos en proceso de aplicación de la prueba de Fagerlund.

Como la absorción se da relativamente rápido entonces hay que hacer pesajes muy continuamente, cada 5, 10, 15 y 30 minutos, 1, 2, 3, 4, 6, 24 y 48 horas. Se utilizó la misma báscula electrónica con la que se pesaron los testigos desde un principio.

Para hacer las lecturas es necesario primero secar las rodajas superficialmente y luego colocarlas en la báscula.



Figura 57 Especímenes siendo secados superficialmente para pasar a pesaje y posteriormente a registro de datos.

De los resultados obtenidos se calcula absorción capilar considerada como masa de agua por unidad de área absorbida por los vacíos, cuando el concreto se



encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva, lo accesible que es para los líquidos y para los agentes agresivos ambientales.

El método de ensayo de absorción capilar propuesto por Fagerlund (de Normativa Sueca) se utiliza para describir la cinética de absorción del agua en concreto, con ayuda de tres coeficientes: (ϵ_e) porosidad efectiva, (k , también llamado S_m en algunas fuentes) absorción capilar, y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m está en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

Los coeficientes se pueden calcular con los datos obtenidos de mediciones, con las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{t}{z^2} \text{ (s / m}^2\text{)}$$

Donde m : resistencia a la penetración del agua

z : profundidad de penetración del agua en el tiempo t

$$k = \frac{(Wt - W_0) / A}{\sqrt{t}} \text{ (kg / m}^2 \text{ s}^{0.5}\text{)} = S_m$$

Donde Wt : masa de testigo al tiempo t

W_0 : masa inicial de testigo

$$\epsilon_e = \frac{k \sqrt{m}}{1000} \text{ (\%)}$$

El coeficiente S_m puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(Wt - W_0) / A$ en función de \sqrt{t} .



El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$.

Con la información anterior, la absorción capilar, S , se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \text{ (mm / h}^{0.5}\text{) o (m / s}^{0.5}\text{)}$$



CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE PRUEBAS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de las pruebas de laboratorio practicadas a los testigos de concreto.

6.1 PRUEBA DE PORCENTAJE DE VACÍOS

PRUEBA DE PORCENTAJE DE POROSIDAD

Canastilla sin sumergir: 32 grs
 Canastilla sumergida: 26 grs

$$\% \text{ Vacíos} = ((\text{Masa saturada} - \text{Masa seca}) / (\text{Masa saturada} - \text{Masa sumergida})) * 100$$

Tabla 19. Resultados de testigos extraídos de pilas, primer bloque, ejes 82-70.

PORCENTAJES DE VACIO					
Eje	Muestra	Masa húmeda (gr)	Masa sumergida (gr)	Masa seca (gr)	Porcentaje de vacíos
82	I Co3	178.7	99.1	163.0	19.72
82	I Co4	192.8	107.4	174.9	20.96
82	III Co3	169.8	88.9	144.5	31.27
79	IV Co3	149.9	85.0	137.9	18.49
79	V Co3	194.2	111.3	180.6	16.41
76	VI Co3	150.6	82.1	133.6	24.82
76	VI Co4	157.6	86.5	140.2	24.47
76	VII Co3	192.3	102.8	168.1	27.04
73	VIII Co3	131.1	73.9	118.7	21.68
73	IX Co3	148.3	82.5	133.7	22.19
73	IX Co3	139.8	78.2	127.1	20.62
70	X Co3	120.5	67.7	109.3	21.21
70	X Co4	121.6	68.1	109.0	23.55
70	XII Co3	143.2	78.8	127.9	23.76
70	XII Co4	137.5	75.7	122.6	24.11



Tabla 20. Resultados de testigos extraídos de pilas, primer bloque, ejes 70-55.

PORCENTAJES DE VACIO					
Eje	Muestra	Masa húmeda (gr)	Masa sumergida (gr)	Masa seca (gr)	Porcentaje de vacíos
70	XII Co5	198.8	109.6	178.5	22.76
67	XIII Co3	192.7	108.1	178.0	17.38
67	XIV Co3	192.7	108.6	177.9	17.60
64	XV Co4	153.8	87.6	141.1	19.18
64	XV Co5	152.3	85.2	138.6	20.42
64	XVI Co3	119.7	68.8	109.9	19.25
61	XVII Co3	185.4	97.8	161.3	27.51
61	XVIII Co3	126.4	65.8	107.4	31.35
58	XIX Co3	120.4	67.6	108.5	22.54
58	XX Co3	133.7	75.3	121.2	21.40
55	XX Co4	165.3	92.4	149.4	21.81
55	XXI Co3	130.3	72.2	115.7	25.13
55	XXI Co4	145.8	80.1	130.5	23.29
55	XXII Co3	171.0	92.9	151.4	25.10

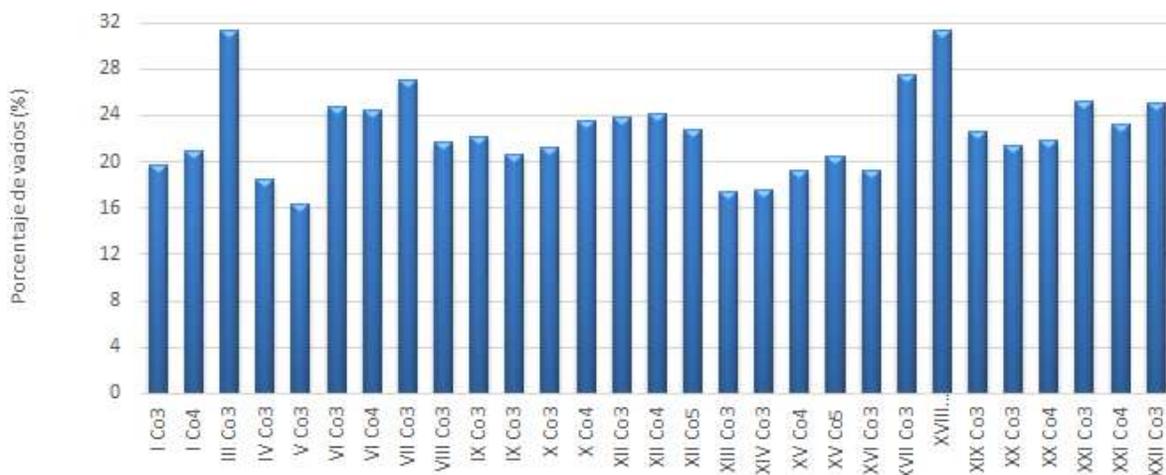


Figura 58. Gráfica de barras de resultados de Porcentaje de vacíos, primer bloque.



Tabla 21. Resultados prueba de Porcentaje de Vacíos. Segundo Bloque.

PORCENTAJES DE VACÍO						
Elemento	Eje	Muestra	Masa húmeda (gr)	Masa sumergida (gr)	Masa seca (gr)	Porcentaje de vacíos
Cabezal	82	1	152.8	84.1	144.9	11.50
Cabezal	79	3	227.3	152.2	208.4	25.17
Cabezal	70	10	152.9	112.4	144.2	21.48
Cabezal	51	11	140.6	106.7	132.8	23.01
Cabezal	49	14	146.7	110.9	137.2	26.54
Cabezal	46	15	210.5	144.8	195.0	23.59
Cabezal	43	17	158.7	116.3	147.0	27.59
Cabezal	38	19	135.4	102.5	124.9	31.91
Pila 3	52	22	128.0	97.4	119.7	27.12
Pila 2	49	23	82.4	72.1	74.7	74.76
Pila 1	46	25	122.9	95.1	111.2	42.09
Pila 3	43	27	139.3	103.6	125.6	38.38
Pila 2	40	30	118.2	87.0	97.7	65.71
Pila*3(1)	30	35	148.8	109.4	135.8	32.99
Pila 3	28	38	112.1	88.8	100.7	48.93
Pila 4	25	40	158.9	112.9	141.1	38.70

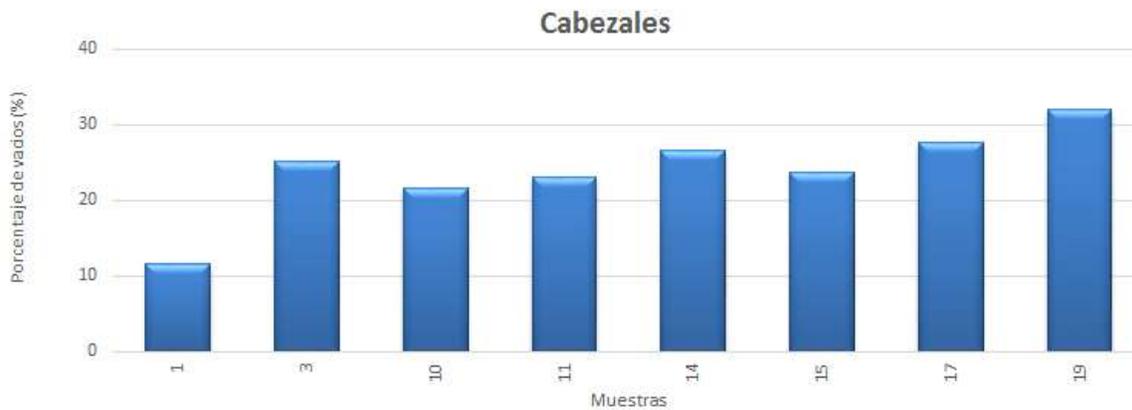


Figura 59 Resultados de segundo bloque, cabezales.

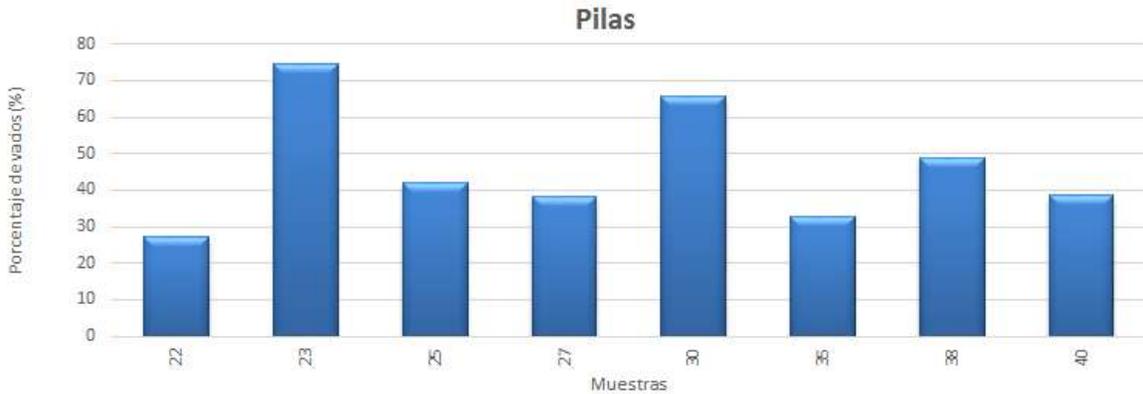


Figura 60. Resultados de segundo bloque, pilas.

Tabla 22. Guía de calidad relativa con base en porosidad total (DURAR, 1998).

% Vacíos o Poros	Clasificación del concreto (DURAR)
$\leq 10\%$	Concreto de buena calidad y compacidad
10% al 15%	Concreto de moderada calidad
$> 15\%$	Concreto de durabilidad inadecuada

- Las muestras 23, 30 y 38 tienen una porosidad alta, el concreto mostraba una clara porosidad en la superficie. Todas las muestras examinadas, a excepción de la muestra 1 de los cabezales, tienen porcentaje de vacíos mayores al 15%, por lo que se puede clasificar como: concreto de **durabilidad inadecuada**, de acuerdo al criterio establecido por la red temática DURAR y la ASTM-C-642-2013.



6.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Tabla 23. Resultados de mediciones a testigos primer bloque, ejes 82-70

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Resistencia eléctrica (1er lectura) (Ω)	Resistencia eléctrica (2a lectura) (Ω)	Resistencia eléctrica (promedio) (Ω)	Resistividad eléctrica promedio
82	1	II	Co2	8.8	5.02	19.81	8200.00	7600.00	7900.00	17.78
		III	Co2	9.73	4.98	19.45	7600.00	7000.00	7300.00	14.59
79	2	IV	Co2	9.19	5.01	19.73	10400.00	9500.00	9950.00	21.36
		V	Co2	9.98	5.02	19.75	14000.00	13000.00	13500.00	26.72
76	3	VI	Co2	9.95	4.99	19.53	4900.00	4300.00	4600.00	9.03
		VII	Co2	10.11	5.00	19.61	5500.00	5100.00	5300.00	10.28
73	2	VIII	Co2	9.95	5.02	19.81	11200.00	11100.00	11150.00	22.19
		IX	Co2	9.98	5.03	19.84	9700.00	8700.00	9200.00	18.29
70	1	X	Co2	10.17	5.00	19.64	10000.00	8400.00	9200.00	17.76
PROMEDIOS				9.76	5.01	19.68	9055.56	8300.00	8677.78	17.6

Tabla 24. Resultados de mediciones a testigos primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	29-dic			05-ene			06-ene		
							Resistencia eléctrica (1er lectura)	t para VPU (1er lectura)	VPU (m/s) (1er lectura)	Resistencia eléctrica (2da lectura)	t para VPU (2da lectura)	VPU (m/s) (2da lectura)	Resistencia eléctrica (3er lectura)	t para VPU (3er lectura)	VPU (m/s) (3er lectura)
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	3700	25.5	2945	3900	23.4	3209	3900	20.1	3736
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	5100	24	4033	5500	23.5	4119	5900	23.6	4102
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	5600	25.4	3925	5900	24.5	4069	6000	24.5	4069
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	5800	23.6	4110	5900	23.2	4181	6200	22.9	4236
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	5400	25.2	3861	5600	24	4054	6300	23.6	4123
61	2	XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	7000	26.3	3639	7100	22.9	4179	7800	22.7	4216
		XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	2200	30	3263	2500	29.3	3341	2400	29.2	3353
58	3	XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	3900	28.5	3519	4000	26.5	3785	4200	26.4	3799
		XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	5000	28.2	3457	5800	23.7	4114	5800	24.1	4046
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	5900	28.2	3418	6800	23.7	4068	7100	23.6	4085
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	4600	29.5	3380	5100	25	3988	5400	24.9	4004
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	2300	27.6	3576	2500	26.8	3683	2700	26.5	3725
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	2500	28.9	3484	3000	26	3873	3100	26.3	3829

EJE	# PILA	# Muestra	07-ene			08-ene			09-ene			12-ene		
			Resistencia eléctrica (4ta lectura)	t para VPU (4ta lectura)	VPU (m/s) (4ta lectura)	Resistencia eléctrica (5ta lectura)	t para VPU (5ta lectura)	VPU (m/s) (5ta lectura)	Resistencia eléctrica (6ta lectura)	t para VPU (6ta lectura)	VPU (m/s) (6ta lectura)	Resistencia eléctrica (7ma lectura)	t para VPU (7ma lectura)	VPU (m/s) (7ma lectura)
70	1	XI	3800	20.6	3646	4000	20.8	3611	4000	21	3576	4100	20.6	3646
67	2	XIII	5900	23.6	4102	6300	24.4	3967	6500	23.6	4102	6100	23.3	4155
		XIV	6300	24.8	4020	6500	24.7	4036	6400	24.6	4053	6000	24.6	4053
64	1	XV A	6100	22.9	4236	6700	23.8	4076	6400	23.1	4199	6100	23.4	4145
		XV B	5700	24.1	4037	6600	24.6	3955	6300	23.8	4088	6200	23.6	4123
		XVI	7100	22.5	4253	8200	22.9	4179	8100	22.8	4197	7900	22.9	4179
61	2	XVII	2500	28.6	3423	2600	28.8	3399	2500	30.1	3252	2700	28.8	3399
		XVIII	4000	26.5	3785	4300	26.6	3771	4300	27.3	3674	4300	26.4	3799
58	3	XIX A	5600	23.9	4079	6100	24.3	4012	6000	23.8	4097	5800	23.7	4114
		XIX B	6800	23.9	4033	6900	24.8	3887	7200	24.1	4000	7300	23.6	4085
		XX	5000	24.6	4053	5300	24.9	4004	5500	24.8	4020	5100	24.8	4020
55	2	XXI	2500	26.4	3739	2800	26.6	3711	2800	27	3656	2700	26.4	3739
		XXII	2700	26.4	3814	3000	26.1	3858	3200	28.1	3584	3000	27.3	3689



Tabla 25. Porcentaje de variación entre últimas lecturas, cuando se aprueba detener las pruebas.

EJE	# PILA	# Muestra	% Cambio últimas lecturas Resistividad
70	1	XI	2.44
67	2	XIII	6.56
		XIV	6.67
64	1	XV A	4.92
		XV B	1.61
		XVI	2.53
61	2	XVII	7.41
		XVIII	0.00
58	3	XIX A	3.45
		XIX B	1.37
		XX	7.84
55	2	XXI	3.70
		XXII	6.67

Tabla 26. Resistencia eléctrica de testigos, primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Resistencia eléctrica							% Cambio últimas lecturas
							29-dic 1	05-ene 8	06-ene 9	07-ene 10	08-ene 11	09-ene 12	12-ene 15	
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	3700	3900	3900	3800	4000	4000	4100	2.44
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	5100	5500	5900	5900	6300	6500	6100	6.56
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	5600	5900	6000	6300	6500	6400	6000	6.67
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	5800	5900	6200	6100	6700	6400	6100	4.92
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	5400	5600	6300	5700	6600	6300	6200	1.61
		XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	7000	7100	7800	7100	8200	8100	7900	2.53
61	2	XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	2200	2500	2400	2500	2600	2500	2700	7.41
		XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	3900	4000	4200	4000	4300	4300	4300	0.00
58	3	XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	5000	5800	5800	5600	6100	6000	5800	3.45
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	5900	6800	7100	6800	6900	7200	7300	1.37
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	4600	5100	5400	5000	5300	5500	5100	7.84
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	2300	2500	2700	2500	2800	2800	2700	3.70
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	2500	3000	3100	2700	3000	3200	3000	6.67

Tabla 27. Variaciones entre mediciones de resistencia eléctrica de testigos, primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Δ Resistencia eléctrica entre lecturas						
							29-dic 1	05-ene 8	06-ene 9	07-ene 10	08-ene 11	09-ene 12	12-ene 15
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	0	5.13	0.00	2.63	5.00	0.00	2.44
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	0	7.27	6.78	0.00	6.35	3.08	6.56
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	0	5.08	1.67	4.76	3.08	1.56	6.67
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	0	1.69	4.84	1.64	8.96	4.69	4.92
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	0	3.57	11.11	10.53	13.64	4.76	1.61
		XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	0	1.41	8.97	9.86	13.41	1.23	2.53
61	2	XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	0	12.00	4.17	4.00	3.85	4.00	7.41
		XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	0	2.50	4.76	5.00	6.98	0.00	0.00
58	3	XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	0	13.79	0.00	3.57	8.20	1.67	3.45
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	0	13.24	4.23	4.41	1.45	4.17	1.37
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	0	9.80	5.56	8.00	5.66	3.64	7.84
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	0	8.00	7.41	8.00	10.71	0.00	3.70
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	0	16.67	3.23	14.81	10.00	6.25	6.67

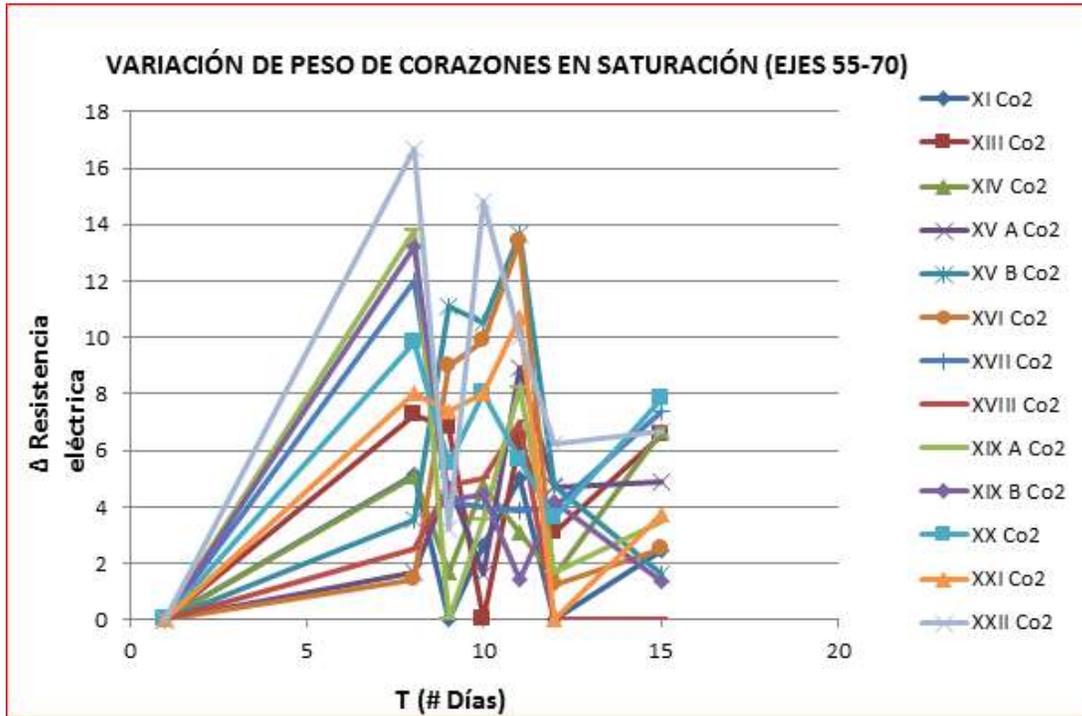


Figura 61. Gráfica de variaciones de resistencia eléctrica, practicada a especímenes en saturación, primer bloque, ejes 70-55

Tabla 28. Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 1, ejes 82-67, muestras II-XIII.

Resistividad Eléctrica						
Eje	Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (ohms)	Resistividad eléctrica K ohms-cm	Riesgo a la corrosión
82	II	19.81	8.8	7600	17.10	Riesgo Moderado
82	III	19.45	9.73	7000	13.99	Riesgo Moderado
79	IV	19.73	9.19	9500	20.39	Riesgo Moderado
79	V	19.75	9.98	13000	25.73	Riesgo Moderado
76	VI	19.53	9.95	4300	8.44	Alto riesgo
76	VII	19.61	10.11	5100	9.89	Alto riesgo
73	VIII	19.81	9.95	11100	22.09	Riesgo Moderado
73	IX	19.84	9.98	8700	17.30	Riesgo Moderado
70	X	19.63	10.17	8400	16.22	Riesgo Moderado
70	XI	19.78	7.51	4100	10.80	Riesgo Moderado
67	XIII	19.71	9.68	6100	12.42	Riesgo Moderado



Tabla 29. Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 1, ejes 67-55, muestras XIV-XXII.

Resistividad Eléctrica						
Eje	Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (ohms)	Resistividad eléctrica K ohms-cm	Riesgo a la corrosión
67	XIV	19.81	9.97	6000	11.92	Riesgo Moderado
64	XV A	19.83	9.70	6100	12.47	Riesgo Moderado
64	XV B	19.87	9.73	6200	12.66	Riesgo Moderado
64	XVI	19.92	9.57	7900	16.45	Riesgo Moderado
61	XVII	19.88	9.79	2700	5.48	Alto riesgo
61	XVIII	19.79	10.03	4300	8.49	Alto riesgo
58	XIX A	19.71	9.75	5800	11.73	Riesgo Moderado
58	XIX B	19.74	9.64	7300	14.95	Riesgo Moderado
58	XX	19.82	9.97	5100	10.14	Riesgo Moderado
55	XXI	19.81	9.87	2700	5.42	Alto riesgo
55	XXII	19.81	10.07	3000	5.90	Alto riesgo

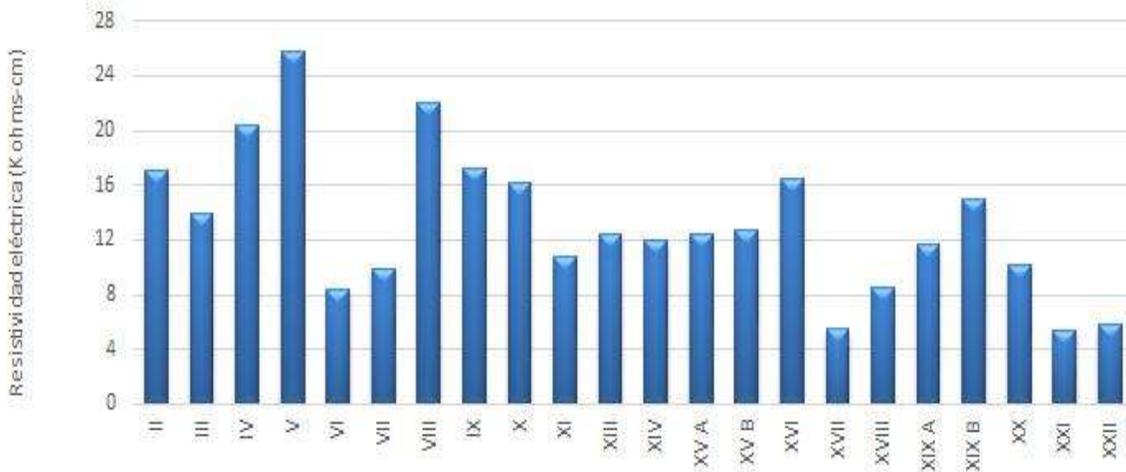


Figura 62. Gráfica de barras de resultados de prueba de Resistividad eléctrica, muestras II-XXII



Tabla 30. Resultados de Resistividad en Cabezales, bloque 2, muestra 1-14.

Resistividad Eléctrica							
Elemento	Eje	Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (ohms)	Resistividad eléctrica K ohms-cm	Riesgo a la corrosión
Cabezal	82	1	19.64	9.76	5700	11.47	Riesgo Moderado
Cabezal	82	2	19.56	9.59	5800	11.83	Riesgo Moderado
Cabezal	79	4	19.56	9.48	3900	8.05	Alto riesgo
Cabezal	76	5	19.56	9.95	5600	11.01	Riesgo Moderado
Cabezal	76	6	19.56	8.43	5100	11.83	Riesgo Moderado
Cabezal	73	7	19.56	8.36	3000	7.02	Alto riesgo
Cabezal	73	8	19.64	10.6	5100	9.45	Alto riesgo
Cabezal	70	9	19.56	9.23	4200	8.90	Alto riesgo
Cabezal	70	10	19.64	10.37	5600	10.60	Riesgo Moderado
Cabezal	51	11	19.64	9.95	6300	12.43	Riesgo Moderado
Cabezal	51	12	19.48	9.50	6500	13.33	Riesgo Moderado
Cabezal	49	13	19.40	9.50	4100	8.37	Alto riesgo
Cabezal	49	14	19.56	8.93	7200	15.77	Riesgo Moderado

Tabla 31. Resultados de Resistividad en Cabezales y pilas, bloque dos, muestras 15-28.

Resistividad Eléctrica							
Elemento	Eje	Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (ohms)	Resistividad eléctrica K ohms-cm	Riesgo a la corrosión
Cabezal	46	15	19.64	9.82	4700	9.40	Alto riesgo
Cabezal	46	16	19.56	9.20	4500	9.57	Alto riesgo
Cabezal	43	17	19.48	8.35	5200	12.13	Riesgo Moderado
Cabezal	43	18	19.64	9.46	5100	10.59	Riesgo Moderado
Cabezal	38	19	19.64	8.84	6700	14.88	Riesgo Moderado
Cabezal	38	20	19.64	8.72	4000	9.01	Alto riesgo
Pila 3	52	21	15.34	8.57	3100	5.55	Alto riesgo
Pila 3	52	22	15.34	8.53	4100	7.38	Alto riesgo
Pila 2	49	23	15.27	8.06	4100	7.77	Alto riesgo
Pila 2	49	24	15.34	8.19	3400	6.37	Alto riesgo
Pila 1	46	25	15.48	8.66	4200	7.51	Alto riesgo
Pila 1	46	26	15.41	8.31	5300	9.83	Alto riesgo
Pila 3	43	27	15.41	8.38	3500	6.44	Alto riesgo
Pila 3	43	28	15.41	7.77	2800	5.55	Alto riesgo



Tabla 32. Resultados de Resistividad en pilas, bloque dos, muestras 29-40.

Resistividad Eléctrica							
Elemento	Eje	Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (ohms)	Resistividad eléctrica K ohms-cm	Riesgo a la corrosión
Pila 2	40	29	15.34	7.98	1000	1.92	Alto riesgo
Pila 2	40	30	15.34	8.10	1000	1.89	Alto riesgo
Pila 1	37	31	15.34	8.17	2200	4.13	Alto riesgo
Pila 1	37	32	15.34	7.76	2400	4.75	Alto riesgo
Pila 2	34	33	15.34	7.99	2100	4.03	Alto riesgo
Pila 2	34	34	15.34	8.26	2100	3.90	Alto riesgo
Pila 1	30	35	15.41	8.59	5600	10.05	Riesgo Moderado
Pila 1	30	36	15.48	8.25	5500	10.32	Riesgo Moderado
Pila 3	28	37	15.41	8.80	3600	6.31	Alto riesgo
Pila 3	28	38	15.34	8.17	3600	6.76	Alto riesgo
Pila 2	25	39	15.41	9.05	5100	8.69	Alto riesgo
Pila 2	25	40	15.34	8.71	4800	8.46	Alto riesgo

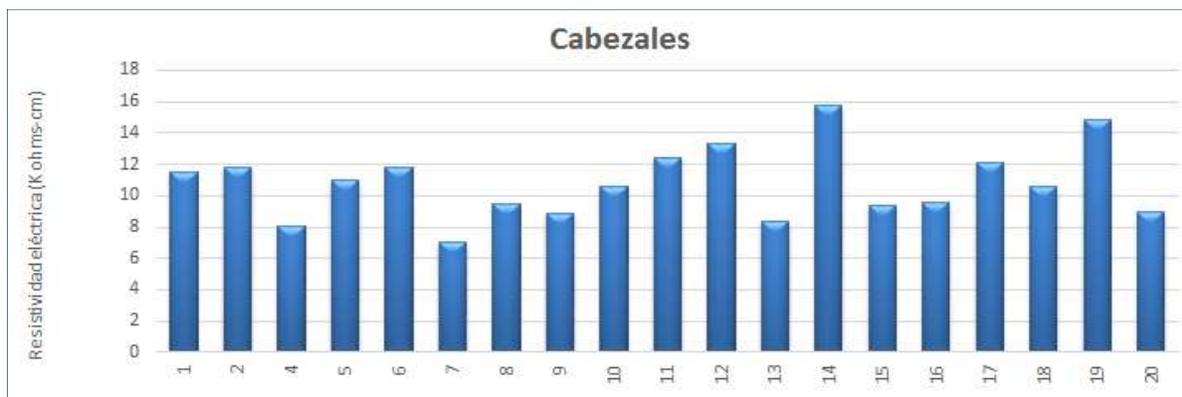


Figura 63. Gráfica de barras con resultados en Cabezales.

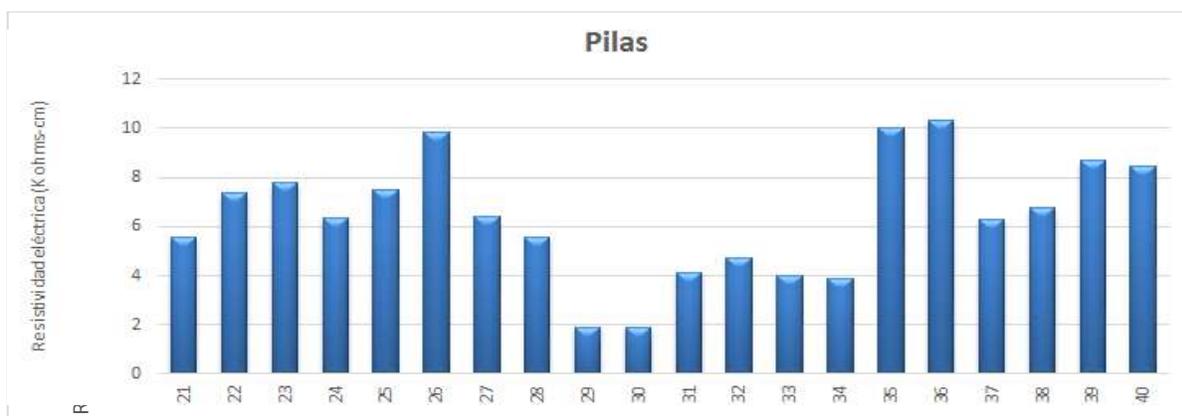


Figura 64. Gráfica de barras con resultados en Pilas.



El criterio tomado de la calidad relativa es el siguiente:

Tabla 33. Tabla de Criterio de riesgos, de acuerdo a valores proporcionados por DURAR (1998).

Riesgo de corrosión de acuerdo a la resistividad (DURAR)	
$P > 200 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > P > 10 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Riesgo moderado
$P < 10 \text{ K}\Omega - \text{cm}$	Alto riesgo

Tabla 34. Valor de resistividad estipulado en el diseño de mezcla de concreto.

Resistividad eléctrica estipulada en proyecto
50 KΩ – cm

- Los resultados de la prueba de Resistividad Eléctrica son preocupantes, porque en el proyecto se estableció que se esperaban entre los 50 y 100 k Ω -cm, los obtenidos son muy deficientes, se encuentran en el rango entre 5 y 25 k Ω -cm, o menores. De acuerdo a la Red DURAR (1998), se considera de **riesgo moderado**.

6.3 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Tabla 35. Resultados de Velocidad de Pulso ultrasónico, primer bloque, ejes 82-70.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	t para VPU (1er lectura) (μ s)	VPU (m/s) (1er lectura)	t para VPU (2da lectura) (μ s)	VPU (m/s) (2da lectura)	VPU promedio (m/s)
82	1	II	Co2	8.8	5.02	19.81	22.3	3946	22.9	3843	3894.49
		III	Co2	9.73	4.98	19.45	31.0	3139	26.7	3644	3391.45
79	2	IV	Co2	9.19	5.01	19.73	22.3	4121	22.9	4013	4067.09
		V	Co2	9.98	5.02	19.75	22.8	4377	24.0	4158	4267.76
76	3	VI	Co2	9.95	4.99	19.53	26.4	3769	26.9	3699	3733.91
		VII	Co2	10.11	5.00	19.61	26.4	3830	30.3	3337	3583.09
73	2	VIII	Co2	9.95	5.02	19.81	23.8	4181	24.5	4061	4120.95
		IX	Co2	9.98	5.03	19.84	25.3	3945	25.6	3898	3921.55
70	1	X	Co2	10.17	5.00	19.64	24.4	4168	25.0	4068	4118.02
PROMEDIOS				9.76	5.01	19.68	25.0	3941.67	25.4	3857.96	3899.81



Tabla 36. Resultados de Velocidad de Pulso ultrasónico, primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Velocidad de Pulso Ultrasónico							% Cambio últimas lecturas
							29-dic 1	05-ene 8	06-ene 9	07-ene 10	08-ene 11	09-ene 12	12-ene 15	
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	2945	3209	3736	3646	3611	3576	3646	1.90
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	4033	4119	4102	4102	3967	4102	4155	1.27
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	3925	4069	4069	4020	4036	4053	4053	0.00
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	4110	4181	4236	4236	4076	4199	4145	1.30
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	3861	4054	4123	4037	3955	4088	4123	0.84
		XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	3639	4179	4216	4253	4179	4197	4179	0.44
61	2	XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	3263	3341	3353	3423	3399	3252	3399	4.32
		XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	3519	3785	3799	3785	3771	3674	3799	3.30
58	3	XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	3457	4114	4046	4079	4012	4097	4114	0.42
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	3418	4068	4085	4033	3887	4000	4085	2.07
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	3380	3988	4004	4053	4004	4020	4020	0.00
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	3576	3683	3725	3739	3711	3656	3739	2.22
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	3484	3873	3829	3814	3858	3584	3689	2.85

Tabla 37. Variaciones entre lecturas de VPU, primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Δ Velocidad de Pulso Ultrasónico entre lecturas						
							29-dic 1	05-ene 8	06-ene 9	07-ene 10	08-ene 11	09-ene 12	12-ene 15
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	0	8.24	14.10	2.49	0.97	0.96	1.90
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	0	2.08	0.43	0.00	3.39	3.28	1.27
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	0	3.54	0.00	1.22	0.40	0.40	0.00
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	0	1.69	1.29	0.00	3.93	2.94	1.30
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	0	4.76	1.67	2.12	2.07	3.25	0.84
		XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	0	12.93	0.87	0.88	1.78	0.44	0.44
61	2	XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	0	2.33	0.34	2.05	0.70	4.51	4.32
		XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	0	7.02	0.38	0.38	0.38	2.63	3.30
58	3	XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	0	15.96	1.69	0.83	1.67	2.06	0.42
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	0	15.96	0.42	1.27	3.77	2.82	2.07
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	0	15.25	0.40	1.20	1.22	0.40	0.00
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	0	2.90	1.12	0.38	0.76	1.50	2.22
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	0	10.03	1.15	0.38	1.14	7.66	2.85

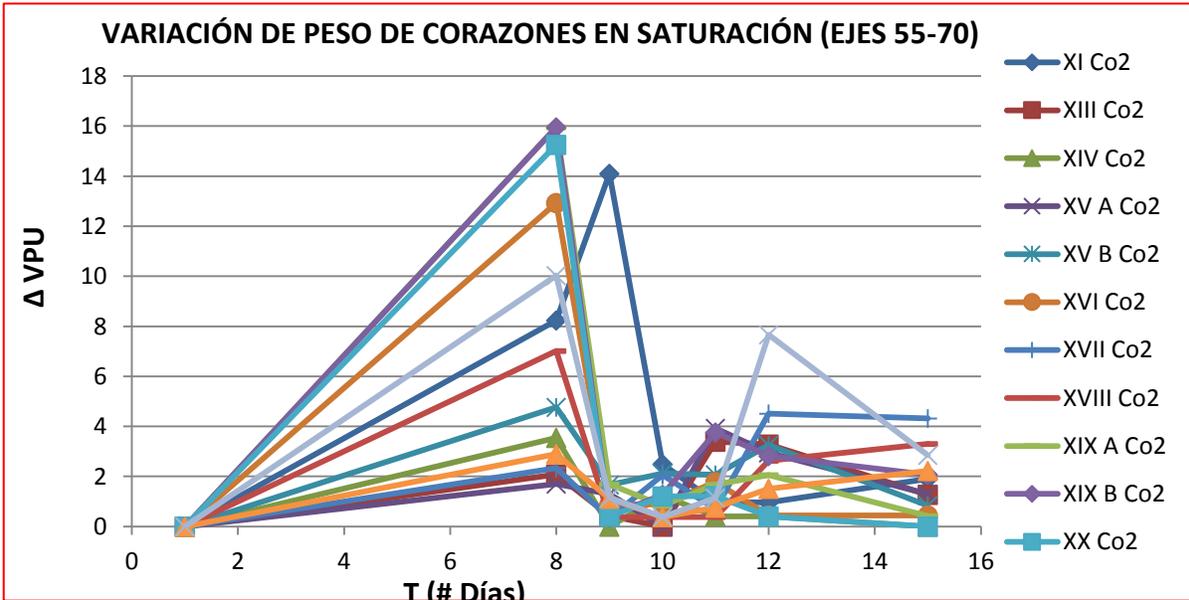


Figura 65. Gráfica de variaciones de VPU, para especímenes en saturación, primer bloque, ejes 70-55.



Tabla 38. Últimas lecturas tomadas a testigos, primer bloque, ejes 70-55.

EJE	# PILA	# Muestra	Tipo Pruebas	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Últimas lecturas			Resistividad eléctrica
							Resistencia eléctrica (7ma)	t para VPU (7ma lectura)	VPU (m/s) (7ma lectura)	
70	1	XI	Co2	7.51	5.02	19.78	4100	20.6	3646	10.80
67	2	XIII	Co2	9.68	5.01	19.71	6100	23.3	4155	12.42
		XIV	Co2	9.97	5.02	19.81	6000	24.6	4053	11.92
64	1	XV A	Co2	9.70	5.03	19.83	6100	23.4	4145	12.47
		XV B	Co2	9.73	5.03	19.83	6200	23.6	4123	12.64
		XVI	Co2	9.57	5.04	19.92	7900	22.9	4179	16.45
61	2	XVII	Co2	9.79	5.03	19.88	2700	28.8	3399	5.48
		XVIII	Co2	10.03	5.02	19.79	4300	26.4	3799	8.49
58	3	XIX A	Co2	9.75	5.01	19.74	5800	23.7	4114	11.74
		XIX B	Co2	9.64	5.01	19.74	7300	23.6	4085	14.95
		XX	Co2	9.97	5.02	19.82	5100	24.8	4020	10.14
55	2	XXI	Co2	9.87	5.02	19.81	2700	26.4	3739	5.42
		XXII	Co2	10.07	5.02	19.81	3000	27.3	3689	5.90

Tabla 39. Resultados de prueba VPU primer bloque, ejes 82-67, muestras II-XIII.

Velocidad de pulso ultrasónico					
Eje	Muestra	Tiempo (us)	Longitud (cm)	Velocidad Ultrasonica (m/s)	Clasificación del del concreto
82	II	22.9	8.8	3843	Bueno
82	III	26.7	9.73	3645	Cuestionable
79	IV	22.9	9.19	4014	Bueno
79	V	24.0	9.98	4159	Bueno
76	VI	26.9	9.95	3699	Bueno
76	VII	30.3	10.11	3337	Cuestionable
73	VIII	24.5	9.95	4062	Bueno
73	IX	25.6	9.98	3899	Bueno
70	X	25.0	10.17	4068	Bueno
70	XI	20.6	7.51	3646	Cuestionable
67	XIII	23.3	9.68	4155	Bueno



Tabla 40. Resultados de prueba VPU primer bloque, ejes 67-55, muestras XIV-XXII.

Velocidad de pulso ultrasónico					
Eje	Muestra	Tiempo (us)	Longitud (cm)	Velocidad Ultrasonica (m/s)	Clasificación del del concreto
67	XIV	24.6	9.97	4053	Bueno
64	XV A	23.4	9.70	4145	Bueno
64	XV B	23.6	9.73	4123	Bueno
64	XVI	22.9	9.57	4179	Bueno
61	XVII	28.8	9.79	3399	Cuestionable
61	XVIII	26.4	10.03	3799	Bueno
58	XIX A	23.7	9.75	4114	Bueno
58	XIX B	23.6	9.64	4085	Bueno
58	XX	24.8	9.97	4020	Bueno
55	XXI	26.4	9.87	3739	Bueno
55	XXII	27.3	10.07	3689	Bueno

Tabla 41. Resultados de prueba VPU para testigos de cabezales, muestras 1-14.

Velocidad de Pulso Ultrasónico						
Elemento	Eje	Muestra	Tiempo (us)	Longitud (cm)	Velocidad Ultrasonica (m/s)	Clasificación del del concreto
Cabezal	82	1	24.0	9.76	4067	Bueno
Cabezal	82	2	24.2	9.59	3963	Bueno
Cabezal	79	4	24.2	9.48	3917	Bueno
Cabezal	76	5	24.1	9.95	4129	Bueno
Cabezal	76	6	20.8	8.43	4053	Bueno
Cabezal	73	7	22.5	8.36	3716	Bueno
Cabezal	73	8	24.5	10.6	4327	Bueno
Cabezal	70	9	23.7	9.23	3895	Bueno
Cabezal	70	10	25.2	10.37	4115	Bueno
Cabezal	51	11	24.5	9.95	4061	Bueno
Cabezal	51	12	23.5	9.50	4043	Bueno
Cabezal	49	13	25.0	9.50	3800	Bueno
Cabezal	49	14	21.8	8.93	4096	Bueno



Tabla 42. Resultados de prueba VPU para testigos de cabezales y pilas, muestras 15-28.

Velocidad de Pulso Ultrasónico						
Elemento	Eje	Muestra	Tiempo (us)	Longitud (cm)	Velocidad Ultrasonica (m/s)	Clasificación del del concreto
Cabezal	46	15	24.7	9.82	3976	Bueno
Cabezal	46	16	23	9.20	4000	Bueno
Cabezal	43	17	22	8.35	3795	Bueno
Cabezal	43	18	23.7	9.46	3992	Bueno
Cabezal	38	19	21	8.84	4210	Bueno
Cabezal	38	20	23.2	8.72	3759	Bueno
Pila 3	52	21	22.7	8.57	3775	Bueno
Pila 3	52	22	22.4	8.53	3808	Bueno
Pila 2	49	23	21.6	8.06	3731	Bueno
Pila 2	49	24	21.70	8.19	3774	Bueno
Pila 1	46	25	22.60	8.66	3832	Bueno
Pila 1	46	26	21.50	8.31	3865	Bueno
Pila 3	43	27	22.20	8.38	3775	Bueno
Pila 3	43	28	20.40	7.77	3809	Bueno

Tabla 43. Resultados de prueba VPU para muestras 29-40.

Velocidad de Pulso Ultrasónico						
Elemento	Eje	Muestra	Tiempo (us)	Longitud (cm)	Velocidad Ultrasonica (m/s)	Clasificación del del concreto
Pila 2	40	29	26.90	7.98	2967	Pobre
Pila 2	40	30	27.20	8.10	2978	Pobre
Pila 1	37	31	24.20	8.17	3376	Cuestionable
Pila 1	37	32	21.90	7.76	3543	Cuestionable
Pila 2	34	33	23.70	7.99	3371	Cuestionable
Pila 2	34	34	24.70	8.26	3344	Cuestionable
Pila 1	30	35	22.40	8.59	3835	Bueno
Pila 1	30	36	21.40	8.25	3855	Bueno
Pila 3	28	37	24.20	8.80	3636	Cuestionable
Pila 3	28	38	22.70	8.17	3599	Cuestionable
Pila 2	25	39	24.10	9.05	3755	Bueno
Pila 2	25	40	23.30	8.71	3738	Bueno

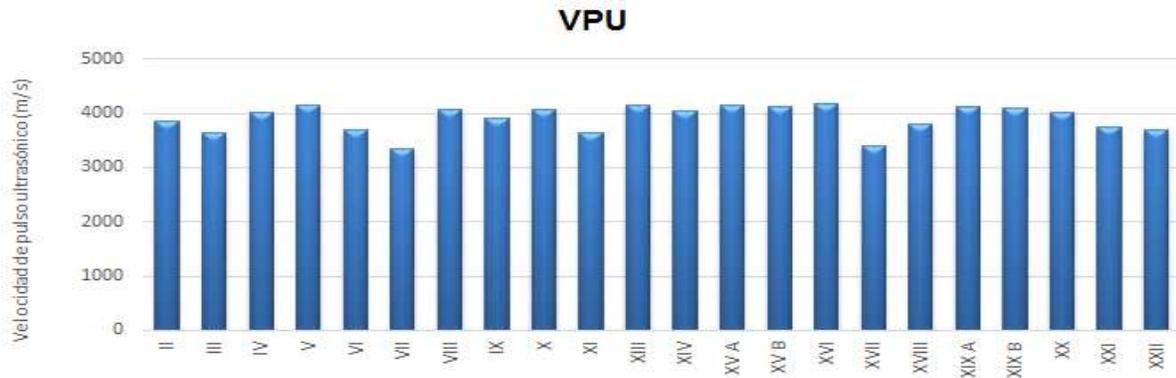


Figura 66. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU, primer bloque, ejes 82-55, muestras II-XXII.



Figura 67. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU para corazones extraídos de cabezales.

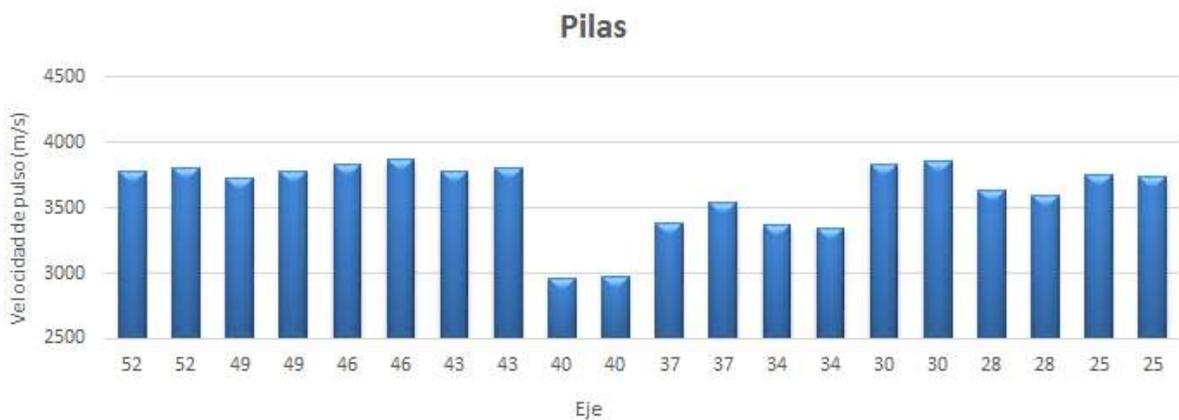


Figura 68. Gráfica de barras de resultados promedio de prueba VPU para corazones extraídos de pilas.



Tabla 44. Criterio de calidad relativa con base en resultados de ensayo VPU. (DURAR, 1998)

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Clasificación del concreto (DURAR)
V > 4575	Excelente
4575 > V > 3660	Bueno
3660 > V > 3050	Cuestionable
3050 > V > 2135	Pobre
V < 2135	Muy pobre

- ✚ Con base en el criterio establecido por la Red Temática DURAR, los resultados obtenidos indican que el concreto, en su mayoría, goza de una **buena calidad**, a excepción de algunas muestras extraídas de pilas.

6.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Tabla 45. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple, primer bloque, ejes 82-70.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (f'c)									
Eje	Muestra	Diámetro	Altura sin cabeceo	Altura con cabeceo	Relación H/D	Factor de corrección	Área	Carga Máxima	Esfuerzo de ruptura
		cm	cm	cm			cm ²	kgf	Mpa
82	II	5.02	8.8	9.13	1.818	0.9927	19.81	12439.00	67.28
82	III	4.98	9.73	10.13	2.035	1.0000	19.45	10329.00	57.30
79	IV	5.01	9.19	9.46	1.888	0.9955	19.73	9674.00	52.68
79	V	5.02	9.98	10.21	2.036	1.0000	19.75	11592.00	63.33
76	VI	4.99	9.95	10.23	2.051	1.0000	19.53	12221.00	67.52
76	VII	5.00	10.11	10.21	2.043	1.0000	19.61	15402.00	84.76
73	VIII	5.02	9.95	10.23	2.037	1.0000	19.81	14160.00	77.15
73	IX	5.03	9.98	10.38	2.065	1.0000	19.84	14628.00	79.54
70	X	5.00	10.17	10.41	2.082	1.0000	19.63	12164.00	66.85
70	XI	5.02	7.51	7.9	1.574	0.9759	19.78	7566.00	40.28
67	XIII	5.01	9.68	9.87	1.970	0.9988	19.71	11241.00	61.46
Factor geométrico de conversión=			1.10						



Tabla 46. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple, primer bloque, ejes 70-55.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO ($f'c$)									
Eje	Muestra	Diámetro	Altura sin cabeceo	Altura con cabeceo	Relación H/D	Factor de corrección	Área	Carga Máxima	Esfuerzo de ruptura
		cm	cm	cm			cm ²	kgf	Mpa
67	XIV	5.02	9.97	10.24	2.039	1.0000	19.81	12439	67.77
64	XV A	5.03	9.70	9.93	1.976	0.9990	19.83	10329	56.15
64	XV B	5.03	9.73	10.02	1.992	0.9997	19.87	9674	52.52
64	XVI	5.04	9.57	9.9	1.966	0.9986	19.92	11592	62.70
61	XVII	5.03	9.79	9.94	1.975	0.9990	19.88	12221	66.26
61	XVIII	5.02	10.03	10.27	2.046	1.0000	19.79	15402	83.97
58	XIX A	5.01	9.75	10	1.996	0.9998	19.71	14160	77.50
58	XIX B	5.01	9.64	9.9	1.975	0.9990	19.74	14628	79.89
58	XX	5.02	9.97	10.13	2.017	1.0000	19.82	12164	66.23
55	XXI	5.02	9.87	10.03	1.997	0.9999	19.81	14284	77.82
55	XXII	5.02	10.07	10.37	2.065	1.0000	19.81	8035	43.78
Factor geométrico de conversión=			1.10						

Tabla 47. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de cabezales, muestras 1-14.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO ($f'c$)										
Elemento	Eje	Muestra	Diámetro	Altura sin cabeceo	Altura con cabeceo	Relación H/D	Factor de corrección	Área	Carga Máxima	Esfuerzo de ruptura
			cm	cm	cm			cm ²	kgf	Mpa
Cabezal	82	1	5.00	9.76	10.00	2.000	1.0000	19.63	9,083	49.92
Cabezal	82	2	4.99	9.59	9.81	1.966	0.9986	19.56	12,304	67.80
Cabezal	79	4	4.99	9.48	9.80	1.964	0.9986	19.56	11,751	64.75
Cabezal	76	5	4.99	9.95	10.18	2.040	1.0000	19.56	10,464	57.74
Cabezal	76	6	4.99	8.43	8.71	1.745	0.9896	19.56	10,669	58.26
Cabezal	73	7	4.99	8.36	8.80	1.764	0.9905	19.56	8,687	47.48
Cabezal	73	8	5.00	10.6	10.21	2.042	1.0000	19.63	12,462	68.49
Cabezal	70	9	4.99	9.23	9.52	1.908	0.9963	19.56	10,464	57.53
Cabezal	70	10	5.00	10.37	10.23	2.046	1.0000	19.63	11,965	65.76
Cabezal	51	11	5.00	9.95	10.32	2.064	1.0000	19.63	12,462	68.49
Cabezal	51	12	4.98	9.50	9.76	1.960	0.9984	19.48	9,913	54.83
Cabezal	49	13	4.97	9.50	9.85	1.982	0.9993	19.40	7,098	39.45
Cabezal	49	14	4.99	8.93	9.15	1.834	0.9933	19.56	7,432	40.74
Factor geométrico de conversión=			1.10							



Tabla 48. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de cabezales y pilas, muestras 15-28.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (f'c)										
Elemento	Eje	Muestra	Diámetro	Altura sin cabeceo	Altura con cabeceo	Relación H/D	Factor de corrección	Área	Carga Máxima	Esfuerzo de ruptura
			cm	cm	cm			cm ²	kgf	Mpa
Cabezal	46	15	5.00	9.82	10.15	2.030	1.0000	19.63	11,915	65.48
Cabezal	46	16	4.99	9.20	9.58	1.920	0.9968	19.56	9,190	50.55
Cabezal	43	17	4.98	8.35	8.7	1.747	0.9898	19.48	9,051	49.63
Cabezal	43	18	5.00	9.46	9.71	1.942	0.9977	19.63	10,375	56.89
Cabezal	38	19	5.00	8.84	9.23	1.846	0.9938	19.63	11,496	62.79
Cabezal	38	20	5.00	8.72	9.11	1.822	0.9929	19.63	11,343	61.90
Pila 3	52	21	4.42	8.57	8.97	2.029	1.0000	15.34	6,908	48.58
Pila 3	52	22	4.42	8.53	8.82	1.995	0.9998	15.34	7,287	51.24
Pila 2	49	23	4.41	8.06	8.24	1.868	0.9947	15.27	6,187	43.48
Pila 2	49	24	4.42	8.19	8.51	1.925	0.9970	15.34	6,293	44.13
Pila 1	46	25	4.44	8.66	9.01	2.029	1.0000	15.48	8,462	58.98
Pila 1	46	26	4.43	8.31	8.63	1.948	0.9979	15.41	9,011	62.96
Pila 3	43	27	4.43	8.38	8.63	1.948	0.9979	15.41	5,931	41.44
Pila 3	43	28	4.43	7.77	8.08	1.824	0.9930	15.41	9,123	63.42
Factor geométrico de conversión=				1.10						

Tabla 49. Resultados de ensayo de resistencia a compresión simple en testigos extraídos de pilas, muestras 29-40.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (f'c)										
Elemento	Eje	Muestra	Diámetro	Altura sin cabeceo	Altura con cabeceo	Relación H/D	Factor de corrección	Área	Carga Máxima	Esfuerzo de ruptura
			cm	cm	cm			cm ²	kgf	Mpa
Pila 2	40	29	4.42	7.98	8.19	1.853	0.9941	15.34	3,082	21.55
Pila 2	40	30	4.42	8.10	8.34	1.887	0.9955	15.34	2,234	15.64
Pila 1	37	31	4.42	8.17	8.28	1.873	0.9949	15.34	4,563	31.93
Pila 1	37	32	4.42	7.76	8.02	1.814	0.9926	15.34	4,532	31.64
Pila 2	34	33	4.42	7.99	8.21	1.857	0.9943	15.34	4,462	31.20
Pila 2	34	34	4.42	8.26	8.42	1.905	0.9962	15.34	3,484	24.41
Pila 1	30	35	4.43	8.59	8.97	2.025	1.0000	15.41	8,202	57.42
Pila 1	30	36	4.44	8.25	8.43	1.899	0.9959	15.48	7,846	54.46
Pila 3	28	37	4.43	8.80	8.92	2.014	1.0000	15.41	7,033	49.24
Pila 3	28	38	4.42	8.17	8.31	1.880	0.9952	15.34	6,156	43.09
Pila 2	25	39	4.43	9.05	9.12	2.059	1.0000	15.41	7,280	50.97
Pila 2	25	40	4.42	8.71	8.87	2.007	1.0000	15.34	4,995	35.13
Factor geométrico de conversión=				1.10						



Figura 69. Gráfica de barras de resultados en testigos de primer bloque, ejes 82-55, muestras II-XXII.

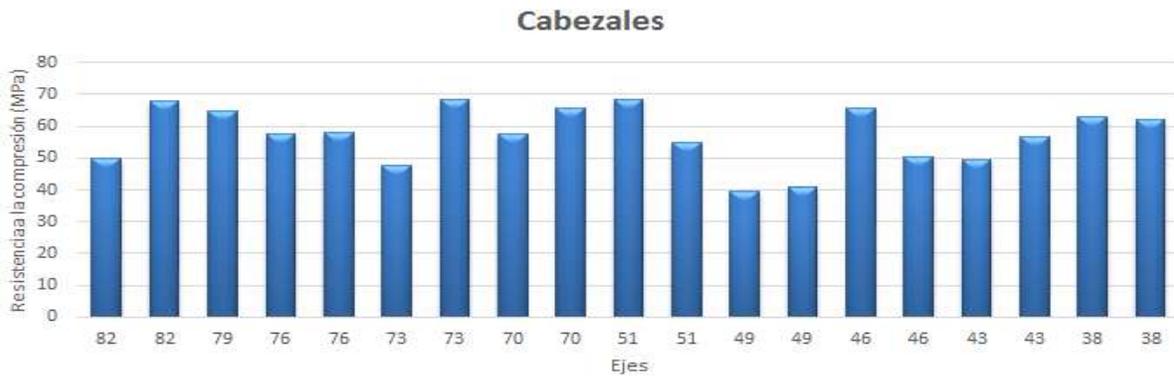


Figura 70. Gráfica de barras de resultados de prueba de resistencia a compresión simple de testigos extraídos de cabezales.

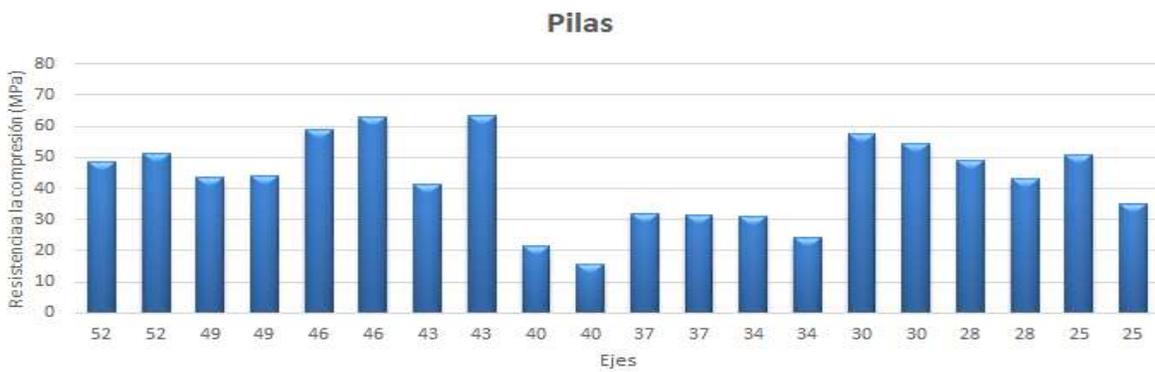


Figura 71. Gráfica de barras de resultados de prueba de resistencia a compresión simple de testigos extraídos de pilas.



Tabla 50. Resistencia estipulada en el diseño de la mezcla del concreto.

Resistencia a compresión estipulada en proyecto
400 kg/cm²
≈ 40 MPa

De acuerdo a la resistencia a la compresión prevista en el diseño del proyecto, la mayoría de testigos de los elementos estructurales **cumplen con la condición de resistir 400 kg/cm²**, excepto las muestras 29 – 34 que se encuentran significativamente alejados del rango en un rango de 240 – 320 kg/cm².

6.5 ENSAYO DE FAGERLUND

Tabla 51. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 1.

Muestra No.	Eje Viaducto	Elemento	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Masa Inicial Seca W _o	Succión								
							5min	10 min	15min	30min	1h	2h	3h	4h	6h
I Co3	82	Pila	5.02	4.02	19.79	167.80	168.40	168.50	168.60	168.90	169.10	169.40	169.70	169.90	170.20
I Co4	82	Pila	5.02	4.38	19.79	179.00	179.50	179.60	179.70	179.80	180.00	180.20	180.50	180.60	180.90
IV Co3	79	Pila	5.01	3.37	19.71	141.10	141.80	141.90	141.90	142.20	142.30	142.60	142.70	142.80	143.10
VI Co3	76	Pila	4.99	3.41	19.56	137.60	138.40	138.70	138.80	139.20	139.40	140.00	140.50	140.80	141.40
VI Co4	76	Pila	4.99	3.38	19.56	143.10	143.80	144.00	144.10	144.50	144.70	145.20	145.70	145.90	146.50
IX Co3	73	Pila	5.03	3.33	19.87	135.60	136.90	137.00	137.10	137.40	137.70	138.20	138.50	138.70	139.20
IX Co4	73	Pila	5.03	3.19	19.87	129.20	129.80	129.80	130.00	130.20	130.40	130.80	131.10	131.40	131.80
XII Co3	70	Pila	5.01	3.36	19.71	130.20	131.10	131.20	131.50	131.70	132.10	132.80	133.30	133.70	134.40
XII Co4	70	Pila	5.01	3.19	19.71	124.90	125.60	125.70	125.90	126.10	126.40	126.90	127.40	127.70	128.20
XII Co5	70	Pila	5.01	4.21	19.71	181.80	182.50	182.60	182.70	183.00	183.30	183.80	184.30	184.60	185.10
XIII Co3	67	Pila	5.01	4.48	19.71	181.70	182.50	182.50	182.60	182.70	182.90	183.30	183.60	183.80	184.10
XV Co3	67	Pila	5.03	3.39	19.87	143.20	143.70	143.80	144.00	144.10	144.30	144.80	145.20	146.10	147.10
XV Co4	67	Pila	5.03	3.31	19.87	141.20	142.10	142.10	142.20	142.40	142.50	143.00	143.40	144.80	145.80
XVII Co3	61	Pila	5.03	4.47	19.87	164.90	166.00	166.10	166.30	166.50	167.00	167.50	168.00	168.30	168.80
XX Co3	58	Pila	5.02	2.96	19.79	123.70	124.50	124.50	124.60	124.80	125.10	125.50	125.80	126.10	126.50
XX Co4	58	Pila	5.02	3.51	19.79	152.40	153.00	153.00	153.00	153.20	153.40	153.80	154.10	154.30	154.70
XXI Co3	55	Pila	5.02	3	19.79	117.90	118.90	119.10	119.30	119.60	120.00	120.60	121.00	121.30	121.80
XXI Co4	55	Pila	5.02	3.58	19.79	133.10	133.80	133.90	134.00	134.30	134.60	135.00	135.40	135.70	136.20

NOTA: Las columnas de "succión" contienen datos del pesaje a cada tiempo.



Tabla 52. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 2.

Muestra No.	Succión												
	Día 1 24	Día 2 48	Día 3 72	Día 4 96	Día 5 120	Día 6 144	Día 7 168	Día 8 192	Día 9 216	Día 10 240	Día 11 264	Día 12 288	Día 13 312
I Co3	171.80	173.20	174.10	174.80	175.30	175.60	175.90	176.20	176.40	176.60	176.70	176.80	176.90
I Co4	182.30	183.50	184.20	184.60	184.90	185.10	185.30	185.40	185.50	185.60	185.60	185.70	185.80
IV Co3	144.30	145.20	145.90	146.30	146.70	147.00	147.20	147.40	147.60	147.80	147.90	148.00	148.10
VI Co3	144.80	147.60	149.20	150.30	151.10	151.40	151.70	151.80	151.80	151.80	151.70	151.80	151.80
VI Co4	149.30	151.50	152.80	153.70	154.40	155.00	155.30	155.60	155.80	155.90	156.00	156.20	156.30
IX Co3	141.80	143.80	145.30	146.20	147.10	147.60	147.90	148.00	148.10	148.10	148.20	148.30	148.40
IX Co4	133.70	135.20	136.30	136.80	137.40	137.80	138.10	138.40	138.60	138.70	138.80	138.90	139.00
XII Co3	137.80	140.30	141.80	142.30	142.90	143.10	143.20	143.20	143.20	143.20	143.30	143.30	143.30
XII Co4	130.80	132.90	134.20	134.90	135.50	135.90	136.10	136.20	136.30	136.30	136.40	136.40	136.50
XII Co5	187.50	189.50	190.70	191.50	192.30	192.80	193.20	193.60	193.70	193.90	194.10	194.30	194.50
XIII Co3	185.80	187.10	187.80	188.40	188.90	189.20	189.40	189.60	189.70	189.80	189.90	190.10	190.30
XV Co3	147.80	148.70	150.20	151.40	152.10	152.40	152.50	152.70	152.80	152.90	153.00	153.10	153.10
XV Co4	146.40	149.60	149.80	150.00	150.80	151.00	151.30	151.60	151.80	151.90	152.00	152.00	152.20
XVII Co3	171.30	173.30	174.20	174.90	175.50	175.90	176.30	176.60	176.80	177.00	177.20	177.40	177.70
XX Co3	128.60	130.30	131.40	132.10	132.70	132.80	133.10	133.30	133.40	133.40	133.50	133.60	133.60
XX Co4	156.40	157.80	158.40	158.90	159.40	159.60	159.80	160.00	160.10	160.10	160.20	160.30	160.40
XXI Co3	124.40	126.20	127.30	127.90	128.50	128.80	128.90	129.10	129.10	129.20	129.30	129.30	129.30
XXI Co4	138.40	139.90	140.80	141.30	141.80	142.10	142.20	142.40	142.60	142.70	142.80	142.90	142.90

Tabla 53. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de pilas, primer bloque, muestras I – XXI Parte 3.

Muestra No.	Succión												(W ₀ -W _f)/W _f * 100
	Día 14 336	Día 15 360	Día 16 384	Día 17 408	Día 18 432	Día 19 456	Día 20 480	Día 21 504	Día 22 528	Día 23 552	Día 24 576	Día 25 600	
I Co3	177.00	177.10	177.20	177.30	177.40	177.50	177.50	177.50	177.50	177.50	177.50	177.50	5.78
I Co4	185.90	186.00	186.00	186.10	186.10	186.20	186.20	186.20	186.30	186.30	186.30	186.30	4.08
IV Co3	148.20	148.20	148.20	148.30	148.40	148.50	148.50	148.50	148.60	148.60	148.60	148.60	5.32
VI Co3	151.90	151.90	151.90	151.90	152.00	152.00	152.00	152.00	152.00	152.00	152.00	152.00	10.47
VI Co4	156.40	156.40	156.50	156.60	156.70	156.70	156.80	156.80	156.80	156.80	156.80	156.80	9.57
IX Co3	148.40	148.40	148.50	148.50	148.50	148.50	148.60	148.60	148.60	148.60	148.60	148.60	9.59
IX Co4	139.10	139.10	139.20	139.20	139.20	139.20	139.30	139.30	139.30	139.30	139.30	139.30	7.82
XII Co3	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	10.06
XII Co4	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	136.50	9.29
XII Co5	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	6.99
XIII Co3	190.40	190.40	190.60	190.70	190.70	190.80	190.80	190.90	190.90	190.90	190.90	190.90	5.06
XV Co3	153.10	153.10	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	153.20	6.98
XV Co4	152.20	152.30	152.30	152.40	152.40	152.50	152.50	152.50	152.50	152.50	152.50	152.50	8.00
XVII Co3	177.90	178.10	178.30	178.50	178.60	178.60	178.70	178.80	178.90	178.90	178.90	178.90	8.49
XX Co3	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	133.60	8.00
XX Co4	160.40	160.50	160.50	160.60	160.60	160.70	160.80	160.80	160.80	160.80	160.80	160.80	5.51
XXI Co3	129.30	129.40	129.40	129.40	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	129.50	9.84
XXI Co4	143.00	143.10	143.10	143.20	143.20	143.20	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	143.30	7.66
	PROMEDIO												7.69493

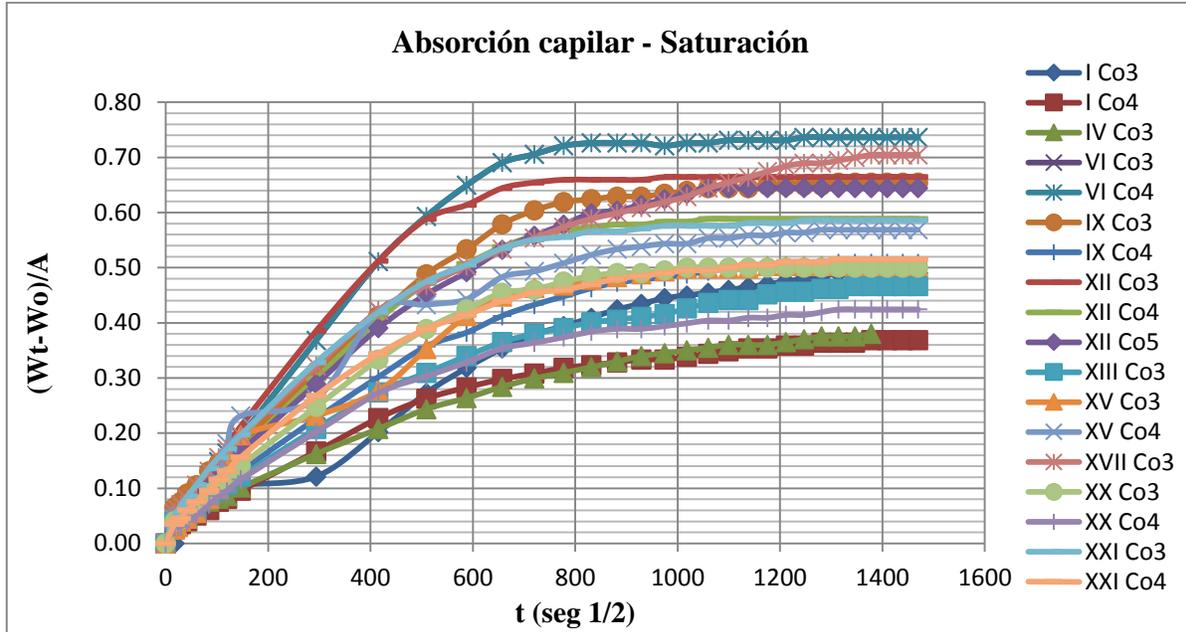


Figura 72. Gráfica de resultados en testigos, primer bloque, muestras I – XXI.

Tabla 54. Resultados de porosidad efectiva y succión capilar en testigos, primer bloque, muestras I - XXI.

Muestra	Eje	Sm (g/cm ² s ^{0.5})	Sm (g/m ² s ^{0.5})	t(s ^{1/2})	t(s)	z (m)	z ² (m ²)	m (s/m ²)	ε _e (%)	S(m/s ^{1/2})
I Co3	82	0.0006	0.0059	509.117	259200	0.0402	0.0016	160392069.503	7.466	0.00008
I Co4	82	0.0005	0.0048	509.117	259200	0.0438	0.0019	135109776.694	5.614	0.00009
IV Co3	79	0.0004	0.0043	509.117	259200	0.0337	0.0011	228231295.512	6.493	0.00007
VI Co3	76	0.0010	0.0099	657.267	432000	0.0341	0.0012	371513832.870	19.098	0.00005
VI Co4	76	0.0011	0.0114	509.117	259200	0.0338	0.0011	226882812.226	17.108	0.00007
IX Co3	73	0.0011	0.0112	509.117	259200	0.0333	0.0011	233747260.774	17.195	0.00007
IX Co4	73	0.0005	0.0047	509.117	259200	0.0319	0.0010	254714478.042	7.456	0.00006
XII Co3	70	0.0007	0.0066	657.267	432000	0.0336	0.0011	382653061.224	12.943	0.00005
XII Co4	70	0.0009	0.0092	509.117	259200	0.0319	0.0010	254714478.042	14.684	0.00006
XII Co5	70	0.0009	0.0088	509.117	259200	0.0421	0.0018	146241558.105	10.591	0.00008
XIII Co3	67	0.0006	0.0063	415.692	172800	0.0448	0.0020	86096938.776	5.886	0.00011
XV Co3	67	0.0005	0.0050	657.267	432000	0.0339	0.0011	375910408.019	9.613	0.00005
XV Co4	67	0.0006	0.0060	657.267	432000	0.0331	0.0011	394300891.741	11.914	0.00005
XVII Co3	61	0.0010	0.0098	415.6922	172800	0.0447	0.0020	86482590.874	9.074	0.00011
XX Co3	58	0.0007	0.0066	657.2671	432000	0.0296	0.0009	493060628.196	14.692	0.00005
XX Co4	58	0.0007	0.0068	415.6922	172800	0.0351	0.0012	140258601.797	8.107	0.00008
XXI Co3	55	0.0009	0.0085	509.1169	259200	0.0300	0.0009	288000000.000	14.499	0.00006
XXI Co4	55	0.0007	0.0071	509.1169	259200	0.0358	0.0013	202240878.874	10.093	0.00007



Coeficiente de absorción capilar

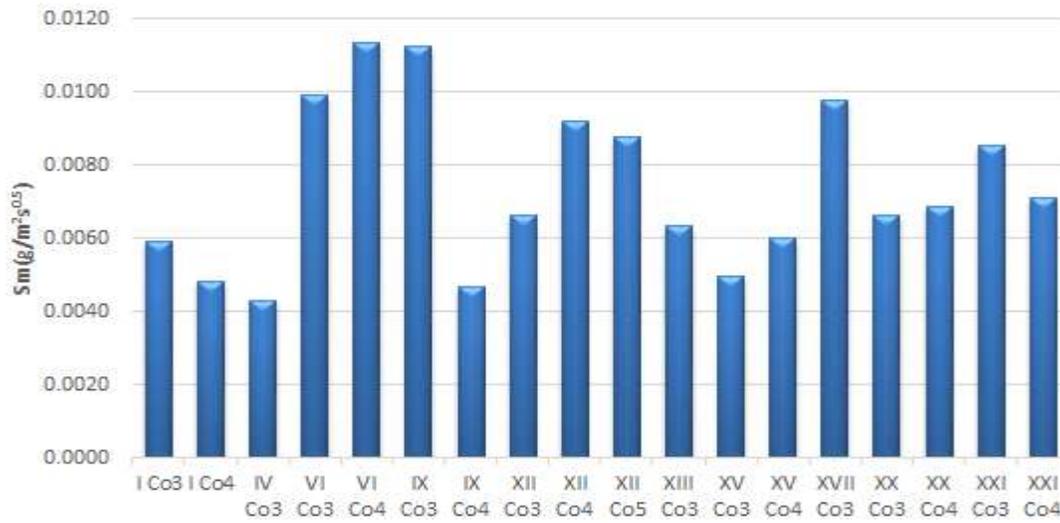


Figura 73. Coeficiente de absorción capilar, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.

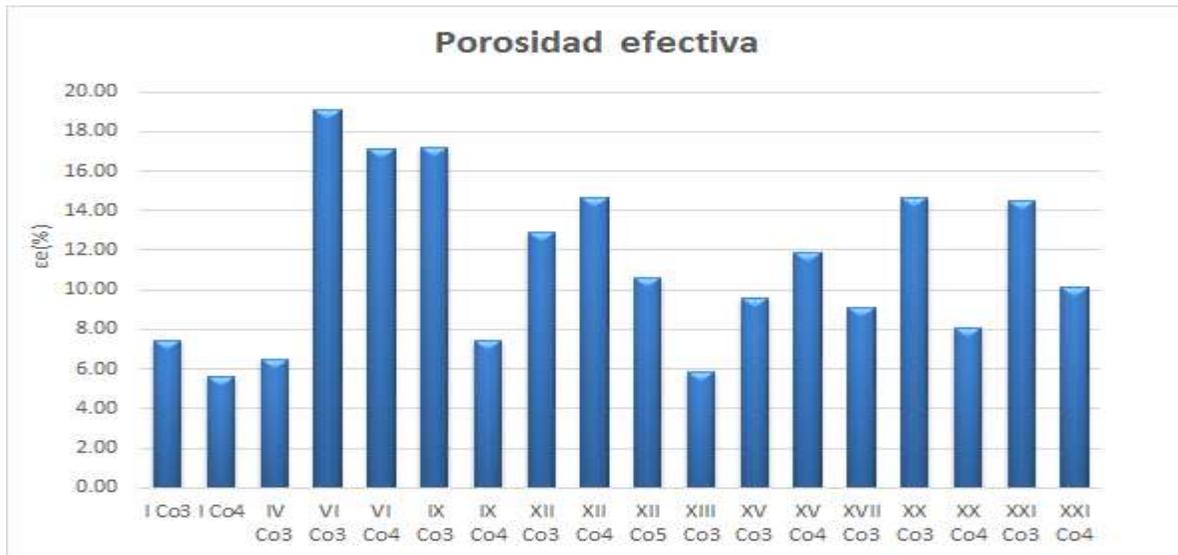


Figura 74. Porosidad efectiva, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.

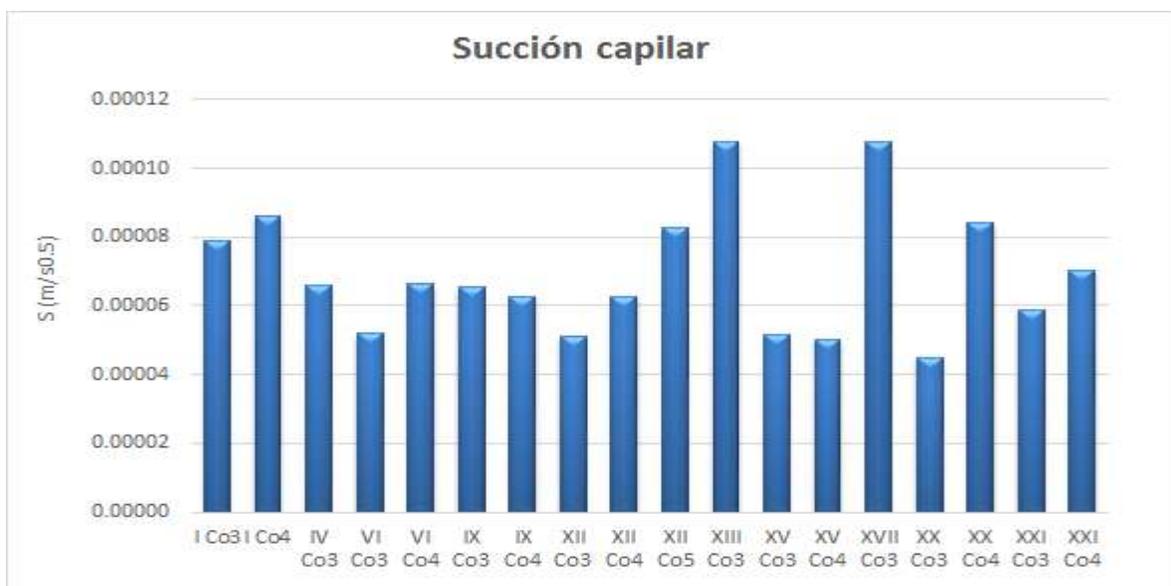


Figura 75. Succión capilar, testigos de primer bloque, muestras I - XXI.

Tabla 55. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de cabezales y pilas, segundo bloque. Parte 1.

Elemento	Muestra No.	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Masa Inicial Seca (Wo)	Succión							
						5min	10 min	15min	30min	1h	2h	4h	6h
Cabezal	1	5.00	3.11	19.61	145.8	146.0	146.2	146.3	146.4	146.6	146.8	147.0	147.4
Cabezal	3	5.00	3.31	19.60	210.3	210.8	210.9	211.3	211.4	211.8	212.2	212.9	213.5
Cabezal	10	5.00	3.50	19.60	145.3	145.7	145.8	145.8	146.0	146.3	146.6	146.9	147.2
Cabezal	11	5.00	3.19	19.63	133.9	134.2	134.2	134.3	134.4	134.5	134.7	134.9	135.2
Cabezal	14	4.99	3.31	19.56	138.2	138.5	138.7	138.7	138.9	139.1	139.3	139.7	140.1
Cabezal	15	5.00	4.77	19.60	198.2	198.5	198.6	198.7	198.9	199.2	199.4	199.9	200.4
Cabezal	17	4.98	3.60	19.47	148.5	148.9	149.0	149.2	149.4	149.7	150.0	150.5	150.9
Cabezal	19	5.00	3.09	19.65	125.8	126.0	126.1	126.2	126.4	126.5	126.8	127.1	127.6
Pila	22	4.42	3.91	15.34	116.0	116.3	116.4	116.4	116.6	116.8	117.0	117.4	117.7
Pila	13	4.41	2.72	15.27	75.6	76.3	76.7	76.9	77.3	78.1	78.0	79.3	80.7
Pila	25	4.44	3.66	15.45	112.6	113.0	113.1	113.2	113.4	113.6	113.9	114.9	114.8
Pila	27	4.43	4.16	15.41	126.6	126.9	127.0	127.1	127.3	127.5	1278.0	128.3	128.7
Pila	30	4.42	3.90	15.34	97.4	99.2	99.9	100.4	101.4	103.0	104.5	107.6	109.6
Pila	35	4.42	4.38	15.37	137.1	137.2	137.4	137.5	137.6	137.7	138.2	138.4	138.8
Pila	38	4.42	3.31	15.36	102.1	102.5	102.6	102.7	102.9	103.2	103.6	104.1	104.4
Pila	40	4.42	4.84	15.31	143.8	144.0	144.2	144.2	144.5	144.8	145.3	145.9	146.5



Tabla 56. Resultados de medición de pesos durante succión de testigos extraídos de cabezales y pilas, segundo bloque. Parte 2.

Elemento	Muestra No.	Succión										
		Día 1 24	Día 2 48	Día 3 72	Día 4 96	Día 5 120	Día 6 144	Día 7 168	Día 8 192	Día 9 216	Día 10 240	Día 11 264
Cabezal	1	148.0	148.9	149.3	149.6	149.9	150.1	150.3	150.5	150.6	150.6	150.7
Cabezal	3	215.4	218.3	219.9	221.0	221.9	222.6	223.3	223.9	224.0	224.0	224.1
Cabezal	10	147.9	149.0	149.3	149.5	149.7	149.9	150.1	150.2	150.2	150.2	150.2
Cabezal	11	135.8	136.7	136.9	137.3	137.5	137.7	137.8	138.0	138.0	138.0	138.0
Cabezal	14	140.9	142.0	142.5	143.0	143.2	143.4	143.5	143.8	143.9	144.0	144.0
Cabezal	15	201.4	202.9	203.6	204.2	204.6	204.9	205.2	205.6	205.6	205.6	205.6
Cabezal	17	151.8	153.1	153.7	154.2	154.6	154.9	155.2	155.5	155.6	115.6	115.6
Cabezal	19	128.4	129.5	129.9	130.3	130.5	130.7	130.9	131.4	131.5	131.5	131.5
Pila	22	118.6	120.0	120.7	121.1	121.5	121.8	122.0	122.4	122.5	122.5	122.5
Pila	13	81.2	82.0	82.4	82.7	82.7	82.7	82.6	83.2	83.2	83.2	83.2
Pila	25	116.1	118.0	115.4	116.0	60.1	90.5	120.9	121.2	121.2	121.2	121.2
Pila	27	129.8	131.5	132.2	132.8	133.3	133.7	134.0	134.4	134.5	134.5	134.5
Pila	30	112.6	117.0	117.1	117.2	117.3	117.4	117.4	117.5	117.5	117.5	117.5
Pila	35	139.8	141.3	142.0	142.5	142.9	143.2	143.6	143.9	143.9	144.0	144.0
Pila	38	105.6	107.5	108.2	108.8	109.2	109.5	109.8	110.2	110.2	110.3	110.3
Pila	40	148.2	150.8	151.6	152.2	152.6	152.9	153.3	153.7	153.7	153.7	153.7

Tabla 57. Resultados de porosidad efectiva y succión capilar en testigos extraídos de viaducto, segundo bloque. Parte 1.

MUESTRA	EJE	S_m ($g/cm^2 s^{0.5}$)	S_m ($g/m^2 s^{0.5}$)	$t(s^{1/2})$	$t(s)$	$z (m)$	$z^2 (m^2)$	$m (s/m^2)$	$\epsilon_c(\%)$	$S(m/s^{1/2})$
1	82	0.0005	0.0050	411.8	169594	0.0311	0.0010	175343735.979	6.6	0.00008
3	79	0.0011	0.0110	608.6	370342	0.0531	0.0028	131345279.97	12.6	0.00009
10	70	0.0006	0.0060	402.0	161604	0.0350	0.0012	131921632.65	6.9	0.00009
11	51	0.0004	0.0040	506.5	256542	0.0319	0.0010	252102721.08	6.4	0.00006
14	49	0.0006	0.0060	364.2	132617	0.0331	0.0011	121044314.23	6.6	0.00009
15	46	0.0007	0.0070	535.6	286837	0.0477	0.0023	126066020.20	7.9	0.00009
17	43	0.0008	0.0080	405.9	164735	0.0360	0.0013	127109965.76	9.0	0.00009
19	38	0.0006	0.0060	430.5	185330	0.0309	0.0010	194101706.10	8.4	0.00007
22	52	0.0007	0.0070	541.0	292681	0.0391	0.0015	191443671.88	9.7	0.00007
23	46	0.0021	0.0210	229.6	52703	0.0272	0.0007	71235727.75	17.7	0.00012
25	43	0.0011	0.0110	477.0	227529	0.0366	0.0013	169853534.00	14.3	0.00008
27	40	0.0009	0.0090	521.7	272136	0.0416	0.0017	157253207.70	11.3	0.00008
30	30	0.0053	0.0530	242.1	58628	0.0390	0.0015	38545655.47	32.9	0.00016
35	28	0.0008	0.0080	495.1	245149	0.0438	0.0019	127785474.46	9.0	0.00009
38	28	0.0010	0.0100	473.9	224581	0.0331	0.0011	204982804.100	14.3	0.00007
40	25	0.0012	0.0120	534.3	285423	0.0484	0.0023	121842370.10	13.2	0.00009



MUESTRA	EJE	S_m ($g/cm^2 s^{0.5}$)	S_m ($g/m^2 s^{0.5}$)	$t(s^{1/2})$	$t(s)$	$z(m)$	$z^2(m^2)$	$m(s/m^2)$	$\varepsilon_c(\%)$	$S(m/s^{1/2})$
58	1	0.0013	0.0130	339.8	115443	0.0410	0.0017	68675270.78	10.8	0.00012
59	4	0.0009	0.0090	427.4	182709	0.0472	0.0022	82011613.530	8.2	0.00011
60	2	0.0007	0.0070	359.4	129189	0.0445	0.0020	65238680.95	5.7	0.00012
62	6	0.0011	0.0110	508.5	258526	0.0466	0.0022	119050832.03	12.0	0.00009
63	1	0.0011	0.0110	416.1	173132	0.0440	0.0019	89427502.391	10.4	0.00011
65	5	0.0007	0.0070	374.7	140411	0.0474	0.0022	62494790.68	5.5	0.00013
67	5	0.0015	0.0150	485.9	236131	0.0420	0.0018	133861227.01	17.4	0.00009
68	6	0.0004	0.0040	506.5	256542	0.0459	0.0021	121768099.639	4.4	0.00009
69	3	0.0008	0.0080	406.1	164938	0.0484	0.0023	70409089.04	6.7	0.00012
71	5	0.0009	0.0090	450.1	202600	0.0460	0.0021	95746697.71	8.8	0.00010
72	2	0.0012	0.0120	431.4	186120	0.0482	0.0023	80112403.487	10.7	0.00011
74	6	0.0022	0.0223	378.4	143176	0.0466	0.0022	65932187.14	18.1	0.00012



Figura 76. Gráfica de barras de resultados absorción capilar de testigos extraídos de cabezales.

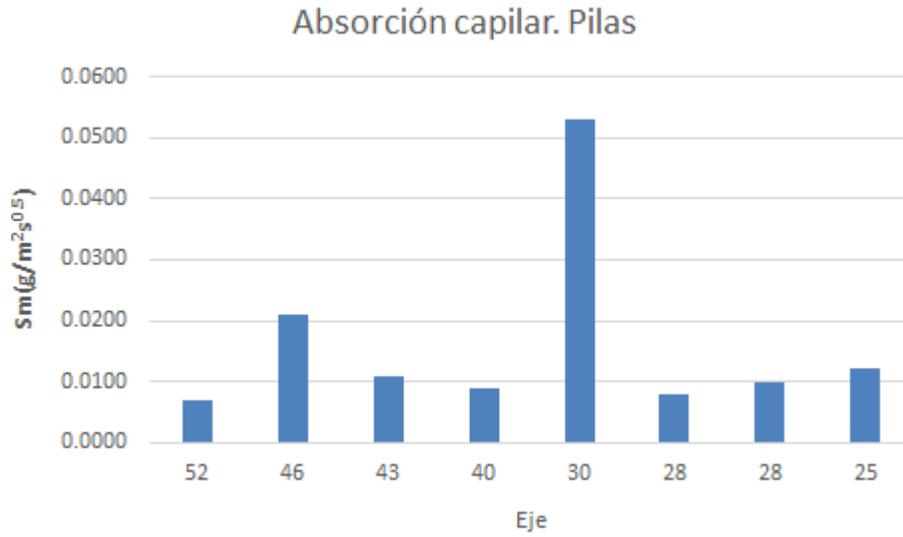


Figura 77. Gráfica de barras de resultados absorción capilar de testigos extraídos de pilas.

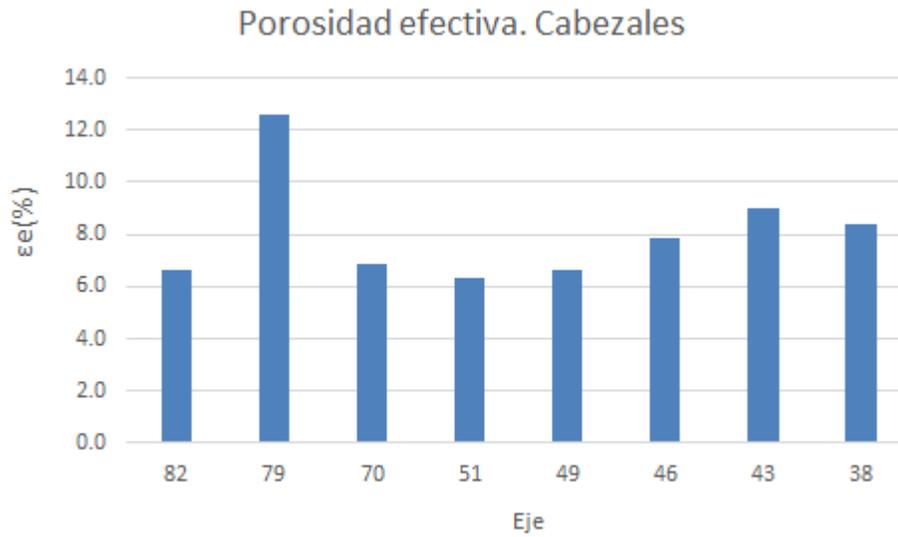


Figura 78. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de cabezales.

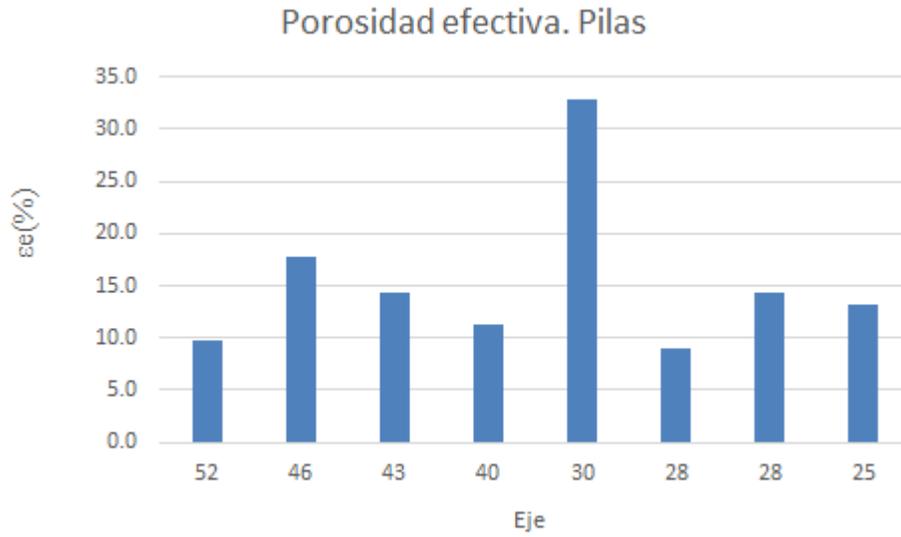


Figura 79. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de pilas.

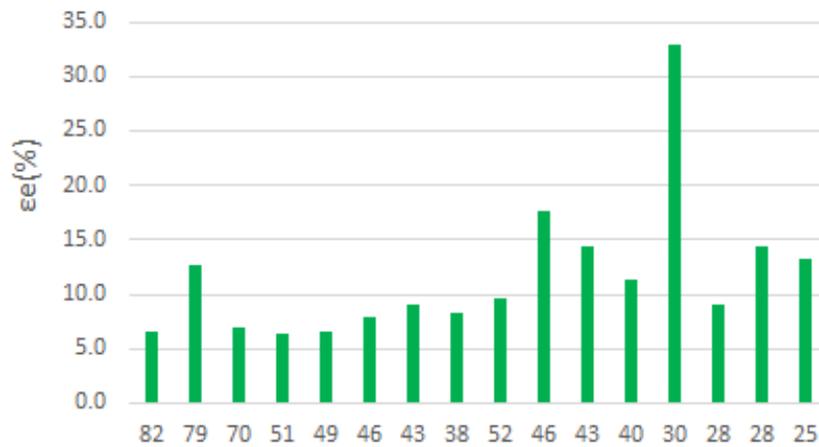


Figura 80. Gráfica de barras de resultados porosidad efectiva de testigos extraídos de pilas y cabezales.

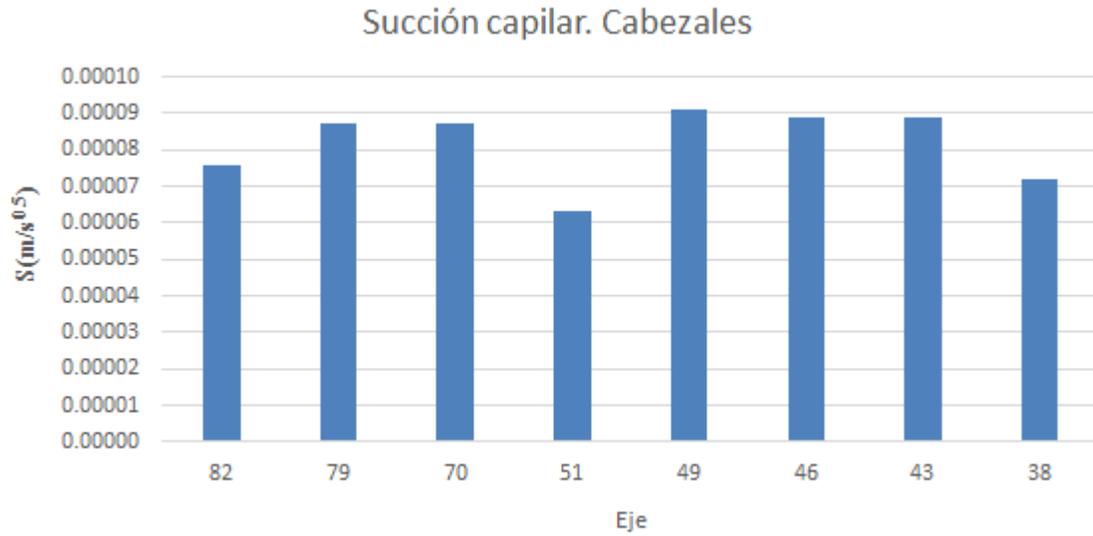


Figura 81. Gráfica de barras de resultados succión capilar de testigos extraídos de cabezales.

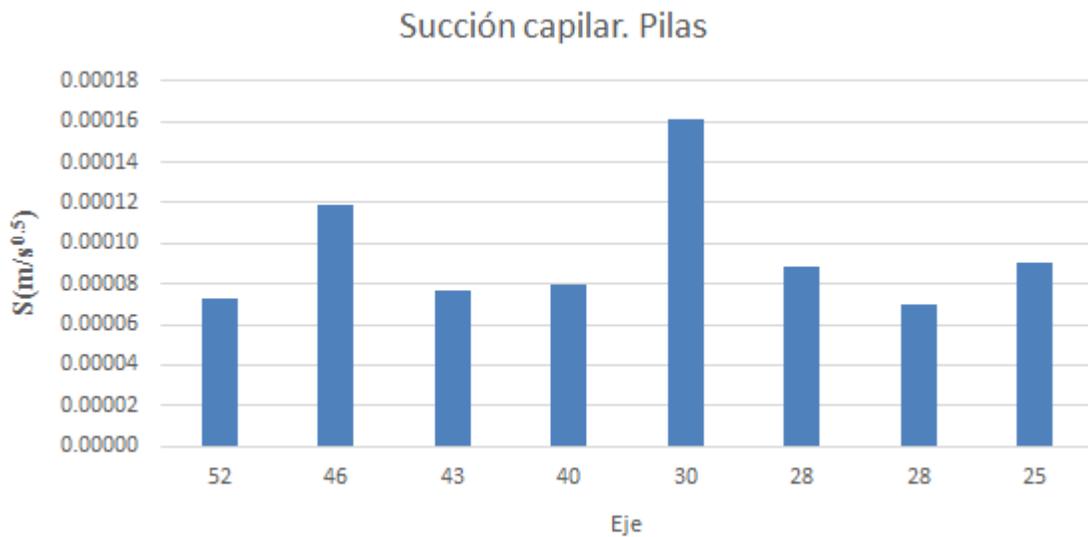


Figura 82. Gráfica de barras de resultados succión capilar de testigos extraídos de pilas.



Tabla 58. Criterio de límites de tolerancia de sorción capilar propuestos por Fagerlund (DURAR, 1998).

Hostilidad del ambiente	Sorción capilar propuesta respecto al tiempo	Sorción capilar propuesta respecto a profundidad
Ambientes severos	$5 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{s}^{0.5}$	3 mm / $h^{0.5}$
Ambientes menos severos	$1 \times 10^{-4} \text{ m} / \text{s}^{0.5}$	6 mm / $h^{0.5}$

- Comparando los resultados de las pruebas, con el criterio límite de sorción propuesto por Fagerlund, prácticamente **ninguna de las probetas cumple** con el criterio de ambientes severos.

Tabla 59. Resumen de resultados de las pruebas practicadas al concreto en laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas.

RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PRACTICADAS AL CONCRETO	
PRUEBA	OBSERVACIONES
Porosidad Total	Las muestras 23, 30 y 38 tienen una porosidad alta, el concreto mostraba una clara porosidad en la superficie. Todas las muestras examinadas, a excepción de la muestra 1 de los cabezales, tienen porcentaje de vacíos mayores al 15%, por lo que se puede clasificar como: concreto de durabilidad inadecuada , de acuerdo al criterio establecido por la red temática DURAR y la ASTM-C-642-2013.
Resistividad Eléctrica	Los resultados de la prueba de Resistividad Eléctrica son preocupantes, porque en el proyecto se estableció que se esperaban entre los 50 y 100 kΩ-cm, los obtenidos son muy deficientes, se encuentran en el rango entre 5 y 25 kΩ-cm. De acuerdo a la Red DURAR (1998), se considera de riesgo moderado .
Velocidad de Pulso Ultrasónico	Con base en el criterio establecido por la Red Temática DURAR, los resultados obtenidos indican que el concreto, en su mayoría, goza de una buena calidad , a excepción de unas cuantas provenientes de pilas.
Resistencia a la Compresión Simple	De acuerdo a la resistencia a la compresión prevista en el diseño del proyecto, la mayoría de testigos de los elementos estructurales cumplen con la condición de resistir 400 kg/cm² , excepto las muestras 29 – 34 que se encuentran significativamente alejados del rango en un rango de 240 – 320 kg/cm ² .
Absorción Capilar (Fagerlund)	Comparando los resultados de las pruebas, con el criterio límite de sorción propuesto por Fagerlund, prácticamente ninguna de las probetas cumple con el criterio de ambientes severos.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

De acuerdo con criterio propuesto por los organismos encargados de normalizar los procedimientos de los métodos de obtención de los parámetros, considerados para evaluar el concreto, los resultados de las pruebas dan evidencia de la durabilidad relativa del material.

Los resultados obtenidos del parámetro de Porosidad Total, son muy preocupantes, ya que prácticamente todas las probetas tienen excesivo porcentaje de vacíos, cosa perjudicial para el material en ambientes agresivos, como el del caso en estudio, por este criterio se clasifica como un concreto de *durabilidad inadecuada*, con una porosidad mayor al 15%.

Por la prueba de Resistividad Eléctrica, se concluye que el concreto está expuesto a un *riesgo moderado*, ya que las muestras mostraron un comportamiento deficiente, no alcanzaron la resistividad entre los 50 - 100 K Ω establecida en el diseño de la mezcla, se quedaron entre 5 – 25 K Ω .

Gracias al ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico, nos damos cuenta que el concreto tiene un buen comportamiento, por lo que goza de una *buena calidad*, a excepción de algunas muestras de las pilas.

De acuerdo con el diseño de la mezcla, el material debería tener una Resistencia a la Compresión mayor a 400 kg/cm², parámetro alcanzado por casi todas las probetas, excepto de la 29 – 34, comprendidas en un rango de 240 – 320 kg/cm², por este parámetro, se obtienen resultados que dan evidencia de una *adecuada resistencia a compresión axial*.

Por el ensayo de la Absorción Capilar, obtuvimos resultados que dejaron mucho que desear de acuerdo al criterio de sorción de Fagerlund, ya que *muy pocas probetas cumplen* con la especificación para el rango comprendido en el Método para



ambientes severos. Podría deberse también a la excesiva porosidad de las muestras que se probaron.

Los resultados de las pruebas dan evidencia de que el concreto cumple solo con algunos de los parámetros de evaluación para determinar la calidad del compuesto.

Los *resultados de los ensayos practicados dejan mucho que desear* del material, ya que hubo probetas de elementos estructurales que tenían más del 50% de vacíos y son cifras potencialmente muy peligrosas, sabiendo que la porosidad es un parámetro proporcional a la probabilidad del ingreso de agentes que corroan al acero, situación que puede afectar el comportamiento también del concreto, y que traería como consecuencia una estabilidad estructural, que hay que mantener monitoreada para evitar problemas serios en el Viaducto.

Todo esto se asevera con el hecho de que está demostrado, por la prueba de sorción con criterio de Fagerlund, que ingresa gran cantidad de líquido, a través del concreto que compone sus elementos estructurales.

Todos los parámetros deben tomarse en cuenta, no basta con que se cumplan algunos cuantos, mientras uno solo no se cumpla debe ponerse atención pertinente a la obra en cuestión.

Las complicaciones pueden deberse al diseño de la mezcla de concreto, pero algunas malas prácticas de los procesos constructivos generalizadas en toda obra, pueden ser las responsables de que al ser materializado, haya tenido un mal comportamiento, y se reflejara ante las pruebas de laboratorio.

Se recomienda realizar inspecciones periódicas, como las de la obra antigua, para tener bien monitoreada la estructura, y así saber de la existencia de problemas, y afecciones debido a estos factores de alto riesgo.



CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

- Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT)*, 1(2), 93-101. Recuperado el 2016, de <http://www.redalyc.org/pdf/4276/427639585001.pdf>
- Apasco, H. (s.f.). *Página Oficial de Holcim Apasco*. Recuperado el 2016, de <http://www.holcimapasco.com/productos-y-servicios/100-cement-detail.html>
- ARQHYS. (s.f.). *Página Oficial de ARQHYS Arquitectura*. Recuperado el 2016, de <http://www.arqhys.com/construcciones/retardantes-para-concreto.html>
- ASTM. (2002). Norma ASTM C 597 – 02. Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos de América.
- ASTM. (2004). *ASTM C 1585-04: Standard test method for measurement of rate of absorption of water*. Nor American Standard: ASTM.
- ASTM. (2012). *ASTM-G-57-2012*. Nor American Standard: ASTM.
- BASF Construction Chemicals Latin America. (2006). *Refrigas y Aditivos Panamá, S.A.* Obtenido de <http://www.ryasapanama.com/web/uploads/pdf/boletines-tecnicos/comoescogerelselladordeconcreto.pdf>
- CivilGeek. (2011). *Civil Geeks*. Obtenido de Ensayos no destructivos en el concreto - Ultrasonido: <http://civilgeeks.com/2011/04/11/ensayos-no-destructivos-del-concreto-ultrasonido/>
- DURAR. (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. (P. I. Desarrollo, Ed.) Internacional: CYTED.
- ESTIIC. (7 de diciembre de 2006). *Instituto de Desarrollo Económico del Principado de Asturias*. Obtenido de Aplicaciones industriales de la nanotecnología: http://www.idepa.es/sites/web/Europal_D_i/Repositorios/galeria_descargas_Europal_D_i/Aplicaciones_industriales_09.pdf
- Fagerlund, G. (Diciembre de 1982). On the Capillarity of Concrete. *Nordic Concrete Research*.
- GlobalTurf Network. (2014). *Global Césped*. Obtenido de http://globalcesped.org/index.php?option=com_content&view=article&id=128:sascab-en-el-a-de-yucat-mco&catid=107:en-general&Itemid=2
- Howland, J. J., & Martín, A. R. (octubre - diciembre de 2013). Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. *Materiales de construcción*, 63(312).



- IBERTIS. (enero de 2014). *Patología+Rehabilitación+Construcción*. Obtenido de <http://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/fisuras-en-el-hormigon-retraccion-hidraulica-causas/>
- IFAI. (2004). *Instituto Federal de Acceso a la Información Pública*. Obtenido de <http://inicio.ifai.org.mx/Estudios/estudio29.pdf>
- IMCYC. (junio de 2006). Pruebas de resistencia a la compresión del concreto. (I. M. Concreto, Ed.) *Problemas, causas y soluciones*, 19-22. Recuperado el 2016, de <http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>
- IMCYC. (2011). *Página Oficial del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.* Obtenido de <http://www.imcyc.com/revistacyt/sep11/artingenieria.html>
- IMT. (16 de agosto de 2013). *Página Oficial del Instituto Mexicano del Transporte*. Obtenido de Instalaciones y Equipos del IMT: <http://www.imt.mx/micrositios/infraestructura/instalaciones-y-equipos.html>
- Neville, A., & Aitcin, P.-C. (diciembre de 1999). *Revista IMCYC*. Obtenido de Concreto de Alto Desempeño: <http://www.imcyc.com/revista/1999/dic99/concreto1.htm>
- Perepérez Ventura, B., Barbera Ortega, E., & Andrade Perdriz, C. (1987). *La Agresividad Ambiental y la Durabilidad de las Estructuras de Hormigón*. Informe de construcción, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Valencia. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/87110/1/20-11-2013-di.pdf>
- Sakurai, C. (2009). Absorción por succión capilar del hormigón. *LEMaC Centro de Investigaciones Viales*, 140-150.
- Sika. (s.f.). *Interempresas*. Recuperado el 2016, de <http://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Impregnante-hidrofugo-Sika-Sikaguard-711-ES-65980.html>
- Solis Carcaño, R. G., Moreno, E. I., & Castillo Pak, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Revista de Ingeniería UADY*, 41-52.
- UNISON. (2002). *Cabeceo con mortero de azufre de especímenes cilíndricos de concreto*. Hermosillo, Sonora, México: Universidad de Sonora.