



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS PROFESIONAL**

**“MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CENIZA DE
BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO:
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-
MECÁNICAS Y LA DURABILIDAD”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

EMMANUEL GONZÁLEZ CASTRO

ASESOR:

M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

COASESORES:

M.I.T. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

ING. ISAÍAS TRUJILLO CALDERÓN

Morelia, Michoacán. Noviembre de 2016.



ÍNDICE

ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
DEDICATORIAS	xvi
AGRADECIMIENTOS	xvii
I. RESUMEN	xix
II. ABSTRACT	xx
III. JUSTIFICACIÓN.....	xxi
III.I. CIFRAS DEL SISTEMA GNR.....	xxii
III.II. CIFRAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE CAÑA.....	xxvii
IV. HIPÓTESIS.....	xxxiii
V. OBJETIVOS.....	xxxiii
V.I. OBJETIVO GENERAL.....	xxxiii
V.II. OBJETIVOS PARTICULARES.....	xxxiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. EL CONCRETO.....	2
2.1.1. Tipos de concreto.....	2
2.1.2. Criterios de diseño.....	3
2.1.3. El concepto de Durabilidad.....	6
2.1.4. Agentes degenerativos del concreto.....	7
2.1.5. Prevención contra los agentes degenerativos del concreto.....	9
2.2. EL CEMENTO.....	10
2.2.1. Historia del cemento: El inicio de la industria.....	11
2.2.2. Fabricación del cemento.....	12
2.2.3. Tipos de cementos.....	17
2.2.4. Hidratación del cemento Portland.....	20
2.3. PUZOLANAS.....	22
2.3.1. Clasificación.....	22
2.3.2. Ventajas del empleo de las puzolanas.....	24
2.4. CAÑA DE AZÚCAR.....	25



2.4.1. Producción de la caña de azúcar.....	25
2.4.2. Ceniza de Bagazo de Caña.....	26
2.5. AGREGADOS PÉTREOS.....	28
2.5.1. Forma de los agregados pétreos.....	28
2.5.2. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto.	29
2.6. AGUA DE MEZCLADO.....	31
2.6.1. Especificaciones.	31
2.7. ADITIVOS.....	33
CAPÍTULO 3. MATERIALES DE ESTUDIO	34
3.1. CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	34
3.2. CEMENTO PORTLAND.....	37
3.3. AGUA DE MEZCLADO.....	38
3.4. ADITIVO.....	40
3.5. MATERIALES PÉTREOS.....	41
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE MEZCLA	43
4.1. INTRODUCCIÓN.....	43
4.2. DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI).....	45
CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYES PARA LA CARACTERIZACIÓN	49
5.1. DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	49
5.1.1. Práctica estándar para el muestreo de agregados.....	50
5.1.2. Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	51
5.1.3. Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporada por secado.	54
5.1.4. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica suelta y compacta).	55
5.1.5. Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	56
5.1.6. Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	59
5.1.7. Método de prueba estándar para materiales que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.	61
5.1.8. Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.....	63
5.1.9. Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.....	64



5.1.10. Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.....	66
5.1.11. Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.....	71
5.2. DEL CEMENTO PORTLAND.....	74
5.2.1. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.....	75
5.2.2. Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.....	77
5.2.3. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	80
5.3. DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	82
5.3.1. Secado de la ceniza.....	82
5.3.2. Cribado de la ceniza.....	83
5.3.3. Granulometría de la CBC previo al proceso de pulverización.....	83
5.3.4. Pulverización de la ceniza.	84
5.3.5. Granulometría de la CBC posterior al proceso de pulverización.....	86
5.3.6. Consistencia normal Cemento-CBC.	86
5.3.7. Tiempos de fraguado Cemento-CBC.....	88
5.4. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PRELIMINARES.	89
5.5. PRUEBAS EN EL CONCRETO FRESCO.....	93
5.5.1. Método de prueba estándar para el flujo de asentamiento del concreto autocompactable.....	93
5.5.2. Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio.	96
5.6. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO ENDURECIDO (PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS).....	97
5.6.1. Método de prueba estándar para el curado de especímenes de prueba en el laboratorio.	98
5.6.2. Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.....	100
5.6.3. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.....	102
5.6.4. Módulo de Elasticidad Estático.....	105
5.6.5. Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.....	107



5.6.6. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.....	110
5.6.7. Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.....	113
5.7. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO ENDURECIDO (PARÁMETROS DE DURABILIDAD).....	115
5.7.1. Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.....	115
5.7.2. Resistividad Eléctrica.	117
5.7.3. Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar en especímenes cilíndricos de concreto.....	119
5.7.4. Método de prueba estándar determinar la abrasión del concreto.....	122
5.7.5. Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.....	124
5.7.6 Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.	127
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	129
6.1. DEL DISEÑO DE MEZCLA.	129
6.2. DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES.	133
6.3. DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	134
6.3.1. Contenido total de humedad evaporado por secado.	134
6.3.2. Masa unitaria en agregados (Suelta y Compacta).....	135
6.3.3. Densidad relativa y absorción del agregado fino.....	136
6.3.4. Densidad relativa y absorción del agregado grueso.....	137
6.3.5. Materiales finos que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.	137
6.3.6. Terrones de arcillas en agregados.....	138
6.3.7. Impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.	139
6.3.8. Valor de equivalente de arena.	139
6.3.9. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.....	140
6.4. DEL CEMENTO PORTLAND.....	141
6.4.1. Consistencia normal.	141
6.4.2. Tiempos de fraguado.	142
6.4.3. Densidad del cemento.	142
6.5. DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	142
6.5.1. Consistencia normal CPC-CBC.....	142



6.5.2. Tiempos de fraguado CPC-CBC.....	143
6.5.3 Análisis granulométrico de la CBC. (Previo y posterior al proceso de pulverización).....	143
6.6. DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	145
6.6.1. Flujo de asentamiento del concreto.....	145
6.6.2. Elaboración de especímenes.....	145
6.7. DEL CONCRETO ENDURECIDO. PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS.....	147
6.7.1. Resistencia a la compresión.....	147
6.7.2. Módulo de Elasticidad Estático.....	148
6.7.3. Resistencia a la compresión diametral. (Tensión indirecta).....	148
6.7.4. Resistencia a la flexión.....	149
6.7.5. Frecuencia de resonancia.....	150
6.8. DEL CONCRETO ENDURECIDO. PARÁMETROS DE DURABILIDAD.....	152
6.8.1. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	152
6.8.2. Resistividad eléctrica.....	153
6.8.3. Determinación de la absorción capilar y porosidad efectiva.....	153
6.8.4. Abrasión del concreto.....	157
6.8.5. Ataque por sulfato de sodio.....	160
6.8.6. Carbonatación.....	161
6.8.7. Resumen de resultados.....	162
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	163
BIBLIOGRAFÍA.....	165



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura i. Producción de cemento por las regiones incluidas en la base de datos GNR en 2013. (GNR).	xxiii
Figura ii. Producción total de clínker para el año 2013. (GNR).	xxiii
Figura iii. Producción total de cemento gris y cemento blanco, para el año 2013. (GNR).	xxiv
Figura iv. Total bruto de emisiones de CO ₂ excluyendo el CO ₂ de la generación de energía in.situ correspondientes a cemento gris y cemento blanco, para el año 2013. (GNR).	xxiv
Figura v. Emisiones brutas de CO ₂ – Promedio ponderado excluyendo el CO ₂ de la generación de energía in situ – clínker gris. (GNR).	xxv
Figura vi. Emisiones brutas de CO ₂ - Promedio ponderado excluyendo el CO ₂ de la generación de energía in situ. (GNR).	xxv
Figura vii. Consumo de energía promedio ponderado por tonelada de cemento (gris y blanco). (GNR).	xxvi
Figura viii. Comparativa nacional, estatal e ingenio. Producción de caña molida bruta (Unión Nacional de Cañeros).	xxviii
Figura ix. Comparativa nacional, estatal e ingenio. Producción de bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).	xxix
Figura x. Comparativa nacional. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).	xxix
Figura xi. Comparativa estatal. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).	xxx
Figura xii. Comparativa Pedernales. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).	xxx
Figura xiii. Regiones cañeras de México. (SAGARPA).	xxxii
Figura xiv. Ingenios azucareros de México. (SAGARPA)	xxxii
Figura 15. Representación sistemática de materiales con porosidad similar pero: (a) alta permeabilidad por los poros capilares interconectados por grandes pasajes y (b) baja permeabilidad, poros capilares segmentados y unidos solamente en algunas partes (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	7
Figura 16. El cemento es una material que al entrar en contacto con el agua se solidifica y se vuelve duro (UNAD, 2016).	10
Figura 17. Etapas en la producción tradicional del cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	13
Figura 18. Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través del proceso seco (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	14
Figura 19. Proceso de producción del Clínker de la materia prima al producto final (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	16
Figura 20. El examen de secciones finas pulidas de clínker Portland muestra la alita (C ₃ S) como cristales angulares y claros. Los cristales más oscuros y arredondados con la belita (C ₂ S). Aumento 400x. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	20
Figura 21. Micrografías electrónicas de (izquierda) silicato dicálcico hidratado, (medio) silicato tricálcico hidratado y (derecha) cemento Portland normal hidratado. Observe la naturaleza fibrosa de los productos hidratos de silicato de calcio. Fragmentos rotos de cristalitas de hidróxido de calcio angular también están presentes (derecha). La unión de las fibras y la adhesión de las partículas de hidratación son responsables por el desarrollo	



de la resistencia de las pasta de cemento Portland. Referencias (izquierda y el medio) (Brunauer, 1962) y (derecha) (Copeland & Schulz, 1962). 21

Figura 22. Micrografía (SEM) de una ceniza volante tipo F. (Salazar J., 2016)..... 23

Figura 23. Puzolana natural de origen volcánico pumítico. (Salazar J., 2016). 23

Figura 24. Caña de azúcar (123RF, 2016)..... 25

Figura 25. El agua que se pueda beber puede ser utilizada en la elaboración de mezcla de concreto hidráulico (Radio Santa Fe, 2016)..... 31

Figura 26. Patio interior en el ingenio Pedernales (izquierda) Calderas para la producción de azúcar de caña (centro y derecha). (Fotografías: E. González Castro)..... 36

Figura 27. Tolva de almacenamiento y canalización de la CBC producida (izquierda). CBC en estado húmedo debajo de la tolva (centro). CBC que se extrajo para su traslado y posterior análisis y empleo en el laboratorio de resistencia de materiales de la U.M.S.N.H. (derecha). (Fotografías: E. González Castro)..... 36

Figura 28. Localización del ingenio Pedernales S.A. de C.V. (Google maps, 2016). 36

Figura 29. Cemento CPC 30R RS. (CEMEX, 2016)..... 37

Figura 30. Ubicación del banco de materiales triturados (Google Maps, 2015). 42

Figura 31. Ubicación del banco de arena de Joyitas. (Google maps, 2016)..... 42

Figura 32. Muestreo del agregado grueso en el banco de material triturado. (Fotografías: E. González Castro)..... 50

Figura 33. Extendido de la arena sobre una superficie limpia para su secado al sol (izquierda). Uso del divisor mecánico (derecha). (Fotografías: E. González Castro). 53

Figura 34. Agregado grueso triturado apilado en forma cónica sobre una superficie dura y limpia (izquierda). Mezcla dividida en 4 partes iguales (derecha). (Fotografías: E. González Castro)..... 53

Figura 35. Secado de la muestra representativa (arena volcánica). (Fotografía: E. González Castro)..... 54

Figura 36. Comparación de los recipientes utilizados para los ensayos de masa unitaria en grava arena, respectivamente. (Fotografías: E. González Castro). 55

Figura 37. Llenado del recipiente en 3 capas dando 25 golpes por capa (izquierda). El procedimiento se repite 3 veces para obtener un valor confiable (derecha). (Fotografías: E. González Castro)..... 56

Figura 38. Medidas cono troncocónico y muestra seca superficialmente [NMX-C-165]. ... 57

Figura 39. Muestra de 300 g arena seca superficialmente (izquierda). Matraz de Chapman con la muestra de arena una vez que se han sacado las burbujas de aire (derecha). (Fotografías: E. González Castro). 58

Figura 40. Muestras representativas de agregado grueso superficialmente seco (charolas) y material seco en la parrilla (hojas de papel, izquierda) (Fotografía: E. González Castro). Picnómetro en prueba de densidad (derecha). (Fotografía: F. López Regalado). 61

Figura 41. Ruptura de los terrones de arcilla. (Fotografía: F. López Regalado)..... 64

Figura 42. Comparación del color de las botellas con la escala colorimétrica (arena volcánica). (Fotografía: E. González Castro)..... 65

Figura 43. Mallas apiladas en orden decreciente de tamaño de abertura en la máquina de cribado Raf-tap (izquierda). Resultados finales del cribado (derecha). (Fotografías: E. González Castro)..... 67



Figura 44. Probeta conteniendo la solución de trabajo hasta una altura de 10 cm (izquierda). Probetas reposando después de haber sido agitadas (derecha). (Fotografías: E. González Castro).....	73
Figura 45. Pisón descansando sobre la arena (izquierda). Lectura superior del pisón (derecha). (Fotografías: E. González Castro).....	74
Figura 46. Ilustración del aparato de Vicat utilizado en el ensaye de Consistencia Normal. [[NMX-C-057-1997-ONNCCE].	76
Figura 47. Aparato de Vicat con la masa de cemento antes de tomar la lectura (izquierda). Lectura final, penetración de la aguja de Vicat de 10 mm (derecha). (Fotografías: E. González Castro).....	77
Figura 48. Diagrama de la pastilla de cemento sobre la placa de vidrio [ASTM-C-266-04].	78
Figura 49. Descripción del aparato de Gillmore. [ASTM-C-266-04].....	79
Figura 50. Aparato de Gillmore y pastilla de cemento resultado del ensaye de consistencia normal, ambos en el cuarto húmedo. (Fotografía: E. González Castro).	79
Figura 51. Matraz de Le Chatelier para la determinación de la densidad del cemento [Norma I.N.V. E-307-07].	81
Figura 52. Secado de la ceniza al sol, charola con CBC después del primer secado a la izquierda y CBC apenas extendida y con su humedad de campo, a la derecha y de un color más oscuro. (Fotografía: E. González Castro).	82
Figura 53. Máquina cribadora (izq.). Muestra de ceniza para cribado (centro). Máquina Raptap terminando el proceso de cribado (derecha). (Fotografía: E. Glez. Castro).	83
Figura 54. Mallas y muestra representativa de CBC (izquierda). Mallas 100, 200 y Charola con sus respectivos retenidos (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	84
Figura 55. Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Fotografía: E. González Castro).	85
Figura 56. Pulverización de la CBC. (Propia del autor: izquierda. Fotografía: A. Flores: derecha).....	85
Figura 57. Muestra de CBC para el cribado (izquierda). Cribado en máquina Raf-tap (derecha). (Fotografías: E. González Castro). En medio, Emmanuel Glez. (Fotografía: A. Flores Ponce).....	86
Figura 58. Material necesario para el ensaye de Consistencia Normal de la mezcla CPC-CBC. (Fotografía: E. González Castro).	87
Figura 59. Medición de la penetración con el aparato de Vicat en la pasta CPC-5% CBC. (Fotografía: A. Flores Ponce).	87
Figura 60. Penetración de 10 mm en la pasta CPC-5%CBC (izq.). Desperdicio de pasta durante los ensayos de CN (derecha). (Fotografías: E. González Castro).....	87
Figura 61. Moldeado de la pastilla CPC-5% CBC para la determinación de los tiempos de fraguado. (Fotografía: A. Flores Ponce).	88
Figura 62. Pastillas de CPC-CBC, 5% (izquierda) y 10% (derecha). (Fotografía: E. González Castro).....	88
Figura 63. Cilindros de la mezcla CPC-20%CBC. (Fotografía: E. González Castro).....	89
Figura 64. Cilindros de la mezcla CPC-5%CBC. (Fotografía: E. González Castro).....	90
Figura 65. Cilindros de la mezcla CPC-10%CBC. (Fotografía: E. González Castro).....	90
Figura 66. Cilindros a la edad de 7 días. (Fotografía: E. González Castro).	91
Figura 67. Cilindros cabeceados con azufre. (Fotografía: E. González Castro).	91



Figura 68. Ensaye de compresión a la edad de 7 días. (Fotografías: E. González Castro).	92
Figura 69. Estructura interna de un cilindro y mezcla CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).	92
Figura 70. Revenimiento del concreto. Prueba fallida. (Fotografía: E. González Castro).	95
Figura 71. Asentamiento en la mezcla testigo. (Fotografía: E. González Castro).	95
Figura 72. Revolvedora y especímenes elaborados. (Fotografía: E. González Castro).	97
Figura 73. Inmersión de los elementos en la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).	99
Figura 74. Medición de la temperatura del agua de la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).	99
Figura 75. Medición del pH del agua de la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).	99
Figura 76. Ejemplo de un plato metálico. [NMX-C-109-ONNCCE-2013].	101
Figura 77. Cilindro cabeceado con mortero de azufre. (Fotografía: E. González Castro).	101
Figura 78. Cilindros Testigo – 7 días (izquierda) – 14 días (centro) – 60 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	103
Figura 79. Cilindros CPC-10%CBC – 7 días (izquierda) – 60 días (centro y derecha). (Fotografías: E. González Castro).	103
Figura 80. Cilindros CPC-10%CBC – 90 días. (Fotografías: E. González Castro).	103
Figura 81. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión [NMX-C-083-ONNCCE-2002].	104
Figura 82. Gráficas esfuerzo-deformación unitaria para concretos de distintas resistencias. (Romo, 2009).	106
Figura 83. Especímen en la máquina de prueba. [NMX-C-163-1997-ONNCCE].	108
Figura 84. Cilindro CPC-10%CBC en la máquina Universal a la edad de 7 días (izquierda). Cilindro CPC-10%CBC fallado a la edad de 60 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	109
Figura 85. Cilindro Testigo fallado a la edad de 14 días (izquierda). Cilindro Testigo a tensión indirecta a la edad de 90 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	109
Figura 86. Marca de los tercios de la viga (izquierda). Viga apoyada a una distancia de 3 veces el peralte de la misma (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	111
Figura 87. Ensaye a flexión en CPC-10%CBC -7 y 28 días de edad. (Fotografías: E. González Castro).	112
Figura 88. CPC-10%CBC-7 días (izquierda). Testigo-7 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	112
Figura 89. Estructura interna de vigas de CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).	112
Figura 90. Determinación de la masa del espécimen (izquierda). Colocación de la viga en el aparato E-meter para medir la resonancia (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	113
Figura 91. Centrado del espécimen a fin de que coincidan el transmisor y el receptor. (Fotografías: E. González Castro).	114
Figura 92. Vibración del espécimen y registro de la frecuencia más alta. (Fotografías: E. González Castro).	114



Figura 93. Equipo para la medición de la velocidad de pulso. (Fotografía: E. Glez. Castro).	116
Figura 94. Medición de masa y longitud de los especímenes. (Fotografías: E. González Castro).	118
Figura 95. Medición de la resistividad en cilindros y prismas (Fotografías: E. Glez. Castro).	118
Figura 96. Preparación de las pastillas (izquierda). Pastillas CPC-10%CBC sobre la cama de agua. (Centro y derecha). (Fotografías: E. González Castro).	121
Figura 97. Corte de los cilindros para obtener las pastillas. (Fotografía: E. Glez. Castro).	122
Figura 98. Muestras en el horno (izquierda) y máquina de Los Ángeles (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	123
Figura 99. Comparativa de las pastillas 0 a 500 revoluciones. Mezcla testigo (izquierda). Mezcla CPC-10%CBC (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	123
Figura 100. Corte de los cilindros (izquierda). Preparación de la solución de sulfato de sodio (centro). Secado en el horno a temperatura de 50°C (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	125
Figura 101. Rodajas obtenidas de cilindros. A la izquierda rodajas de la mezcla CPC-10%CBC, y a la derecha rodajas de la mezcla testigo. (Fotografías: E. González Castro).	125
Figura 102. Rodajas en su respectivo recipiente de prueba. (Fotografías: E. Glez. Castro).	126
Figura 103. Determinación de la masa antes de iniciar los ciclos de prueba. Testigo y CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).	126
Figura 104. Deterioro por la expansión de cristales al final del cuarto ciclo. (Fotografías: E. González Castro).	126
Figura 105. Cilindros marcados en su cara sur (izquierda). Cilindros probados con fenolftaleína (derecha). (Fotografías: E. González Castro).	128
Figura 106. Profundidad de carbonatación, testigo a la izquierda y CPC-10%CBC derecha. (Fotografías: E. González Castro).	128
Figura 107. Resultados granulométricos de la muestra 1 de la arena.	140
Figura 108. Resultados granulométricos de la muestra 2 de la arena.	140
Figura 109. Golpes en elaboración de prismas. (Diagrama: E. González Castro).	146
Figura 110. Poros internos en concreto CPC-10%CBC. (Fotografías: E. Glez. Castro).	146
Figura 111. Segregación de agregados gruesos en vigas testigo. (Fotografías: E. González Castro).	146
Figura 112. Resultados del esfuerzo a compresión promedio por edad de prueba.	147
Figura 113. Resultados del módulo de elasticidad estático calculado por edad de prueba.	148
Figura 114. Resultados del esfuerzo a tensión indirecta promedio por edad de prueba.	149
Figura 115. Resultados del esfuerzo a flexión promedio por edad de prueba.	150
Figura 116. Resultados del módulo de elasticidad dinámico promedio por edad de prueba.	151
Figura 117. Resultados de la velocidad de pulso promedio por edad de prueba.	152
Figura 118. Resultados de la resistividad eléctrica promedio por edad de prueba.	153



Figura 119. Ensayo de absorción capilar para una rodaja del tercio superior de un cilindro de la mezcla CPC-10%CBC.	155
Figura 120. Resultados de la sorción capilar, (S).	155
Figura 121. Resultados del coeficiente de absorción capilar, (k).	156
Figura 122. Resultados de la resistencia a la penetración del agua, (m).	156
Figura 123. Resultados de la porosidad efectiva, (ϵ_e).	157
Figura 124. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio inferior. ...	158
Figura 125. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio medio.	158
Figura 126. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio superior. .	159
Figura 127. Comparativa general del desgaste por abrasión.	159
Figura 128. Resultados de la pérdida de masa por ataque de sulfatos.	160
Figura 129. Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 20 años.	162



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla i. Producción y consumo nacional de cemento. Fuente: (CANACEM, 2014).....	xxi
Tabla ii. Cifras en toneladas sobre el total de caña molida bruta producida. (Unión nacional de Cañeros).....	xxvii
Tabla iii. Cifras en toneladas sobre el total de bagazo de caña producido. (Unión Nacional de Cañeros).....	xxviii
Tabla 4. Relación Agua-Material Cementante Máxima y Resistencia de Diseño Mínima para Varias Condiciones de Exposición (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).	4
Tabla 5. Requisitos para el Concreto Expuesto a los Sulfatos del Suelo y del Agua (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).....	5
Tabla 6. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 29)	15
Tabla 7. Tipos de cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2010].	19
Tabla 8. Clase resistente [NMX-C-414-ONNCCE-2010].	19
Tabla 9. Características especiales [NMX-C-414-ONNCCE-2010].	19
Tabla 10. Proceso de modificación del bagazo en la quema de la ceniza (Ríos González, 2011).	27
Tabla 11. Composición química de cenizas de bagazo de caña de azúcar realizada por varios investigadores (Márquez Montes, 2010).....	27
Tabla 12. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas [NMX-C-122-ONNCCE-2004].	32
Tabla 13. Resultados del análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto.	39
Tabla 14. Propiedades típicas del CRISOTÁN R-5 (Ficha técnica CRISOTAN R-5).....	40
Tabla 15. Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto (Ficha técnica CRISOTAN R-5).	41
Tabla 16. Resumen de las propiedades de los materiales.	45
Tabla 17. Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción [ACI 211].	45
Tabla 18. Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire [ACI 211].	46
Tabla 19. Desviación estándar de la resistencia del concreto [ACI 211].	46
Tabla 20. Fórmulas para determinar el F'cr [ACI 211].	47
Tabla 21. Selección de la relación agua/cemento [ACI 211].	47
Tabla 22. Estimación del agregado grueso [ACI 211].	47
Tabla 23. Normas correspondientes a los agregados pétreos.	49
Tabla 24. Número, frecuencia y tamaño del muestreo [M-MMP-4-04-001/02].	51
Tabla 25. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).	62
Tabla 26. Límites máximos de partículas deleznable [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].	64
Tabla 27. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas [ASTM-C-40-04].	65
Tabla 28. Límites del Módulo de Finura [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03]. ..	68
Tabla 29. Límites de Granulometría para agregado Fino.	68
Tabla 30. Límites Granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa [ASTM-C-33-03].	70
Tabla 31. Normas correspondientes al cemento.....	74
Tabla 32. Normas correspondientes al concreto fresco.....	93



Tabla 33. Número de capas requeridas para los especímenes. [NMX-C-159-ONNCCE-2004].....	97
Tabla 34. Diámetro de Varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes de prueba [NMX-C-159-ONNCCE-2004 y ASTM-C-192].	97
Tabla 35. Normas correspondientes al concreto endurecido.....	97
Tabla 36. Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre [NMX-C-109-ONNCCE-2004].	101
Tabla 37. Tolerancias [NMX-C-083-ONNCCE-2002].	105
Tabla 38. Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto. (Romo, 2009).	107
Tabla 39. Normas correspondientes a la durabilidad del concreto.	115
Tabla 40. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto [Red Durar, 2000].	117
Tabla 41. Criterios de evaluación. [Red Durar, 2000].	119
Tabla 42. Carbonatación en relación con la humedad relativa (R. Montani, 2000).....	128
Tabla 43. Resumen de las cantidades para 1 m ³	132
Tabla 44. Cantidades necesarias totales correspondientes a 1.2 m ³	132
Tabla 45. Resultados a ensaye de compresión. Especímenes preliminares de prueba. .	133
Tabla 46. Comparación de los resultados preliminares respecto a la resistencia de proyecto.	134
Tabla 47. Porcentaje de humedad actual en arena volcánica.	134
Tabla 48. Porcentaje de humedad actual en grava triturada.	135
Tabla 49. Masa Unitaria Suelta en arena volcánica.	135
Tabla 50. Masa Unitaria Suelta en grava triturada.....	135
Tabla 51. Masa Unitaria Compacta en arena volcánica.	136
Tabla 52. Masa Unitaria Compacta en grava triturada.....	136
Tabla 53. Densidad relativa en arena volcánica.....	136
Tabla 54. Porcentaje de absorción en arena volcánica.	137
Tabla 55. Densidad relativa en grava triturada.....	137
Tabla 56. Porcentaje de absorción en grava triturada.....	137
Tabla 57. Material que pasa la malla N° 200.	138
Tabla 58. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].	138
Tabla 59. Terrones de arcilla en arena.	138
Tabla 60. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].	139
Tabla 61. Impurezas orgánicas en agregado fino. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-40-04].	139
Tabla 62. Equivalente de arena en arena volcánica.....	139
Tabla 63. Módulo de Finura promedio.	141
Tabla 64. Análisis granulométrico en grava triturada. Masa en g.	141
Tabla 65. Consistencia Normal.	141
Tabla 66. Tiempos de fraguado del cemento Portland.	142
Tabla 67. Densidad del cemento Portland.	142
Tabla 68. Consistencia Normal CPC-CBC.....	142
Tabla 69. Comparativa consistencia normal de CPC y CPC-CBC.....	143
Tabla 70. Tiempos de fraguado CPC-CBC.....	143
Tabla 71. Análisis granulométrico de CBC previo al pulverizado. Muestra 1.Masa en g.	144



Tabla 72. Análisis granulométrico de CBC previo al pulverizado. Muestra 2.Masa en g.	144
Tabla 73. Análisis granulométrico de la CBC post-pulverizado. Masa en g.	144
Tabla 74. Resultados del asentamiento del concreto.....	145
Tabla 75. Módulo de elasticidad dinámico calculado mediante la frecuencia de resonancia.	151
Tabla 76. Serie de datos para el tercio superior de un cilindro de la mezcla CPC-10%CBC.	154
Tabla 77. Resultados promedio obtenidos del ensaye de carbonatación.....	161
Tabla 78. Resumen de resultados.....	162



DEDICATORIAS

A mi papá: **Manuel González Morales**. ¡Gracias papá! Esta carrera representa tu trabajo y todo el esfuerzo que hiciste porque yo pudiera tenerla, así que es tuya también. Sin tu apoyo, llegar a este día no hubiera sido posible, o hubiera sido mucho más complicado. Gracias por creer en que podía hacer las cosas bien y por no dejarme solo. Has sido un gran ejemplo de trabajo y quiero que sepas que eres muy importante en mi vida y me siento muy feliz por tenerte en ella. Si no lo sabías, aprovecho el momento para confesarte que tienes alguien que te admira. Sin temor a equivocarme sé que siempre podré contar contigo.

A mi mamá: **Rosa María Castro Zavala**. Gracias mamá por tu amor y tus sacrificios, gracias por cada vez que te preocupaste por mí y me apoyaste en cada proyecto en el que decidía participar, por creer en mí y darme la confianza que muchas veces me faltaba en mí mismo. Me secaste lágrimas, me abrazaste confortablemente, celebraste mis éxitos, me viste triunfar y caer, pero sobre todo me animaste a mantenerme fuerte. Hoy puedo escribir con toda seguridad que mi madre es una promesa de que voy a tener una amiga para siempre.

Papás, seguramente en este momento la voz me estará temblando, sin embargo, debo hacerles saber que son mis héroes, maestros y mejores amigos. Hay cosas y personas que simplemente se quedan grabadas para siempre en la memoria, se vuelven parte de nosotros sin darnos cuenta, nos completan y nos hacen crecer, como cosas, me quedo con su amor, sus consejos, sus enseñanzas y las alegrías que juntos hemos vivido, como personas están ustedes encabezando la lista, siempre estarán presentes a donde quiera que vaya y mis logros serán suyos. Mi trabajo y esfuerzo está dedicado a ustedes, los amo y agradezco a Dios por tenerlos como padres. ¡Gracias por todo!

A mis hermanos **Julio César y Oliver**: Gracias por todas las veces que me han tendido la mano y me han brindado una palabra de apoyo. Por ser hermanos y amigos, y por haber estado presente en los momentos difíciles e importantes. Porque sé que lo seguirán estando. Por esto y muchas cosas más: ¡Gracias!

"Llegar a la meta no es vencer, lo importante es el camino y en él caer, levantarse, insistir, aprender"

"Sueñe en grande, planee bien, trabaje duro, sonría siempre y los milagros empiezan a suceder"

"Somos constructores, Somos creadores"



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme concluir esta tarea y mantener mi perseverancia y ánimos para no desistir. Por darme la fuerza que me hacía seguir adelante aunque el cansancio fuera grande.

Agradezco enormemente a mis padres por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por sus consejos y regaños, por creer en mí y ser aliento para lograr mis objetivos. A mis hermanos, quienes han sido mis compañeros y amigos a lo largo de mi vida. ¡A ustedes: mil gracias!

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por ser la institución que me formó profesionalmente. A la Facultad de Ingeniería Civil, que siempre llevaré en mi corazón y a la cual recordaré con mucho cariño. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, departamento de Resistencia de Materiales y todo su personal, por brindarme las instalaciones, material y equipo necesarios para el desarrollo de la investigación. A mis profesores, por sus enseñanzas y consejos.

A mi asesor, el M.A. Wilfrido Martínez Molina, quien fue además mi tutor, profesor, líder y amigo, a la Doctora Elia Mercedes Alonso Guzmán, por sus valiosas aportaciones, consejos e ideas para conducir la investigación por el mejor camino, así mismo por resolver mis dudas y darme la confianza necesaria. Les agradezco todo lo aprendido de ustedes.

A Sandy, Isaías y Berna, quienes me brindaron su ayuda y consejos en todo momento, siendo mi apoyo incondicional en cada paso de la investigación. ¡Gracias Sandy! Por todas las indicaciones, por tu ayuda y apoyo. ¡Gracias Isaías! Por tantas coladas en las que me quitaste peso de encima, y tu apoyo siempre que lo necesitaba. ¡Gracias Berna! Por los dos días enteros de revisión y correcciones. Por los momentos de risa y los momentos en los que fueron guía. ¡Muchas gracias por estar ahí! A Mauricio y a Rosalía quienes me explicaron procedimientos que desconocía, y por las ocasiones en las que me dieron una palabra de ánimo.

Al Dr. Andrés Torres, Dr. Hugo Luis Chávez, por sus consejos y asesorías dadas con el fin de obtener mejores resultados.

A Los Primeros Cuatro Reprobados (LP4R): Aldo y sus formularios que hacían cualquier examen más sencillo, a Isaac y sus técnicas shaolin que nos salvaron la vida en tantos proyectos y tareas, a Gustavo, el más elegante y distinguido, a Josué y Tony por su ayuda en las coladas cuando ya no podía más, y por tantos apoyos y consejos de su parte, a Fabián, compañero de tesis y trabajo del laboratorio, con quien pasamos muchos momentos divertidos que hacían todo más llevadero, Fredy, Yovas y Sixto grandes amigos, trabajadores, ocurrentes. Fue para mí un gusto haberlos encontrado, con ustedes aprendí a trabajar en equipo y la carrera se volvió más sencilla. A mis amigas Alejandra, Lupita y Amirais, con quienes viví muchos



buenos momentos, y de quienes recibí sus consejos y apoyo en innumerables ocasiones. A Gaby Servín, que nunca se preocupó por mí.

A todos aquellos quienes me tendieron la mano en este gran proyecto, e hicieron mi trabajo más sencillo, significó mucho su ayuda para mí: Josué de Jesús García Chávez, Isaac Olivares Valencia, Andrea Villaseñor Sánchez, Aldo Alberto Rangel Torres, Alejandra Díaz Cruz, Maestro Noel Díaz González, José Wilbert Viveros Ramos, Julio Díaz Cardiel, Eduardo Carreón Hernández, José Israel Bocanegra Torres, Jorge Sánchez, Itzel Rubio, Elizabeth Contreras Marin, Carolina Chiquito, Arturo Zalapa, Luis Felipe Martínez, Miguel Ángel Martínez Rivera.

A mis compañeros de tesis: Antonio Guzmán Oropeza, Fabián López Regalado, Amirais Flores Ponce, Bersain De León Ambrocio, Óscar Cuellar Martínez, Jesús Daniel Rodríguez Palominos, Jesús Hernández Méndez (Chuy), Job Daniel Álvarez, Marcos Ariel Villanueva Guzmán, Tranquilino Francisco Martínez, Sixto Alberto Pineda Pineda, Víctor Hugo Blancas Herrera, Fidel, Luis Colín Velázquez, y no podía faltar la famosa #TesisColin.

Al ingenio azucarero de Pedernales por donar la ceniza de bagazo de caña para su estudio.



I. RESUMEN

El empleo de puzolanas como sustitución parcial de cemento Portland (CP) en la elaboración de concreto pretende incrementar sus propiedades mecánicas a edades tardías, reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera y crear a su vez un eco-material que satisfaga las solicitudes de proyecto. De acuerdo con cifras del sistema Getting the Numbers Right (GNR), en 2013 se produjeron 862 millones de toneladas de cemento Portland y 546 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, en el mundo. Acorde a las cifras provenientes de las “Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2005-2014”, publicadas por la Unión Nacional de Cañeros, en el período correspondiente a 2013-2014 se obtuvieron 15, 473, 145 toneladas de bagazo de caña a nivel nacional como parte del proceso de la molienda de caña de azúcar, lo que sitúa a nuestro país como una gran fuente de materia prima para el desarrollo de concretos ecológicos. La ceniza de bagazo de caña (CBC) se obtuvo de un ingenio azucarero ubicado en la localidad de Pedernales, municipio de Tacámbaro, Michoacán. Se sustituyó 10% del peso de cemento por CBC y se comparó el concreto ecológico con un testigo de relación agua cemento (A/C)= 0.42, utilizando un cemento CPC-30R-RS. En la investigación se realizaron pruebas con sustitución de cemento por CBC del 5%, 10% y 20% con respecto al peso del cemento, y se determinó como porcentaje óptimo el 10%, además se adicionó el 0.74%, con respecto al peso de cemento, de CRISOTAN R-5 como aditivo súper plastificante, reduciendo así la cantidad de agua de mezclado. Los especímenes fueron ensayados a las edades de 7, 14, 28, 60, 90 y 120 días por resistencia mecánica, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico (VPU); y por durabilidad a las edades de 120 días para ataque por sulfatos, 215 días para carbonatación, 155 días para porosidad, y finalmente 230 días para el desgaste por abrasión. En el ensaye a compresión se obtuvieron valores de 46.74 MPa y 47.45 MPa para la muestra testigo y el concreto con CBC respectivamente. Se observa que la resistencia a compresión del concreto ecológico se encuentra 1.89% por encima de la resistencia del testigo, y 18.89% por encima de la resistencia de proyecto. En relación a los resultados de tensión indirecta, el concreto con CBC queda solamente un 1.11% debajo con relación al testigo y en el ensaye de flexión es superado, aunque alcanzó valores altos de Módulo de Ruptura (MR). En los ensayes de durabilidad presenta buenos resultados para velocidad de pulso ultrasónico, porosidad efectiva y carbonatación. Presenta resultados más desfavorables en los ensayes de resistividad eléctrica, resistencia a la abrasión y ataque por sulfatos. En términos generales, el concreto elaborado con la mezcla de CPC-10%CBC posee buenas propiedades que pueden ser aprovechadas y que a su vez pueden mejorarse en posteriores investigaciones.

Palabras Clave: concreto hidráulico, puzolana, ceniza de bagazo de caña, durabilidad, sustitución parcial.



II. ABSTRACT

The use of pozzolan as a partial replacement for Portland (PC) cement in developing concrete aims to increase its mechanical properties at later ages, reduce the amount of CO₂ in the atmosphere and in turn create an eco- material that meets the project solicitations. According to figures from the system Getting the Numbers Right (GNR), in 2013 were produced 862 million tons of Portland cement, and 546 million tons of CO₂ were produced, which they were released into the atmosphere in the world. According to figures obtained from the Unión Nacional de Cañeros “Estadísticas de la agroindustria de la caña de azúcar 2005-2014”, in the 2013/2014 period it reached the amount of 15, 473, 145 tons of sugarcane bagasse ash (SCBA) nationwide as part of the process of grinding sugar cane, which puts our country as a great source of raw material for possible use in the development of concrete ecological. The SBA was obtained from a sugar mill located in the town of Pedernales, municipality of Tacámbaro, Michoacán. 10% by weight of cement was replaced by SBA and compared the ecological concrete with a witness of water cement ratio (W/C) = 0.42, using a cement CPC-30R-RS. In research tests they were performed with cement replacement by SBA 5%, 10% and 20 % relative to the weight of cement, and optimal percentage was determined as 10%, besides was added 0.74% of CRISOTAN R-5, with relation of the cement weight, as super plasticizer admixture thereby reducing the amount of mixing water. The specimens were tested at ages 7, 14, 28, 60, 90 and 120 days in mechanical strength, electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity (UPV); and durability at the age of 120 days to sulfate attack, 2015 days for carbonation, 155 days for porosity, and finally 230 days to abrasive wear. In the compressive test values of 46.74 MPa and 47.45 MPa for the control sample and concrete with SBA they were obtained respectively. It is noted that the compressive strength of concrete ecological is 1.89% above the control resistance, and 18.89 % above the design strength. In relation to the results of strain, the concrete with SBA it is only 1.11% relative to the control below and it is surpassed in the bending test, however reached high values of modulus of rupture (MR). In durability testing shows good results for ultrasonic pulse velocity, effective porosity and carbonation. It presents unfavorable test results of electrical resistivity, abrasion resistance and sulfate attack. In general, the concrete mix made with SBA has good properties that can be exploited and which in turn can be improved in subsequent investigations.

Keywords: concrete, pozzolan, sugarcane bagasse ash, durability, partial substitution.



III. JUSTIFICACIÓN

En nuestro país en gran medida los avances tanto científicos como tecnológicos están encaminados a la generación de nuevos productos conjuntamente con el establecimiento de nuevos procesos que garanticen un desarrollo sustentable, los cuales involucran sin dejar duda alguna a todas las áreas del conocimiento. (S. Marquez-Montero, 2010).

El alto consumo de cemento Portland y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes que se utilizan como combustibles energéticos para su fabricación comprometen el futuro empleo de este material de construcción, por lo tanto resulta crucial que las empresas que lo producen encuentren la manera de reducir el impacto ambiental que generan, una de ellas sería mejorar la eficiencia de sus procesos de producción en planta, y una segunda opción representa el empleo de materiales alternativos para sustituir parcialmente el cemento Portland sustentándose en las experiencias y avances sobre las que ha transitado la tecnología del concreto. (J.F. Martirena-Hernández, 1998).

En México para el año de 2014 la producción nacional de cemento Portland alcanzó la cifra de 36.6 millones de toneladas, correspondiente a 294 Kg/habitante de acuerdo a la Tabla i que se presenta a continuación.

Tabla i. Producción y consumo nacional de cemento. Fuente: (CANACEM, 2014).

Año	Producción	Consumo nal. (Millones de tons.)	Habitantes	Kg/Habitante
2009	35.1	34.4	107,550,697	321
2010	34.5	33.9	112,336,538	301
2011	35.4	34.4	114,975,406	299
2012	36.2	34.6	116,901,761	295
2013	34.6	32.7	118,395,054	276
2014	36.6	35.2	119,713,203	294

El cemento Portland y el concreto son elementos insustituibles para la transición hacia una sociedad baja en carbono y hacia un futuro sostenible.

El concreto hidráulico es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, y el cemento Portland es su componente principal, pero durante su producción hay un alto consumo energético y grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero como es el caso de dióxido de carbono (La Jornada en Línea, 2014).



El incremento acelerado de la población mundial – combinado con el crecimiento en la urbanización, para quien la ONU estima que en el año 2050 dos tercios de las personas vivirá en ciudades - representa grandes retos para todos los grupos de interés involucrados en la planeación y desarrollo de ciudades realmente sostenibles (CEMEX, 2016).

III.I. CIFRAS DEL SISTEMA GNR.

Es fácil pasar por alto el uso del concreto en la sociedad. Éste juega un papel vital en nuestra vida cotidiana y en una sociedad que funcione. Sus beneficios son inmensos, pues se utiliza para construir nuestras escuelas, hospitales, edificios de viviendas, puentes, túneles, presas, sistemas de alcantarillado, aceras, pistas, carreteras y más.

Pocas personas se dan cuenta de que el concreto es de hecho el material sintético más utilizado en el mundo, con casi tres toneladas utilizadas anualmente para cada hombre, mujer y niño. Se utiliza el doble de concreto en todo el mundo que el total de todos los otros materiales de construcción, incluyendo madera, acero, plástico y aluminio. Ninguno de estos otros materiales puede reemplazar al concreto en términos de eficacia, precio y rendimiento para la mayoría de los propósitos.

Incluso menos personas son conscientes de los muchos beneficios ambientales que el uso del concreto trae.

Es de vital importancia para el desarrollo de productos y sistemas que se pueden utilizar para construir eco- edificios energéticamente eficientes y más duraderos, y el concreto se puede utilizar para hacer precisamente esto. El concreto, con su resistencia, durabilidad y excelente masa térmica debe ser un componente clave en los edificios ecológicos de hoy y del futuro (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, 2014-2015).

El sistema GNR (Getting the Numbers Right) es hasta la fecha la base de datos con la más amplia cobertura de la industria del cemento a nivel mundial. Actualmente, los participantes GNR cubren el 21% de la producción mundial de cemento, con una alta representación (por encima del 70 %) en Europa y América, y más del 41% en la India.

En China, el resto de Asia y Oriente Medio, se están realizando esfuerzos para aumentar la cobertura como partes adicionales que se unen al esfuerzo. La región latinoamericana y el caribe (Centroamérica) es la que corresponde a los países FICEM con una cobertura de casi el 70% de las plantas. En la Figura i se aprecia una comparativa de las regiones que conforman la GNR representando en porcentaje la cobertura estadística por región.

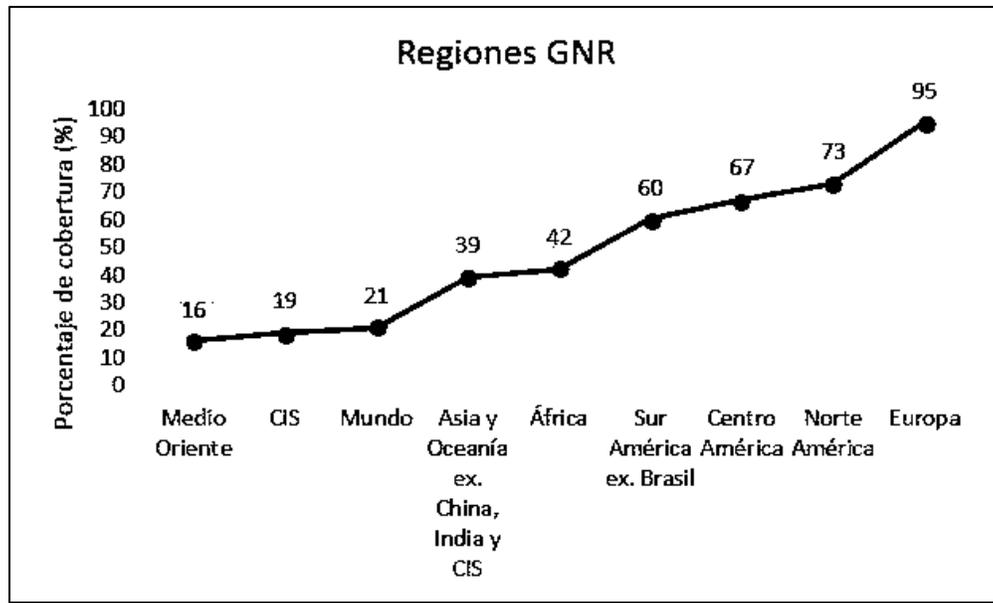


Figura i. Producción de cemento por las regiones incluidas en la base de datos GNR en 2013. (GNR).

México pertenece a la región de América Central, en el año de 2013 contaba con 4 compañías asociadas al sistema GNR que comprendía 29 plantas productoras de cemento. El sistema GNR nos proporciona cifras sobre producción de clínker, cemento gris, cemento blanco y emisiones de dióxido de carbono, entre otras estadísticas relacionadas con la industria de la producción de cemento y sus implicaciones energéticas y medio ambientales. Los principales gráficos y cifras correspondientes se muestran a continuación, las cuales fueron seleccionadas entre las existentes debido a su relevancia en la presente investigación.

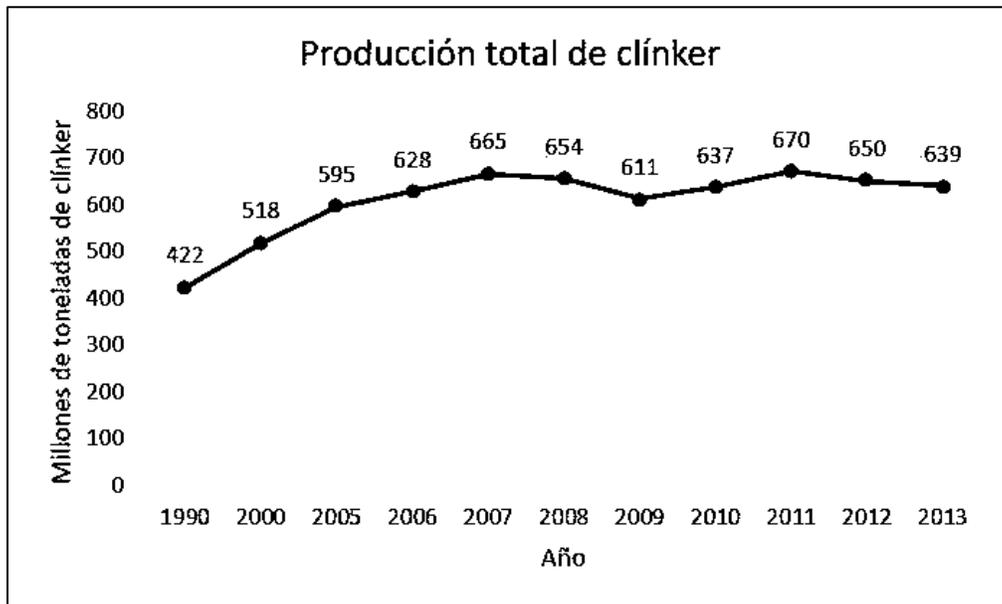


Figura ii. Producción total de clínker para el año 2013. (GNR).

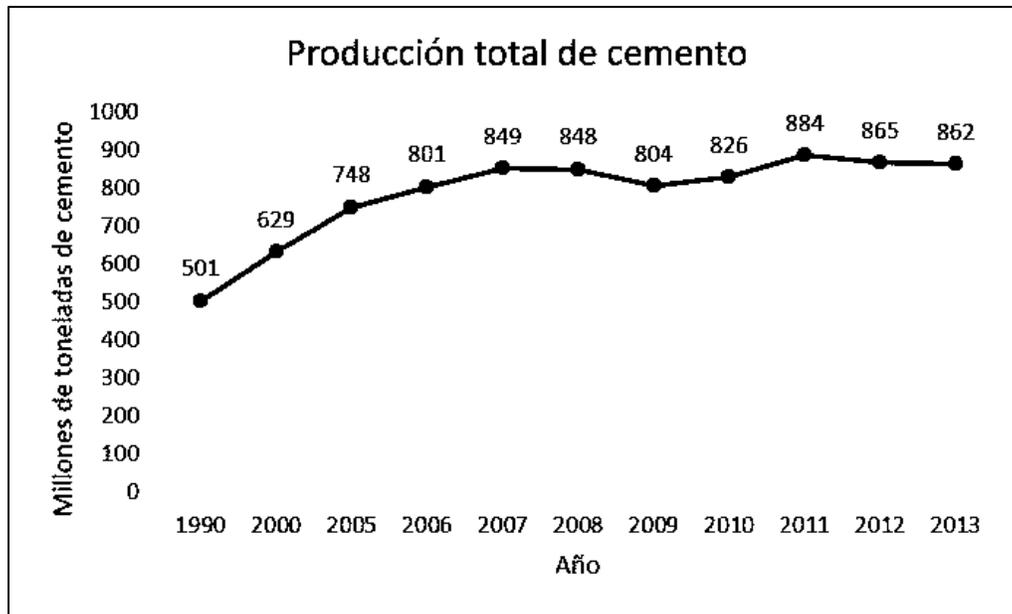


Figura iii. Producción total de cemento gris y cemento blanco, para el año 2013. (GNR).

Se observa que la producción de clínker en relación con la producción mundial de cemento gris y blanco es menor. Esto se debe a que el clínker es la materia prima para la producción del cemento, pero no el único componente. También se presentan en la figura iv las emisiones de CO₂ producidas durante los procesos:

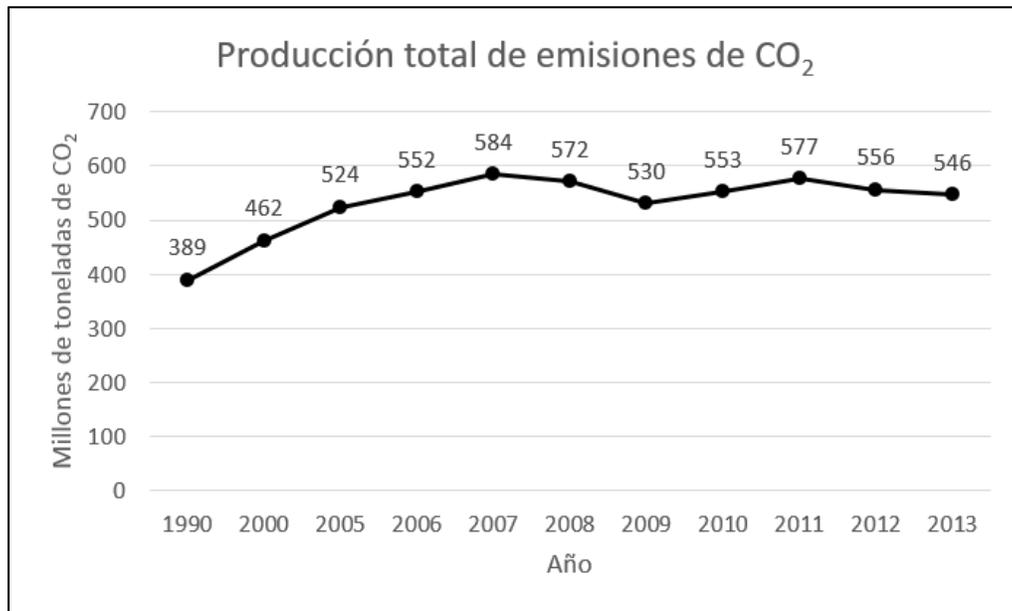


Figura iv. Total bruto de emisiones de CO₂ excluyendo el CO₂ de la generación de energía in.situ correspondientes a cemento gris y cemento blanco, para el año 2013. (GNR).



La Figura v nos muestra la tendencia a la baja de las emisiones de CO₂ producido por tonelada de clínker en el sistema GNR, lo cual demuestra una preocupación por parte de las empresas cementeras por contribuir a generar procesos más amigables con el medio ambiente.

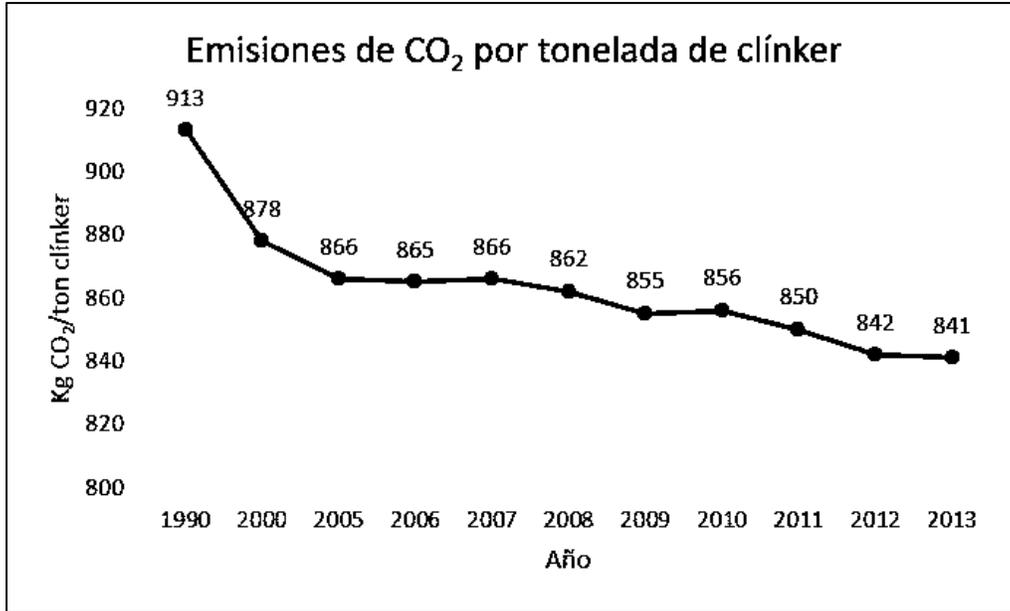


Figura v. Emisiones brutas de CO₂ – Promedio ponderado excluyendo el CO₂ de la generación de energía in situ – clínker gris. (GNR).

La Figura vi correspondiente solamente a las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento blanco, los datos totales y de cemento gris no aparecen en las estadísticas.

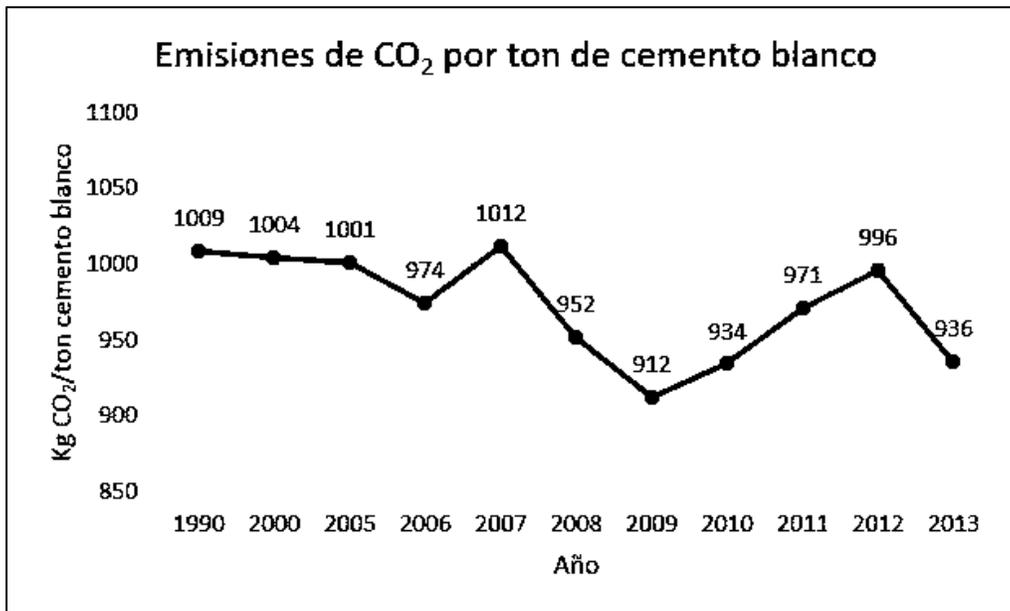


Figura vi. Emisiones brutas de CO₂ - Promedio ponderado excluyendo el CO₂ de la generación de energía in situ. (GNR).



A pesar de que la emisión de CO₂ alcanzó su mínimo nivel en la producción de cemento en 2009, y a partir de ese período hasta 2012 volvió a la alza, para el año de 2013 se realizó un esfuerzo por reducir nuevamente las cantidades de gas contaminante.

La Figura vii nos muestra la tendencia a la baja sobre la energía consumida en el proceso de fabricación del cemento:

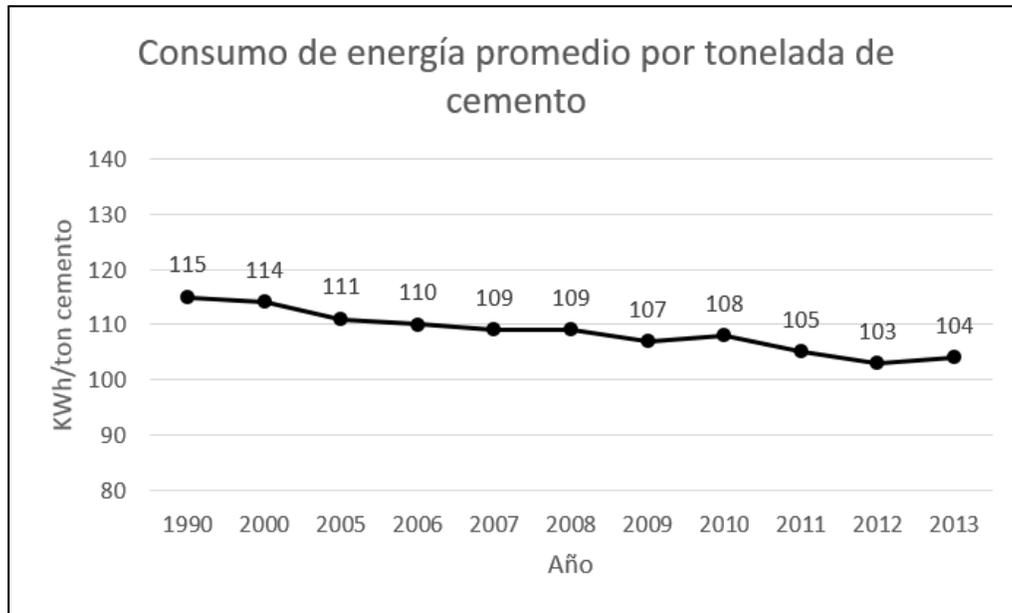


Figura vii. Consumo de energía promedio ponderado por tonelada de cemento (gris y blanco). (GNR).

Con un panorama alentador a continuar los esfuerzos, se puede concluir con base en los gráficos mostrados que a pesar de que la producción de cemento en el mundo ha ido en aumento, las emisiones producidas y la energía utilizada cada vez es menor.

La producción de cemento causa aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO₂ de origen humano, 50% de dichas emisiones son emisiones de los procesos que ocurren durante la producción de clínker, el 40% provienen de la combustión de los combustibles para calentar el horno de cemento Portland y 10% provienen del uso de la electricidad y el transporte.

La demanda de cemento Portland se prevé que continúe aumentando en todo el mundo, en particular en las economías emergentes, donde es muy necesaria la construcción de viviendas y aumenta la infraestructura. Por lo tanto, la reducción de las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de cemento es una tarea importante y urgente para el sector del cemento Portland (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, 2014-2015).



III.II. CIFRAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE CAÑA.

De acuerdo con cifras obtenidas de la Unión Nacional de Cañeros, “Estadísticas de la agroindustria de la Caña de azúcar 2005-2014”, en México se produjeron un total de 54, 329, 039 de toneladas de caña de azúcar que fueron molidas en el periodo 2013/2014, de las cuales 1, 486, 752 toneladas se molieron en el estado de Michoacán y en el ingenio de Pedernales, el cuál proporcionó la ceniza para la investigación, se produjeron 393, 981 toneladas.

Así mismo, en sus cifras de producción se presentan las correspondientes a la obtención de bagazo de caña, las cuales en el periodo de 2013/2014 alcanzaron las siguientes cantidades: 15, 473, 145 toneladas a nivel nacional, 424,170 toneladas en el estado de Michoacán y 122, 803 toneladas para el ingenio de Pedernales. Con base en las estadísticas podemos asegurar que nuestro país es una gran fuente de materia prima para la producción de ceniza de bagazo de caña, la cual puede ser utilizada, de acuerdo a la hipótesis, como material cementante en la elaboración de un concreto ecológico.

Debe mencionarse que los mismos ingenios producen la ceniza como un subproducto de la quema del bagazo utilizado como combustible en las calderas, por lo que no es necesario el empleo de otra fuente de energía para su obtención. Al ser un material considerado desecho, no es reportado en sus estadísticas, pero está ahí y es utilizado como abono por agricultores de la zona.

Se presentan en tablas y gráficos las cifras correspondientes a la producción de caña bruta molida y bagazo de caña a nivel nacional, estatal y del ingenio Pedernales correspondientes al período 2004-2014, además de un mapa sobre las regiones cañeras de la República Mexicana y los ingenios azucareros en México.

Tabla ii. Cifras en toneladas sobre el total de caña molida bruta producida. (Unión nacional de Cañeros).

Año	Nacional	Michoacán	Ingenio Pedernales
2004/2005	50 892 642	1 241 776	331 849
2005/2006	47 290 412	1 153 155	317 339
2006/2007	49 025 604	1 214 000	326 369
2007/2008	48 305 474	1 164 971	310 492
2008/2009	42 516 838	944 700	256 689
2009/2010	43 370 288	1 044 460	259 596
2010/2011	44 131 570	907 363	291 019
2011/2012	46 231 229	1 231 929	396 130
2012/2013	61 438 539	1 516 303	434 520
2013/2014	54 329 039	1 486 752	393 981

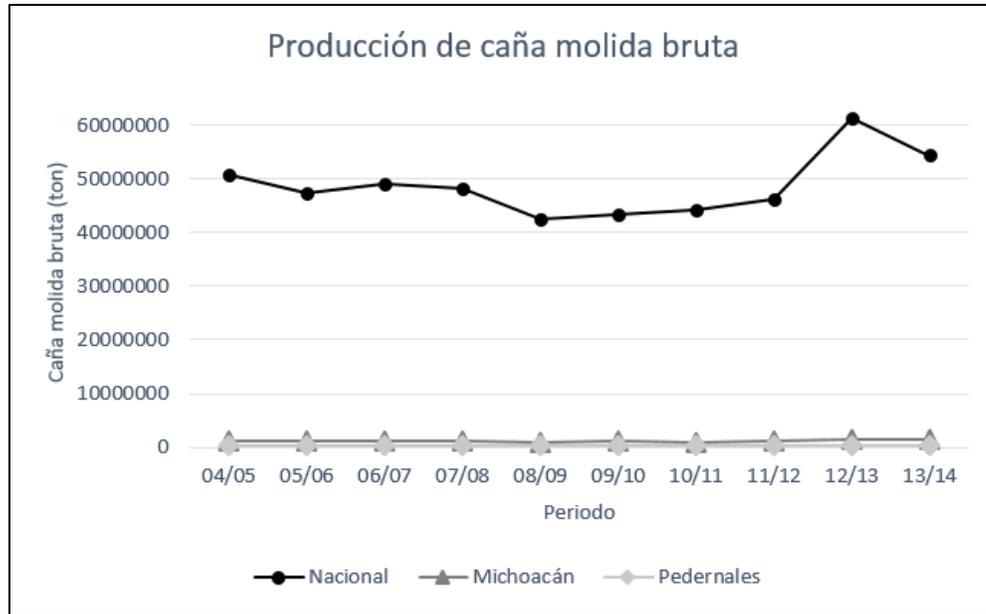


Figura viii. Comparativa nacional, estatal e ingenio. Producción de caña molida bruta (Unión Nacional de Cañeros).

La anterior información se presenta en forma de tabla y en forma de gráfico ya que no se aprecia claramente la diferencia existente entre las cantidades de caña producidas en el estado de Michoacán y el ingenio de Pedernales, así mismo el colocar las etiquetas de la magnitud de cada marcador crea un gráfico más que confuso.

De la misma manera se presenta a continuación la información correspondiente a la producción de bagazo de caña en los niveles nacional, estatal e ingenio de Pedernales. (Tabla iii y Figura ix).

Tabla iii. Cifras en toneladas sobre el total de bagazo de caña producido. (Unión Nacional de Cañeros).

Año	Nacional	Michoacán	Ingenio Pedernales
2004/2005	14 710 217	382 890	99 836
2005/2006	13 742 927	370 134	96 119
2006/2007	14 113 420	369 113	95 054
2007/2008	14 051 635	373 318	92 201
2008/2009	12 576 430	295 653	74 794
2009/2010	12 610 961	308 431	74 732
2010/2011	12 839 017	263 211	83 175
2011/2012	13 477 068	358 166	113 940
2012/2013	17 552 630	439 305	143 000
2013/2014	15 473 145	424 170	122 803

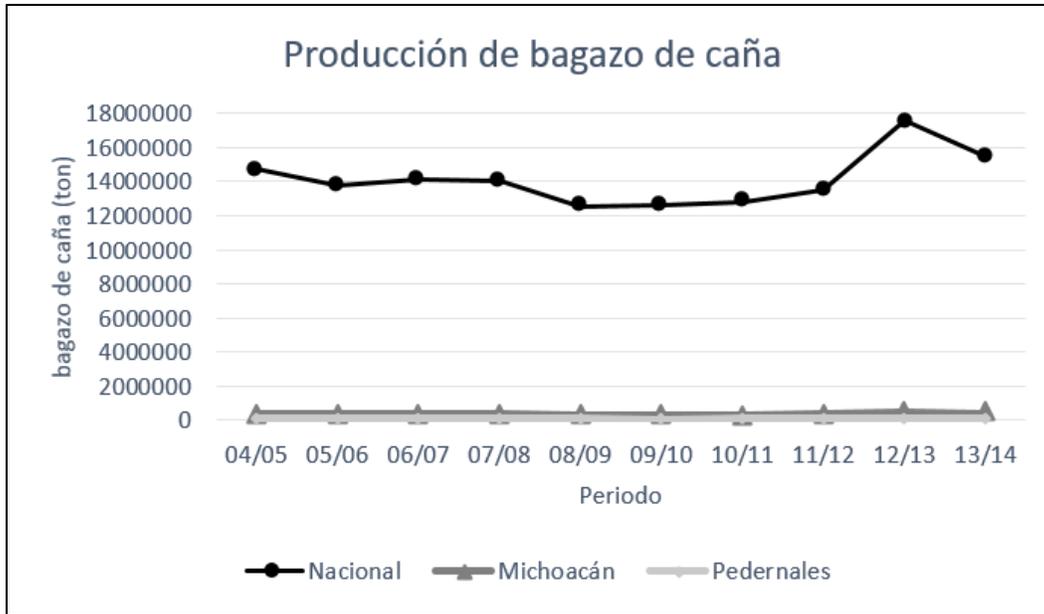


Figura ix. Comparativa nacional, estatal e ingenio. Producción de bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).

Finalmente, para observar de manera gráfica la obtención de bagazo en relación a la cantidad de caña molida se presentan las Figuras x a la xii. Haciendo cálculos de manera rápida con las cifras de producción de caña y su correspondiente producción de bagazo, en los tres niveles (nacional, estatal e ingenio) se obtiene que el bagazo de caña comprende alrededor del 30% de la caña de azúcar.

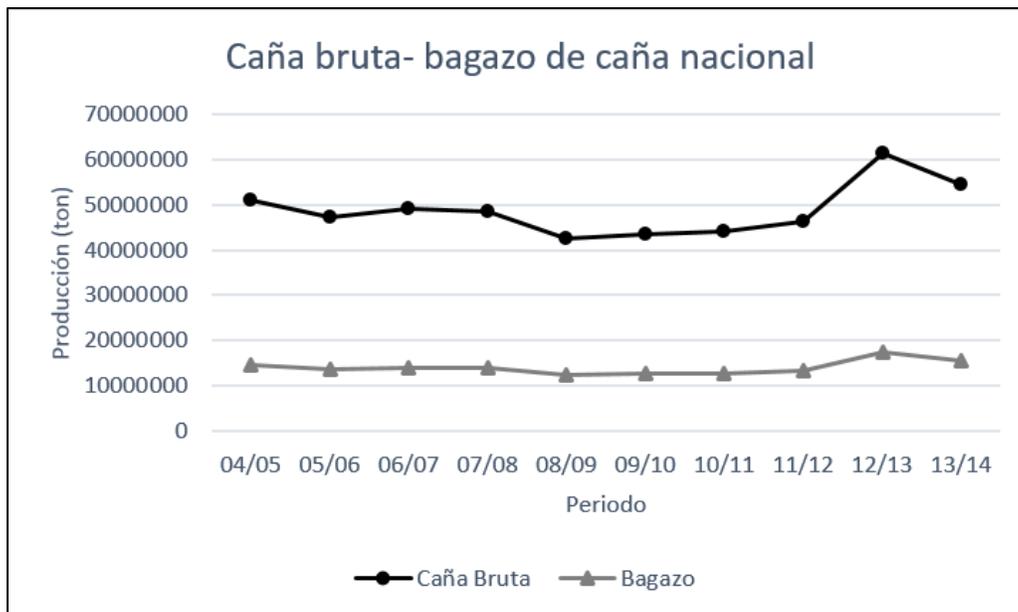


Figura x. Comparativa nacional. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).

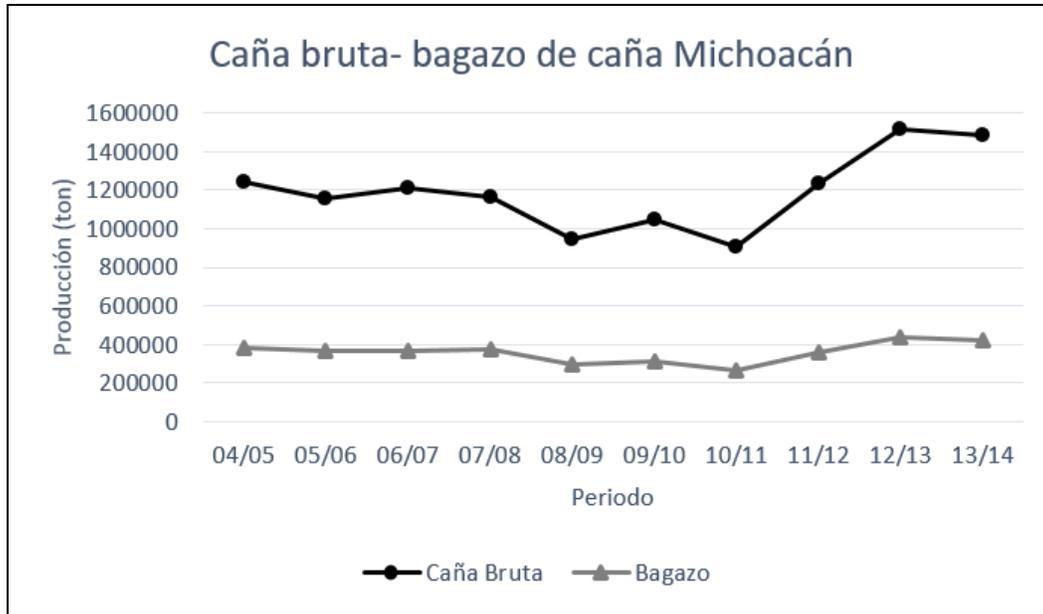


Figura xi. Comparativa estatal. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).

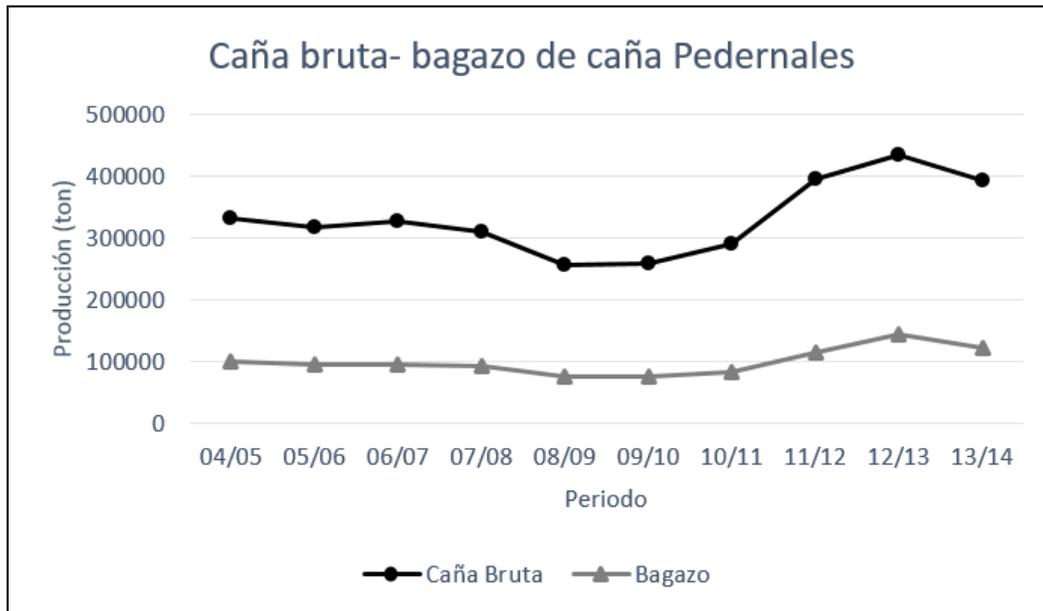


Figura xii. Comparativa Pedernales. Producción de caña bruta contra bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros).

Con base en las cifras de producción de cemento a nivel mundial y las de producción de caña de azúcar, en la que México se sitúa como uno de los principales generadores de caña de azúcar, se afirma que el país tiene el potencial para ser gran participante en la producción de concretos ecológicos con el uso de esta puzolana: la ceniza de bagazo de caña.

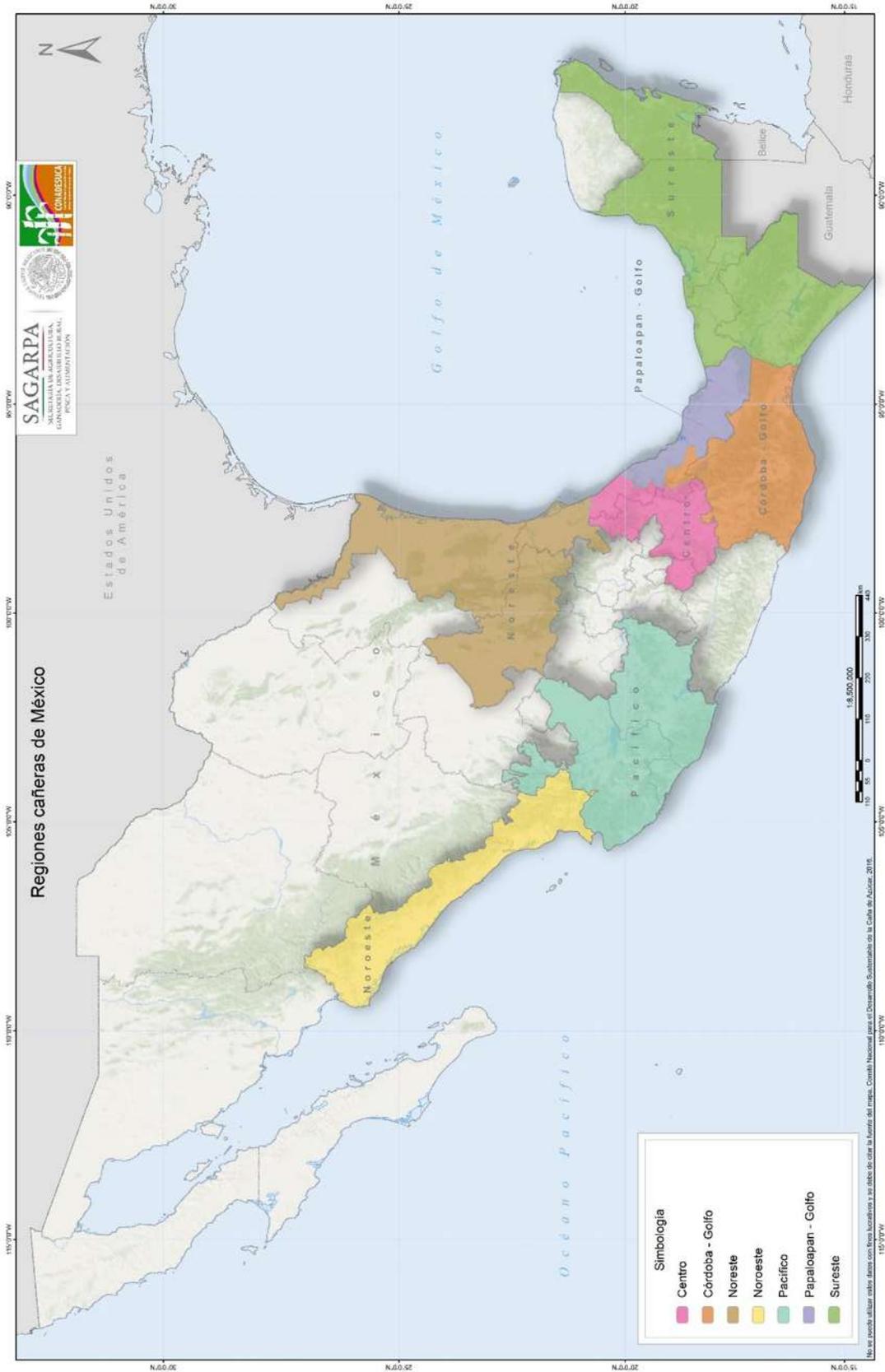


Figura xiii. Regiones cañeras de México. (SAGARPA).

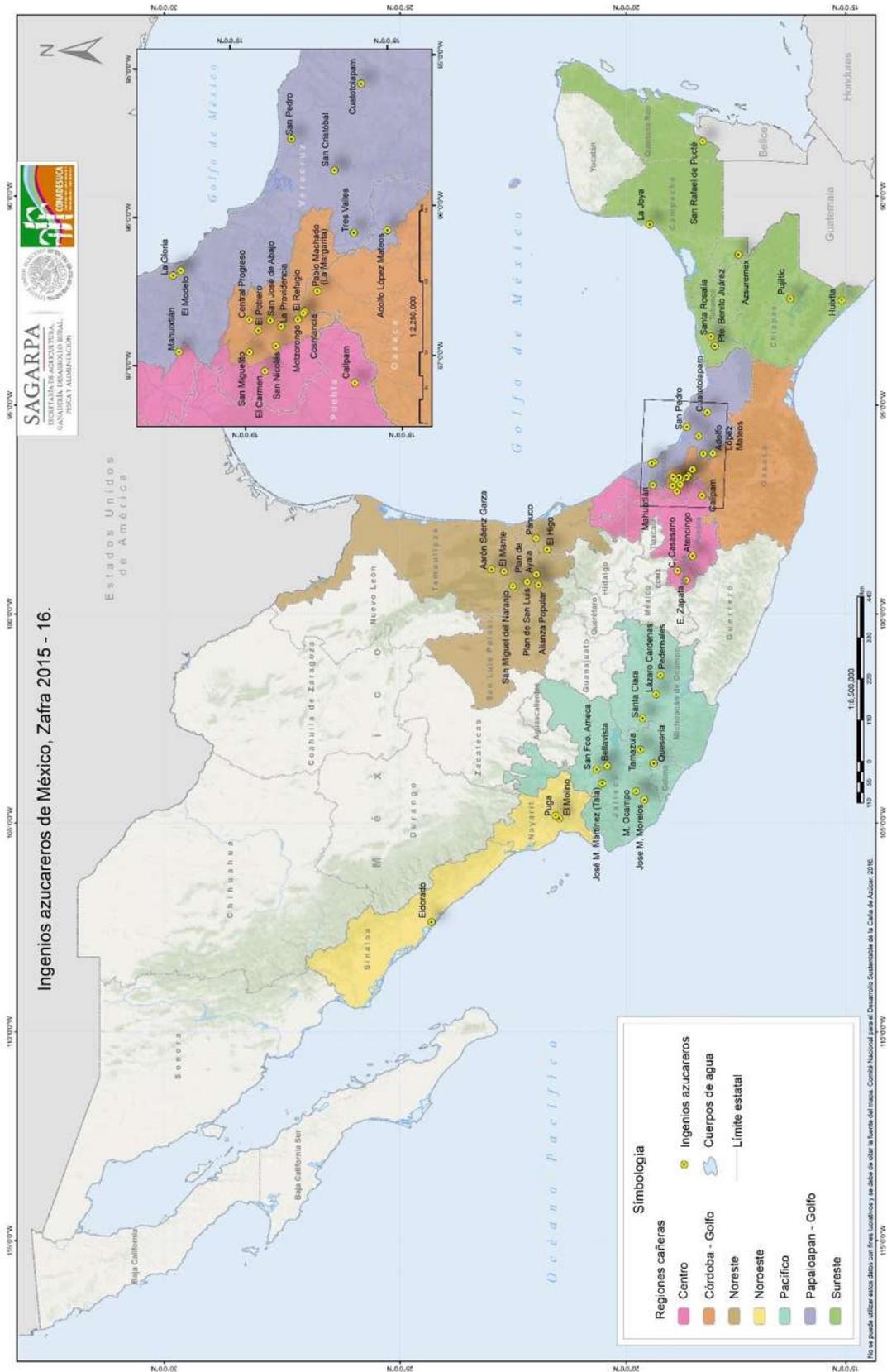


Figura xiv. Ingenios azucareros de México. (SAGARPA)



IV. HIPÓTESIS.

La utilización de puzolanas en la elaboración de una mezcla de concreto hidráulico incrementa sus propiedades físico-mecánicas a edades tardías, proporcionándole mejores condiciones de resistencia y durabilidad. La ceniza de bagazo de caña es una puzolana que se genera en el proceso de producción de azúcar, muy común en México y contribuye a formar compuestos similares a los productos de la hidratación de cemento Portland, por lo que puede sustituirlo en pequeños porcentajes con respecto a su masa.

V. OBJETIVOS.

V.I. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar una mezcla de concreto hidráulico adicionando ceniza de bagazo de caña (CBC) como sustituto parcial de cemento Portland (CP) en una proporción óptima, elaborarla bajo condiciones controladas de laboratorio y evaluar su desempeño por resistencia mecánica y durabilidad.

Así mismo al reducir la cantidad de cemento Portland utilizado en una mezcla de alta resistencia, conseguir un material ecológico y amigable con el medio ambiente para ser utilizado en obras civiles de alto desempeño ante el ataque de agentes agresivos que comprometan la integridad del concreto y el estado del acero de refuerzo. Con esto se pretende reducir la huella de carbono en la producción del concreto.

V.II. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Estudiar las propiedades y características de los materiales puzolánicos, particularmente la ceniza de bagazo de caña (CBC) y utilizar un porcentaje óptimo de sustitución con respecto a la masa de cemento Portland, basado en la trabajabilidad de la mezcla y la mínima relación a/c en peso posible.
- Elaborar especímenes del concreto modificado para aplicar ensayos físico-químicos y mecánicos, destructivos y no destructivos, compararlos con una muestra patrón y presentar los resultados haciendo un análisis de ellos.
- Promover el uso de residuos agroindustriales con características puzolánicas en la industria de la construcción.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

La popularidad del concreto ha crecido exponencialmente desde la invención del cemento Portland en el año de 1824, hasta llegar a convertirse en un material de construcción mundialmente utilizado en la actualidad. Por su relativo bajo costo es prácticamente accesible para cualquier persona; es además excepcionalmente adecuado para la construcción, presenta una gran resistencia a la compresión y gracias a la incorporación del acero de refuerzo se convierte en el material ideal para lograr innumerables edificaciones y obras de infraestructura.

Generalmente al diseñar estructuras de concreto reforzado se pretende cumplir con una serie de requerimientos y especificaciones que las vuelvan resistentes ante las cargas mecánicas, funcionales, confortables y estéticas a la vez. Hoy en día todas estas características no son suficientes si buscamos conservar las óptimas condiciones de servicio y una larga vida útil en estructuras localizadas en ambientes agresivos, con los menores costos de rehabilitación y mantenimiento.

Entonces hablamos de construir estructuras durables: diseñar y construir con criterios de durabilidad implica tener en consideración que el proyecto exigirá la resistencia al ataque de las condiciones ambientales, como son los repetidos cambios de temperatura, la humedad del aire, la presencia de sales, la erosión, vibraciones, etc.

Por lo mencionado anteriormente además del correcto diseño por resistencia es indispensable llevar a cabo el debido diseño por durabilidad en aquellas obras cuya importancia, magnitud o localización lo demanden.

El ser humano desarrolla actividades para satisfacer sus necesidades y con ello genera impactos en el medio ambiente de manera negativa, un ejemplo muy representativo es la emisión de gases de efecto invernadero de manera descontrolada a la atmósfera. A finales de mayo de 2013, el observatorio Mauna Loa, en Hawai, anunció que el mundo ha cruzado un umbral histórico de bióxido de carbono (CO₂) atmosférico de 400 partes por millón (ppm). (UNAM, 2013-2014)

Y es que la industria cementera es responsable de cerca del 5% del total de las emisiones de CO₂ generadas por el hombre. (Federación Interamericana del Cemento, 2013). Entonces tenemos un problema englobado en otro aún mayor, construir estructuras durables y totalmente funcionales de concreto y a la vez reducir la huella de carbono en la producción del cemento, para posteriormente elaborar concretos más amigables con el medio. Una manera de reducir la cantidad de cemento utilizado en una mezcla de concreto y a la vez promover el aumento de las propiedades de durabilidad de la estructura es sustituyendo en un porcentaje óptimo parte del cemento por materiales puzolánicos, ya sean naturales o artificiales.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1. EL CONCRETO.

El concreto es básicamente la mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementosos (cementantes) se pueden incluir en la pasta (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

2.1.1. Tipos de concreto.

Hacer un buen concreto puede parecer simple, pero no lo es. Aunque aparentemente se logren obtener supuestos beneficios económicos con ofertas de bajo precio, la diferencia entre un producto de calidad y los demás se manifiesta, tarde o temprano en la obra, en su seguridad y en el prestigio de quien la construye. Entre los diferentes tipos de concreto se pueden mencionar:

Concreto autocompactable.- Es un producto que presenta una gran facilidad para fluir por sí mismo sin necesidad de vibrado, aún entre el acero de refuerzo sin segregación ni exudación.

Concreto de baja contracción.- Concreto especialmente diseñado para la construcción de elementos que requieran de un alto desempeño y una gran estabilidad volumétrica.

Concreto lanzado.- Producto diseñado para recubrimientos, estabilización de taludes, reparación de estructuras o para construcción de túneles.

Concreto ligero.- Concreto de características particulares para reducir peso en las estructuras y cargas a la cimentación o para cuando se requiere concreto con propiedades de aislamiento térmico y acústico.

Concreto convencional.- Concreto de uso general para todo tipo de construcciones que no requieran características especiales.

Concreto estructural.- Concreto de alta calidad que cumple con las especificaciones más estrictas de los reglamentos de construcción para zonas sísmicas.

Concreto MR - Ideal para la construcción de pavimentos urbanos, carreteras y patios de acceso o maniobras en proyectos industriales. (Holcim México, 2016).



2.1.2. Criterios de diseño.

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir:

- Propiedades del concreto fresco.
- Propiedades mecánicas del concreto endurecido.
- La inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

El proporcionamiento de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco.
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido.
- Economía.

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en la construcción de concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla (Abrams 1918, Hover 1998 y Shilstone, 1990).

Elección de las características de la mezcla: Antes que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerándose el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto requeridas para la estructura. Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio.

Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto. Sin embargo, el tecnólogo de concreto no debe descuidar la moderna tecnología del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Relación entre resistencia y relación agua-material cementante: Dentro del rango normal de resistencias usadas en la construcción de concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua/cemento o agua-material cementante. Para concretos totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del concreto, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad del agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante (Abrams, 1918).

La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El



concreto se vuelve más resistente con el tiempo, desde que la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas.

Por lo tanto, la resistencia en cualquier edad es función tanto de la relación agua-material cementante original y del grado de hidratación del material cementante. La importancia del curado temprano y minucioso se reconoce fácilmente. La diferencia en la resistencia del concreto para una relación agua/cemento establecida puede resultar de: (1) cambios del tamaño, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez del agregado, (2) diferencias en los tipos y fuentes de material cementante, (3) contenido de aire incluido (incorporado), (4) la presencia de aditivos y (5) duración del curado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Relación agua-material cementante. La relación agua-material cementante es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas. Las Tablas 4 y 5 enseñan los requisitos para varias condiciones de exposición.

Tabla 4. Relación Agua-Material Cementante Máxima y Resistencia de Diseño Mínima para Varias Condiciones de Exposición (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Condición de exposición	Relación agua-material cementante máxima por masa de concreto	Resistencia a compresión de diseño mínima $f'c$ Kgf/cm ² (MPa) [psi]
Concreto protegido de la exposición a congelación-deshielo, de la aplicación de sales de deshielo o de sustancias agresivas.	Elija la relación agua-material cementante basándose en la resistencia, trabajabilidad y requisitos de acabado.	Elija la resistencia basándose en los requisitos estructurales.
Concreto que se pretende que tenga baja permeabilidad cuando sea expuesto al agua.	0.50	280 (28) [4000]
Concreto expuesto a congelación-deshielo en la condición húmeda y a descongelantes.	0.45	320 (31) [4500]
Para protección contra la corrosión del refuerzo (armadura) del concreto expuesto a cloruro de las sales descongelantes, agua salobre, agua del mar o rociado de estas fuentes.	0.40	350 (35) [5000]

Adaptada del ACI 318 (2002).



Tabla 5. Requisitos para el Concreto Expuesto a los Sulfatos del Suelo y del Agua (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Exposición a sulfatos	Sulfatos solubles en agua (SO ₄) presentes en el suelo, % en masa	Sulfatos (SO ₄) en el agua, ppm	Tipo de cemento	Relación agua-material cementante, máxima en masa	Resistencia a compresión de diseño mínima, f'c Kg/cm ² , (MPa), [psi]
Insignificante	Menor que 0.10	Menor que 150	Ningún tipo especial necesario	-----	-----
Moderada	0.10 a 0.20	150 a 1500	Cemento de moderada resistencia a los sulfatos	0.50	280 (28) [4000]
Severa	0.20 a 2.00	1500 a 10,000	Cemento de alta resistencia a los sulfatos	0.45	320 (31) [4500]
Muy severa	Mayor que 2.00	Mayor que 10,000	Cemento de alta resistencia a los sulfatos	0.40	360 (35) [5000]

Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua-material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión.

Contenido de agua. El contenido de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua-material cementante, contenido de agua, tipo y contenido de material cementante, aditivos y condiciones ambientales. Un aumento del contenido de aire y del tamaño del agregado, una reducción de la relación agua-material cementante y del revenimiento o el uso de agregados redondeados, de aditivos reductores de agua o de ceniza volante reducirá la demanda de agua. Por otro lado, el aumento de la temperatura, del contenido de cemento, del revenimiento (asentamiento), de la relación agua/cemento, de la angularidad del agregado y la disminución de la proporción entre el agregado grueso y el agregado fino aumentarán la demanda de agua (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Contenido y tipo de materiales cementantes. Los requisitos de contenido mínimo de cemento Portland tienen como objetivo asegurar durabilidad y acabado satisfactorios, mejorar la resistencia al desgaste de losas y garantizar una apariencia adecuada para las superficies verticales. Esto es importante aun cuando los requisitos de resistencia se cumplan con contenidos de materiales cementantes más bajos. Sin embargo, se deben evitar cantidades de materiales cementantes excesivamente elevadas, para que se mantenga la economía en la mezcla y no afecte adversamente la trabajabilidad y otras propiedades (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



2.1.3. El concepto de Durabilidad.

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento Portland como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, abrasión, y cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzcan deterioro del concreto (ACICommittee201, 1982).

La conclusión primordial que se desprende de esta definición es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa sólo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente y las condiciones de trabajo a las cuales sea sometido. En este sentido, no existe un concreto “durable” por sí mismo, ya que las características físicas, químicas y resistentes que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias, no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes (Geeks, 2016).

Desde los inicios del empleo del concreto armado, a mediados del siglo XIX las construcciones civiles en concreto simple, armado o pretensado, han resistido las más variadas sobrecargas y acciones del medio ambiente. No obstante, el concreto pudiera ser considerado un material prácticamente eterno (siempre que reciba un mantenimiento sistemático y programado) hay construcciones que presentan manifestaciones patológicas de significativa intensidad e incidencia, acompañadas de elevados costos para su rehabilitación. Siempre habiendo comprometimiento de los aspectos estéticos y en la mayoría de los casos, reducción de la capacidad resistente, pudiéndose llegar en ciertas situaciones, al colapso parcial o total de la estructura (Arreola Sánchez, 2013).

Para conseguir un concreto durable es de suma importancia cuidar dos aspectos en su elaboración:

1.- Que los materiales que lo conforman sean de buena calidad:

- Agua de mezclado libre de partículas contaminantes.
- Agregados pétreos: con alta densidad, granulometría más adecuada, poca porosidad, etc.
- Cemento: aquel que cumpla con las propiedades más adecuadas para los requerimientos del proyecto.

2.- Que el proceso de elaboración se realice cuidando todos los aspectos que involucra, para así asegurar la mejor compacidad posible, menor porosidad, menor permeabilidad, correcto curado en forma y tiempo, y por consecuencia mayor durabilidad.

La dosificación, la compacidad y la homogeneidad del concreto, el espesor de recubrimiento y el estado superficial del acero son características que podemos controlar como ingenieros y que afectan directamente la durabilidad de la estructura por su intervención en el proceso de corrosión del acero.



2.1.4. Agentes degenerativos del concreto.

La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos derivados del medio ambiente o por los agentes internos dentro del concreto. Las causas pueden ser categorizadas como físicas, mecánicas y químicas. Las causas físicas surgen de la acción de las heladas y de las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento, mientras que las causas mecánicas están asociadas principalmente a la abrasión. En las causas químicas tenemos: ataque por sulfatos, ácidos, agua de mar, y penetración de los cloruros, que inducen la corrosión electroquímica del acero de refuerzo. (Neville & Brooks, Concrete Technology, 2010).

Permeabilidad: Desde el punto de vista de la durabilidad, es importante conseguir una baja permeabilidad tan rápidamente como sea posible. Por consiguiente, una mezcla con una baja relación agua/cemento es ventajosa. La permeabilidad de la pasta de cemento hidratado es mayor si existe presencia de grandes poros capilares, y es generalmente una función de la porosidad capilar. Ya que la porosidad capilar está gobernada por la relación agua/cemento y por el grado de hidratación, la permeabilidad de la pasta de cemento también depende principalmente de estos parámetros (Neville & Brooks, Concrete Technology, 2010).

Es importante diferenciar entre la porosidad y la permeabilidad. La porosidad es la existencia de espacios dentro de la masa del concreto, los cuales pueden encontrarse aislados o conectados, mientras que la permeabilidad es la conexión de los mismos, es la que forma una especie de "camino" por el cual pueden abrirse paso fluidos o agentes externos. Este fenómeno en el que dos masas de concreto presentan porosidades similares pero distintas permeabilidades se representa en la figura 15.

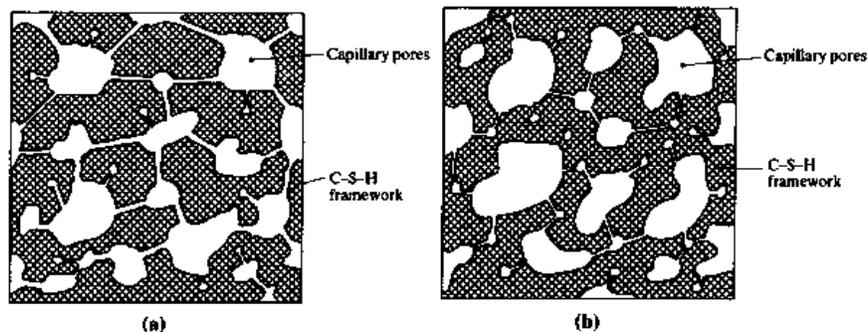


Figura 15. Representación sistemática de materiales con porosidad similar pero: (a) alta permeabilidad por los poros capilares interconectados por grandes pasajes y (b) baja permeabilidad, poros capilares segmentados y unidos solamente en algunas partes (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Sulfatos y cristalización de sales. Los sulfatos reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto. El mayor daño ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas



sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. El ataque de sulfatos y la cristalización de sales son más severos donde el concreto está expuesto a ciclos de mojado y secado, que donde el concreto está constantemente mojado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Ataque por agua de mar. Una estructura expuesta al agua del mar o la salpicadura del agua del mar es más vulnerable en la zona de marea o salpicadura, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. Los sulfatos y los cloruros presentes en el agua del mar requieren el uso de concretos de baja permeabilidad para minimizar la corrosión de la armadura (refuerzo) y el ataque de sulfatos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Ataque por ácidos. No hay cemento Portland resistente al ataque de ácidos. En condiciones húmedas, el dióxido de azufre (SO_2) u dióxido de carbono (CO_2), así como algunos otros gases en la atmósfera, forma ácidos que atacan concreto mediante la disolución y eliminación de una parte, de la pasta de cemento hidratado y dejan una masa suave y muy débil. Esta forma de ataque se encuentra en varias condiciones industriales, tales como chimeneas y en algunas condiciones agrícolas, como pisos de industrias lácteas (Neville & Brooks, Concrete Technology, 2010).

Reactividad álcali-agregado. Ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable. La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas – reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es más preocupante pues es más común la ocurrencia de agregados conteniendo minerales de sílice (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa (Segarra Foradada, 2005).

Resistencia a los cloruros. El concreto protege a la armadura (refuerzo) embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el concreto (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones de cloruros de los anticongelantes y del agua del mar puede destruir o penetrar en la película. Cuando se alcanza el límite de corrosión por cloruros (aproximadamente 0.15% cloruros solubles en agua por masa de cemento), una celda eléctrica se forma a lo largo del acero entre las barras de acero y el proceso electroquímico de la corrosión empieza.



Carbonatación. Es un proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos calcio para formar carbonatos. La carbonatación reduce considerablemente la alcalinidad (pH) del concreto la cual es necesaria para la protección de la armadura (refuerzo) contra la corrosión y, por consiguiente, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para prevenirse la corrosión del acero de refuerzo. Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el concreto que tiene alta relación agua/cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia mecánica y pasta altamente permeable (porosa).

2.1.5. Prevención contra los agentes degenerativos del concreto.

La forma de prevenir los efectos nocivos de los mecanismos de degradación del concreto y mortero, es la utilización de criterios de durabilidad en la etapa de proyecto de la mezcla y/o estructura (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). En la actualidad, se considera que los concretos de baja permeabilidad, es decir, con baja relación agua/cemento, bien compactados y adecuadamente curados, son poco susceptibles de ser atacados por sulfato y los casos reales documentados de deterioro corresponden a concretos porosos y con deficiencias de curado (Helene & Pereira, 2003). Los cementos con contenido de aluminato tricálcico (C_3A) del 4% al 10%, ofrecen protección satisfactoria contra el ataque de sulfatos del agua del mar, o bien como protección contra la corrosión de la armadura por cloruros. La relación a/c no debe exceder 0.40. En climas fríos, el concreto debe contener un mínimo del 6% de aire incluido.

Las prácticas corrientes para el control de la reacción álcali-sílice incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos adicionados. Los materiales cementantes suplementarios incluyen cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, sílice activa (humo de sílice, micro sílice) y puzolanas naturales. Los cementos adicionados también contienen estos materiales para el control de la reactividad álcali-sílice. Esta práctica permite el uso de agregados y materiales cementantes disponibles en la región. La reducción del contenido de álcalis en el concreto también puede controlar la reacción.

La resistencia del concreto a los cloruros en general es buena, pero se puede mejorar con una baja relación agua/cemento en peso (0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad. Otros métodos de reducción de corrosión de acero incluyen el uso de aditivos inhibidores de corrosión, acero revestido con epoxi, tratamientos de superficie, revestimiento del concreto y protección catódica (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Produciendo concretos de relaciones bajas de a/c, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas y curado apropiado se reduce la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él (Rick, 2000).



2.2. EL CEMENTO.

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y se endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.



Figura 16. El cemento es una material que al entrar en contacto con el agua se solidifica y se vuelve duro (UNAD, 2016).

La hidratación empieza así que el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una camada fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlaza con la camada fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de resistencia.

La rigidización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece.

La hidratación continúa desde que existan condiciones favorables de temperatura y humedad (curado) y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y resistente. Gran parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuadas, continúa de manera más lenta, por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de resistencia, excediendo 30 años (Washa y Wendt 1975 y Word 1992).



2.2.1. Historia del cemento: El inicio de la industria.

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca del 7000 a.C. y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah El, en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual al mezclarse con el agua y piedra, se endureció formando el concreto. (Brown, 1996)

En aproximadamente 2500 a.C., se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide de Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dice que era un mortero de cal mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la quema de sulfato de calcio.

En 500 a.C., el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (conglomerantes) entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 a.C. La palabra concreto es derivada del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante. En un momento del siglo II a.C., los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. El descubrimiento tuvo un efecto importante en la industria de la construcción.

El material no era arena, pero si era una ceniza volcánica fina, conteniendo sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico. Los constructores de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompeya (con capacidad para 20,000 espectadores), el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material.

Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porqué algunas cales poseían propiedades hidráulicas mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton concentró su trabajo en este campo, descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos. Él empleó este



cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone, en el Canal de la Mancha, al sudoeste de Plymouth, Inglaterra. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente. La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma de "terron", mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación.

El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento Portland. El cemento natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX. El desarrollo del cemento Portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. La invención del cemento Portland se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés.

En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo denominó cemento Portland, pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland, en el Canal de la Mancha. Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

2.2.2. Fabricación del cemento.

El cemento Portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferro aluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele juntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3). Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

Los diagramas en las Figuras 17 y 18 muestran las etapas de la fabricación del cemento Portland. Como las operaciones de las plantas de cemento no son básicamente iguales, no se pueden ilustrar adecuadamente por un mismo gráfico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento; cada planta tiene diferencias significativas en disposición, equipos o apariencia general.



"MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y LA DURABILIDAD"

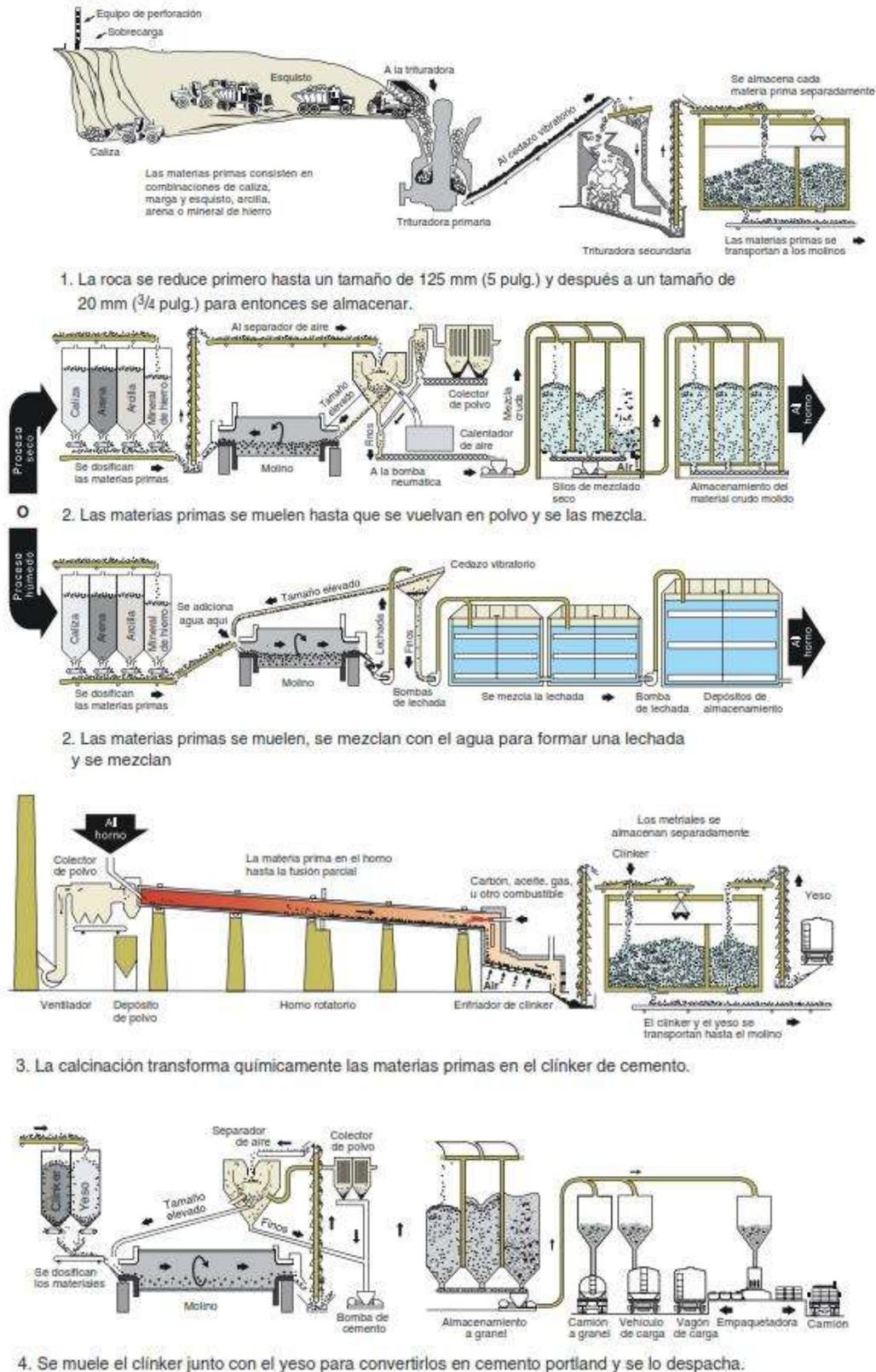
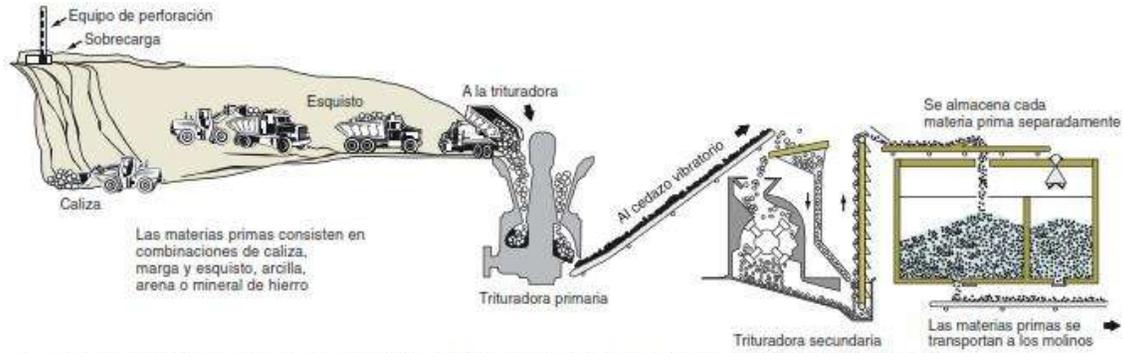


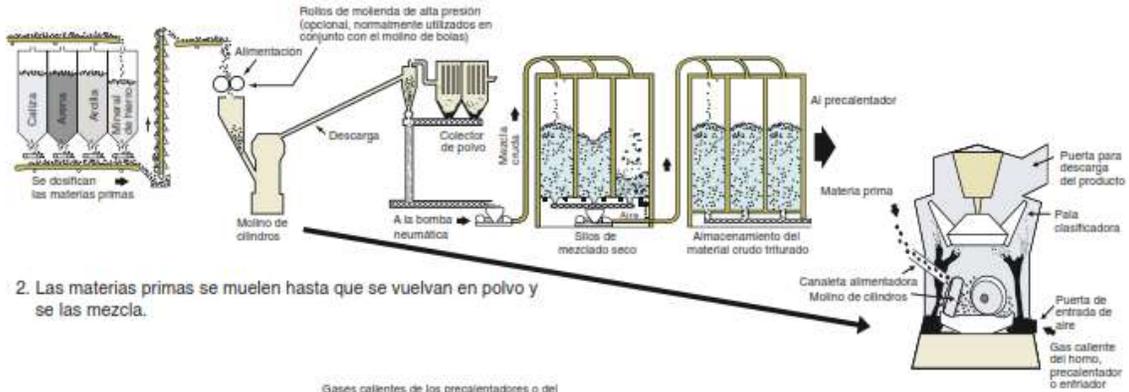
Figura 17. Etapas en la producción tradicional del cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



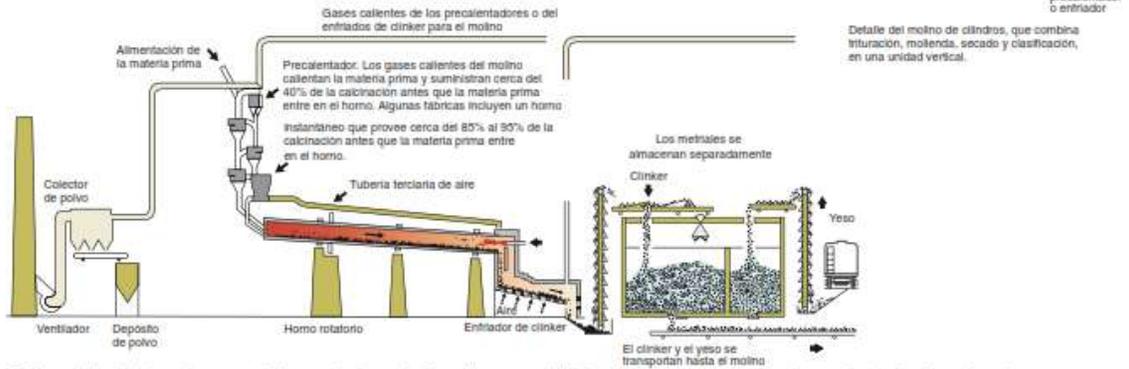
"MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y LA DURABILIDAD"



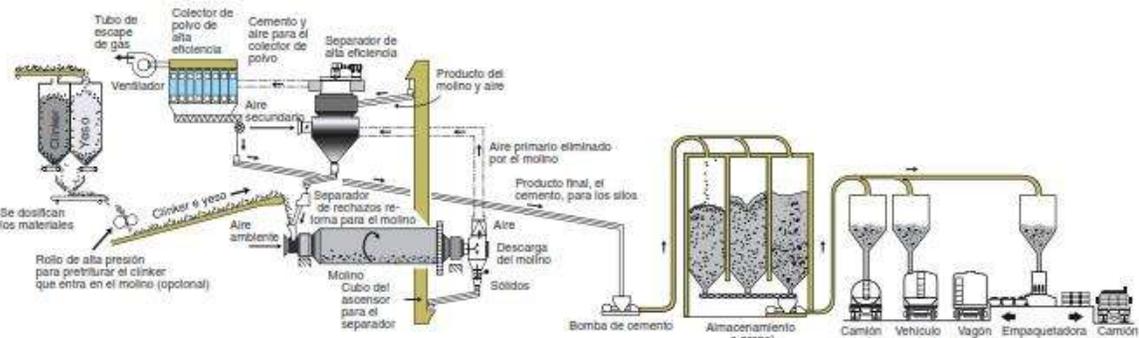
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenan.



2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Figura 18. Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través del proceso seco (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



Las materias primas seleccionadas (Tabla 6) se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada.

Tabla 6. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 29)

Cal, CaO	Hierro Fe ₂ O ₃	Sílice SiO ₂	Alúmina Al ₂ O ₃	Yeso o Sulfato CaSO ₄ .2H ₂ O
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Mineral de hierro*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Costras de lamido*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Lavaduras de mineral	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Cenizas de pinta	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Esquisto	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla		Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto*		Arenisca	Escoria	
Escoria		Esquisto*	Estaurolita	
		Basalto		

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción de cemento Portland. *Las fuentes más comunes.

La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda.

En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso (Figura 19) para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de retracción y el desarrollo de resistencia. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz (cedazo) de 45 micrómetros (malla No. 325). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento Portland. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



Sección	Vista del horno	Proceso de nodulización	Reacción de clinkerización
A 700°C Las materias primas son un polvo de flujo libre		Las partículas son sólidas. No hay reacción entre las partículas. 	Hay pérdida de agua. La arcilla deshidratada se recristaliza. ● Partícula de arcilla ○ Partícula de caliza
700-900°C El polvo aun fluye libremente		Las partículas aun son sólidas. 	A medida que la calcinación continua, la cal libre aumenta. La sílice reactiva combina con el CaO para empezar a formar C ₂ S. La calcinación mantiene la temperatura de alimentación en 850°C.
1150-1200°C Las partículas empiezan a ser "pegajosas"		Las reacciones empiezan entre las partículas sólidas. 	Cuando la calcinación termina, la temperatura se eleva rápidamente. Los cristales pequeños de belita se forman por la combinación de silicatos con CaO.
1200-1350°C Las partículas comienzan a aglomerarse, ellas se mantienen juntas por el liquido. La rotación del horno empiezan la cocción de los aglomerantes		Las fuerzas capilares del liquido mantienen las partículas juntas. 	La fase liquida se forma cuando la temperatura excede 1250°C. El liquido permite la reacción entre la belita y el CaO libre, formando alita.
1350-1450°C La aglomeración de las partículas continua a medida que el material cae encima uno del otro.		Si hay liquido suficiente, se forman nódulos. La insuficiencia de liquido producirá un clinker polvoriento. 	La cantidad de cristales de belita disminuye y su tamaño aumenta. El tamaño y la cantidad de alita aumentan.
Enfriamiento		Los nódulos de clinker no cambian durante el enfriamiento 	Bajo el enfriamiento, el C ₃ A y el C ₄ AF se cristalizan en la fase liquida. La estructura lamilar aparece en los cristales de belita.

Figura 19. Proceso de producción del Clínter de la materia prima al producto final (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



2.2.3. Tipos de cementos.

Se fabrican diferentes tipos de cemento Portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Los cementos Portland se producen de acuerdo con las especificaciones ASTM C 150, AASHTO M 85 o ASTM C 1157 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

De acuerdo a la norma ASTM C 150-16, se designan 10 tipos de cementos:

- Tipo I — Para usar cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
- Tipo IA — Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.
- Tipo II — Para uso general, más específicamente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos.
- Tipo IIA — Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.
- Tipo II (MH) — Para uso general, más específicamente cuando se desea un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.
- Tipo II (MH) A — Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.
- Tipo III—Para usar cuando se desea alta resistencia temprana.
- Tipo IIIA — Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.
- Tipo IV — Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación.
- Tipo V — Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

Describiendo de manera rápida y general la función de cada uno de los 5 tipos de cemento tenemos las siguientes especificaciones:

Tipo I. El cemento tipo I es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado.



Tipo II. El cemento tipo II se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se lo puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa. El cemento tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C₃A).

Tipo III. El cemento tipo III ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado. A pesar de que se puede usar un alto contenido de cemento tipo I para el desarrollo temprano de la resistencia, el cemento tipo III puede ofrecer esta propiedad más fácilmente y más económicamente.

Tipo IV. El cemento tipo IV se usa donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede usar el cemento tipo IV en estructuras de concreto masivo (hormigón masa), tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada. El cemento tipo IV raramente está disponible en el mercado.

Tipo V. El cemento tipo V se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos – principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos. Su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, no excediendo a 5%.

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014: “Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba” los cementos se deben identificar por el tipo y la clase resistente a la que pertenecen (Tablas 7 y 8). Si el cemento tiene especificada una resistencia a 3 días se añade una letra R (resistencia rápida). En el caso de que algún tipo de cemento tenga las características especiales señaladas en la Tabla 9 su designación se completa de acuerdo con la nomenclatura indicada en dicha Tabla, de representar dos o más características especiales la denominación se hace siguiendo el orden de la Tabla 9, separándolas por una diagonal.



Tabla 7. Tipos de cementos [NMX-C-414-ONNCCE-2014].

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Tabla 8. Clase resistente [NMX-C-414-ONNCCE-2014].

20
30
30R
40
40R

Tabla 9. Características especiales [NMX-C-414-ONNCCE-2014].

RS: Resistente a los Sulfatos
BRA: Baja Reactividad Alkali Agregado
BCH: Bajo Calor de Hidratación
B: Blanco

Así mismo la norma NMX C 414 ONNCCE 2014 hace algunas definiciones de las cuales se destacan los conceptos siguientes:

Cemento Portland compuesto: Es el cemento que resulta de la integración de clínker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único.

Cenizas volantes: Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados. Se consideran como materiales puzolánicos.

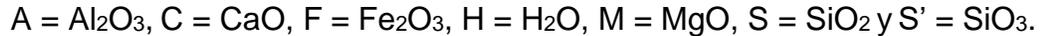
Escoria Granulada de Alto Horno: Es el subproducto no metálico constituido esencialmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos, que se obtienen por el enfriamiento brusco con agua o vapor y aire, del residuo que se produce simultáneamente con la fusión de minerales de hierro en el alto horno.

Humo de sílice: El humo de sílice es un material puzolánico muy fino, compuesto principalmente de sílice amorfa, que es un subproducto de la fabricación de silicio o aleaciones de ferro-silicio con arco eléctrico (también conocido como humo de sílice condensado o micro sílice).



2.2.4. Hidratación del cemento Portland.

En la fabricación del clinker de cemento Portland, durante la calcinación, el calcio combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda. Los químicos del cemento usan las siguientes abreviaturas químicas para describir los compuestos:



Se usa el término “fase” preferiblemente al término “compuesto” para describirse los componentes del clinker. Los 4 principales componentes del cemento Portland, fórmulas químicas aproximadas y abreviaciones son las siguientes:

- Silicato tricálcico: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$.
- Silicato dicálcico: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$.
- Aluminato tricálcico: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$.
- Ferroaluminato tetracálcico. $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$.

Siguen las formas de sulfato de calcio, sus fórmulas químicas y abreviaturas:

- Sulfato de calcio anhidro (anhidrita) = $\text{CaSO}_4 = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 = \text{C}\hat{\text{S}}$.
- Sulfato de calcio dihidratado (yeso) = $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\hat{\text{S}}\text{H}_2$.
- Hemidrato de sulfato de calcio = $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\hat{\text{S}}\text{H}_{1/2}$.

El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empleada en el cemento. El C_3S y el C_2S en el clinker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% hasta 70% del clinker, mientras que la belita es responsable por sólo 15% hasta 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% hasta 10% del clinker y los compuestos de ferrita del 5% hasta 15% (Taylor, 1997).

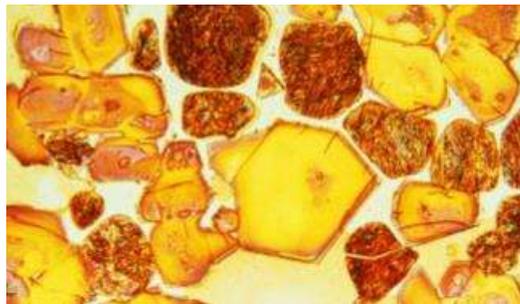


Figura 20. El examen de secciones finas pulidas de clinker Portland muestra la alita (C_3S) como cristales angulares y claros. Los cristales más oscuros y arredondados con la belita (C_2S). Aumento 400x. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



En presencia de agua, estos compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado de gel de tobermorita). El cemento Portland hidratado contiene del 15% hasta 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa.

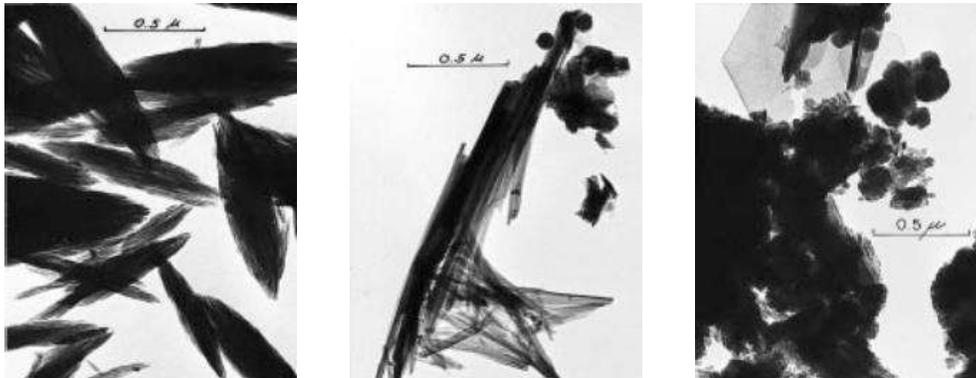


Figura 21. Micrografías electrónicas de (izquierda) silicato dicálcico hidratado, (medio) silicato tricálcico hidratado y (derecha) cemento Portland normal hidratado. Observe la naturaleza fibrosa de los productos hidratos de silicato de calcio. Fragmentos rotos de cristalitas de hidróxido de calcio angular también están presentes (derecha). La unión de las fibras y la adhesión de las partículas de hidratación son responsables por el desarrollo de la resistencia de la pasta de cemento Portland. Referencias (izquierda y el medio) (Brunauer, 1962) y (derecha) (Copeland & Schulz, 1962).

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

Silicato Tricálcico (C_3S): se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana. En general, la resistencia temprana del concreto de cemento Portland es mayor, cuando el porcentaje de C_3S aumenta.

Silicato dicálcico (C_2S): se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

Aluminato tricálcico (C_3A): libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos.

Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF): es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (clinkerización o cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C_4AF y sus hidratos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



Sulfato de calcio: Sin sulfato el fraguado del cemento sería rápido. Además del control del fraguado y del desarrollo de resistencia, el sulfato también ayuda a controlar la retracción por secado y puede influenciar la resistencia hasta 28 días. (Lerch, 1946).

Desde el punto de vista de la durabilidad, la presencia de C₃A es responsable de la baja resistencia del concreto al ataque de sulfatos; también las grandes cantidades de hidróxido de calcio Ca(OH)₂ formadas en la hidratación son responsables de la baja resistencia del concreto a diferentes tipos de ataque químico (CEMEX - Manual del Constructor, 2016).

2.3. PUZOLANAS.

Se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementicias y de la actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos. La reactividad de las puzolanas se atribuye, fundamentalmente en algunos casos, a la sílice activa que se encuentra en ellas formando compuestos mineralógicos silícicos (Salazar J., 2016).

2.3.1. Clasificación.

Las puzolanas se pueden clasificar según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales (cenizas); estas últimas pueden ser subproductos de algún proceso industrial o agroindustrial.

Clase N: Puzolanas naturales en bruto o calcinadas, que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como dados en este documento, como algunas tierras de diatomeas; shaeds opalina y lutitas, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

Clase F: Cenizas volantes que normalmente se producen por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables de esta clasificación. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Clase C: Cenizas volantes que normalmente se producen a partir del lignito y carbón subbituminoso que cumpla con los requisitos aplicables a esta clasificación. Esta Clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

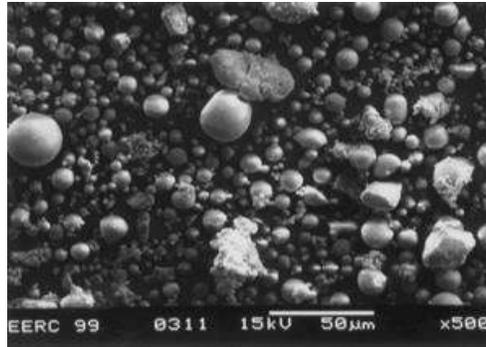


Figura 22. Micrografía (SEM) de una ceniza volante tipo F. (Salazar J., 2016).

Causas de la actividad puzolánica. La actividad puzolánica responde a un principio general. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de grupos como SiO_4 , AlO_4 , entre otros.

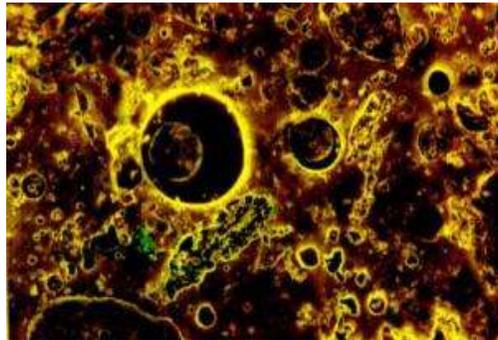


Figura 23. Puzolana natural de origen volcánico pumítico. (Salazar J., 2016).

En resumen las puzolanas pueden clasificarse:

Puzolanas Naturales: Materias de origen volcánico y materias sedimentarias de origen animal o vegetal.

Puzolanas Artificiales:

- Materias tratadas (tratamiento térmico entre 600°C y 900°C).
- Subproductos de fabricación industrial.
- Cenizas volantes.
- Humo de sílice.
- Arcillas naturales (subproductos de la industria de ladrillo cocido).
- Ceniza de cascarilla de arroz.
- Escorias granuladas de industrias metálicas no ferrosas.



2.3.2. Ventajas del empleo de las puzolanas.

En general, las ventajas de todo orden que pueden obtenerse de los cementos puzolánicos los hacen aptos para una amplia serie de empleos específicos que se detallan a continuación (Salazar J., 2016).

En la resistencia mecánica. A largo plazo, al prolongar el período de endurecimiento, a tracción, compresión y mejor relación tracción-compresión.

En la estabilidad. Frente a la expansión por cal libre, por sulfatos, por la reacción álcalis-agregado, por la menor relación a/c, por enfriamiento y frente a la fisuración.

En la durabilidad. Frente a ataques por aguas puras y ácidas, a ataques por aguas y suelos sulfatados, ataques por agua de mar, ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas y frente a la desintegración por la reacción álcalis-agregado.

En el rendimiento y la economía. Al corresponder a los cementos puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de masa y al ser los cementos puzolánicos, en general, conglomerantes más baratos.

En la plasticidad. Rebajando la relación a/c, reduciendo la segregación y evitando la exudación.

En la impermeabilidad. Reduciendo la porosidad, evitando la formación de eflorescencias y produciendo la mayor cantidad de Tobermorita.

En la adherencia. Del agregado a la pasta y del mortero a las armaduras.

En el comportamiento térmico. Al liberar menor calor de hidratación y al producir menor elevación de temperatura.

Empleos específicos de los cementos puzolánicos.

- Trabajos de concreto en grandes masas.
- Cimentaciones en todo terreno.
- Obras marítimas.
- Obras sanitarias.
- Albañilería (pega de muros y mampostería en general).
- Repellos o revocos (pañetes).
- Solados.
- Baldosas hidráulicas.
- Prefabricados de elementos estructurales de concreto armado o sin armar, especialmente curados por tratamientos térmicos.
- Concretos especiales premezclados.



2.4. CAÑA DE AZÚCAR.

Una de las preocupaciones contemporáneas es qué usos dar y qué hacer con la creciente cantidad de residuos que generan los procesos industriales, agroindustriales, domésticos y de consumo, la afectación se siente especialmente en centros urbanos, los cuales hoy por hoy se ven agobiados por los impactos que se observan como consecuencia de estos desechos. En este orden de ideas dentro de los retos actuales y futuros, se vislumbra el cómo dar respuesta apropiada y ambientalmente sostenible a la reducción, disposición, reutilización y manejo adecuado de residuos.

Las cenizas obtenidas de residuos agrícolas (cascarilla de arroz, paja de la caña de azúcar, ceniza de hoja de maíz, fibras de agave lechuguilla, ceniza de cascara de cacahuate, y bagazo de la caña), son la materia prima para la producción de puzolanas, ya que estos y otros productos generan residuos que pueden ser aprovechados por sus propiedades químicas además de usarse como fuente energética, y aunque su uso, en la actualidad resulta bastante limitado están siendo estudiadas con el objeto de producir puzolanas consiguiéndose resultados satisfactorios hasta el momento en los trabajos de investigación realizados (Tolosa Correa).

2.4.1. Producción de la caña de azúcar.



La caña de azúcar es originaria de Nueva Guinea, de donde se distribuyó a toda Asia. Los árabes la trasladaron a Siria, Palestina, Arabia y Egipto, de donde se extendió por África. Colón la llevó a las islas del Caribe y de ahí pasó a América tropical. A México llegó con la conquista instalándose las primeras industrias azucareras en las partes cálidas del país como parte de la colonización (Cetrade, 2016). La caña de azúcar es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis (Galeón, 2016).

Figura 24. Caña de azúcar (123RF, 2016).

El proceso de producción inicia con la preparación del terreno (arando la tierra), etapa previa de la siembra de la caña, una vez que la planta madura entre los 12 y 15 meses, las personas encargadas de la tarea de la cosecha se dispone a cortarla y recogerla a través de alce mecánico, para llevarla a los ingenios azucareros, una vez en estos sitios se hacen muestreos para determinar las características de



calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas, luego se pesa en básculas y se conduce a los patios donde temporalmente se almacena, de ahí pasa a las mesas de lavado de caña para dirigirla a una banda transportadora que las conduce para su picado, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la extracción del jugo en los molinos.

Una vez que la caña ha sido preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres o cuatro mazas metálicas y mediante presión extrae el jugo de la caña. En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua, generalmente caliente para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso.

Este proceso de extracción es llamado maceración. El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos.

El azúcar es uno de los productos básicos de consumo, su producción se realiza en los ingenios a partir de los jugos de caña de azúcar y de remolacha, dando origen a una agroindustria que genera gran cantidad de empleos, participando directamente en la economía nacional (Guía del emprendedor, 2016).

La agroindustria de la caña de azúcar es una actividad relevante para la economía de México y lo ha sido a lo largo de cinco siglos de su historia. Se trata de un cultivo cuyo procesamiento demanda hoy grandes cantidades de mano de obra y un trabajo fabril especializado, por lo cual su problemática merece un interés particular (Cetrade, 2016).

2.4.2. Ceniza de Bagazo de Caña.

La caña de azúcar ha sido sin lugar a dudas uno de los productos de mayor importancia para el desarrollo comercial del continente americano y europea. El azúcar se consume en todo el mundo, puesto que es una de las principales fuentes de calorías en las dietas de todos los países. Lo cual provoca que el desperdicio se genere de manera importante (bagazo de caña) (Guía del emprendedor, 2016).

La composición de la ceniza varía según la edad de la caña, tipo de suelo y cantidad de fertilizantes. La cantidad de ceniza en el bagazo depende de la influencia de los suelos que como material extraño se haya recogido durante la cosecha y del clima, sobre el rendimiento de la caña ya que ambos factores tienen un efecto significativo sobre la producción (Sánchez Aymaral).

En un estudio reciente acerca de cómo influye en gran medida las condiciones de quema del bagazo en las propiedades de la ceniza se encontró que en este proceso, el bagazo atraviesa por varias modificaciones en su estructura (Tabla 10).



Tabla 10. Proceso de modificación del bagazo en la quema de la ceniza (Ríos González, 2011).

	A 100°C se presenta una pérdida inicial de masa, resultante de la evaporación de agua absorbida.
	A 350°C Inicia una ignición del material más volátil, aquí es donde inicia la quema del bagazo.
	Entre 400° a 500°C el carbón residual y los óxidos se forman, se observa una pérdida más importante de masa, después de esta etapa la ceniza se convierte en amorfa, rica en sílice.
	El uso de temperaturas por arriba de los 700°C puede llevar a la formación de cuarzos, y niveles aún más elevados de temperatura, pueden crear otras formas cristalinas.
	Encima de los 800°C, el sílice presente en la ceniza del bagazo de caña de azúcar es esencialmente cristalino.

La cantidad y la forma de sílice en la ceniza dependen no solamente de la temperatura, sino también del periodo de quema. Se señala al respecto en un trabajo realizado en Londres en 1986, que mantener la ceniza a periodos más largos de quema a temperaturas de 500°C a 680°C por menos de un minuto, dan como resultado una sílice totalmente amorfa. En el mismo trabajo, se menciona que las condiciones de quema además de influir en el grado de cristalinidad de la ceniza, también afecta el área de superficie específica de las partículas, propiedad estrechamente relacionada con la reactividad de la ceniza (Rodríguez Galán, 2010).

Tabla 11. Composición química de cenizas de bagazo de caña de azúcar realizada por varios investigadores (Márquez Montes, 2010).

Composición Química de Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar (varios investigadores)			
Compuesto	Investigadores		
	Martirena	Ganesan	Oliveira
SiO ₂	72.74	64.15	83.77
Al ₂ O ₃	5.26	9.05	-
Fe ₂ O ₃	3.92	5.52	6.53
TiO ₂	0.32	-	1.16
CaO	7.99	8.14	1.18
MgO	2.78	2.28	-
SO ₃	0.13	-	0.68
K ₂ O	3.47	1.35	6.15
Na ₂ O	0.84	0.92	-
P ₂ O ₅	1.59	-	-
Pérdida por ignición	0.77	4.9	-



2.5. AGREGADOS PÉTREOS.

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol, 1996).

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interfase entre éstos dos componentes. Debido a lo anterior, morteros con diferentes calidades y agregados gruesos con diferentes características (forma, textura, mineralogía, resistencia, etc.), pueden producir concretos de distintas resistencias (Özturan & Çeçen, 1997).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993).

El 100% de los concretos que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003). Ahora existen también concretos que utilizan productos de demolición de obras, como agregados triturados.

Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm ; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm (Neville & Brooks, “Tecnología del concreto”, 1999). De acuerdo a su peso específico, los agregados se dividen en ligero, normal y pesado; estas diferencias los hacen aptos para producir concreto con cierta variedad en el peso unitario, el cual es una característica básica del material (Alatorre & Uribe, 1998).

Algunas otras importantes propiedades físicas de los agregados son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. También es de suma importancia la granulometría de los agregados, y el tamaño máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003).

2.5.1. Forma de los agregados pétreos.

La forma de los agregados tiene incidencia sobre la trabajabilidad del concreto fresco. Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son equidimensional o esférica, prismática, acicular o elíptica e irregular.



De todas estas, la que mayor problema puede ocasionar para la trabajabilidad es aquella de tipo tabular (conocidas como piezas planas y alargadas); ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano, de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. Además, gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla (Uribe, 1991).

Es deseable, entonces, que los agregados particularmente los gruesos tengan una forma un tanto angular y cúbica (Chan, 1993).

Los agregados se pueden calificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable, logrando producir, por ejemplo, a mayor grado de redondeamiento menor relación de vacíos; pero por otra parte un menor valor de este parámetro reduce la capacidad de compactación (Neville, 1999).

2.5.2. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto.

Además por consideraciones teóricas, independientemente de la relación a/c, las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de la superficie y el tipo de mineral, influyen en las características de la zona de transición, y por lo tanto, afectan la resistencia del concreto (Mehta & Monteiro, 1998).

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación a/c que afecta tanto física como químicamente la zona de interfase. Se ha encontrado que concretos fabricados con agregados triturados resisten más que los de canto rodado; el esfuerzo de compresión a los 28 días para los concretos hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20 por ciento más bajo que los concretos preparados con agregados triturados. Lo anterior puede ser atribuido tanto a la superficie lisa de los agregados de canto rodado, como a su posible menor resistencia, en relación a los agregados triturados, que fueron de basalto y caliza. (Özturan & Çeçen, 1997).

El efecto del tamaño máximo del agregado en la resistencia también es conocido. La tendencia observada indica que mientras que el TMA disminuye, la resistencia decrece. Este fenómeno se ha observado para gravas de 75.0, 37.5, 19.0 y 9.5 mm (3", 1½", ¾", y ⅜"), (Sleiman, 2000).

Los concretos con altos contenidos de agregados presentan bajas resistencias de compresión a edades tempranas, fallando probablemente por la concentración de esfuerzos alrededor de los agregados, ya que en éstos sus propiedades físicas no



varían con el tiempo, mientras que la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta de cemento están todavía por debajo de su valor final (Cetin & Carrasquillo, 1998).

Por otro lado, la capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto.

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad (igual a 2.25) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre la masa volumétrica y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su masa es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla. Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia (Cerón M., 1996).

La presencia de un porcentaje importante de materia orgánica en los agregados puede provocar problemas en la fabricación de concreto, ya que trae consigo efectos como inhibir la adecuada hidratación del cemento y por lo tanto causar un retraso en el endurecimiento del mismo. Los agregados contaminados pueden ser causa de reducción de la resistencia a la compresión del concreto; y además, pueden contener sustancias nocivas que afecten químicamente al material de diversas formas (Uribe, 1991).

Aunque de manera simplista pudiera pensarse que el agregado grueso actúa principalmente como un relleno para reducir el contenido de la pasta de cemento y moderar el esfuerzo en la matriz, sus contribuciones parecen ser más que eso. Un porcentaje máximo en volumen de agregados, sobre todo gruesos, tiene un efecto positivo tanto en su resistencia, como en sus características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad, hecho que se presenta debido a que la pasta de cemento endurecido constituye el elemento más débil en lo que se refiere a las propiedades antes citadas (Palbol, 1996).

La demanda de agua de los agregados determina el contenido de cemento y pasta para una determinada resistencia del concreto. Debido a que la pasta es la principal fuente de acortamiento y alargamiento en el concreto, agregados con bajas demandas de agua producirían concretos menos propensos a la deformación (acortamiento y alargamiento). Por esto, los agregados que mejor se acomodan en una mezcla producen concretos con menor inestabilidad volumétrica (Alexander, 1996).



2.6. AGUA DE MEZCLADO.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para el preparo del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables.



Figura 25. El agua que se pueda beber puede ser utilizada en la elaboración de mezcla de concreto hidráulico (Radio Santa Fe, 2016).

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad.

Por lo tanto, se pueden establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas sobre varias propiedades. Algunas Impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades.

2.6.1. Especificaciones.

Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para el preparo del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos.

El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La norma mexicana que establece los valores límites de impurezas en el agua de mezclado en México es la NMX-C-122-ONNCCE-2004, "Industria de la Construcción-Agua para concreto-Especificaciones", esta norma presenta la siguiente tabla (Tabla 12) especificando los valores característicos y límites tolerables de sales e impurezas:



Tabla 12. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas [NMX-C-122-ONNCCE-2004].

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfuresistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2,000	2,000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50,000	35,000
Cloruros como Cl (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1,000 (c)
Sulfato como SO ₄ = (a)	3,000	3,500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbono disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3,500	4,000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5

NOTA 1. Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no excedan dichos límites.

NOTA 2. El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea menor a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088-1997-ONNCCE “Industria de la Construcción-Agregados-Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino”.

NOTA 3. Cuando se use cloruro de calcio (CaCl₂) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la fabricación y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 12, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han causado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

NOTA 4. Cuando se sospeche que con la integración de los componentes de los ingredientes del concreto (cemento, agregados, aditivos) el agua puede producir resultados adversos, se deben hacer los estudios y pruebas que se estimen necesarios con la debida anticipación.



2.7. ADITIVOS.

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

Clasificación de los aditivos

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

Las razones principales para el uso de aditivos son:

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

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción. La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad del material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del concreto (Kosmatka & Panarese, 1992).



CAPÍTULO 3. MATERIALES DE ESTUDIO

3.1. CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.

La presente investigación se llevó a cabo utilizando ceniza de bagazo de caña (CBC) proveniente de un ingenio azucarero ubicado en la localidad de Pedernales, municipio de Tacámbaro, Michoacán.

México ocupa el sexto lugar en producción mundial de caña de azúcar y durante la extracción del jugo el 30% se transforma en bagazo que podría aprovecharse para este fin (La Jornada en Línea, 2014).

Antecedentes.

De acuerdo con el investigador politécnico Dr. Pedro Montes García, trabajos previos efectuados en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca indican que el bagazo ha sido utilizado para sustituir parcialmente al cemento. “En la composición química de la ceniza de bagazo de caña predomina el óxido de silicio con contenidos de alúmina y óxido de hierro, que pueden reaccionar con el hidróxido de calcio en la hidratación del cemento y producir materiales que mejoren las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto”.

Para el estudio, el programa experimental realizado por el Dr. Montes García se dividió en tres etapas:

1. En la primera se realizó la caracterización de los ingredientes y cómo podría trabajar el material; encontraron que la morfología, tamaño y composición mineralógica de las partículas de ceniza de bagazo de caña resultan difíciles de procesar en las mezclas de mortero y concreto, aunque esto puede solucionarse con la ayuda de un aditivo súperplastificante.
2. En la segunda, tras evaluar propiedades microestructurales de los materiales se encontró que el uso de la ceniza de bagazo de caña no tiene efectos perjudiciales.
3. La tercera etapa, explica el doctor Montes García, consiste en hacer pruebas de laboratorio y campo para evaluar las propiedades de durabilidad del concreto. Los resultados de pruebas de difusión de cloruros y resistividad eléctrica sugieren que el concreto elaborado con ceniza de bagazo de caña puede ser más durable que aquel que contiene otros materiales suplementarios.

Por el momento la investigación del CIIDIR-Oaxaca recomienda no rebasar el 15 por ciento de sustitución de cemento Portland por ceniza de bagazo de caña de



azúcar. La razón es que actualmente no se cuenta con un adecuado control del sistema de calcinación del bagazo; por lo tanto, la ceniza tiene un alto contenido de materia sin calcinar, la cual puede afectar de manera negativa las propiedades finales del concreto.

El bagazo de caña tiene diversas aplicaciones, y una de ellas es como base para la elaboración de materiales compuestos, incluso se le ha llamado en las publicaciones de revistas como el material compuesto del futuro. En su uso directo estaría incorporado como sustituto parcial del cemento para la elaboración de concreto y utilizarse en la construcción de obras en infraestructura.

Montes García señala que otra aplicación exitosa en el CIIDIR-Oaxaca ha sido para la estabilización de bloques de suelo compactado, ya que la adición de ceniza mejora significativamente las propiedades de resistencia y durabilidad de los bloques. Y concluye que la ceniza de bagazo de caña parece ser una opción factible para la elaboración de una gran variedad de materiales que se utilizan en la industria de la construcción. Por ello se requiere continuar con investigaciones tendientes a dilucidar su potencial como sustituto parcial o total del cemento Portland (La Jornada en Línea, 2014).

Como otro antecedente sobre el estudio de la ceniza de bagazo de caña como material puzolánico en una mezcla de mortero tenemos el realizado por el M.I.T. Mauricio Arreola Sánchez: “Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto” en el año de 2013. Se obtuvo como resultado que la CBC en un porcentaje de 20% de sustitución con respecto a la masa de cemento es un material de óptimo desempeño, pues mostró mejoras tanto mecánicas como de durabilidad y su comportamiento fue constante y consecuente en los distintos ensayos realizados. (Arreola Sánchez, 2013).

De la misma manera en el trabajo de investigación titulado “Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus” llevado a cabo por la M.I.T. Sandra del Carmen Arguello Hernández concuerda con que los porcentajes óptimos de CBC en una mezcla de mortero son el 5% y 20% (Arguello Hernández, 2012).

Cabe señalar que la CBC utilizada en el estudio del M.I.T. Mauricio Arreola y la M.I.T. Sandra del Carmen se obtuvo gracias al ingenio de azúcar “Lázaro Cárdenas”, que está ubicado en las afueras del poblado de Taretan en el estado de Michoacán, y que fue una investigación aplicada a morteros de cemento. Estos resultados sientan una base como apoyo a la presente investigación, que debe ser adaptada a una mezcla de concreto hidráulico, buscando igualmente un óptimo porcentaje de sustitución y una buena trabajabilidad.



Figura 26. Patio interior en el ingenio Pedernales (izquierda) Calderas para la producción de azúcar de caña (centro y derecha). (Fotografías: E. González Castro).



Figura 27. Tolva de almacenamiento y canalización de la CBC producida (izquierda). CBC en estado húmedo debajo de la tolva (centro). CBC que se extrajo para su traslado y posterior análisis y empleo en el laboratorio de resistencia de materiales de la U.M.S.N.H. (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

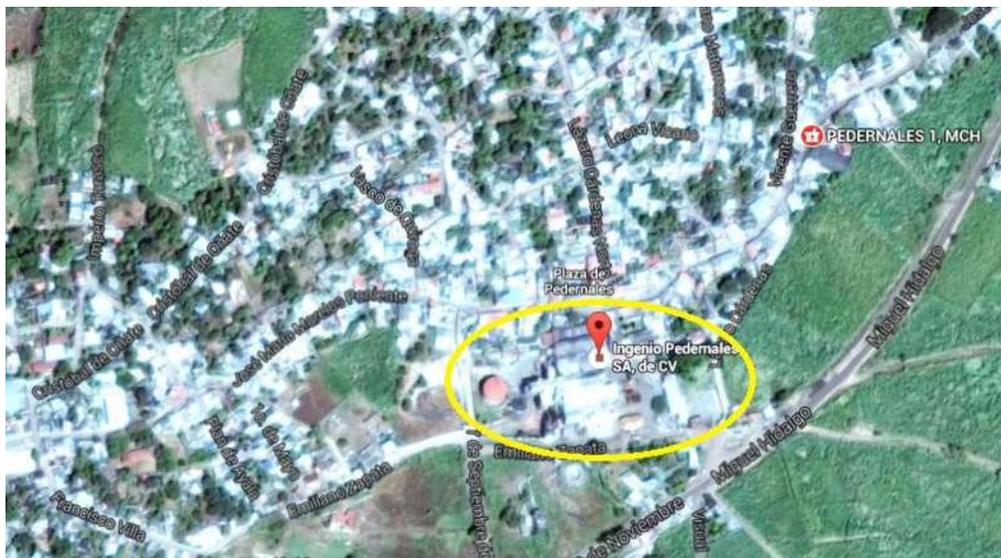


Figura 28. Localización del ingenio Pedernales S.A. de C.V. (Google maps, 2016).



3.2. CEMENTO PORTLAND.

El cemento utilizado para la experimentación fue un CPC 30R RS Tolteca de la marca CEMEX. Sus características se describen a continuación:

El cemento CPC 30R RS Extra está especialmente formulado para reducir la aparición de grietas por contracción plástica en el concreto expuesto a condiciones ambientales extremas, mejorar la consistencia de la mezcla, producir una mezcla más fácil de manejar y evitar el proceso de curado.



Ventajas:

- Reduce la aparición de grietas generadas por contracción plástica que se promueven en condiciones ambientales extremas de alta temperatura y velocidad del viento.
- Le brinda a las mezclas de concreto mayor cohesión, adherencia y trabajabilidad, aún con agregados problemáticos.
- Reduce el riesgo y la segregación de las mezclas de concreto.
- Sustituye el uso de membranas de curado, al promover por sí mismo el proceso de curado, lo que representa ahorros significativos en las obras.

Figura 29. Cemento CPC 30R RS. (CEMEX, 2016).

El hecho de ser un CPC 30R RS significa que es un cemento Portland compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a los 3 días de 20 MPa, resistencia de 30 MPa a los 28 días y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE-2010).

La relación entre la resistencia del cemento Portland a sulfatos y su contenido de aluminato tricálcico (C_3A) está bien establecida. El cemento Portland que contiene menos de 5% de C_3A ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo. Los estudios han demostrado que los cementos que contienen potencialmente menos hidróxido de calcio en la hidratación se comportan bien en exposición de sulfatos.

Debe señalarse que el uso de cemento tipo RS por sí mismo no garantizará la producción de un concreto resistente a sulfatos ya que están involucrados otros factores y deben ser considerados, pues su efecto puede ser más importante que el del cemento de la resistencia a sulfatos del concreto. La fuerza del ataque de



sulfatos depende del tipo y concentración del sulfato y se incrementa con el mojado y el secado (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2006).

Desde el punto de vista químico, se debería esperar que el C_4AF formara sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto que produjera expansión. Sin embargo la acción del sulfato de calcio en el cemento hidratado disminuye al reducirse la relación $Al_2O_3:Fe_2O_3$.

La baja proporción de C_3A y el contenido comparativamente bajo de C_4AF del cemento resistente a los sulfatos significa que este tiene un alto contenido de silicatos que le proporcione una alta resistencia, pero como el silicato dicálcico (C_2S) representa una alta proporción de silicatos, la resistencia a edades tempranas es baja. El ataque de los sulfatos ocurre porque el Aluminato tricálcico (C_3A) reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Es por ello que el cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, se evite que la sustancia que se forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997).

3.3. AGUA DE MEZCLADO.

El agua de mezclado o agua de amasado que se utilice en una mezcla de concreto hidráulico debe cumplir con ciertos parámetros indicadores de su calidad, los cuales al ser los deseados nos permitirán hacer uso de ella.

El agua empleada para la elaboración de las distintas mezclas (mezcla de concreto testigo y concreto con sustitución de CBC) fue analizada por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en mayo de 2014, quienes expidieron los resultados referentes a la normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Los resultados de este análisis demuestran que el agua es apropiada para utilizarse en la elaboración de los especímenes de concreto, en su etapa de curado y en los ensayos de caracterización del cemento y otros que requieran el uso de agua en su procedimiento.

La Tabla 13 muestra estos parámetros obtenidos y se presentan a continuación:



Tabla 13. Resultados del análisis del agua utilizada para la caracterización del cemento y la elaboración de los especímenes de concreto.

Muestra: Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Sitio de muestro: Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas".

Fecha de muestreo: 18 de mayo de 2014.

Normativa de referencia: NMX-C-122-ONNCCE-2004.

Parámetro	Resultado	Límite permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI2000
Sólidos disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI2001
Oxígeno disuelto	337	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI2001
Dureza Cálcica	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

(Reyes Bernabé, 2015).



3.4. ADITIVO.

Para lograr una mezcla trabajable y con mayor fluidez se optó por utilizar un aditivo súper plastificante llamado CRISOTAN R-5. Se adicionó a la mezclas (testigo y CBC) el 0.74% de aditivo con respecto a la masa de material cementante. Este aditivo utilizado se describe a continuación con base en su ficha técnica:

El CRISOTÁN R-5 es un agente no tóxico que no provoca espuma y dado que es un producto sintético, presenta propiedades uniformes de un lote a otro, a diferencia de los lignosulfonatos.

Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150°C. Su temperatura de descomposición es a los 380°C. En dosificaciones normales, el CRISOTAN R-5 no afecta al calor de hidratación del concreto. No contribuye a la corrosión del acero ni al crecimiento de microorganismos.

Tabla 14. Propiedades típicas del CRISOTÁN R-5 (Ficha técnica CRISOTAN R-5)

	CRISOTAN R-5	CRISOTAN R-5 LÍQUIDO
Apariencia	Polvo fino	Líquido ámbar oscuro
% de ingrediente activo	90%	40%
Densidad (g/ml)	-----	1.2
Solubilidad en solución al 10%	Clara	Clara

La plasticidad que imparte el CRISOTAN R-5 a una mezcla de concreto produce una fluidez en el llenado de moldes. Cuando los moldes se retiran, el concreto resulta de superficie más uniforme, sin accidentes.

Cómo funciona.

El CRISOTAN R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras. Esta poderosa acción del CRISOTAN R-5 sobre el cemento causa que la mezcla de concreto fluya más fácilmente que una mezcla convencional. Este efecto se llama plastificación.

Como un súper plastificante, el CRISOTAN R-5 da a la mezcla de concreto una óptima plastificación y permite que sea colocado con mayor facilidad. Además, su uso permite reducir la relación agua/cemento sin pérdida en el revenimiento. Esto resulta directamente, en un incremento en la resistencia inicial y final a la compresión del concreto.

Dosificación.

La dosificación del CRISOTANR-5 dependerá de la relación agua/cemento que tenga nuestra mezcla de concreto de acuerdo a la siguiente tabla:



Tabla 15. Dosificación del CRISOTAN R-5 en polvo para una mezcla de concreto (Ficha técnica CRISOTAN R-5).

Aegados	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	445	445	445	379
Arena	796	867	914	972
Grava	920	920	920	920
Agua	206	170	155	158
CRISOTÁN R-5 (SÓLIDOS)	---	1.8	3.3	2,8
Revenimiento (cm)	11.5	10.2	12.7	10.8
%RH	---	18.18	25.3	24
%RC	---	---	---	14.8
Relación a/c	0.46	0.38	0.34	0.41

(CHRISTIANSON S.A. de C.V.).

Según definición de la norma UNE 934-2, se denominan reductores de agua/plastificantes y reductores de agua de alta actividad/súper plastificantes, respectivamente, aunque también se los conoce como fluidificantes y súper fluidificantes.

- **Aditivo reductor de agua o plastificante:** Es un aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua de un determinado concreto, o que, sin modificar el contenido en agua, aumenta el revenimiento (cono de Abrams) / escurrimiento del concreto, o que produce ambos efectos a la vez.
- **Aditivo reductor de agua de alta actividad o súper plastificante:** Es un aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir fuertemente el contenido en agua de un determinado concreto, o que, sin modificar el contenido en agua, aumenta considerablemente el revenimiento, o ambos efectos a la vez.

3.5. MATERIALES PÉTREOS.

El agregado pétreo (arena y grava) tienen la función de proporcionar la resistencia al concreto y generar volumen respectivamente. En la presente investigación los agregados pétreos son procedentes de dos distintos bancos de materiales.

Agregado grueso.

Como agregado grueso se eligió una grava producto de trituración de roca basáltica con TMA de ¾” (19 mm) proveniente de un banco de material (encerrado en el



círculo rojo del mapa en la Figura 30) ubicado al final de un camino de terracería (línea de guiones color naranja) que entronca con la carretera federal 43 (línea punteada color amarillo) localizado al norte y en las afueras de la ciudad de Morelia. Dicho camino de terracería se encuentra a la altura de la calle Dalia (marcada con línea continua de color azul). Con el uso de los agregados triturados se espera lograr un concreto de mayor densidad y de mejores prestaciones mecánicas, así mismo incrementar la durabilidad.

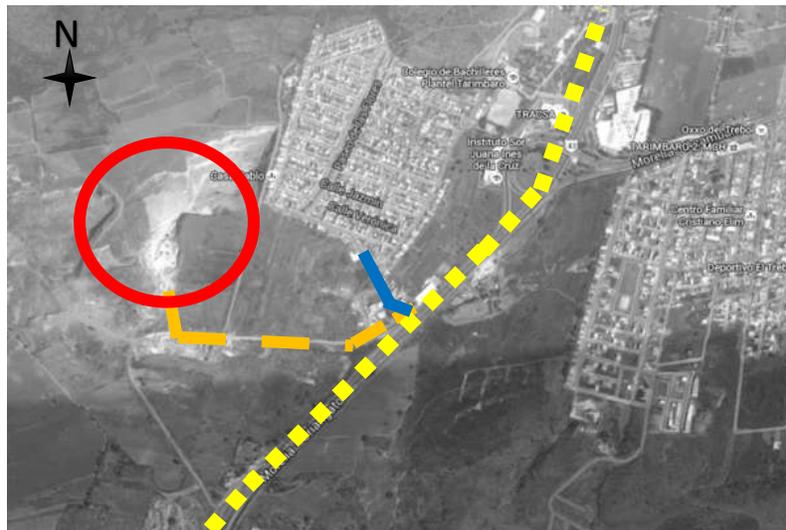


Figura 30. Ubicación del banco de materiales triturados (Google Maps, 2015).

Agregado fino.

El agregado fino utilizado fue una arena volcánica negra originaria del banco de arena de “Joyitas” ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia-Quiroga entrada a San Bernabé, Michoacán.

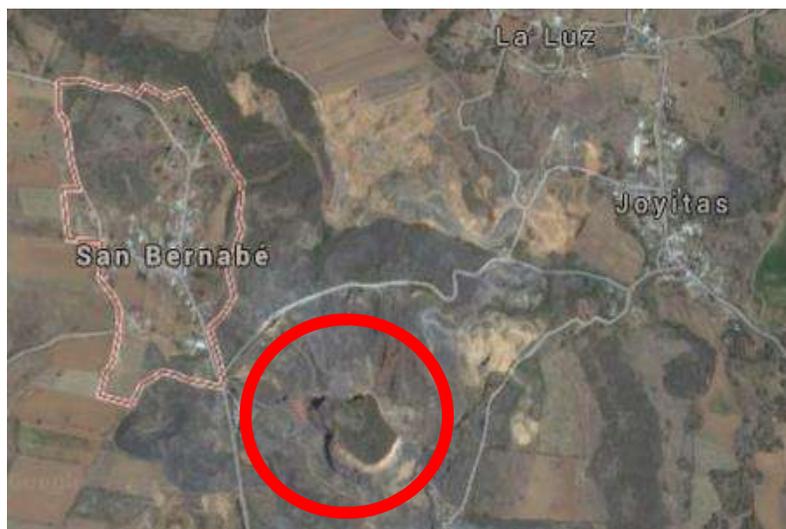


Figura 31. Ubicación del banco de arena de Joyitas. (Google maps, 2016).



CAPÍTULO 4. DISEÑO DE MEZCLA

4.1. INTRODUCCIÓN.

El diseño de mezclas puede ser definido como el proceso de selección de los ingredientes adecuados para concreto (cemento, agregados, agua y ocasionalmente aditivos) y la determinación de sus proporciones relativas con el objeto de producir un concreto de cierta resistencia, consistencia y durabilidad de la forma más económica posible (Shetty, 2005).

Como objetivo del diseño de una mezcla de concreto se debe determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada que debe cumplir con las siguientes propiedades: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Trabajabilidad aceptable en el concreto fresco, lo cual engloba los aspectos de:

- Homogeneidad y uniformidad.
- Consistencia (cohesión y viscosidad).
- Estabilidad (oposición a la segregación y exudación).
- Aptitud para la compactación.
- Disposición para el acabado (condiciones de textura superficial).

Una mezcla de concreto debe ser plástica, lo cual significa que debe tener la consistencia adecuada para que sea de fácil elaboración, manejo, colocación, acomodo y moldeado; además de mantener esta consistencia sin presentar el fenómeno conocido como exudación de una manera excesiva. Una mezcla de concreto que no se encuentre adecuadamente proporcionada no podrá considerarse como una mezcla plástica si no es homogénea, esto se ve reflejado en aquellas mezclas con cantidades elevadas de agregados pétreos (especialmente agregados gruesos), poca agua, mezclas desmoronables, no fluidas o muy fluidas.

Como consecuencia de tener una relación agua cemento alta (mezcla fluida) se espera tener resistencias bajas, segregación y exudación (fenómeno por el cual los agregados más pesados de la mezcla de concreto se sedimentan parcialmente y provoca la migración del agua de mezclado hacia la superficie, incrementando la relación agua cemento en ese lugar y disminuyéndola en la parte inferior).

En el concreto endurecido se deben conseguir las propiedades de durabilidad, resistencia y homogeneidad. La resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (Kgf/cm²)



a una edad de 28 días y se le asigna con el símbolo $f'c$ (Kosmatka & Panarese, 1992).

El segundo objetivo del diseño de una mezcla de concreto es hacer una mezcla económica (Shetty, 2005).

El costo de la elaboración de la mezcla de concreto dependerá básicamente del costo de los materiales y del costo de la mano de obra. Es de destacar que el precio del cemento, por kilogramo, es varias veces mayor que el de los agregados, es decir, el cemento del cemento Portland constituye alrededor del 10% del volumen absoluto total del concreto pero puede llegar a representar más del 70% del costo del mismo (Neville A. , Tecnología del Concreto, 1998). Es por esta razón que el ingeniero debe buscar conseguir una mezcla con el menor consumo de cemento del cemento Portland, pero cumpliendo a la vez con los criterios de resistencia mecánica, durabilidad y otras propiedades intrínsecas de la mezcla.

El costo de los demás materiales que conforman la mezcla juega un papel menos impactante, sin embargo en ocasiones puede influir significativamente en la elección de los agregados pétreos. El costo del agua no suele influir importantemente, como si lo hace el costo de cualquier aditivo utilizado. Se debe tener especial cuidado con el uso de aditivos, pues su efecto puede ser adverso.

La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al producir un concreto (Kosmatka & Panarese, 1992).

Existen distintos métodos de diseño de mezclas de concreto, entre ellos tenemos:

- Proporción arbitraria.
- Método de módulo de finura.
- Método de máxima densidad.
- Método de área superficial de los agregados.
- Relación de vacíos.
- El diseño de mezclas de alta resistencia.
- Mezclas de diseño basadas en la resistencia a la flexión.
- Contenido de cemento.
- Método del ACI 211.
- Mezcla de diseño para concreto bombeado.

El método desarrollado en la investigación es el desarrollado por el American Concrete Institute, elegido al ser el más conocido y utilizado. Se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams (1918). El desarrollo y cálculo se presentan a continuación, haciendo uso de las propiedades de agregados y cemento Portland obtenidas en los ensayos de caracterización.



4.2. DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI).

Método del ACI

Primeramente se hace una recopilación de las propiedades de los materiales con los que se preparará la mezcla de concreto.

Tabla 16. Resumen de las propiedades de los materiales.

Material	M.U.S.	M.U.C.	Densidad	Absorción	M.F.	T.M.A.
Unidad	Kg/m ³	Kg/m ³	g/cm ³	%	-	in
Arena	1373.1	1502.9	2.39	5.42	3.6	-
Grava	1407.5	1497.1	2.57	1.10	-	3/4
Cemento	-	-	3.05	-	-	-

Paso 1: Elección del revenimiento. Cuando no se especifica el revenimiento, puede seleccionarse un valor apropiado para la obra de los que aparecen en la Tabla 17. Las variaciones de revenimiento que se muestran son aplicables cuando se emplea el vibrador para compactar concreto.

Tabla 17. Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción [ACI 211].

Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción			
Tipos de construcción	Revenimiento en centímetros		Tolerancias
	Máximo	Mínimo	
Vigas y muros reforzados	10	-	3.5
Columnas para edificios	10	2.5	3.5
Pavimentos y Losas	8	2.5	2.5
Concreto Masivo	5	2.5	2.5

Paso 2. Elección del Tamaño Máximo del Agregado: Los concretos con tamaños más grandes de agregado requieren menos mortero por unidad de volumen del concreto. Generalmente el tamaño máximo nominal del agregado debe ser el más grande que esté económicamente disponible y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo nominal debe exceder de 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras, 1/3 del espesor de la losa, ni 3/4 del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas, o torones de pretensado.

Paso 3. Determinación del agua de mezclado y contenido de aire: La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo nominal, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido.



En la Tabla 18 aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregados, con o sin aire incluido.

Tabla 18. Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire [ACI 211].

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado									
Agua Kg/m ³ de concreto									
Tamaños máximos nominales de agregado	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"	in
	10	12.5	20	25	40	50	70	150	cm
Revenimiento en cm	Concreto sin aire incluido								
2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113	Kg/m ³
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124	Kg/m ³
15 a 18	243	228	216	202	190	178	160	---	Kg/m ³
% de aire incluido	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2	
Concreto con aire incluido									
2.5 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107	Kg/m ³
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119	Kg/m ³
15 a 18	216	205	197	184	174	166	154	---	Kg/m ³
Promedio recomendado del contenido total del aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición									
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1	
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3	
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4	

Paso 4. Selección de la relación Agua/Cemento: La relación agua/cemento será una de las características más importantes, pues al ser lo más baja posible nos brindará un concreto de mayor durabilidad, a la vez debe ser aquella que permita a la mezcla tener una trabajabilidad adecuada. La resistencia media, que es mayor que el $f'c$ se llama $f'cr$, y es la resistencia requerida en el diseño de la mezcla. El $f'cr$ se obtiene de sumar a la resistencia de proyecto $f'c$ la desviación estándar de la resistencia del concreto. Este valor se define de acuerdo al procedimiento de fabricación de la mezcla.

Tabla 19. Desviación estándar de la resistencia del concreto [ACI 211].

Desviación estándar de la resistencia del concreto en Kg/cm ²		
Procedimiento de fabricación	$F'c \leq 200 \text{ Kg/cm}^2$	$200 \leq F'c \leq 300 \text{ Kg/cm}^2$
Mezclado mecánico, proporcionamiento, corrección por humedad y absorción de los agregados de una misma fuente y de calidad controlada.	30	35
Mezclado mecánico, proporcionamiento por masa.	35	45
Mezclado mecánico, proporcionamiento por volumen; volúmenes cuidadosamente controlados.	50	60



La Tabla 20 muestra las fórmulas con las cuales se determina el F'_{cr} en el diseño de la mezcla.

Tabla 20. Fórmulas para determinar el F'_{cr} [ACI 211].

Fórmulas para determinar el F'_{cr}
$F'_{cr} = f'_c + 1.28 * c$
$F'_{cr} = f'_c + 2.52 * c - 35$

La Tabla 21 contiene los valores de la relación agua/cemento correspondientes a las distintas resistencias a la compresión a la edad de 28 días.

Tabla 21. Selección de la relación agua/cemento [ACI 211].

Resistencia a la compresión a los 28 días (Kgf/cm ²)	Relación agua/cemento por masa	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Paso 5. Cálculo del contenido de cemento: la cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el paso 3 y 4. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación a/c.

Paso 6. Estimación del contenido del agregado grueso. Se puede ver que para una trabajabilidad igual, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino. Este volumen se convierte a masa seca del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por la masa unitaria de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso [ACI 211].

Tabla 22. Estimación del agregado grueso [ACI 211].

Tamaño máximo del agregado	Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto			
	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena indicados			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81



- Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado seco, como se describe en la norma ASTM C29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de las relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción.
- Para concretos más trabajables véase la ASTM Método 136 para el cálculo del módulo de finura.

Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino: Para la estimación del contenido del agregado fino se lleva a cabo por medio del método del volumen absoluto, el cual inicia con el cálculo de la masa de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma. El método del volumen absoluto implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su masa dividida entre la densidad de ese material (siendo esta el producto del masa unitario del agua y de la gravedad específica del material).

Paso 8. Ajustes o correcciones por humedad del agregado: Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para 1 m^3 de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar al porcentaje de la humedad actual el porcentaje de la humedad de absorción del material (porcentaje de humedad actual – porcentaje de absorción). Por lo tanto a los materiales pétreos, al considerarse superficialmente secos y saturados se les debe restar el porcentaje de absorción correspondiente.



CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYES PARA LA CARACTERIZACIÓN

5.1. DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados.

Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros y los constructores al emplear el concreto, es la poca verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados (Cerón M., 1996).

Tabla 23. Normas correspondientes a los agregados pétreos.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE-2004	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE-1997	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado.	NMX-C-166-ONNCCE-2006	ASTM-C-566-97
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE-2004	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE-2014	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE-2014	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE-2006	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE-2004	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE-1997	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE-1997	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02



5.1.1. Práctica estándar para el muestreo de agregados.

Estos procedimientos serán aplicables para los agregados pétreos tanto finos como gruesos. La importancia del muestreo de materiales es tan relevante como los mismos ensayos de caracterización, dado que el material obtenido debe representar las características del conjunto, ser representativo y así al ser evaluado obtener datos confiables para un correcto diseño de mezcla.

Procedimiento:

- 1) El muestreo se realiza en el banco de material, en los camiones que hacen el transporte y suministro del material a la obra o del mismo material que se tenga ya en obra.



Figura 32. Muestreo del agregado grueso en el banco de material triturado. (Fotografías: E. González Castro).

- 2) El procedimiento se realiza en forma sistemática seleccionando de manera objetiva y aleatoria el material para la posterior determinación de sus características.
- 3) El tamaño de las muestras parciales, su número y frecuencia para cada tipo de muestreo se realiza de acuerdo a la Tabla 24.
- 4) Las muestras obtenidas se envasan, identifican, transportan y almacenan, tomando en cuenta lo siguiente:
 - a) Las muestras se envasan en los costales que estén limpios antes de ser llenados.
 - b) Se debe de evitar que las muestras se contaminen con polvo u otras materias extrañas.



- c) Revisar que los costales queden llenos y bien amarrados, con objeto de evitar pérdidas o alteración de su contenido.
- d) Las muestras se identifican mediante dos etiquetas, una en su interior y otra sujeta al exterior. Estas etiquetas incluirán, por lo menos, la siguiente información: nombre de la obra, nombre del banco, tipo de material, localización del sitio de muestreo, responsable del muestreo, fecha y hora del muestreo, uso a que se destina y observaciones. (Estos datos también se anotan en una libreta de campo, así como todas las observaciones que se consideren pertinentes).
- e) Una vez en el laboratorio, las muestras se registran asignándoles un número de identificación y se almacenan dentro de una bodega techada, cerrada, limpia y seca, sobre una tarima que permita el paso del aire, colocada a 15 cm del suelo como mínimo, acomodando los costales de tal forma que no puedan sufrir caídas.

Tabla 24. Número, frecuencia y tamaño del muestreo [M-MMP-4-04-001/02].

Tipo	Número y Frecuencia	Tamaño de la muestra en Kg
Exploración de bancos	*Una muestra por sondeo por cada 20,000 m ³ de material homogéneo * Una muestra por sondeo por cada 5,000 m ³ de material heterogéneo	20
Estudio de bancos	*Una muestra por sondeo por cada 10,000 m ³ de material homogéneo *Una muestra por sondeo por cada 2,500 m ³ de material heterogéneo	50
Estudio de almacenamientos	* Una muestra por cada 400 m ³ de material	20
Control de calidad	* Una muestra por cada 250 m ³ de material * Una muestra por cada 2,500 m ³ de material	5 40

5.1.2. Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.

El objetivo de esta práctica es obtener una muestra que represente al conjunto total (de agregados, arena o grava) en todas propiedades para poder obtener así resultados confiables de los posteriores análisis de caracterización. Para que la muestra sea representativa debe elegirse la técnica de muestreo más adecuada que produzca a su vez una muestra aleatoria adecuada. Las



consecuencias de no llevar a cabo de manera correcta los procedimientos de muestreo conllevan a no obtener resultados fiables de los análisis consecuentes.

Procedimiento:

Los dos procedimientos mayormente utilizados en la obtención de muestras representativas se describen a continuación:

Antes de llevar a cabo cualquiera de los procedimientos siguientes el material debe secarse para asegurar que no se encuentre húmedo y los resultados sean incorrectos.

Divisor Mecánico – Cuarteador de Johnson.

1. Se toma la muestra representativa en una charola ancha, más o menos del mismo tamaño que el canal de alimentación del divisor.
2. Se coloca la muestra en la charola de la parte superior del divisor, distribuyéndola uniformemente de orilla a orilla, de este modo se introducirá en las canaletas aproximadamente una cantidad igual de material en cada uno de los canales, la muestra se distribuye y cae en los recipientes de la parte de abajo.
3. El material retenido en uno de los recipientes se elimina o se regresa al material de muestreo y el material del otro recipiente es el que se utiliza para realizar las pruebas.
4. Cuando se desea una muestra más pequeña, se vierte en una charola la porción de la muestra retenida en uno de los recipientes, y después se coloca dentro del divisor, realizando este procedimiento de reducción tantas veces como sea necesario para reducir la muestra al tamaño deseado.

Cuarteo con palas.

1. Se coloca la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro, donde no pueda existir ninguna pérdida de material o adición accidental de material contaminante.
2. Se mezcla la muestra desde abajo y se gira tres veces cambiándola cada vez al extremo opuesto.
3. En el último cambio se traslapa la muestra entera dentro de una pila cónica depositando cada palada sobre la punta superior de la pila.
4. Se aplana la parte superior de la pila con la parte posterior de la pala.



5. Se divide la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con la pala, trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie del material, removiendo y eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona
6. Los dos cuartos restantes se utilizan para efectuar las pruebas necesarias.
7. Cuando se desea una muestra más pequeña, se repite el procedimiento desde el paso 2 para reducir la muestra al tamaño deseado.

A continuación se presentan la Figura 33 y Figura 34, imágenes tomadas en la realización de los procedimientos descritos con anterioridad.



Figura 33. Extendido de la arena sobre una superficie limpia para su secado al sol (izquierda). Uso del divisor mecánico (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cuarteo del agregado grueso con el fin de obtener una muestra representativa:



Figura 34. Agregado grueso triturado apilado en forma cónica sobre una superficie dura y limpia (izquierda). Mezcla dividida en 4 partes iguales (derecha). (Fotografías: E. González Castro).



5.1.3. Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporada por secado.

Este procedimiento de prueba es llevado a cabo cuando el material pétreo se encuentra con cierta humedad tomada del ambiente, y su objetivo es hacer una corrección por humedad en la cantidad de agua de mezclado y conservar la relación agua/cemento de diseño.

Procedimiento:

1. Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
2. Se determina la masa de la muestra con aproximación al 0.1%.
3. Se coloca la muestra en una charola y seca en la parrilla. La muestra está completamente seca, cuando el calor le causa menos del 0.1% de pérdida adicional en masa.
4. Se determina la masa de la muestra seca con una precisión de 0.1% después de que se haya enfriado lo suficiente.



Figura 35. Secado de la muestra representativa (arena volcánica). (Fotografía: E. González Castro).

Cálculo:

El cálculo del porcentaje de humedad actual se realiza de acuerdo a la ecuación 1:

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

% H = contenido total de humedad, en %.

M_i = masa del material en su estado original, en g.

M_f = masa del material seco, en g.



5.1.4. Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados (Masa volumétrica suelta y compacta).

Estos procedimientos son aplicables tanto para los agregados finos como para los agregados gruesos, la diferencia radica en el tamaño del recipiente con el que se hace cada ensaye, recipiente más chico para el agregado fino y de mayor tamaño para el agregado grueso, de la misma manera lo es así el tamaño de cucharón.

Procedimiento (Masa unitaria seca y suelta):

1. Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
2. Se vacía el agregado dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir del borde del recipiente de aproximadamente 5 centímetros.
3. Se sigue llenando el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
4. Se nivela la superficie con los dedos o con la varilla de modo que no quede ningún pedazo sobresaliente.
5. Se determina la masa de la muestra con una precisión de 0.1%.



Figura 36. Comparación de los recipientes utilizados para los ensayos de masa unitaria en grava arena, respectivamente. (Fotografías: E. González Castro).

Procedimiento (Masa unitaria Seca y Varillada):

1. Se toma el agregado y se cuartea para obtener una muestra representativa.
2. Se llena el recipiente a un tercio de su capacidad y se nivela la superficie con los dedos.
3. Se varilla la capa de agregados dando 25 golpes, distribuidos ampliamente sobre la superficie, con la varilla punta de bala.
4. Se llena el recipiente a dos tercios y se vuelve a nivelar y varillar como se hizo en el paso 2.
5. Se llena el recipiente hasta rebasar el borde, se varilla nuevamente y se enrasa con la varilla.
6. Se determina la masa de la muestra con una precisión de 0.1%.



Figura 37. Llenado del recipiente en 3 capas dando 25 golpes por capa (izquierda). El procedimiento se repite 3 veces para obtener un valor confiable (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

Las masas unitarias seca suelta y seca varillada se determinan con la ecuación 2:

$$M_v = \frac{G-T}{V} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- M_v = masa volumétrica de los agregados, en Kg/m^3 .
- G = masa de los agregados más el recipiente, en Kg.
- T = masa del recipiente, en Kg.
- V = volumen del recipiente, en m^3 .

5.1.5. Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Alaejos & Fernández, 1996). La densidad relativa es la propiedad de los agregados utilizada para calcular el volumen que ocupan los agregados una vez que forman parte de la mezcla de concreto.

Procedimiento (Densidad relativa):



1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg y se cubre con agua manteniéndola en esa condición durante 24 ± 4 horas.
2. Se seca superficialmente la muestra por medio del molde troncocónico de la siguiente manera:
 - Se coloca la arena en una charola para ponerla a secar en una parrilla hasta eliminar el agua que tiene en exceso.
 - Para saber cuándo está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda y 3 a la tercera y finalmente 2 a la cuarta capa, si al final el material rebasa el borde del molde, se enrasa con el mismo pisón deslizándolo y cuidando de no ejercer presión sobre el material.
 - Se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso, por lo que se requiere seguir secando la muestra.

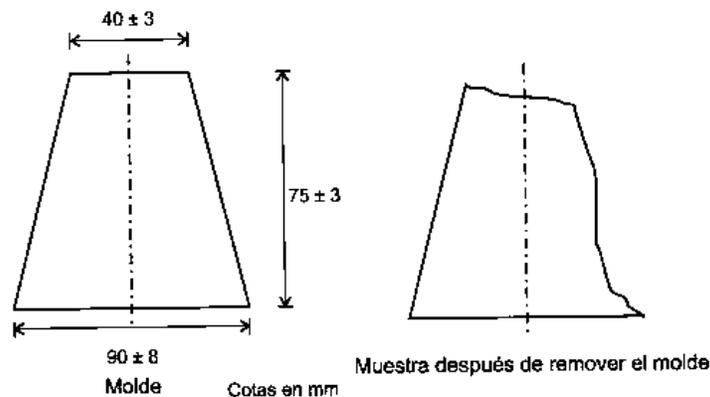


Figura 38. Medidas cono troncocónico y muestra seca superficialmente [NMX-C-165].

3. Se introduce agua en el matraz Chapman hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.
4. Se pesan 500 ± 10 gramos de la muestra superficialmente seca registrando este valor como “S”.
5. Con la ayuda de un embudo, se introduce la muestra en el matraz y se le adiciona agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad.



6. Después de introducir el material, se agita el matraz a fin de expulsar el aire atrapado.
7. Después de eliminar las burbujas, se llena el matraz hasta que alcance su máxima capacidad y se determina la masa total del matraz más la muestra y el agua del interior registrando este valor como "C"
8. Se remueve el agregado fino del frasco y se seca a temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, se deja enfriar en un cuarto a temperatura ambiente por $1 \pm 1/2$ hora y se determina su masa registrando este valor como "A".
9. Por último se determina la masa del matraz lleno de agua hasta su máxima capacidad y se registra este valor como B.

Cálculo:

La densidad relativa del agregado fino se calcula de acuerdo a la ecuación 3.

$$D_r = \frac{A}{B+S-C} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- D_r = densidad relativa o gravedad específica, adimensional
A = masa del material seco en el horno o parilla, en g.
B = masa del matraz lleno de agua, en g.
S = masa del material superficialmente seco, en g.
C = masa total del matraz más la muestra y el agua, en g.



Figura 39. Muestra de 300 g arena seca superficialmente (izquierda). Matraz de Chapman con la muestra de arena una vez que se han sacado las burbujas de aire (derecha).
(Fotografías: E. González Castro).

Procedimiento (Porcentaje de Absorción).



1. Del mismo material que quedó superficialmente seco del procedimiento anterior, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg se toman 300 g. registrando esta masa como masa saturada y superficialmente seca.
2. La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua.
3. Para saber cuándo el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.
4. Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material.

Cálculo: El porcentaje de absorción se calcula de acuerdo a la ecuación 4.

$$\% \text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

% Absorción = porcentaje de absorción, en %.

Mh = masa del material superficialmente seco, en g.

Ms = masa del material seco, en g.

5.1.6. Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.

El procedimiento varía un poco con respecto a los procedimientos realizados para el agregado fino, esto se debe principalmente a las diferencias con respecto al tamaño medio de los agregados, sin embargo se obtienen resultados confiables aplicando correctamente los procedimientos siguientes:

Procedimiento (Densidad):

1. Se toma el agregado grueso y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg.
2. De la fracción de material que se retiene en la malla de 3/8” se toma una cantidad tal que permita obtener una muestra de aproximadamente 300 g.
3. Se colocan los 300 g de material en una charola con agua, donde se somete a saturación por un período de 24 h.
4. Después del período de saturación, se retira el material del agua y se seca superficialmente con un lienzo, procurando eliminar únicamente el agua



adherida en la superficie sin remover mediante presión el agua absorbida. Esta operación se realiza lo más rápido posible a fin de evitar cualquier pérdida de agua por evaporación.

5. Se coloca el picnómetro sobre una superficie horizontal libre de vibraciones y se llena con agua destilada hasta el nivel de derrame. Junto a él, en su extremo de desalajo se coloca una probeta graduada vacía.
6. El material saturado y superficialmente seco se sumerge en el picnómetro y se recolecta en la probeta graduada el agua desalojada. Al concluir la inmersión del material, se mide sobre la escala de la probeta graduada el volumen correspondiente y se registra como V_t , en cm^3 .
7. Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 20 h. Transcurrido este tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
8. Una vez enfriado, se determina la masa del material seco y se registra como M_i , en g.

Cálculo: La densidad relativa del agregado grueso se de acuerdo a la ecuación 5.

$$Dr = \frac{M_i}{V_t(D_w)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

Dr = densidad relativa o gravedad específica, adimensional.

M_i = masa del material retenido en la malla de 3/8” completamente seco, en g.

V_t = volumen del material retenido en la malla de 3/8”, en cm^3 .

D_w = densidad del agua, que se considera igual a 1 g/cm^3 .

Procedimiento (Porcentaje de Absorción).

1. Del mismo material que quedó superficialmente seco del procedimiento anterior, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 300 g. registrando esta masa como masa saturada y superficialmente seca.
2. La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua.
3. Para saber cuándo el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.



4. Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material.



Figura 40. Muestras representativas de agregado grueso superficialmente seco (charolas) y material seco en la parrilla (hojas de papel, izquierda) (Fotografía: E. González Castro). Picnómetro en prueba de densidad (derecha). (Fotografía: F. López Regalado).

Cálculo: El porcentaje de absorción se calcula de acuerdo a la ecuación 6.

$$\% \text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

% Absorción = porcentaje de absorción, en %.
Mh = masa del material superficialmente seco, en g.
Ms = masa del material seco, en g.

5.1.7. Método de prueba estándar para materiales que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.

En algunos casos el material fino, como las arcillas o los limos se encuentran adheridas a las partículas más grandes. Estas partículas más finas de las 75 micras pueden ser separadas de una manera mucho más eficiente y por completo por medio de cribado en estado húmedo, comparado con un cribado en estado seco.

Procedimiento:

1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra representativa de 300 g como mínimo y se seca a una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
2. Después del secado se determina su masa registrándola como M_i .
3. Se coloca el material en un contenedor y se le agrega agua suficiente hasta cubrir todo el recipiente.



4. Hecho lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de “ochos” utilizando una varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla N°200 (0,075 mm).
5. Para facilitar el paso y eliminación de los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia.
6. Finalmente se regresa el material retenido en la malla N°200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, la cual se pesa y se registra como Mf.

Cálculo: El cálculo del porcentaje se realiza de acuerdo a la ecuación 7.

$$\%A = \frac{M_i - M_f}{M_f} * 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

% A = porcentaje de material que pasa la malla No. 200, en %.

Mi = masa inicial del material seco, en g.

Mf = masa del material seco después del lavado, en g.

Especificaciones:

Las especificaciones correspondientes a los límites permisibles se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).

Concepto	Material máximo permisible en masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2004	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 ⁽¹⁾	3.00 ^(A)
En concretos presforzados	8.00 ⁽¹⁾	--
En otros concretos	15.00	5.00 ^(A)

(1) En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente.

(A) En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente.



5.1.8. Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.

Este ensayo es muy utilizado dentro del campo de la ingeniería al momento de realizar una mezcla de concreto de cemento Portland; su fin es determinar la cantidad de partículas que tienen la capacidad de afectar su resistencia debido a la absorción en mayor o menor proporción de cemento y agua.

Procedimiento:

1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kilogramo y se seca a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.
2. Se deja enfriar la muestra y se pasa por la malla No. 16, del retenido se toma una muestra de 100 gramos y se anota como Pi pesados al décimo de gramo.
3. Se coloca el material en una charola y se extiende en una fina capa en la parte inferior.
4. Se cubre la muestra con agua y se deja reposar durante un período de 24 ± 4 horas.
5. Se presionan las partículas individualmente entre el dedo pulgar y el índice para tratar de romper los terrones de arcilla que existan.
6. Después de que todo el material ha sido presionado, se tamiza la muestra por la malla No. 30.
7. El tamizado se realiza vertiendo agua sobre la muestra mientras se agita manualmente la criba, hasta que todo el material de menor tamaño ha sido eliminado.
8. Se remueven las partículas retenidas en el tamiz y se secan a temperatura constante de 110 ± 5 °C.
9. Se deja enfriar el material y se determina su masa.

Cálculo:

El porcentaje de terrones de arcilla se calcula de acuerdo a la ecuación 8.

$$\%Terrorones = \frac{M-N}{M} * 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$



Donde:

% Terrones = porcentaje de terrones de arcilla, en %.

M = masa inicial del material seco retenido en la malla No.16, en g.

N = masa final del material seco retenido en la malla No.30, en g.



Figura 41. Ruptura de los terrones de arcilla. (Fotografía: F. López Regalado).

Especificaciones:

Los límites máximos de partículas deleznable se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Límites máximos de partículas deleznable [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].

Concepto	Material máximo permisible en masa de la muestra total en %
Grumos de arcilla y partículas deleznable	3.00

5.1.9. Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.

La realización de este ensaye es determinar la posible contaminación existente de los agregados finos por la presencia de materia orgánica dañina. Los resultados obtenidos de esta prueba son un índice que nos brinda una advertencia a cerca del uso del agregado, en conjunto con los resultados de las pruebas de caracterización ya mencionadas.

En los agregados finos naturales a veces se presentan impurezas orgánicas, las cuales disminuyen la hidratación del cemento y el desarrollo consecuente de la resistencia del hormigón. Normalmente, las impurezas orgánicas se evitan por medio del despeje adecuado del depósito, para eliminar por completo la tierra



vegetal, y un enérgico lavado de la arena. La detección del contenido orgánico en la arena se lleva a cabo con facilidad por medio de la prueba colorimétrica con hidróxido de sodio. Algunas impurezas en la arena pueden dar indicación de un elevado contenido orgánico pero, en realidad, no ser dañino (Ingeniería Real, 2016).

Procedimiento:

1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 450 gramos.
2. Se coloca la arena en una botella (frasco de biberón) hasta la marca de 130 ml.
3. Se le adiciona una solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen del agregado fino con la solución después de agitarse vigorosamente indique 200 ml.
4. Se tapa la botella y se deja reposar durante 24 horas.
5. Al término del tiempo, se compara el color de la botella con la carta colorimétrica y se registra el número de la carta que más se parezca al color de la botella.



Figura 42. Comparación del color de las botellas con la escala colorimétrica (arena volcánica). (Fotografía: E. González Castro).

Especificaciones:

Los valores colorimétricos se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Carta Colorimétrica para determinar impurezas orgánicas [ASTM-C-40-04].

Escala colorimétrica				
1	2	3 (límite)	4	5



5.1.10. Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.

La granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco (Kosmatka & Panarese, 1992).

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.3 y 3.2) y carecer de alguna clase granulométrica.

Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.2 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.3 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe, 1991).

Procedimiento (agregado fino):

1. Se toma el agregado fino y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos.
3. Se colocan las mallas en orden decreciente (No.4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se vierte la muestra de 500 gramos en la malla superior y se tapa.
4. Se agitan las mallas ya sea en forma manual o con algún equipo mecánico por un periodo suficiente, que una vez terminado el cribado, no más del 1% en masa del material retenido en cualquier malla individual, pase por ella durante un minuto de cribado continuo a mano.
5. Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la



malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés.

6. La masa total del material después del cribado se debe comparar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación

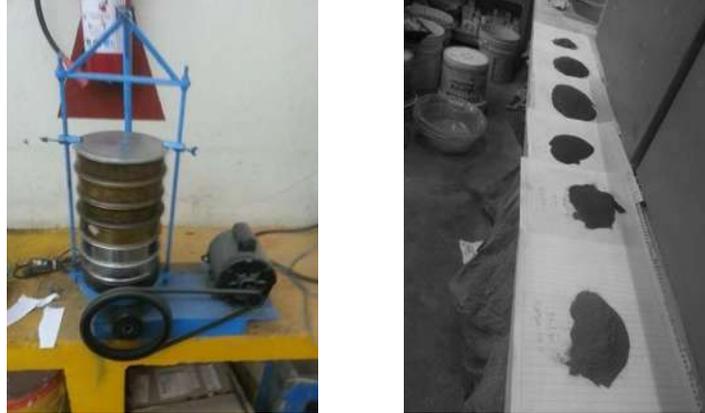


Figura 43. Mallas apiladas en orden decreciente de tamaño de abertura en la máquina de cribado Raf-tap (izquierda). Resultados finales del cribado (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

- a) Se realiza una tabla con cinco columnas.
- b) En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- c) En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- d) En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la ecuación 9:

$$\% \text{Retenido} = \frac{M_N}{\sum W_T} * 100 \text{ (Ecuación 9)}$$

Donde:

% Retenido = porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.

M_N = masa del material retenido en la malla N, en g.

$\sum M_T$ = suma de las masas retenidas de la columna 2, en g.

- e) En la cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados de la siguiente manera, de acuerdo a la ecuación 10:



$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \% \text{ Retenido en la malla } N + \% \text{ Retenido acumulado en la malla anterior} \quad (\text{Ecuación 10})$$

- f) En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera, de acuerdo a la ecuación 11:

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado en la malla } N \quad (\text{Ecuación 11})$$

- g) El módulo de Finura se calcula de la siguiente manera: (Ecuación 12)

$$M. F. = \frac{\sum \text{Del } \% \text{ retenido acumulado en las mallas } 100, 50, 30, 16, 8}{100} * 100$$

Especificaciones:

Las especificaciones se muestran en las Tablas 28 y 29 siguientes:

Tabla 28. Límites del Módulo de Finura [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].

Módulo de finura en la arena
Entre 2.3 y 3.2

Tabla 29. Límites de Granulometría para agregado Fino.

Malla	NMX-C-111-ONNCCE-2004	ASTM-C-33-03
mm (N°)	%Que pasa	%Que pasa
9.5 (3/8")	100	100
4.75 (No. 4)	95-100	95-100
2.36 (No. 8)	80-100	80-100
1.18 (No. 16)	50-85	50-85
0.60 (No. 30)	25-60	25-60
0.30 (No. 50)	10-30	5-30
0.15 (No. 100)	2-10	0-10

Procedimiento (agregado grueso):

1. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se hace el cuarteo para obtener una muestra de aproximadamente la capacidad del recipiente con el que se hizo la prueba de masas volumétricas.
2. Se trabaja individualmente cada malla (3/4", 1/2", 3/8" y No. 4) usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma.
 - a. Se coloca en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado la masa. Dentro de la segunda charola se pone



la malla de mayor tamaño y con el cucharón se colocan porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas.

- b. Se agita la malla con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta. Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.
 - c. Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en la malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.
3. Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.
4. La masa total del material después del cribado se debe checar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.

Cálculo:

- a) Se realiza una tabla con cinco columnas.
- b) En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- c) En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- d) En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la ecuación 13:

$$\% \text{Retenido} = \frac{M_N}{\sum W_T} * 100 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

% Retenido = porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.
 M_N = masa del material retenido en la malla N, en g.
 $\sum M_T$ = suma de las masas retenidas de la columna 2, en g.



- e) En la cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados de la siguiente manera de acuerdo a la ecuación 14:

$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \% \text{ Retenido en la malla } N + \% \text{ Retenido Acumulado en la malla anterior} \quad (\text{Ecuación 14})$$

- f) En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera de acuerdo a la ecuación 15:

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado en la malla } N \quad (\text{Ecuación 15})$$

- g) El tamaño máximo del agregado es la dimensión de la criba de menor abertura por la que pasa la totalidad de un agregado.
- h) El tamaño máximo nominal del agregado es el que se nombra en las especificaciones como la criba de menor abertura por la que pasa la cantidad agregado permitido.

Especificaciones:

Tabla 30. Límites Granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa [ASTM-C-33-03].

Nº	Tamaño Nominal mm (in)	100 4"	90 3 1/2"	75 3"	63 2 1/2"	50 2"	37.5 1 1/2"	25 1"	19 3/4"	12 1/2"	9.5 3/8"	4.75 N°4	2.36 N°8	1.18 N°16
1	90.0 a 37.5 (3 1/2"-1 1/2")	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2	63.0 a 37.5 (2 1/2"-1 1/2")	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
3	50.0 a 25.0 (2" a 1")	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
35 7	50.0 a 4.75 (2" a No. 4)	-	-	-	100	90 a 100	-	35 a 70	-	0 a 10	-	0 a 5	-	-
4	37.5 a 19.0 (1 1/2"-3/4")	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
46 7	37.5 a 4.75 (1 1/2"-No. 4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
5	25.0 a 12.5 (1" a 1/2")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-



56	25.0 a 9.5 (1" a 3/8")	-	-	-	-	-	100	95 a 10 0	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
57	25.0 a 4.75 (1" a No. 4)	-	-	-	-	-	100	95 a 10 0	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
6	19.0 a 9.5 (3/4" a 3/8")	-	-	-	-	-	-	10 0	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
67	19.0 a 4.75 (3/4" a No. 4)	-	-	-	-	-	-	10 0	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
7	12.5 a 4.75 (1/2" a No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 10 0	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
8	9.5 a 2.36 (3/8" a No. 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	10 0	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
89	9.5 a 1.18 (3/8" a No.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	10 0	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10
9	4.75 a 1.18 (No. 4- No. 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10

5.1.11. Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregados finos.

Esta prueba de equivalente de arena tiene como objetivo principal el determinar la calidad que tiene un suelo que puede ser empleado en las capas de un pavimento, esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

El método cuantifica el volumen total de material no plástico deseable en la muestra, fracción gruesa, denominando su proporción volumétrica como equivalente de arena. Las partículas de agregado, con un recubrimiento de arcilla pueden disminuir la adherencia con la pasta de cemento.

Los materiales semejantes a la arcilla, ya sea que se encuentren como recubrimiento de los agregados o estén dispersos como en las rocas de piedra caliza arcillosa, son objetables ya que entonces el volumen de la roca responde a



los cambios en el contenido de humedad. La contracción y la expansión de estas sustancias causaran agrietamiento perjudicial en el concreto (Ingeniería Real, 2016).

Procedimiento:

1. Se divide o cuartea suficiente material de la porción que pasa la malla No.4 para llenar el recipiente metálico de 85 ml, de manera que quede levemente redondeada por encima del borde.
2. Se golpea el filo del fondo del recipiente en la mesa de trabajo o en cualquier otra superficie dura para causar la consolidación del material y permitir la colocación de la máxima cantidad en el recipiente y se enrasa el contenido del recipiente con una espátula o regla.
3. Se prepara la solución de reserva que consiste en la disolución de 454 g de cloruro de calcio en 1.9 litros de agua destilada que se enfría al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente para después pasarla a través de papel filtro y al final se le agregan 47 gramos de formaldehído y 2047 gramos de glicerina, mezclándolos bien y diluyéndolos con agua destilada hasta completar los 3.2 litros de líquido.
4. Se prepara la solución de trabajo en la botella equipada con el equipo sifón diluyendo 90 mililitros de la solución de reserva en 3.8 litros de agua destilada.
5. Se coloca la botella equipada con el equipo sifón de tal manera que la salida del líquido quede a 92 cm de altura con relación a la superficie de la mesa de trabajo, uniendo la botella mediante la manguera de hule al tubo irrigador.
6. Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4”).
7. Se deja reposar la muestra durante 10 min, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita vigorosamente colocando el cilindro en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos en un tiempo de 30 segundos, con una carrera aproximada de 20 cm, entendiéndose que un ciclo comprende un movimiento completo de oscilación, es decir, de un lado a otro hasta concluir en la posición de partida.
8. Se coloca el cilindro sobre la mesa de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba a abajo hasta concluir en el fondo. Con el fin de hacer la irrigación uniforme en todo el recorrido, se gira el cilindro conforme avanza el tubo irrigador, propiciando la separación entre el material arcilloso y el arenoso.



9. Cuando el nivel del líquido llegue a 38,1 cm (15"), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38.1 cm después de retirar completamente el tubo.
10. Se deja reposar el cilindro durante 20 min, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período, transcurrido el cual, la arena se ha sedimentado y los finos permanecen en suspensión.
11. Se mide y registra como Lectura de arcilla el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2 mm (0,1" aprox.).
12. A continuación se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descansa sobre la arena.
13. Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se le resta la altura h (254 mm aprox.) y se registra como Lectura de arena, con aproximación de 2 mm (0.1" aprox.).
14. Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical; se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior.



Figura 44. Probeta conteniendo la solución de trabajo hasta una altura de 10 cm (izquierda). Probetas reposando después de haber sido agitadas (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

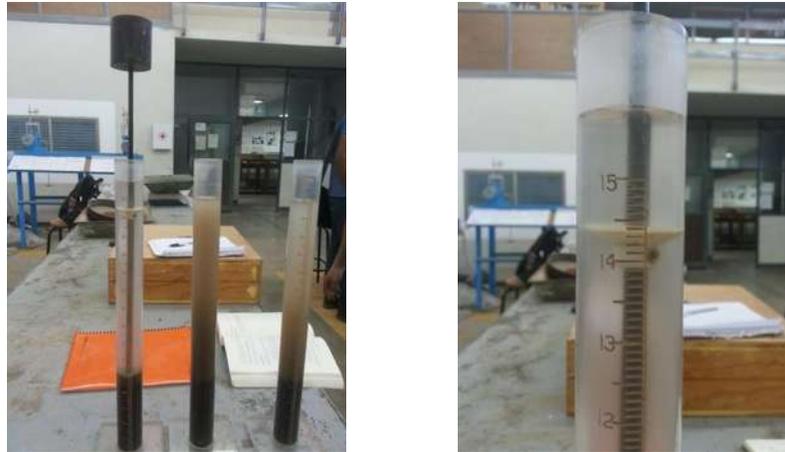


Figura 45. Pisón descansando sobre la arena (izquierda). Lectura superior del pisón (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

El cálculo del equivalente de arena se realiza de acuerdo a la ecuación 16.

$$EA = \frac{L_{are}}{L_{arc}} * 100 \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

EA = equivalente de arena, en %.
 L_{are} = lectura de arena, en pulgadas.
 L_{arc} = lectura de arcilla, en pulgadas.

5.2. DEL CEMENTO PORTLAND.

Los ensayos correspondientes al cemento Portland se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31. Normas correspondientes al cemento.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.	NMX-C-057-ONNCCE-2010	ASTM-C-187-98
Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Gillmore.	-----	ASTM-C-266-04
Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.	NMX-C-152-ONNCCE-2010	ASTM-C-188-95



5.2.1. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.

El objetivo del ensaye es determinar la cantidad de agua mínima necesaria para hidratar por completo a las partículas de cemento Portland. Esta cantidad puede variar dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente existente en el momento de realizar la prueba, para la misma cantidad y tipo de cemento Portland.

Procedimiento:

1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.
2. Se fija una cantidad de agua expresada en por ciento. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (cronometrando a partir de que cae el agua sobre el cemento).
3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - a) En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
 - b) En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se completa la operación lanzándola de una mano a otra, seis veces, manteniendo las manos separadas por una distancia de 15 cm.
 - c) En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, se descansa la esfera en la palma de una mano y se introduce a presión dentro del anillo cónico del aparato de Vicat por la base mayor, el cual se sostiene con la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).
 - d) El sobrante de la pasta sobre la base mayor se quita mediante un movimiento de la palma de la mano, a 90 ° de la dirección del movimiento



con el que se introdujo la bola de pasta en el anillo, enseguida se coloca el anillo por su base mayor sobre la placa "H".

- e) El sobrante de la pasta se quita de la base menor mediante un corte oblicuo con el filo de la cuchara inclinada ligeramente sobre la base superior, si es necesario se alisa la superficie con el filo de la cuchara sin presionar la pasta.
 - f) Todo el conjunto constituido por la placa, pasta y anillo se lleva al aparato de Vicat procurando que quede centrado con respecto a la barra "B". Se desliza la barra "B" hasta que toque con la parte "C" la superficie de la pasta confinada en el anillo, luego se ajusta el índice corredizo sobre la barra "B" al acero superior de la escala, o bien se hace una lectura inicial y se suelta la barra inmediatamente, esto no debe exceder los 30 segundos a partir del instante en que se terminó de hacer la pasta. El aparato debe permanecer libre de vibraciones durante la prueba.
6. Se considera que la pasta tiene una consistencia normal cuando la barra "B" con extremo "C" baje 10 mm \pm 1 mm a partir de la superficie original en un intervalo de 30 segundos contados desde el instante en que soltó dicha barra. Deben hacerse varias pruebas con distintos porcentajes de agua hasta que se obtenga la consistencia normal. Cada que se haga una prueba, se debe usar una porción nueva de la muestra de cemento que se prueba.

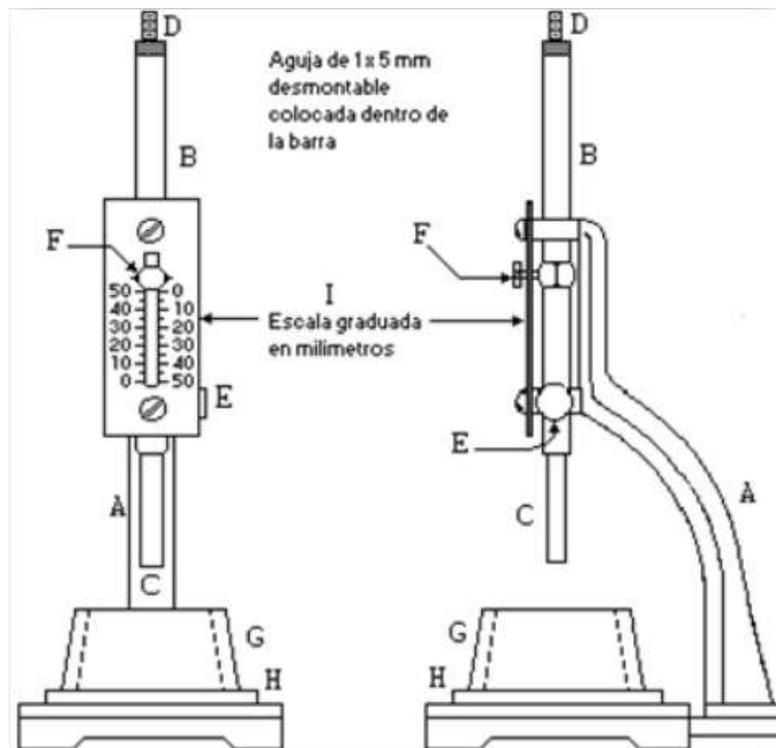


Figura 46. Ilustración del aparato de Vicat utilizado en el ensayo de Consistencia Normal. [[NMX-C-057-1997-ONNCCE].



Figura 47. Aparato de Vicat con la masa de cemento antes de tomar la lectura (izquierda). Lectura final, penetración de la aguja de Vicat de 10 mm (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

La cantidad de agua que se requiere para obtener la consistencia normal (CN) se expresa en por ciento de la masa del cemento seco, calculándose hasta décimos de por ciento y repórtese al 0.5% más próximo. (Ecuación 17).

$$CN = \frac{\text{Mililitros de agua}}{\text{Masa de cemento}} * 100 \quad (\text{Ecuación 17})$$

5.2.2. Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.

Este ensaye permite la determinación de los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta de cemento mediante la penetración de las agujas del aparato de Gillmore. El tiempo de fraguado es una característica de la pasta de cemento en la cual intervienen factores como la cantidad de agua obtenida en la prueba de consistencia normal, de la temperatura y humedad del ambiente. Este ensaye debe ser realizado inmediatamente después de concluir el ensaye de consistencia normal, con la pasta de cemento adicionada con la cantidad óptima de agua.

Definiciones:

Tiempo del Fraguado inicial: Es el tiempo que transcurre, a partir del momento del contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 3,4 MPa (35 Kgf/cm²).

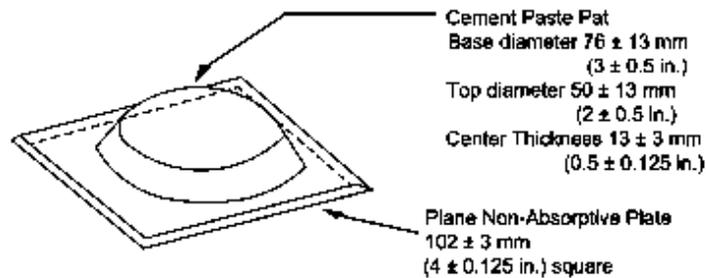
Tiempo del Fraguado final: Es el tiempo que transcurre, a partir del momento que el cemento entra en contacto con el agua, hasta que el mortero obtenido por el



cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 27,5 MPa (280 Kgf/cm²). (NMX-C-177-1997-ONNCCE).

Procedimiento:

1. Con la pasta preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente de 4” por lado se prepara una pastilla de aproximadamente 7.5 cm de diámetro y 1.3 cm de espesor en la parte central, disminuyendo dicho espesor hacia los bordes.



(a) Pat with top surface flattened for determining time of setting by Gillmore Method

Figura 48. Diagrama de la pastilla de cemento sobre la placa de vidrio [ASTM-C-266-04].

2. Para llevar a cabo el moldeado primeramente se deberá aplanar la pasta de cemento sobre el vidrio y se reducirá el espesor hacia los bordes con un movimiento de la cuchara desde los bordes y hacia el centro, aplanando la parte central superior hasta el espesor aproximado de 1.3 cm.
3. Colóquese la pastilla en el cuarto húmedo, se mantendrá dentro desde la formación de la pastilla hasta la determinación del fraguado final.
4. Al determinar el tiempo de fraguado manténgase las agujas en posición vertical y póngase en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, considere que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la de menor peso) sin que marque huellas apreciables.
5. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore final (la de mayor peso), sin que marque huellas apreciables.

El tiempo de fraguado se afecta no solo por el porcentaje y temperatura del agua empleada y intensidad del amasado que haya recibido la pasta, sino también por las condiciones ambientales, por lo tanto la determinación de los tiempos de fraguado es meramente aproximado.

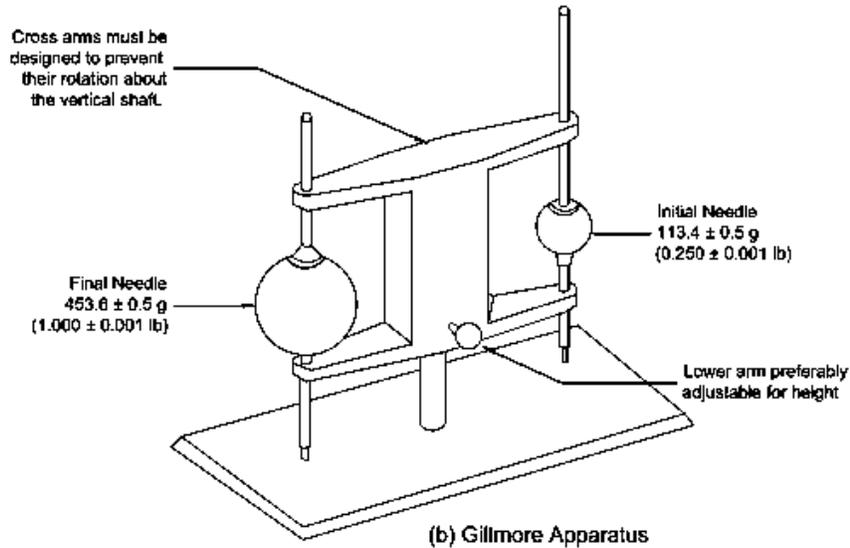


Figura 49. Descripción del aparato de Gillmore. [ASTM-C-266-04].



Figura 50. Aparato de Gillmore y pastilla de cemento resultado del ensaye de consistencia normal, ambos en el cuarto húmedo. (Fotografía: E. González Castro).

Las mediciones para la determinación de los tiempos de fraguado comienzan a llevarse a cabo a los 15 minutos después de la preparación de la pastilla y posteriormente se repite el proceso cada 15 minutos, y a consideración del observador se establecen los tiempos de medición posteriores hasta conseguir que cada aguja se pueda apoyar sobre la masa de pasta de cemento sin dejar huella apreciable.

Es de vital importancia que las condiciones de humedad y temperatura no varíen dentro del cuarto húmedo.



5.2.3. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.

Para efectos de este ensaye, se entiende por densidad del cemento hidráulico, la relación de la masa de cemento en gramos, entre el volumen en milímetros que desplaza éste al introducirse en un líquido, con el cual no efectúe reacción química alguna.

Procedimiento:

1. Se llena el matraz Le Chatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro. La parte interior del matraz arriba del nivel del líquido, se debe secar en caso necesario. Se registra la primera lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.
2. Se debe tener la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que la variación de la temperatura del líquido en el matraz al momento de tomar la lectura inicial y final, no tenga una variación mayor de 0.2 °C.
3. Se pesa aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz.
4. Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
5. Se coloca el tapón al matraz y se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o se hace rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con una material que proteja al matraz de una posible ruptura.
6. La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.

Cálculo:

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba. Se utiliza la ecuación 18 mostrada a continuación.

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60 \text{ gr}}{L_f - L_i} \quad (\text{Ecuación 18})$$



5.3. DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.

La CBC al ser un desecho agroindustrial generado en el proceso de la producción de azúcar de caña y al estar almacenada a la intemperie no puede ser utilizada inmediatamente en la elaboración de una mezcla de concreto, por lo que es necesario llevar a cabo un proceso previo de preparación y caracterización para así determinar sus propiedades y utilizarla de manera eficiente para conseguir los resultados esperados.

5.3.1. Secado de la ceniza.

Como inicio de la preparación de la ceniza de bagazo de caña para el desarrollo experimental se comenzó por eliminar la humedad presente en el material extendiendo y secando al sol sobre charolas y láminas plásticas procurando cubrir la mayor área posible y así crear las condiciones idóneas para la pérdida de humedad. El primer secado se realizó al sol por un período de entre 6 y 8 horas continuas. Posteriormente se secó en hornos a una temperatura de 100°C por un período de 12 horas.

Este procedimiento se repitió hasta secar aproximadamente la cantidad de 45 Kg de CBC. Durante el primer secado se eliminó cualquier impureza que contaminara la ceniza, por ejemplo la eliminación de raíces, pequeñas piedras y se llevó a cabo la ruptura de terrones de ceniza formados por la humedad contenida. Un aspecto importante en el proceso de secado es evitar en la medida de lo posible la pérdida de finos, ya que son las partículas de mayor interés debido a que su reactividad se ve favorecida a medida que el tamaño de partícula es más pequeño.



Figura 52. Secado de la ceniza al sol, charola con CBC después del primer secado a la izquierda y CBC apenas extendida y con su humedad de campo, a la derecha y de un color más oscuro. (Fotografía: E. González Castro).



5.3.2. Cribado de la ceniza.

Inicialmente se pretendía utilizar solamente aquella parte de la ceniza que tuviera un tamaño lo suficientemente fino como para pasar por la malla N° 200, por lo cual al desconocer la distribución granulométrica de la CBC una vez concluido su proceso de secado se procedió a llevar a cabo un cribado mecánico utilizando las mallas 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200.

Se comenzó cribando una cantidad de prueba de 6.5 Kg haciéndola pasar por las mallas ya mencionadas en el mecanismo de la máquina cribadora de la figura 53; al ser una máquina que no cuenta con la suficiente fuerza para hacer un cribado uniforme se continuó el trabajo de manera manual, y al tener cantidades ya menores y solamente 3 tamaños predominantes (retenido en malla 50, 100 y 200), se utilizó la máquina Raf-tap hasta pasar la muestra completa.



Figura 53. Máquina cribadora (izq.). Muestra de ceniza para cribado (centro). Máquina Raf-tap terminando el proceso de cribado (derecha). (Fotografía: E. Glez. Castro).

Del total de los 6.5 Kg de ceniza, al cribarlas por la máquina cribadora y de manera manual se logró obtener solamente 1.75 Kg de ceniza que pasa la malla N° 200 correspondiente al 26.92% de la masa de la muestra total, esta cantidad no incluye la masa obtenida del cribado en la Raf-tap, por lo que se estaría recuperando aproximadamente un 30% del total de la muestra para ser utilizada en la experimentación. Con base en estos resultados se tomó la decisión de pulverizar la ceniza y así reducir su tamaño de partícula con el fin de aventajar en tiempo el proceso de experimentación.

5.3.3. Granulometría de la CBC previo al proceso de pulverización.

Se cribaron dos muestras representativas de 230 g cada una del material puzolánico haciéndolas pasar por las mallas número 8, 16, 30, 50, 100 y 200 con



el objetivo de conocer su distribución granulométrica. El proceso fue llevado a cabo en la máquina Raf-tap, sellando la abertura existente entre cada malla con cinta adhesiva para evitar la pérdida excesiva de finos.



Figura 54. Mallas y muestra representativa de CBC (izquierda). Mallas 100, 200 y Charola con sus respectivos retenidos (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Se observa que el cribado mediante la máquina Raf-tap es mucho más eficiente que la combinación de la máquina cribadora y el cribado manual, ya que se obtuvo una mayor cantidad de CBC que pasa la malla N° 200, sin embargo es mucho más lento el proceso si se dimensiona a la cantidad total de CBC necesaria para la experimentación, al tener menor capacidad. Por estas razones la pulverización se vuelve un factor necesario y práctico con ventajas como el tiempo y la eficiencia.

Como una observación de gran importancia es que la CBC tiene baja densidad, pues ocupa un gran volumen en relación con su peso, por esta misma razón es que se desplaza fácilmente por el aire. No se realizó ensaye para determinar su densidad, pues se hidrata al instante y se diluye en el agua inmediatamente.

5.3.4. Pulverización de la ceniza.

La ceniza utilizada como sustitución puzolánica de cemento Portland fue sometida a un proceso de pulverización introduciéndola en la máquina de ensayo de Los Ángeles, la cual consiste en un tambor cilíndrico de acero que gira en posición horizontal. Este cilindro está provisto de una abertura para introducir la muestra que se desea ensayar y un entrepaño para conseguir el volteo del material.

Como cuerpos pulverizadores se utilizaron 12 bolas de hierro, en sesiones de 10 minutos por cada 6 Kg de ceniza de bagazo de caña, hasta conseguir la cantidad de aproximadamente 45 Kg de CBC pulverizada.



Figura 55. Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Fotografía: E. González Castro).

Debido a la facilidad con que la CBC se dispersa por el aire la máquina debe ser cerrada de manera hermética con el fin de asegurar que no se pierdan finos por alguna abertura o por el movimiento rotatorio de la máquina. En el ensaye se protegió la compuerta con una película plástica y con cinta adhesiva, además de la supervisión constante para evitar fugas por accidente. Como medida de seguridad e higiene la pulverización debe llevarse a cabo utilizando el equipo de protección adecuado, para prevenir daños a la salud.



Figura 56. Pulverización de la CBC. (Propia del autor: izquierda. Fotografía: A. Flores: derecha).

Concluido el proceso de pulverización, la ceniza se vuelve apta para sustituir al cemento Portland en la mezcla de concreto, en el porcentaje que resulte óptimo. El cambio físico de tamaño es inmediatamente apreciable a la vista y al tacto, pues se vuelve mucho más fina y homogénea, sin apreciarse ningún tipo de partícula alargada semejante a una cascarilla de arroz.



5.3.5. Granulometría de la CBC posterior al proceso de pulverización.

De acuerdo con el primer proceso de ensaye granulométrico se cribaron nuevamente dos muestras representativas de CBC de 230 g cada una, y se colocaron en la máquina Raf-tap. Las juntas entre cada malla fueron selladas con cinta adhesiva y la pérdida de finos fue prácticamente nula. Al observarse visualmente que el tamaño de la ceniza era ya muy homogénea, se utilizaron únicamente tres mallas: N° 50, 100 y 200, además de la charola. El tiempo de cribado de cada muestra fue de 10 minutos.



Figura 57. Muestra de CBC para el cribado (izquierda). Cribado en máquina Raf-tap (derecha). (Fotografías: E. González Castro). En medio, Emmanuel Glez. (Fotografía: A. Flores Ponce).

5.3.6. Consistencia normal Cemento-CBC.

Uno de los objetivos planteados en la investigación es el de crear un material capaz de alcanzar la resistencia de proyecto e incluso incrementarla a edades tardías sustituyendo un porcentaje del cemento Portland por ceniza de bagazo de caña.

De acuerdo a la publicación "Valoración puzolánica de la hoja de la caña de azúcar", el máximo incremento resistente por efecto de la puzolanicidad se obtiene entre el 10 y el 20% de adición de ceniza de hoja de caña (Guzmán, Guitiérrez, Amigó, Mejía de Gutiérrez, & Delvasto, 2011).

Con estos antecedentes y sumados los resultados obtenidos en las experimentaciones de morteros con CBC, ya mencionados en el capítulo 3, en los que se menciona que los porcentajes óptimos fueron 5% y 20%, se decidió trabajar con tres porcentajes: 5, 10 y 20% de sustitución, y posteriormente determinar entre ellos el más adecuado para la elaboración de los especímenes finales.



Para conocer la influencia de estos porcentajes de sustitución en la pasta de cemento, con respecto a la hidratación del material cementante, se llevó a cabo el ensaye de consistencia normal, para cada porcentaje de sustitución.



Figura 58. Material necesario para el ensaye de Consistencia Normal de la mezcla CPC-CBC. (Fotografía: E. González Castro).



Figura 59. Medición de la penetración con el aparato de Vicat en la pasta CPC-5% CBC. (Fotografía: A. Flores Ponce).



Figura 60. Penetración de 10 mm en la pasta CPC-5%CBC (izq.). Desperdicio de pasta durante los ensayos de CN (derecha). (Fotografías: E. González Castro).



5.3.7. Tiempos de fraguado Cemento-CBC.

Una vez obtenidas las cantidades de agua correspondientes a la consistencia normal para cada mezcla de materiales cementantes (CPC-CBC), se procedió a determinar los tiempos de fraguado de las pastas CPC-5% CBC y CPC-10% CBC únicamente. Para esto se moldeó una pastilla para cada porcentaje de sustitución de acuerdo con la norma ASTM-C-266-04, y se llevaron al cuarto húmedo.



Figura 61. Moldeado de la pastilla CPC-5% CBC para la determinación de los tiempos de fraguado. (Fotografía: A. Flores Ponce).



Figura 62. Pastillas de CPC-CBC, 5% (izquierda) y 10% (derecha). (Fotografía: E. González Castro).

Se aprecia que al sustituir en mayor cantidad al cemento Portland por ceniza la coloración de la pasta se va haciendo más oscura. La consistencia al tacto en ambas mezclas no se aleja demasiado de la presente en una pasta ordinaria de cemento Portland y agua. La coloración es la propiedad física más apreciable. La mezcla entre las distintas partículas cementantes se lleva a cabo de una manera rápida y eficaz.



5.4. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PRELIMINARES.

Primeramente se elaboró la mezcla CPC-20%CBC en peso. De acuerdo a la ficha técnica del aditivo súper plastificante CRISOTÁN-R5 el valor máximo permisible de adición corresponde al 0.74% de la masa del material cementante, y por las observaciones hechas durante la elaboración de especímenes de CBC con 20% de sustitución, en el trabajo de tesis de maestría titulado "Innovación en el diseño de concreto; empleo de puzolanas para incrementar la durabilidad", bajo la autoría del ingeniero Miguel Ángel Villicaña Cupa se tomó la decisión de utilizar este porcentaje máximo en la mezcla. Pese al utilizar la proporción de materiales calculada y el máximo porcentaje permisible de aditivo, la mezcla de concreto CPC-20%CBC no consiguió presentar una consistencia homogénea, ni mucho menos conseguir la hidratación total del material cementante, pues se formaban grumos de diámetro aproximado de 2" provocando la apariencia de un suelo poco húmedo y muy poco cohesivo.

Al realizar los ensayos de consistencia normal se determinó que la mezcla CPC-20%CBC requería un 65.45% más de agua, por la acción absorbente de la ceniza, lo que corresponde a 785.4 ml, sin embargo se tuvo que añadir 1 lt de agua (83.33%), a la calculada por el diseño, para conseguir una mezcla trabajable.



Figura 63. Cilindros de la mezcla CPC-20%CBC. (Fotografía: E. González Castro).

Como segundo paso se elaboró la mezcla CPC-5%CBC en peso. De la misma manera se utilizó el 0.74% de aditivo y se elaboró la mezcla, al agua de mezclado se añadió el porcentaje demandado por la ceniza obtenido de su correspondiente ensayo de consistencia normal, la cual representa el 19.09% (229 ml). De esta manera no se modifica la relación agua/cemento, ya que esta agua añadida será absorbida por la CBC. El resultado fue una mezcla de buena trabajabilidad y fluidez.



Figura 64. Cilindros de la mezcla CPC-5%CBC. (Fotografía: E. González Castro).

Finalmente como tercer paso se elaboró la mezcla CPC-10%CBC en peso. Al observar una consistencia un poco fluida en la mezcla del 5%, se elaboró el concreto únicamente con el agua de mezclado y el 0.74% del aditivo, hasta una consistencia homogénea. No se adicionó el agua demandada por la ceniza (36.36%) calculada con la consistencia normal correspondiente, y sin embargo la mezcla presentó una uniformidad muy buena. Al tacto, es un poco pastosa, el mezclado se realiza con relativa facilidad, es una mezcla pesada, fluida, que no presenta segregación, expulsa pequeñas burbujas de aire, y al formar un cono no mantiene su forma, si no que se expande rápidamente, sin presentar exudación excesiva ni segregación del agregado grueso. Características comparables con las de un concreto auto nivelable.



Figura 65. Cilindros de la mezcla CPC-10%CBC. (Fotografía: E. González Castro).

Por esta razón los especímenes no fueron varillados en su elaboración, sino que solo se golpearon con el mazo de goma para ayudar a expulsar de burbujas de aire; ya que el acomodo de la mezcla se hace por sí solo. Pasadas 24 horas los cilindros se desmoldaron y curaron por inmersión en la pila de agua. Ahí se mantuvieron hasta la edad de 7 días en la que se probaron a compresión 2 especímenes de cada



mezcla. El tercero de ellos permaneció en el proceso de curado hasta alcanzar los 14 días de edad.



Figura 66. Cilindros a la edad de 7 días. (Fotografía: E. González Castro).

Previo a la prueba de compresión se procedió a cabecear los cilindros con azufre para asegurar los planos horizontales entre cada extremo de cada cilindro, y un eje perpendicular a la aplicación de la carga de compresión.



Figura 67. Cilindros cabeceados con azufre. (Fotografía: E. González Castro).

La apariencia superficial de los especímenes fue bastante buena y solamente se presentaron algunos huecos por burbujas de aire, que no se pudieron expulsar. La coloración, como ya se mencionó con anterioridad, se vuelve más oscura a medida que el porcentaje de ceniza incorporada a la mezcla es mayor, sin embargo, esta coloración es mucho más notoria si el elemento se encuentra saturado, pues al perder humedad su color se vuelve más claro, parecido a un concreto convencional.

Durante el ensaye de compresión, se debe asegurar que el cilindro a probarse se encuentre debidamente centrado dentro de los círculos marcados sobre la platina de la máquina de prueba, sobre una superficie limpia y completamente horizontal. La velocidad de prueba debe ser lenta y de manera uniforme, aplicada a una



velocidad constante de manera que no se aplique carga de impacto, la velocidad puede ser un poco mayor durante la primera parte del ensaye, en la cual la estructura interna del elemento se reacomoda cerrando espacios existentes.



Figura 68. Ensaye de compresión a la edad de 7 días. (Fotografías: E. González Castro).

Una vez probados los cilindros a compresión se abrieron con ayuda de un mazo para observar su estructura interna, en la cual se pudo notar que contenían un alto porcentaje de humedad interna por causa de la absorción e hidratación de la pasta de cemento. Se apreció un poco de segregación en un extremo del cilindro, donde predominaba la pasta de cemento y el agregado fino.

De manera general, la distribución de los agregados gruesos es uniforme en los elementos. La mayoría de los agregados gruesos no se rompieron por acción mecánica, lo cual significa que la resistencia de la pasta de cemento a la edad de 7 y 14 días no alcanza su máxima dureza y desarrollo de hidratación.



Figura 69. Estructura interna de un cilindro y mezcla CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).



5.5. PRUEBAS EN EL CONCRETO FRESCO.

La Tabla 32 presenta las normas utilizadas en la investigación, correspondientes al concreto en estado fresco:

Tabla 32. Normas correspondientes al concreto fresco.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para el flujo de asentamiento del concreto autocompactable.	----	ASTM-C-1611
Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio.	NMX-C-159-ONNCCE-2004	ASTM-C-192M-02

5.5.1. Método de prueba estándar para el flujo de asentamiento del concreto autocompactable.

Este método proporciona un procedimiento para la determinación del flujo de asentamiento del concreto autocompactable en el laboratorio o en la obra. Este método se usa para monitorear la consistencia del concreto recién moldeado, no endurecido y autocompactable y de su potencial de flujo no confinado.

Es difícil de producir un concreto autocompactable que sea al mismo tiempo fluido y no segregable, usando agregados gruesos mayores de 25mm (1pulg). Por lo tanto se considera que éste método de ensayo es aplicable a un concreto autocompactable que tenga un agregado grueso de una tamaño de hasta 25 mm (1pulg).

Definiciones:

Halo: Un anillo observado de la pasta de cemento o del mortero que se separa claramente del agregado grueso, alrededor de una circunferencia exterior del concreto, después del flujo fuera del molde.

Esparcimiento o extensión: Es la distancia cubierta por el flujo lateral del concreto, durante el ensayo del flujo de asentamiento.

Estabilidad: Es la habilidad de una mezcla de concreto para resistir la segregación de la pasta, de los agregados.

Viscosidad: Es la resistencia de un material a fluir bajo un esfuerzo de corte aplicado.



Procedimiento:

1. Se realiza el ensayo sobre una superficie plana, nivelada, no absorbente como un piso de concreto o una placa de base apropiada. Se debe usar una placa de base en condiciones donde una superficie plana y nivelada no está disponible, como ocurre en el sitio de la obra.
2. Se humedece la superficie de trabajo o de la placa de base con un trapo húmedo o con una esponja.
3. Se humedece el molde y se coloca sobre la superficie de trabajo, o centrado sobre la placa de base, con la abertura mayor hacia abajo.
4. Se mantiene el molde firmemente en su lugar parándose sobre los dos estribos para apoyar los pies, y se llena de una manera continua hasta rebalsar ligeramente el molde por su parte superior (Se ha encontrado aceptable el llenado del molde usando múltiples cucharadas de concreto o bien vertiéndolo de una cubeta o recipiente similar aceptable).
5. Se enrasa la superficie de concreto a nivel con el borde superior del molde, por medio de un movimiento de aserrado con la barra enrasadora.
6. Se debe remover el concreto del área que está alrededor de la base del molde para prevenir cualquier interferencia con el movimiento del concreto que fluye.
7. A continuación se remueve del molde levantándolo verticalmente. Se levanta el molde por una distancia de $225 \pm 75\text{mm}$ (9 ± 3 pulg) en $3 \pm 1\text{s}$ con un movimiento ascendente constante y firme sin ningún vaivén lateral o torsional.
8. El ensayo total desde el inicio del llenado del molde hasta la remoción del molde, debe completarse sin interrupción dentro de un tiempo de $2\frac{1}{2}$ min.

Recomendaciones:

Se debe esperar que el concreto pare de fluir, y luego se mide el diámetro mayor (d1) del esparcimiento o extensión resultante del concreto. Cuando se observe un halo en este esparcimiento o extensión circular del concreto, el mismo debe ser incluido en el diámetro del concreto. Se mide a continuación un segundo diámetro (d2) del esparcimiento o extensión circular, a un ángulo aproximadamente perpendicular al primer diámetro medido (d1). Los diámetros se miden con una aproximación de 5 mm. Luego se calcula el flujo de asentamiento con la ecuación correspondiente.



Figura 70. Revenimiento del concreto. Prueba fallida. (Fotografía: E. González Castro).



Figura 71. Asentamiento en la mezcla testigo. (Fotografía: E. González Castro).

Cálculo:

El flujo de asentamiento se calcula de acuerdo a la ecuación 19.

$$Fa = \frac{d1+d2}{2} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

Fa = flujo de asentamiento (cm).

d1 = Diámetro mayor del esparcimiento o extensión del concreto (cm).

d2 = Diámetro menor del esparcimiento o extensión del concreto (cm).

Nota: Como parte de la experimentación y caracterización del concreto fresco se intentó determinar el revenimiento de la mezcla de CPC-10%CBC en peso, sin embargo al levantar el cono para provocar el asentamiento, éste se extendió por toda la superficie de la placa de metal y se salió de los límites de la misma. Por lo que se procedió a determinar el asentamiento como parámetro de caracterización.



5.5.2. Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio.

Este método establece los requisitos estandarizados para la preparación de los materiales utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral; las mezclas de concreto y la toma de muestras en condiciones de laboratorio. Si la preparación de muestras se controla como se estipula en este documento, las muestras pueden ser usadas para revelar información con los siguientes fines: mezclas de dosificación para concreto de proyecto, evaluación de mezclas de diferentes materiales, correlación con pruebas no destructivas y proporcionar muestras con fines de investigación.

Procedimiento:

1. De la mezcla del concreto se obtiene la fracción representativa para elaborar los especímenes.
2. Se coloca el concreto dentro del molde, en el número de capas y espesor especificado según la Tabla 33.
3. Se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado en la Tabla 34.
4. Se distribuyen los golpes uniformemente en toda la sección transversal del molde y para cada capa superior, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 10 mm dentro de la capa inmediata inferior, cuando el espesor de esa capa sea menor a 100 mm, y aproximadamente 20 mm cuando su espesor sea de 100 mm o más.

Nota: De acuerdo con lo explicado en la sección 5.4. “Elaboración de especímenes preliminares” los especímenes elaborados con la mezcla CPC-10%CBC en peso no se varillaron, sin embargo el concreto testigo si se varilló por no ser un concreto modificado.

5. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de hule las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla.
6. Después de la compactación, se termina la superficie superior enrasándola con la varilla punta de bala, haciéndola rodar por la superficie.
7. Para evitar pérdidas de agua por evaporación, se recomienda cubrir los cilindros con bolsas de plástico.



Figura 72. Revolvedora y especímenes elaborados. (Fotografía: E. González Castro).

El número de capas para los especímenes se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Número de capas requeridas para los especímenes. [NMX-C-159-ONNCCE-2004].

Tamaño del espécimen (mm)	Método de compactación	Nº de capas	Espesor aproximado de la capa (mm)
Hasta 300	Varillado	3 iguales	---
Más de 300	Varillado	Según se requiera	100
Hasta 450	Vibrado	2 iguales	---
Más de 450	Vibrado	3 o más	150 o lo más cercano

Tabla 34. Diámetro de Varilla y número de penetraciones empleados para moldear los especímenes de prueba [NMX-C-159-ONNCCE-2004 y ASTM-C-192].

Diámetro del cilindro (cm)	Diámetro de la varilla (mm)	Número de penetraciones por capa
Entre 5 y menos de 15	10	25
15	16	25
20	16	50
25	16	75

5.6. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO ENDURECIDO (PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS).

Los ensayos correspondientes a pruebas mecánicas se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Normas correspondientes al concreto endurecido.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para el curado de especímenes de prueba en el laboratorio.	NMX-C-159-ONNCCE-2004	ASTM-C-192-81
Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.	NMX-C-109-ONNCCE-2013	ASTM-C-617-98



Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	NMX-C-083-ONNCCE-2014	ASTM-C-39-86
Módulo de Elasticidad Estático.	[Romo, 2009 y ACI 318]	
Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.	NMX-C-163-1997-ONNCCE	ASTM-C-496-79
Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.	NMX-C-191-ONNCCE-2004	ASTM C 78 – 02
Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.	NMX-C-089-1997-ONNCCE	ASTM-C-215-02

5.6.1. Método de prueba estándar para el curado de especímenes de prueba en el laboratorio.

Es gracias al proceso de curado que los elementos alcanzan su resistencia máxima, ya que al saturar la masa de concreto en la inmersión se crea el medio ideal para la hidratación del material cementante y la formación de los compuestos responsables de dicha resistencia.

Procedimiento:

1. Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, hasta que los especímenes sean extraídos de los moldes.
2. Los especímenes deben ser descimbrados no antes de 20 horas ni después de 48 horas de su elaboración.
3. A menos que en otro método se especifique lo contrario, todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperatura de $296\text{ K} \pm 3\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$) durante las primeras 24 horas, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$), con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba.
4. El almacenaje durante las primeras 48 horas debe ser en un sitio libre de vibraciones. Con relación a los especímenes extraídos de los moldes, el curado húmedo significa que los especímenes de prueba pueden mantenerse con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logra por inmersión en agua saturada con cal, o por almacenamiento en un cuarto húmedo.



5. Los especímenes no deben ser expuestos a goteo directo o agua corriente.



Figura 73. Inmersión de los elementos en la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).



Figura 74. Medición de la temperatura del agua de la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).

La temperatura en la pila de curado llegó a bajar hasta los 13°C. El pH medido obtuvo un valor de 7.



Figura 75. Medición del pH del agua de la pila de curado. (Fotografías: E. González Castro).



5.6.2. Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.

Esta práctica describe los procedimientos para proporcionar superficies planas en los extremos de los cilindros de concreto para cabecear con materiales adheribles o cemento puro a los especímenes cilíndricos de concreto recién elaborados, así como con mortero de azufre a los especímenes cilíndricos y corazones de concreto endurecido, cuando la superficie final no se ajusten a los requisitos de planicidad y perpendicularidad de las normas aplicables.

Procedimiento:

1. Se prepara el mortero de azufre para su empleo calentándolo a $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Se recomienda colocar en los recipientes para el fundido la cantidad necesaria de mortero azufre para los especímenes por cabecear en esa etapa, y antes de volverse a llenar se elimina el material sobrante verificando que el material re-usado no tenga más de 10 usos, siempre y cuando se garantice que se cumple con lo indicado en la tabla 36.
2. Para el cabeceo de especímenes de concreto de resistencia mayor que 350 Kg/cm^2 , antes del cabeceo de los especímenes, se debe comprobar que el mortero tiene una resistencia de por lo menos la resistencia del concreto. (Tabla 36).
3. El mortero de azufre debe estar seco en el momento que se coloque en el recipiente para el fundido ya que la humedad puede producir espuma. Por la misma razón el mortero de azufre fundido debe mantenerse alejado de cualquier humedad.
4. El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser calentados ligeramente antes de ser empleados para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación de capas delgadas. Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido.
5. Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.
6. Para asegurarse que la capa se ha adherido a la superficie del espécimen, la base de éste no debe ser aceitada antes de la aplicación de la capa.
7. Los especímenes curados por vía húmeda deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante el tiempo transcurrido entre el terminado del cabeceo y el momento de la prueba, regresándolos al almacenamiento



húmedo o protegiéndolos con una manta o material similar húmedos para evitar la evaporación.

8. Los especímenes cabeceados no se ensayaran hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida.

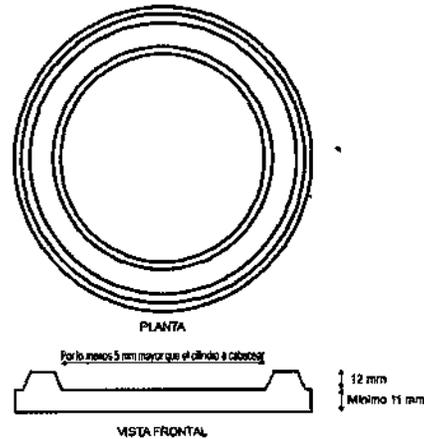


Figura 76. Ejemplo de un plato metálico. [NMX-C-109-ONNCCE-2013].



Figura 77. Cilindro cabeceado con mortero de azufre. (Fotografía: E. González Castro).

La resistencia del mortero de azufre se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre [NMX-C-109-ONNCCE-2004].

Resistencia del concreto (Kgf/cm ²)	Resistencia mínima del mortero de azufre (Kgf/cm ²)	Espesor máximo de capa de cabeceo en cualquier punto (mm)
350 a 500	350 o la del concreto, cualquiera que sea mayor	8
Más de 500	No menor que la resistencia del concreto	5



5.6.3. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

La resistencia a la compresión de una masa de concreto es quizás una de las características más importantes del mismo, esta dependerá de la calidad de los materiales con los que se haya elaborado, del método y calidad de la dosificación, del proceso de producción, transporte, colocación y acomodo. Debe tenerse presente que al no cumplir con cualquiera de las partes mencionadas la calidad de la mezcla será menor, y por lo tanto su desempeño mecánico bajará de la misma manera. La resistencia a la compresión es un parámetro del control de calidad de una mezcla de concreto, y los resultados de este ensaye deben ser interpretados de la manera correcta para comprender su comportamiento.

Procedimiento:

1. Se limpian las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme.
2. Se debe aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 Kgf/cm²/min a 210 Kgf/cm²/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min
3. Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada; pueden utilizarse máquinas operadas manualmente o motorizadas que permitan cumplir con lo anterior, teniendo en cuenta que sólo se harán los ajustes necesarios en los controles de la máquina de prueba para mantener uniforme la velocidad de aplicación de carga, hasta que ocurra la falla.
4. Se aplica la carga hasta que aparezca la falla de ruptura, registrándola en el informe.
5. Los especímenes para la aceptación o rechazo de concreto deben ensayarse a la edad de 14 días en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días en el caso de resistencia normal con las tolerancias que se indican en la Tabla 37.



A continuación se muestran fotografías de cilindros probados a compresión a distintas edades de prueba:



Figura 78. Cilindros Testigo – 7 días (izquierda) – 14 días (centro) – 60 días (derecha).
(Fotografías: E. González Castro).



Figura 79. Cilindros CPC-10%CBC – 7 días (izquierda) – 60 días (centro y derecha).
(Fotografías: E. González Castro).



Figura 80. Cilindros CPC-10%CBC – 90 días. (Fotografías: E. González Castro).

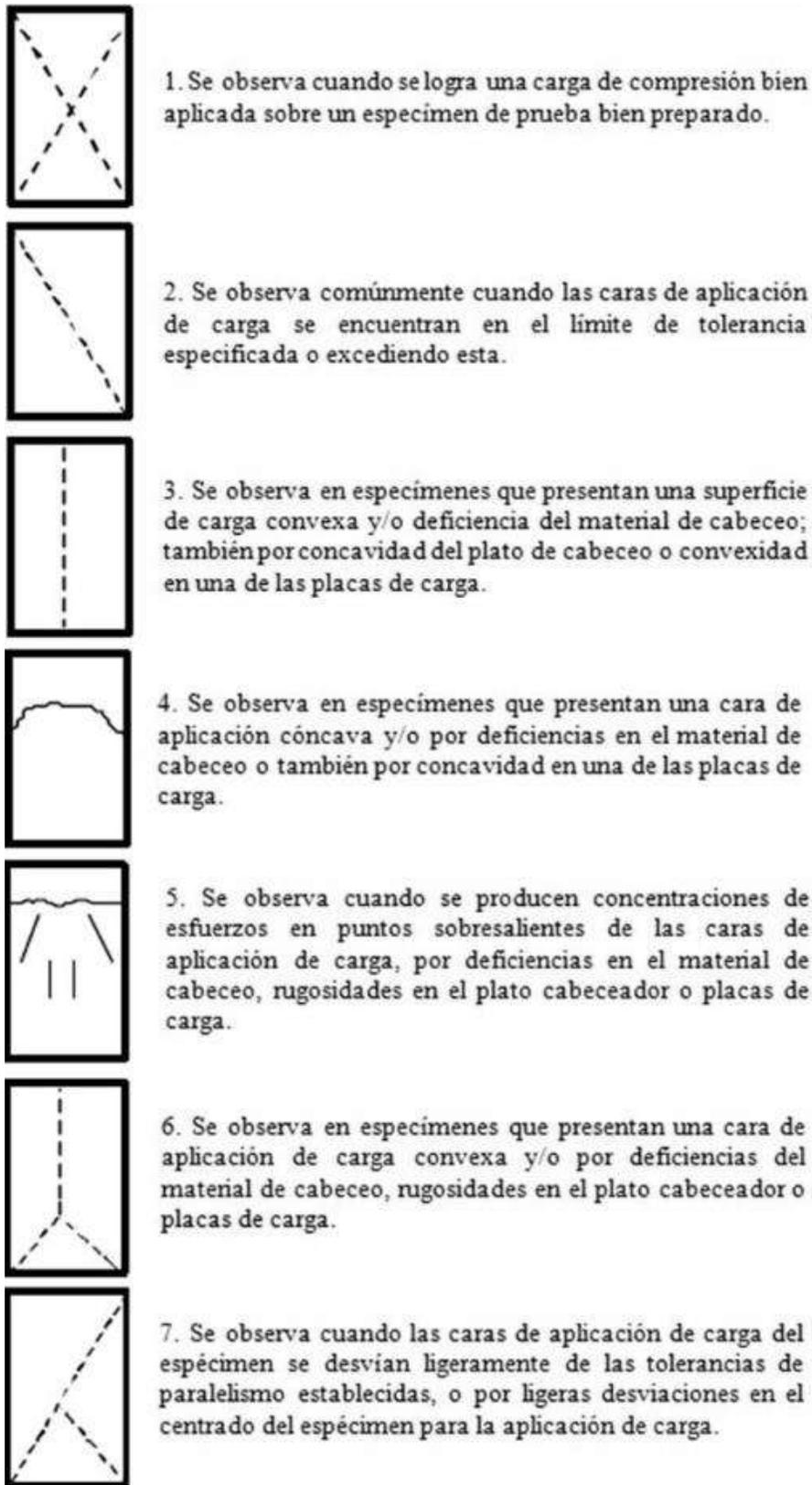


Figura 81. Diagrama de fallas de cilindros sometidos a compresión [NMX-C-083-ONNCCE-2002].



Tabla 37. Tolerancias [NMX-C-083-ONNCCE-2002].

Edad de prueba	Tolerancia permisible
24 horas	± 0:30 horas
3 días	± 2 horas
7 días	± 6 horas
14 días	± 12 horas
28 días	± 24 horas

Cálculo:

Para calcular la resistencia a la compresión real que resiste el concreto, se divide la carga resistente entre el área de la sección transversal, de acuerdo a la ecuación 20:

$$\sigma = P/A \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

$\sigma = s$ = resistencia a la compresión real que resiste el espécimen, en Kg/cm².

P = carga de ruptura, en Kgf.

A = área de la sección transversal del espécimen, en cm².

Conociendo y registrando su edad se determina su porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto de la forma siguiente, de acuerdo a la ecuación 21:

$$\% \text{ resistencia} = \sigma / \sigma_p \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

% resistencia = porcentaje de la resistencia real del espécimen, en %.

σ = resistencia real a cierta edad, en días y en Kg/cm².

σ_p = resistencia de proyecto, Kg/cm².

Este porcentaje de resistencia calculado se compara con la cura de resistencia del concreto respecto a la edad en días y se verifica si está dentro de las especificaciones.

5.6.4. Módulo de Elasticidad Estático.

El módulo de elasticidad estático depende directamente de la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto, su variación es directamente proporcional al valor de la resistencia f'c. Cuando se dibuja la curva esfuerzo-deformación de un elemento de concreto sometido a compresión se obtienen diferentes tipos de gráficos que dependen fundamentalmente de la resistencia a la ruptura del material, como se muestra en la Figura 82:

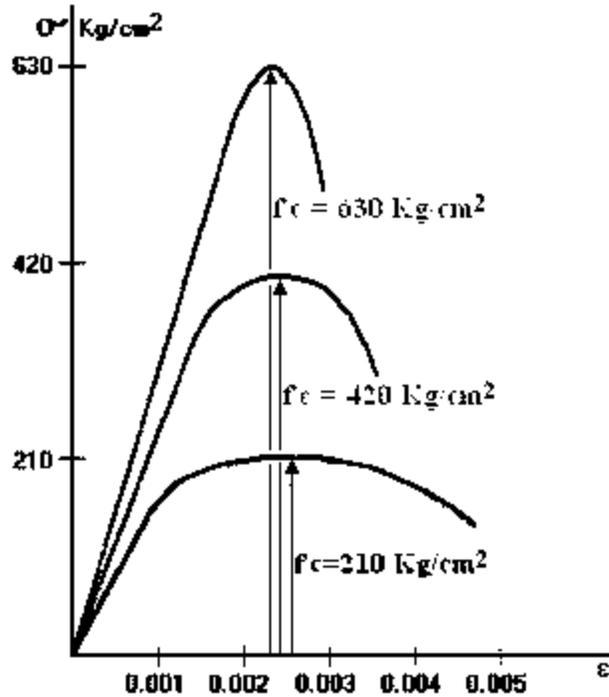


Figura 82. Gráficas esfuerzo-deformación unitaria para concretos de distintas resistencias. (Romo, 2009).

Los concretos de menor resistencia suelen mostrar una mayor capacidad de deformación que los concretos más resistentes.

Todos los concretos presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo-deformación) y elástico (en la descarga recupera la geometría previa a la carga) ante el incremento de esfuerzos de compresión, cuando las cargas son relativamente bajas (menores al 70% de la carga de ruptura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la gráfica esfuerzo-deformación) cuando las cargas son altas.

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad del material o Módulo de Young, que se simboliza “ E_c ”, que puede calcularse mediante la ecuación 22 a partir de la gráfica esfuerzo-deformación:

$$E_c = \frac{\sigma_{c1}}{\varepsilon_{c1}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Cuando no es posible obtener deformaciones por falta del equipo necesario, el ACI (American Concrete Institute) como forma aproximada de calcular el módulo de elasticidad estático del concreto, en función de la resistencia a la compresión del mismo, propone la ecuación 23, obtenida experimentalmente:



$$E_c = 15,000\sqrt{f'_c} \text{ ó } 5,000\sqrt{f'_c} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad estático del concreto, en Kgf/ cm² ó en MPa.

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto, en Kgf/cm² ó en MPa.

La expresión anterior es válida para concretos con agregados de masa normal y resistencias normales y medias. A continuación se presenta una tabla que relaciona la resistencia de los concretos utilizados con más frecuencia con su módulo de elasticidad (Romo, 2009).

La Tabla 38 muestra distintos módulos de elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto.

Tabla 38. Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto. (Romo, 2009).

Resistencia en Kgf/ cm ²	Módulo de elasticidad estático en Kgf/ cm ²
210	217,000
280	251,000
350	281,000
420	307,000

5.6.5. Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.

Esta norma mexicana establece el método de prueba para determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral en especímenes cilíndricos de concreto.

Procedimiento:

1. En cada extremo del espécimen se deben dibujar líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que asegure que las líneas se encuentren en el mismo plano diametral.
2. Se determina el diámetro del espécimen de prueba con una aproximación de 1 mm, se calcula con el promedio de tres diámetros, medidos cerca de los extremos, al centro del espécimen y contenidos dentro del plano, que incluye las líneas marcadas en los extremos.
3. Se determina la longitud del espécimen con aproximación de 1 mm, con el promedio de por lo menos dos medidas de longitud tomadas en el plano que contienen las líneas marcadas en los extremos.



4. Para cada prueba se debe contar con dos tiras de madera de triplay, neopreno o con dureza de 80 shore similar, libre de imperfecciones con un espesor de 3 mm, un ancho de 25 mm, aproximadamente y una longitud igual o ligeramente mayor que el espécimen. Las tiras de distribución de carga se colocan entre el espécimen y ambas platinas de carga, superior e inferior de la máquina de prueba, o entre el espécimen y las placas suplementarias cuando se utilicen. Después de cada prueba las tiras de triplay deben desecharse.
5. Se centra una de las tiras de carga sobre la platina inferior. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea en tal forma, que las líneas marcadas en los extremos del cilindro estén verticales y centradas con relación a las tiras. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo con relación a las líneas marcadas en los extremos del mismo. Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.
6. Se debe aplicar la carga en forma continua sin impacto a una velocidad constante de tal manera, que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 5 Kgf/cm² a 15 Kgf/cm² por minuto hasta la falla de espécimen. Para cilindros de 15 por 30 cm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 3467 Kgf y 10,605 Kgf por minuto.
7. Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.
8. Se deben observar, el tipo de falla y la apariencia del concreto.

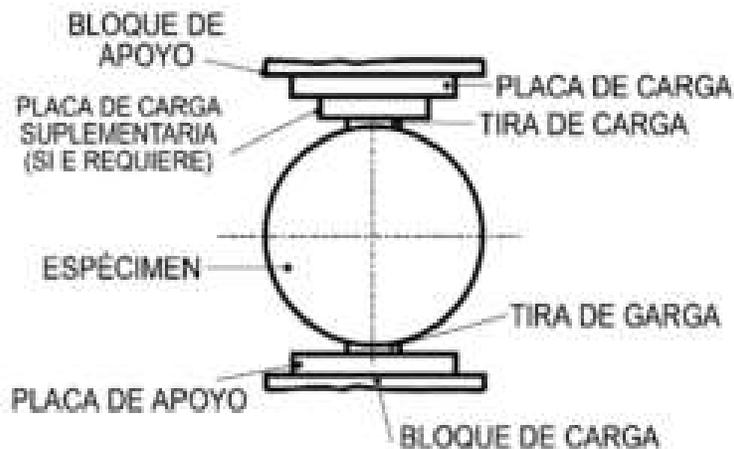


Figura 83. Especimen en la máquina de prueba. [NMX-C-163-1997-ONNCCE].



Cálculo:

La resistencia a la tensión se calcula con la ecuación 24.

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \text{ (Ecuación 24)}$$

Donde:

T = resistencia a la tensión por compresión diametral, en Kgf/cm².

P = carga máxima aplicada, en Kgf.

L = longitud, en cm.

d = diámetro, en cm.



Figura 84. Cilindro CPC-10%CBC en la máquina Universal a la edad de 7 días (izquierda). Cilindro CPC-10%CBC fallado a la edad de 60 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).



Figura 85. Cilindro Testigo fallado a la edad de 14 días (izquierda). Cilindro Testigo a tensión indirecta a la edad de 90 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).



5.6.6. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación a la resistencia a la flexión del concreto, usando una viga con cargas concentradas en los tercios del claro.

Definiciones:

Módulo de ruptura: Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga.

Procedimiento:

1. La longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo.
2. La distancia entre apoyos debe ser de 3 veces el peralte de la viga, con una tolerancia de +/- 2%. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye.
3. Las caras laterales del espécimen deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas sus superficies deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, agujeros o identificaciones grabadas.
4. Se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado, se centra en los bloques de apoyo y éstos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada.
5. Los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Se debe tener contacto total, entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen.
6. Se deben lijar las superficies del espécimen o bien usarse tiras de cuero si la separación de la línea de contacto entre ellas y los bloques sea mayor de 0.1 mm. (Se recomienda que el lijado de las superficies laterales de los especímenes sea mínimo, ya que puede cambiar las características físicas de las mismas y por lo tanto afectar sus resultados).
7. La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de 980 kPa/min (10 Kgf/cm² por minuto), permitiéndose velocidades mayores antes del 50% de la carga estimada de ruptura.
8. Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.



Cálculo:

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula como sigue, de acuerdo a la ecuación 25:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \text{ (Ecuación 25)}$$

Donde:

R = módulo de ruptura, en Kgf/cm².

P = es la carga máxima aplicada, Kgf.

L = es la distancia entre apoyos, en cm.

b = es el ancho promedio del espécimen, en cm.

d = es el peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la ruptura se presenta fuera del tercio medio del claro, en no más del 5% de su longitud, se calcula el módulo de ruptura como sigue, de acuerdo a la ecuación 26:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \text{ (Ecuación 26)}$$

Donde:

a = es la distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga, en milímetros.

Si la ruptura ocurre fuera del tercio medio del claro en más del 5% se desecha el resultado de la prueba.



Figura 86. Marca de los tercios de la viga (izquierda). Viga apoyada a una distancia de 3 veces el peralte de la misma (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Se colocan los rodillos para ejercer la carga al elemento:



Figura 87. Ensaye a flexión en CPC-10%CBC -7 y 28 días de edad. (Fotografías: E. González Castro).

Se observa la rotura en el tercio medio del claro de la viga:



Figura 88. CPC-10%CBC-7 días (izquierda). Testigo-7 días (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Una vez probadas, se observa si la falla ocurrió en la pasta o el agregado:



Figura 89. Estructura interna de vigas de CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).



5.6.7. Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto.

Este método de prueba se utiliza para determinar el módulo de elasticidad dinámico, el módulo dinámico de rigidez y el valor dinámico de Poisson en prismas o cilindros de concreto, es decir, este método está destinado para la detección de cambios significativos en el módulo de elasticidad dinámico de las muestras de laboratorio o campo que han sido expuestas a la intemperie o a otro tipo de influencias de deterioro.

Procedimiento:

1. Se determina la masa y el promedio de la longitud del espécimen.
2. Se determina el promedio de la sección transversal. Las relaciones de esbeltez pequeñas o grandes son comúnmente difíciles de excitar en el modo de vibración fundamental, es por ello que se recomienda relaciones entre 3 y 5. Para la aplicación de este procedimiento la relación de esbeltez debe ser al menos de 2.
3. Se monta el espécimen en el equipo de manera que sea capaz de vibrar libremente en el modo longitudinal colocándose de manera que la fuerza que lo maneja sea perpendicular a él y aproximadamente al centro de las caras de la muestra.
4. Se coloca la unidad de recolección de frecuencia en el espécimen de manera que la recolección de sensibilidad coincida con la dirección de la vibración, esto es, el eje longitudinal del espécimen.
5. Se obliga al espécimen a vibrar a varias frecuencias y se registra la frecuencia más alta.



Figura 90. Determinación de la masa del espécimen (izquierda). Colocación de la viga en el aparato E-meter para medir la resonancia (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

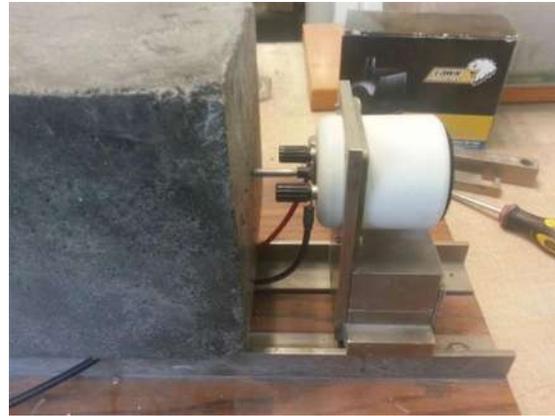


Figura 91. Centrado del espécimen a fin de que coincidan el transmisor y el receptor. (Fotografías: E. González Castro).



Figura 92. Vibración del espécimen y registro de la frecuencia más alta. (Fotografías: E. González Castro).

Para las vibraciones fundamentales longitudinal y torsional, hay un punto de vibración cero (nodo) en el punto medio del espécimen y la amplitud máxima está en los extremos.

Cálculo:

El cálculo del módulo de elasticidad dinámico se realiza de acuerdo a la ecuación 27.

$$E_d = (4n^2L^2P) \times 10^{-12} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Donde:

E_d = módulo de elasticidad dinámico, en MN/m^2 , (MPa).

P = densidad del concreto, en Kg/m^3 .

L = longitud del espécimen, en mm.

n = frecuencia fundamental longitudinal, en Hz.



5.7. PRUEBAS REALIZADAS AL CONCRETO ENDURECIDO (PARÁMETROS DE DURABILIDAD).

Los ensayos relativos a durabilidad se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Normas correspondientes a la durabilidad del concreto.

ENSAYE	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.	NMX-C-275-ONNCCE-2004	ASTM-C-597-02
Resistividad Eléctrica	[Red Durar, 2000]	
Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar en especímenes cilíndricos de concreto.	[Red Durar, 2000]	
Método de prueba estándar determinar la abrasión del concreto.	---	
Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.	---	ASTM C 88-99 ^a ASTM-C-452-95
Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.	[Red Durar, 2000]	

5.7.1. Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.

Este método es aplicable para evaluar la calidad y homogeneidad del concreto, para indicar la presencia de vacíos o grietas y para evaluar la efectividad de las reparaciones a estas grietas. También es aplicable para indicar los cambios en las propiedades del concreto y en el estudio de las estructuras para estimar la severidad del deterioro o la formación de grietas.

Definiciones:

Velocidad de pulso: Es la relación existente entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tardan recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, proporciona la velocidad promedio de la propagación de la onda.

Homogeneidad: Es la cualidad del concreto por la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda



ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Procedimiento:

1. Los especímenes o zonas de concreto a ser ensayados deben tener la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y no deben estar carbonatados.
2. Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, se deben regularizar a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con espesor mínimo, a fin de posibilitar un buen acoplamiento con los transductores o sondas, pero sin que puedan interferir en la medida.
3. Se calibra el equipo de velocidad de pulso con ultrasonido usando la barra de referencia
4. El modo de prueba puede ser de tres formas:
 - Transmisión directa: con los transductores en las caras opuestas del material.
 - Transmisión indirecta: con los transductores en misma cara.
 - Transmisión semidirecta: con los transductores en las caras adyacentes.
5. Se aplica un adecuado agente de acoplamiento (como agua, vaselina, grasa, goma moldeable, u otros materiales viscosos) a las caras de los transductores o la superficie de ensayo o ambas.
6. Se presionan las caras de los transductores firmemente contra la superficie de concreto hasta que se muestre un tiempo estable o hasta obtener el valor estable más bajo que se considere adecuado.
7. Se registra ese valor y se determina la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores.



Figura 93. Equipo para la medición de la velocidad de pulso. (Fotografía: E. Glez. Castro).



Cálculo:

Para transmisiones directas y semidirectas, la velocidad se determina con la ecuación 29 siguiente:

$$V = L/T \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

V = velocidad de pulso, en Km/s.

L = longitud de paso, en Km.

T = tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, en s.

De la medición de la velocidad de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico con ayuda de la ecuación 30:

$$E_d = V^2 Q \frac{(1+u)(1-2u)}{1-u} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde:

E_d = Módulo de elasticidad dinámico, en MPa.

V = Velocidad de pulso, en Km/s.

Q = Densidad del concreto, en Kg/m³ (Masa saturada entre volumen del concreto).

u = Proporción de Poisson (concreto de alta resistencia u = 0.15; concreto de baja resistencia u = 0.30). Alta resistencia > 80 MPa (Neville & Brooks, 2010).

Especificaciones:

Los criterios de evaluación para la calidad del concreto se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40. Criterios de Evaluación para la Calidad del Concreto [Red Durar, 2000].

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del concreto
<2,000	Deficiente
2,001 a 3,000	Normal
3,001 a 4,000	Alta
>4,000	Durable

5.7.2. Resistividad Eléctrica.

La Resistividad Eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad, su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (Durar, 2000).



Procedimiento:

1. Se toman las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud.
2. Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro.
3. Se monta la muestra en el equipo correspondiente.
4. Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el concreto.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada, (I).
6. Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.



Figura 94. Medición de masa y longitud de los especímenes. (Fotografías: E. González Castro).



Figura 95. Medición de la resistividad en cilindros y prismas (Fotografías: E. Glez. Castro).



Cálculo:

La Resistencia eléctrica, R_e , se calcula como Voltaje/Intensidad de corriente y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por la ec. 31:

$$\rho = R_e \frac{A}{L} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

- ρ = resistividad eléctrica, en ohm-cm.
- R_e = resistencia eléctrica, en ohms.
- A = área transversal del espécimen, en cm^2 .
- L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones:

Las especificaciones de durabilidad de acuerdo a la resistividad se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Criterios de evaluación. [Red Durar, 2000].

Resistividad eléctrica ($\text{K}\Omega\text{-cm}$)	Riesgo de corrosión
<10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
>200	Poco riesgo

5.7.3. Método de prueba estándar para la determinación de absorción capilar en especímenes cilíndricos de concreto.

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado sólido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (ϵ_e) porosidad efectiva; (k) absorción capilar; y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar [Juan José Carpio et al, 2000].

Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

Poros de gel. Son de menor tamaño (<15-25 Å) y corresponden a espacios intersticiales del gel de la cal apagada. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades relativas < 20%. Estos poros de tamaño reducido impiden el transporte capilar del agua, que sólo puede atravesarlo en estado gaseoso. Los materiales de microporosidad alta son, por lo tanto, casi impermeables a nivel capilar.



Poros capilares. Son de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a 1 μm . Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cal apagada endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad. Permiten el transporte capilar de agua; en estos casos, la cantidad absorbida depende de la capilaridad del material.

Poros de aire. Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de 0.05 mm. Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos, este tipo de poro grande tampoco favorece el transporte capilar de agua, al igual que los poros de gel.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales.

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Gören Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de concretos y morteros a través de tres coeficientes:

m = Resistencia a la penetración del agua.
 k = Coeficiente de absorción capilar.
 ϵ_0 =Porosidad efectiva

Procedimiento:

1. El ensayo se realiza en especímenes de espesor aproximado de $H=50$ mm.
2. Los especímenes se pre-acondicionan mediante un secado a 60°C por 48 horas o hasta masa constante.
3. Posteriormente se dejan enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
4. Se coloca resina o parafina en las caras laterales del espécimen para garantizar que el agua solo se absorba por la cara inferior.
5. Se registra su masa inicial, W_0 .
6. El espécimen se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua de sólo 3 mm por encima de la parte inferior del espécimen.



7. El recipiente se deberá mantener cerrado durante la prueba para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.
8. Se registra la masa del espécimen a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas, hasta lograr masa constante.
9. Como último paso se procede a calcular los coeficientes de Fagerlund.



Figura 96. Preparación de las pastillas (izquierda). Pastillas CPC-10%CBC sobre la cama de agua. (Centro y derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones 32 y 33 respectivamente:

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m).

$$m = \frac{t}{z^2}, \left(\frac{s}{m^2}\right) \text{ (Ecuación 32)}$$

Donde:

z = representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo "t".

Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(W_t - W_o)/A}{\sqrt{t}}, \left(\frac{kg}{m^2 s^{\frac{1}{2}}}\right) \text{ (Ecuación 33)}$$

Donde:

Wo = Masa inicial de la probeta (Kg o g).

Wt = Masa final de la probeta (Kg o g).

A = Área expuesta de la probeta (m o cm).

k es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico (Wt-Wo)/A como función respecto de la raíz del tiempo $t^{1/2}$.



5.7.4. Método de prueba estándar determinar la abrasión del concreto.

Como una medida de la durabilidad, el ensaye de cántabro determina la pérdida de masa por abrasión en elementos similares a las pastillas elaboradas en el ensayo Marshall de pavimentos asfálticos. Hace una comparativa entre las masas de concreto testigo y el concreto modificado, registrando así la pérdida progresiva de masa con el aumento de ciclos de prueba. Tomando como base la metodología propuesta por el Dr. Miró Recasens para determinar la pérdida por abrasión en pastillas Marshall mediante el ensayo Cántabro se tiene el siguiente procedimiento:

Procedimiento:

1. Las muestras sometidas a la abrasión deberán ser de forma cilíndrica con las dimensiones siguientes: diámetro de 10 cm y espesor de 6.5 cm. Para obtener estas muestras se realizarán cortes con ayuda de una sierra de diamante en cilindros de 10 cm x 20 cm, obteniendo 3 probetas por cilindro.
2. Las probetas cortadas se deben de someter a secado en un horno a temperatura constante de 50°C hasta registrar masa constante.
3. Se pesa en seco la probeta, con una aproximación de 0.1 gramos registrando esta lectura como M1.
4. Antes de ensayarla, la probeta se mantiene a la temperatura de ensayo un mínimo de 6 horas.
5. Se introduce la probeta en la máquina de Los Ángeles sin ninguna clase de carga abrasiva, y se la somete a 100 revoluciones, la segunda probeta a 200 revoluciones, sucesivamente hasta que la quinta probeta se someta a 500 revoluciones.
6. Se saca la probeta, que se habrá ido reduciendo por el desgaste, y se pesa con una aproximación de 0.1 gramos registrando el masa como M2.



Figura 97. Corte de los cilindros para obtener las pastillas. (Fotografía: E. Glez. Castro).



Figura 98. Muestras en el horno (izquierda) y máquina de Los Ángeles (derecha).
(Fotografías: E. González Castro).



Figura 99. Comparativa de las pastillas 0 a 500 revoluciones. Mezcla testigo (izquierda).
Mezcla CPC-10%CBC (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

La pérdida de material por desgaste se expresa en tanto por ciento referida a la masa inicial de la probeta, de acuerdo con la ecuación 34:

$$M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

M = Pérdida por desgaste, en %.

M1 = Masa inicial probeta, en g.

M2 = Masa final probeta, en g.



5.7.5. Método de prueba estándar para la solidez del concreto por acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

El ensaye simula las condiciones de exposición a sales, tales como sulfatos, a las que se encuentran sometidos elementos de concreto en ambientes marinos, los cuales sufren constantes ciclos de humedecimiento y secado provocando el deterioro prematuro del concreto y su reducción de vida útil.

Procedimiento:

1. Como primer paso debe realizarse una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) con una concentración de 350 g de sulfato por cada litro de agua destilada. La cantidad debe ser suficiente para llevar a cabo 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. En la experimentación se prepararon 20 litros de solución. El proceso de preparación de la solución consiste en disolver el sulfato en el agua a una temperatura no mayor a 40°C y mezclar dicha solución por un tiempo mínimo de 1 hora. Se debe evitar que quede polvo al final del proceso o material contaminante en el recipiente del mismo.
2. Los especímenes deberán de secarse hasta masa constante antes de iniciar la prueba. Para esto se cortaron cilindros de ambas mezclas consiguiendo rodajas y secándolas a una temperatura de 50°C hasta masa constante.
3. Se pesan los especímenes para obtener la masa seca o masa inicial de cada uno y se prepara un recipiente capaz de contener todas las muestras para cada mezcla, durante el tiempo de prueba procurando mantener un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la superficie de los especímenes, estos deberán ir apoyados sobre una rejilla que evite su reposo directo sobre el fondo del recipiente y asegure el contacto con la solución en todas sus caras, por lo que deben estar separados 2 cm entre sí.
4. Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniéndolos a una temperatura en promedio de 21°C .
5. Concluidas las 16 horas se sacan y se dejan escurrir durante 15 minutos para después colocarlos en un horno previamente calentado a una temperatura constante de 50°C hasta conseguir masa constante nuevamente.
6. Pasado el tiempo de secado se sacan las muestras del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener su masa seca.
7. Se ensayan las muestras a compresión y se comparan con los resultados de aquellas muestras que no se hayan sometido a los ciclos de humedecimiento



y secado. Cada uno de los pasos del 3 al 6 se repiten hasta completar 5 ciclos de prueba.

El desarrollo de la experimentación se llevó a cabo haciendo uso de sulfato de sodio y no se utilizaron cilindros enteros, sino 15 rodajas de los mismos de cada mezcla de 4.5 cm de espesor y se determinó su pérdida de masa en cada ciclo únicamente. Por su relación de espesor no fue posible su ensaye a compresión, pues la relación mínima es 2 a 1, y las rodajas no cumplen esta condición.

Debe tenerse el debido cuidado de no mezclar los recipientes en los que se contengan las muestras probadas, estas deben sumergirse siempre en su correspondiente recipiente y nunca en otro, aunque contenga solución preparada bajo las mismas condiciones.



Figura 100. Corte de los cilindros (izquierda). Preparación de la solución de sulfato de sodio (centro). Secado en el horno a temperatura de 50°C (derecha). (Fotografías: E. González Castro).



Figura 101. Rodajas obtenidas de cilindros. A la izquierda rodajas de la mezcla CPC-10%CBC, y a la derecha rodajas de la mezcla testigo. (Fotografías: E. González Castro).

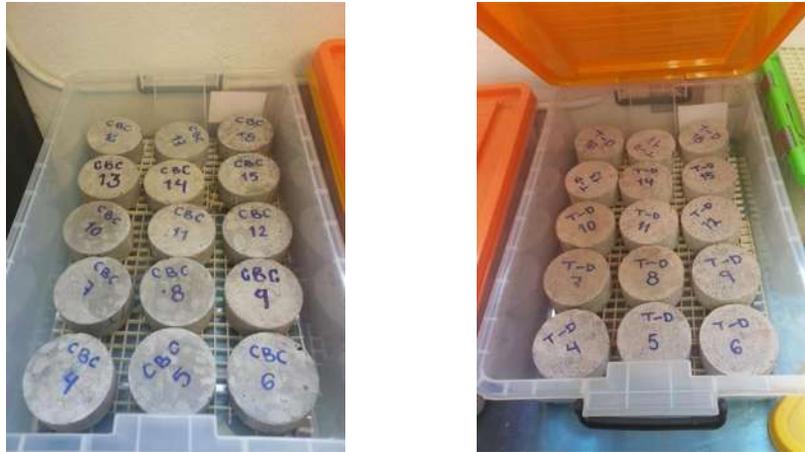


Figura 102. Rodajas en su respectivo recipiente de prueba. (Fotografías: E. Glez. Castro).



Figura 103. Determinación de la masa antes de iniciar los ciclos de prueba. Testigo y CPC-10%CBC. (Fotografías: E. González Castro).



Figura 104. Deterioro por la expansión de cristales al final del cuarto ciclo. (Fotografías: E. González Castro).

Como se muestra en la figura 104, la pérdida de masa es progresiva y afecta en mayor proporción a la mezcla que contiene CBC. La fotografía hace una comparación de la rodaja de la mezcla testigo en peores condiciones de daño, con las rodajas de mayor deterioro de la mezcla de concreto-ceniza de bagazo de caña.



5.7.6 Método de prueba estándar para la determinación de la profundidad de carbonatación.

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad del concreto, este fenómeno actualmente afecta a muchas estructuras del país; se lleva a cabo cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino, con valores de 9 o menos.

El contenido de humedad relativa del ambiente es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50%–70% aproximadamente ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso (R. Montani, 2000).

El contenido de dióxido de carbono en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en la zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación en el concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO_2 que normalmente se encuentra en la atmósfera en el rango de 0.03% (ACI 222, 2002).

La prueba fue realizada a 3 cilindros de 10 cm x 20 cm de concreto de cada mezcla. Los especímenes se dejaron a la intemperie a partir del 9 de febrero de 2016 por un periodo de 5 meses hasta el día 13 de julio del mismo año en que fueron ensayados.

Procedimiento:

1. Los cilindros se marcan en la cara sur ya que es la dirección de los vientos dominantes en la ciudad de Morelia, y por lo tanto la dirección más favorable para sufrir carbonatación.
2. Los cilindros deben de cortarse para tener una sección longitudinal en la dirección sur - norte. En el caso de la investigación el corte se llevó a cabo por medio del ensaye de compresión diametral. Así mismo se registró una carga que podemos relacionar con su profundidad de carbonatación.
3. Después de que se realiza el corte longitudinal se limpia inmediatamente la cara interna de todo el material que queda suelto o polvo.
4. Se le aplica con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras del corte la solución de fenolftaleína, el tiempo que deberá transcurrir después de realizado el corte no deberá ser mayor de 15 min.
5. Después de realizado el corte se debe de tomar la profundidad de la carbonatación midiendo esta en cada lado del corte, obteniendo un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen. La profundidad de carbonatación es la longitud que no se pigmenta de color morado.

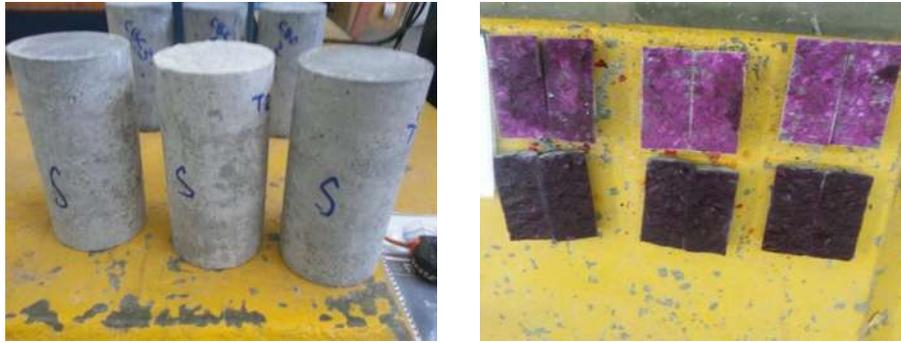


Figura 105. Cilindros marcados en su cara sur (izquierda). Cilindros probados con fenolftaleína (derecha). (Fotografías: E. González Castro).

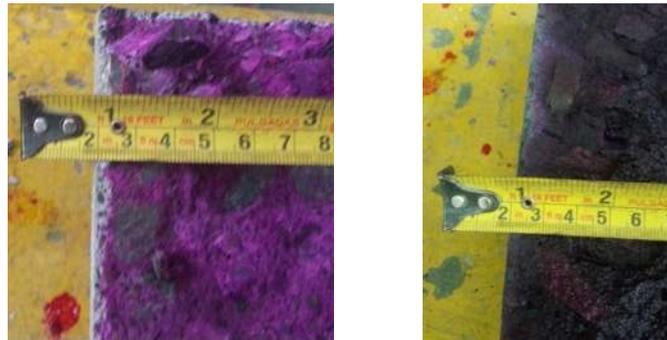


Figura 106. Profundidad de carbonatación, testigo a la izquierda y CPC-10%CBC derecha. (Fotografías: E. González Castro).

Cálculo:

El cálculo de la constante de carbonatación se hace de acuerdo la ecuación 35.

$$K_{CO_2} = \frac{x_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

K_{CO_2} = Constante de carbonatación en mm/ (año)^{0.5}.

x_{CO_2} = Profundidad de carbonatación en mm.

t = Tiempo de Exposición en años.

Susceptibilidad de acuerdo a la humedad relativa.

Tabla 42. Carbonatación en relación con la humedad relativa (R. Montani, 2000).

Humedad relativa (%)	Proceso de carbonatación
HR > 70%	Evita que ingrese el CO ₂ .
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente.
HR < 50%	No hay suficiente agua para disolver el CO ₂ .



CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. DEL DISEÑO DE MEZCLA.

Paso 1. Elección del revenimiento y tamaño máximo del agregado: Un objetivo de la mezcla a diseñar es lograr la mayor trabajabilidad posible. Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de consistencia normal, específicamente el correspondiente a la sustitución del 10% de cemento Portland, se observó que la CBC demanda un 36.36% más de agua de mezclado, por lo tanto se elige un revenimiento de diseño de 10 cm obtenido de la tabla 20.

Paso 2. Reglas generales para la elección del tamaño máximo de agregado: Las dimensiones de los especímenes por elaborar son, para el caso de las vigas: 15 cm x 15 cm x 60 cm, para el caso de los cilindros: 10 cm x 20cm. La menor de todas estas dimensiones es 10 cm. La quinta parte de esta dimensión ($10 \text{ cm}/5=2 \text{ cm}$) representa el tamaño máximo de agregado a utilizar, que será de $\frac{3}{4}$ ”, correspondiente a $1.905 \text{ cm} < 2 \text{ cm}$.

Los dos puntos posteriores quedan satisfechos ya que no se pretenden colar losas o utilizar acero de refuerzo embebido en los especímenes.

Paso 3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire: Una vez elegido el revenimiento de 10 cm para el diseño de la mezcla, se procede a la elección del agua de mezclado correspondiente a 1 m^3 con el apoyo de la tabla 21. Ya que el concreto a diseñar debe cumplir con especificaciones de durabilidad, deberá ser considerado como una mezcla sin aire incluido, de esta manera se contribuye a no generar más poros no deseados en la mezcla, volviéndola homogénea y menos susceptible a permitir la introducción de agentes dañinos y degradantes.

Para un revenimiento de 10 cm y un T.M.N. de agregado de $\frac{3}{4}$ ” corresponde 205 Kg/m^3 de agua, y se considera que se presentará un 2% de aire incluido consecuencia del mismo proceso de elaboración.

Paso 4. Selección de la relación agua/cemento: Se consideró un valor de 0 para el F'_{cr} , por lo tanto se omite la parte del cálculo de este parámetro. Se busca tener una mezcla con la menor relación agua/cemento, así que se intentó elaborar un concreto con relación $a/c = 0.40$, pero éste presentó características no deseadas por su baja trabajabilidad, por lo tanto se incrementó la relación a/c a un valor de 0.42, la cual corresponde al valor de la resistencia $f'c = 407 \text{ Kg/cm}^2$ obtenida de la tabla 24. Estos valores serán utilizados en el cálculo del contenido de cemento, al conocerse ya la cantidad de agua necesaria.



Paso 5. Cálculo del contenido de cemento. La obtención del valor del contenido de cemento está dada por la ecuación 36:

$$\text{Cantidad de cemento en masa} = \frac{\text{Cantidad de agua en Kg}}{\text{Relación agua-cemento}} \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$\text{Cantidad de cemento en masa} = \frac{205 \text{ Kg}/m^3}{0.42} = 488.1 \text{ Kg}/m^3$$

Paso 6. Estimación del contenido del agregado grueso: La tabla 25 nos permite llevar a cabo la determinación de la cantidad de agregado grueso, con base de tamaño máximo del agregado y el módulo de finura de la arena. Analizando el tamaño de 19 mm observamos una tendencia a la baja de 0.02 por cada 0.2 de aumento en el módulo de finura de la arena, por lo tanto para un valor de M.F. de 3.6 se equivale a un valor de la tabla de 0.54, lo cual significa que se tendrá un volumen del 54% de agregado grueso en la mezcla.

Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino: Para la estimación del contenido del agregado fino se lleva a cabo por medio del método del volumen absoluto, el cual inicia con el cálculo de la masa de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma:

$$\text{Cálculo del masa de la grava} = \text{Cantidad de grava} * \text{M. U. C.} \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$\text{Cálculo de la masa de la grava} = 0.54 * 1497.1 \frac{\text{Kg}}{m^3} = 808.43 \text{ Kg}/m^3$$

$$\text{Cálculo del volumen de la grava} = \frac{\text{Masa de la grava}}{\text{Densidad de la grava} * 1000} \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$\text{Cálculo del volumen de la grava} = \frac{808.43 \text{ Kg}/m^3}{2.57 \text{ g}/cm^3 * 1000} = 0.315 \text{ m}^3 = 315 \text{ L}$$

Continuamos con el cálculo de la masa y el volumen de cemento:

$$\text{Cálculo del masa del cemento} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{relación agua-cemento}} \quad (\text{Ecuación 39})$$

$$\text{Cálculo del masa del cemento} = \frac{205 \text{ Kg}}{0.42} = 488.1 \text{ Kg}$$

$$\text{Cálculo del volumen de cemento} = \frac{\text{Masa del cemento}}{\text{Densidad del cemento} * 1000} \quad (\text{Ecuación 40})$$

$$\text{Cálculo del volumen de cemento} = \frac{488.1 \text{ Kg}}{3.05 \text{ g}/cm^3 * 1000} = 0.16 \text{ m}^3 = 160 \text{ L}$$



Cálculo del volumen del agua:

Dado que la densidad del agua = 1 g/cm^3 ó 1000 Kg/m^3 el volumen del agua es igual a su masa en Kg. Por lo tanto el volumen del agua es 205 L.

Cálculo del volumen de aire, se realiza utilizando la ecuación 41. (Ecuación 41):

$$\text{Cálculo del volumen de aire} = \frac{\% \text{ de aire incluido}}{100} = \frac{2\%}{100} = 0.02 \text{ m}^3 = 20 \text{ L}$$

Una vez obtenidos estos valores se realiza una suma de volúmenes con excepción del volumen de arena (Sv-a), ya que es el volumen que queremos encontrar, se realiza utilizando la ecuación 42:

$$(Sv-a) = (\text{Vol. de grava}) + (\text{Vol. de cemento}) + (\text{Vol. de agua}) + (\text{Vol. de aire}). \text{ (Ec. 42)}$$

$$(Sv-a) = 0.315 \text{ m}^3 + 0.16 \text{ m}^3 + 0.205 \text{ m}^3 + 0.02 \text{ m}^3 = 0.7 \text{ m}^3.$$

$$\text{Volumen de la arena} = 1 \text{ m}^3 - 0.7 \text{ m}^3 = 0.3 \text{ m}^3 = 300 \text{ L.}$$

$$\text{Relación grava-arena} = 808.43 \text{ Kg} / 717.96 \text{ L} = 1.126.$$

Una vez que se obtiene el volumen de la arena se calcula la masa de la arena para 1 m^3 , utilizando la ecuación 43.

Cálculo de la masa de la arena = Densidad de la arena * Volumen de la arena (Ec. 43)

$$\text{Cálculo de la masa de la arena} = 2390 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.3 \text{ m}^3 = 717.96 \text{ Kg}$$

Paso 8. Ajustes o correcciones por humedad del agregado: Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para 1 m^3 de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar el porcentaje de la humedad actual del porcentaje de absorción del material. Por lo tanto a los materiales pétreos, al considerarse superficialmente secos y saturados se les debe restar el porcentaje de absorción correspondiente.

$$\text{Masa corregida de la grava} = 808.43 \text{ Kg} - 1.1\% \text{ absorción} = 799.54 \text{ Kg.}$$

$$\text{Masa corregida de la arena} = 717.96 \text{ Kg} - 5.42\% \text{ absorción} = 679.05 \text{ Kg.}$$

Estas cantidades que se restaron por la absorción deben ser sumadas a la cantidad del agua calculada anteriormente:

$$(808.43 \text{ Kg} + 717.96 \text{ Kg}) - (799.54 \text{ Kg} + 679.05 \text{ Kg}) = 47.8 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa total del agua} = 205 \text{ Kg} + 47.8 \text{ Kg} = 252.8 \text{ Kg} = 252.8 \text{ L}$$



Tabla 43. Resumen de las cantidades para 1 m³.

Resumen de las cantidades obtenidas en el proporcionamiento			
Material	Volumen (L)	Masa (Kg)	Masa Corregida (Kg)
Cemento	160	488.1	488.1
Grava	315	808.43	799.54
Arena	300	717.96	679.05
Agua	205	205	252.8
Aire	20	0	0

Para fines de la investigación en la que se evaluó las mezclas de concreto por resistencia mecánica y durabilidad, se elaboraron dos tipos de especímenes necesarios para la realización de los ensayos. Estos especímenes fueron cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, y prismas de 15 cm x 15 cm de sección transversal por 60 cm de longitud. La cantidad de especímenes planeada corresponde a 125 cilindros y 66 vigas (incluyendo las 2 mezclas de concreto: patrón y combinación CPC-CBC).

8. Cálculo de las cantidades totales necesarias.

Para el cálculo de las cantidades totales necesarias de materiales se debe conocer el volumen ocupado por un cilindro y un prisma, posteriormente dimensionarlo al total de especímenes necesarios en la investigación. El cálculo de los volúmenes se lleva a cabo por medio de las ecuaciones 44 y 45, después se suman los totales.

Ecuación 44:

$$\text{Volumen de un cilindro} = \pi r^2 h = 3.1416 * (0.05m)^2 * 0.20m = 1.5708 * 10^{-3} m^3$$

$$\text{Volumen total cilindros} = 1.5708 * 10^{-3} m^3 * 125 \text{ cilindros} = 0.1964 m^3$$

Ecuación 45:

$$\text{Volumen de un prisma} = a * b * c = 0.15m * 0.15m * 0.60m = 0.0135 m^3$$

$$\text{Volumen total de prismas} = 0.0135 m^3 * 66 \text{ prismas} = 0.891 m^3$$

$$\text{Volumen total} = (0.891 m^3 + 0.1964 m^3) * 10\% \text{ desperdicio} = 1.2 m^3$$

Ahora se procede a recalcular las proporciones para que correspondan a 1.2 m³.

Tabla 44. Cantidades necesarias totales correspondientes a 1.2 m³.

Cantidades necesarias totales			
Material	Volumen (L)	Masa (Kg)	Masa Corregida (Kg)
Cemento	192	585.72	585.72
Grava	378	970.12	959.45
Arena	360	861.55	814.86
Agua	246	246	303.36
Aire	24	0	0



La cantidad de cemento total necesaria para ambas mezclas es 585.72 Kg, lo que significa que cada mezcla necesita 292.86 Kg. La mezcla CPC-CBC no requiere los 292.86 Kg ya que un porcentaje de cemento será sustituido por CBC. Para determinar qué porcentaje es el más adecuado, contando con las proporciones necesarias y los resultados de consistencia normal, se procedió a elaborar 3 cilindros de cada porcentaje de sustitución, 5%, 10% y 20% en peso.

Una vez elaborados los cilindros se curaron por inmersión y se probaron a compresión, 2 de cada porcentaje a la edad de 7 días y el restante a la edad de 14 días. Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de compresión (en los que el 10% de sustitución presentó el mejor comportamiento mecánico) y las observaciones hechas durante la elaboración de la mezcla, en las que se determinó que la mezcla con el 10% de sustitución presentaba la mejor trabajabilidad y homogeneidad. Por lo tanto se eligió como porcentaje óptimo el 10% de sustitución de CBC: Por lo que la mezcla CPC-CBC requiere 263.57 Kg de cemento y 29.29 Kg de ceniza de bagazo de caña. Los resultados preliminares de resistencia mecánica de estos cilindros de prueba, elaborados para elegir el porcentaje óptimo de sustitución se muestran en la sección 6.2.

6.2. DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES.

El resumen de los resultados de los ensayos de compresión se presenta en la tabla 45, en la que se aprecia que la mezcla del 10% presenta el mejor comportamiento mecánico, muy por encima de las mezclas de 5% y 20%, además se aprecia que la densidad del elemento es mayor a menor cantidad de agua incorporada a la mezcla (mismo volumen, distinta masa).

Tabla 45. Resultados a ensaye de compresión. Especímenes preliminares de prueba.

CPC-20%CBC					
Nº	Edad (días)	Masa (Kg)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	7	3.25	5,217	78.54	6.51
2	7	3.25	5,086	78.54	6.35
3	14	3.25	6,106	78.54	7.62
CPC-10%CBC					
Nº	Edad (días)	Masa (Kg)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	7	3.6	24,109	78.54	30.10
2	7	3.55	22,924	78.54	28.62
3	14	3.6	25,031	78.54	31.25
CPC-5%CBC					
Nº	Edad (días)	Masa (Kg)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	7	3.5	14,130	78.54	17.64
2	7	3.5	15,517	78.54	19.37
3	14	3.5	17,758	78.54	22.17

Nota: Los esfuerzos mecánicos de toda la investigación se calcularon en Kg/cm² y posteriormente se convirtieron a MPa para ser presentados.



Tabla 46. Comparación de los resultados preliminares respecto a la resistencia de proyecto.

Comparativa con el $f'c = 407 \text{ Kg/cm}^2 = 39.91 \text{ MPa}$					
% CBC	N° espécimen	Edad (días)	Esfuerzo (MPa)	Promedio	% Alcanzado
20%	1	7	6.51	6.43	16.12
	2		6.35		
	3	14	7.62	7.62	19.10
% CBC	N° espécimen	Edad (días)	Esfuerzo (MPa)	Promedio	% Alcanzado
10%	1	7	30.10	29.36	73.57
	2		28.62		
	3	14	31.25	31.25	78.30
% CBC	N° espécimen	Edad (días)	Esfuerzo (MPa)	Promedio	% Alcanzado
5%	1	7	17.64	18.51	46.37
	2		19.37		
	3	14	22.17	22.17	55.55

En la tabla 46 se observa que a la edad de 14 días, para la mezcla correspondiente al 10% de sustitución de cemento por CBC, se logró alcanzar valores cerca al 80% de la resistencia de proyecto. Así mismo es de notar que el incremento ocurrido entre la primera y segunda edad de prueba es poco. Se esperan mayores resistencias a edades tardías cuando el efecto puzolánico de la CBC comience, de acuerdo a la hipótesis del proyecto.

6.3. DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

6.3.1. Contenido total de humedad evaporado por secado.

El contenido total de humedad fue determinado con base a la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006, los resultados para el agregado fino se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Porcentaje de humedad actual en arena volcánica.

Porcentaje de Humedad Actual			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Masa húmeda (g)	300	300	300
Masa seca (g)	298.8	299.5	299
%Humedad	0.40	0.17	0.33
Promedio (%)	0.30		

El contenido total de humedad para agregado grueso fue determinado con base a la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006, los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 48.



Tabla 48. Porcentaje de humedad actual en grava triturada.

Porcentaje de Humedad Actual			
Material	Grava Triturada		
N° de muestra	1	2	3
Masa húmeda (g)	302.5	301.1	301.4
Masa seca (g)	294.6	297.7	298.9
%Humedad	2.68	1.14	0.83
Promedio (%)	0.99		

6.3.2. Masa unitaria en agregados (Suelta y Compacta).

La masa unitaria se determinó con base en los lineamientos indicados en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Los resultados para la masa unitaria suelta en arena se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49. Masa Unitaria Suelta en arena volcánica.

Masa Unitaria Suelta			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Tara (g)	1900	1900	1900
Tara + material (g)	5715	5640	5710
Masa material (g)	3815	3740	3810
Volumen (cm ³)	2759	2759	2759
Masa Unitaria (g/cm ³)	1.3827	1.3556	1.3809
Masa Unitaria (Kg/m ³)	1,382.7	1,355.6	1,380.9
Promedio (Kg/m ³)	1,373.1		

La masa unitaria se determinó con base en los lineamientos indicados en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Los resultados para la masa unitaria suelta en grava se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50. Masa Unitaria Suelta en grava triturada.

Masa Unitaria Suelta			
Material	Grava Triturada		
N° de muestra	1	2	3
Tara (g)	2930	2930	2930
Tara + material (g)	17,800	17,900	17,850
Masa material (g)	14,870	14,970	14,920
Volumen (cm ³)	10,600	10,600	10,600
Masa Unitaria (g/cm ³)	1.4028	1.4123	1.4075
Masa Unitaria (Kg/m ³)	1,402.8	1,412.3	1,407.5
Promedio (Kg/m ³)	1,407.53		



La masa unitaria compacta se determinó con base en los lineamientos indicados en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Los resultados para la arena volcánica se muestran en la Tabla 51.

Tabla 51. Masa Unitaria Compacta en arena volcánica.

Masa Unitaria Compacta			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Tara (g)	1900	1900	1900
Tara + material (g)	6070	6040	6030
Masa material (g)	4170	4140	4130
Volumen (cm ³)	2759	2759	2759
Masa Unitaria (g/cm ³)	1.5114	1.5005	1.4969
Masa Unitaria (Kg/m ³)	1,511.4	1,500.5	1,496.9
Promedio (Kg/m ³)	1,502.9		

La masa unitaria compacta se determinó con base en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Los resultados para la grava se muestran en la Tabla 52.

Tabla 52. Masa Unitaria Compacta en grava triturada.

Masa Unitaria Compacta			
Material	Grava Triturada		
N° de muestra	1	2	3
Tara (g)	2930	2930	2930
Tara + material (g)	18,800	18,800	18,800
Masa material (g)	15,870	15,870	15,870
Volumen (cm ³)	10,600	10,600	10,600
Masa Unitaria (g/cm ³)	1.4971	1.4971	1.4971
Masa Unitaria (Kg/m ³)	1,497.1	1,497.1	1,497.1
Promedio (Kg/m ³)	1,497.1		

6.3.3. Densidad relativa y absorción del agregado fino.

La densidad relativa del agregado fino se determinó con ayuda de la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014. Los resultados se muestran en la Tabla 53.

Tabla 53. Densidad relativa en arena volcánica.

Densidad relativa	
Material	Arena Volcánica
N° de muestra	1
Masa material seco (g)	300
Masa matraz + agua (g)	773.5
Masa matraz + agua + muestra (g)	948.1
Densidad relativa (g/cm ³)	2.39
Promedio (g/cm ³)	2.39



La absorción del agregado fino se determinó con ayuda de la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014. Los resultados se muestran en la Tabla 54.

Tabla 54. Porcentaje de absorción en arena volcánica.

Porcentaje de absorción		
Material	Arena Volcánica	
N° de muestra	1	2
Masa húmeda (g)	300	300
Masa seca (g)	284	285
Agua absorbida (g)	16	15
% Absorción	5.63	5.20
Promedio (%)	5.42 > 4 (Alta absorción)	

6.3.4. Densidad relativa y absorción del agregado grueso.

La densidad relativa del agregado grueso se determinó con base en la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014. Los resultados se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55. Densidad relativa en grava triturada.

Densidad relativa			
Material	Grava Triturada		
N° de muestra	1	2	3
Masa superficialmente seca (g)	303.2	303.8	301.1
Volumen (cm ³)	116	116	122
Densidad relativa (g/cm ³)	2.61	2.62	2.47
Promedio (g/cm ³)	2.57		

La absorción del agregado grueso se determinó con base en la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014. Los resultados se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56. Porcentaje de absorción en grava triturada.

Porcentaje de absorción		
Material	Grava Triturada	
N° de muestra	1	2
Masa húmeda (g)	301.2	300.4
Masa seca (g)	297.9	297.2
Agua absorbida (g)	3.3	3.2
% Absorción	1.11	1.08
Promedio (%)	1.095 < 2 (Baja absorción)	

6.3.5. Materiales finos que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado.

Los resultados obtenidos se basan en los procedimientos de la norma NMX-C-084-ONNCCE-2006, estos se muestran en la Tabla 57.



Tabla 57. Material que pasa la malla N° 200.

Material que pasa la malla N° 200			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Masa inicial seca (g)	597.7	597.7	598.45
Masa final seca después de lavado (g)	553.8	552.5	561.6
% A	7.34	7.56	6.16
Promedio (%)	7.02		

Las especificaciones permisibles para el porcentaje de material fino que pasa la malla N° 200 se muestran en la Tabla 58.

Tabla 58. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].

Especificación		
Porcentaje Máximo permisible		
Concepto	*	/
En concreto sujeto a abrasión	5	3
En concretos presforzados	8	-
En otros concretos	15	5
(*) NMX-C-111-ONNCCE-2014		(/) ASTM-C-33-03

De acuerdo con la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 la arena estudiada podría ser utilizada en concretos presforzados y otros tipos de concreto.

6.3.6. Terrones de arcillas en agregados.

El porcentaje de terrones de arcilla fueron determinados con base a lo marcado en la norma NMX-C-071-ONNCCE-2004. Los resultados se encuentran contenidos en la Tabla 59.

Tabla 59. Terrones de arcilla en arena.

Terrones de Arcilla			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Masa inicial seca (g)	100	100	100
Masa final seca (g)	97.1	96	92.5
% Terrones	2.9	4	7.5
Promedio (%)	4.8		

Las especificaciones permisibles para el porcentaje de terrones de arcilla se marcan en la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 se muestran en la Tabla 60.



Tabla 60. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03].

Especificación		
Porcentaje Máximo permisible		
Concepto	*	/
Grupos de arcilla y partículas deleznales	3	3
(*) NMX-C-111-ONNCCE-2014		(/) ASTM-C-33-03

De acuerdo con las especificaciones de la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 y la ASTM-C-33-03 la arena estudiada se encuentra en un estado excesivo de terrones de arcilla, así como de material fino que no aporta resistencia mecánica (material que pasa la malla N° 200), por lo tanto se recomienda hacer un lavado para eliminar los excesos y obtener un agregado de mejor calidad.

6.3.7. Impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.

Las impurezas orgánicas en el agregado fino se determinaron con ayuda de la norma NMX-C-088-ONNCCE-1997. Los resultados se muestran en la Tabla 61.

Tabla 61. Impurezas orgánicas en agregado fino. Especificaciones permisibles [NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-40-04].

Colorimetría		
Material	Arena Volcánica	
N° de muestra	1	2
Materia orgánica (escala colorimétrica)	2	2
(*) (/) Máximo permisible: 3		
(*) NMX-C-111-ONNCCE-2014		(/) ASTM-C-40-04

Los resultados correspondientes a la cantidad de materia orgánica presentes en el agregado fino permanecen dentro del límite aceptado por las normativas.

6.3.8. Valor de equivalente de arena.

El valor de equivalente de arena se determinó con base en la norma NMX-C-416-ONNCCE-2003. Los resultados se muestran en la Tabla 62.

Tabla 62. Equivalente de arena en arena volcánica.

Equivalente de Arena			
Material	Arena Volcánica		
N° de muestra	1	2	3
Lectura de arcilla	4.47	5	4.7
Lectura de arena	4.1	4.5	4.4
%Equivalente de arena	91.72	90	93.62
Promedio (%)	91.78		



6.3.9. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.

Los resultados se obtuvieron con base en el procedimiento marcado NMX-C-077-ONNCCE-1997. Los resultados correspondientes a la muestra 1 de la arena se muestran en la Figura 107.

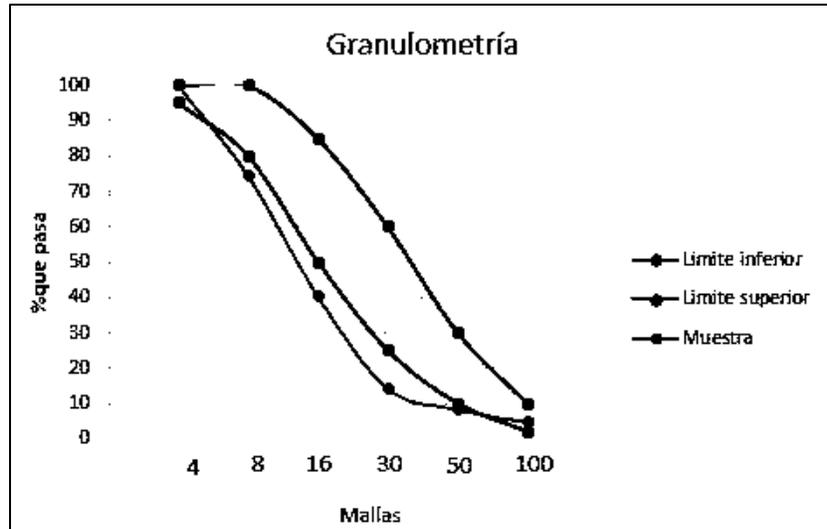


Figura 107. Resultados granulométricos de la muestra 1 de la arena.

Se observa que la arena presenta un módulo de finura fuera de norma, pues es mayor a 3.2. La Figura 107 muestra que existe carencia de los tamaños 8, 16, 30 y 50 al estar por debajo de la curva que marca el límite inferior. Los resultados correspondientes a la muestra 2 de la arena se muestran en la Figura 108.

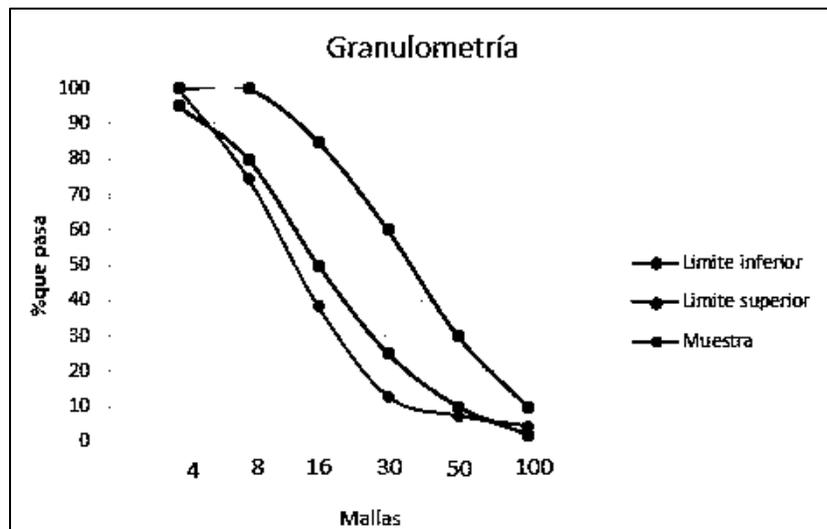


Figura 108. Resultados granulométricos de la muestra 2 de la arena.



La Tabla 63 muestra el módulo de finura promedio de ambas muestras de arena.

Tabla 63. Módulo de Finura promedio.

Resultado promedio de ambas muestras
Módulo de Finura: 3.6

De acuerdo con la norma NMX-C-111-ONNCCE-2014 y ASTM-C-33-03 que establecen que el M.F. debe comprender entre 2.3 y 3.2 para especímenes elaborados en laboratorio, la arena contiene mucho material fino, que no aporta resistencia mecánica. Este resultado es coherente con los obtenidos en los ensayos de material que pasa la malla N° 200 y porcentaje de terrones de arcilla. En conjunto nos hablan de una arena con gran presencia de finos.

La Tabla 64 muestra el análisis granulométrico realizado a la muestra de grava triturada de acuerdo a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997.

Tabla 64. Análisis granulométrico en grava triturada. Masa en g.

Análisis Granulométrico				
Malla N°	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1"	0	0	0	100
3/4"	2,330.7	15.51	15.51	84.49
1/2"	10,200	67.89	83.4	16.6
3/8"	1,610.9	10.72	94.12	5.88
1/4"	825.6	5.49	99.61	0.39
Retenido 4	58.2	0.39	100	0
Total	15,025.4	-	-	-
Tamaño Máximo	3/4"			

6.4. DEL CEMENTO PORTLAND.

6.4.1. Consistencia normal.

La consistencia normal del cemento se determinó con base en la norma NMX-C-057-ONNCCE-2010. Los resultados se muestran en la Tabla 65.

Tabla 65. Consistencia Normal.

Consistencia Normal	
Masa de cemento (g)	350
Mililitros de agua (ml)	110
Penetración (mm)	10
Consistencia Normal (%)	31.43



6.4.2. Tiempos de fraguado.

Los tiempos de fraguado del cemento se determinaron con base en la norma ASTM-C-266-04, los resultados se muestran en la Tabla 66.

Tabla 66. Tiempos de fraguado del cemento Portland.

Tiempos de Fraguado	
Fraguado Inicial	4 horas
Fraguado Final	10 horas 21 min

6.4.3. Densidad del cemento.

Debido a que el único matraz de Le Chatelier necesario para la determinación de la densidad del cemento Portland se encontraba fuera de uso, no se llevó a cabo el ensaye en esta investigación, y se tomó el valor obtenido en otras investigaciones pasadas correspondiente al mismo tipo y marca de cemento. Este valor se muestra en la Tabla 67.

Tabla 67. Densidad del cemento Portland.

Densidad del cemento
3.05 g/ml

6.5. DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.

6.5.1. Consistencia normal CPC-CBC.

Se realizaron ensayos de consistencia normal de las combinaciones de cemento Portland con los 3 porcentajes de sustitución tentativos, siguiendo el mismo procedimiento que marca la norma NMX-C-057-ONNCCE-2010. Los resultados se muestran en la Tabla 68.

Tabla 68. Consistencia Normal CPC-CBC.

Consistencia Normal CPC-CBC			
Porcentaje de Sustitución	5%	10%	20%
Masa de cemento (g)	332.5	315	280
Masa de ceniza (g)	17.3	35	70
Mililitros de agua (ml)	131	150	182
Penetración (mm)	9	9	10
Consistencia Normal (%)	37.43	42.86	52

Si se considera que el resultado de consistencia normal del cemento como punto de comparación se puede determinar la cantidad de agua añadida por acción de la



incorporación de la ceniza de bagazo de caña. Los resultados de agua añadida las tres sustituciones se muestran en la Tabla 69.

Tabla 69. Comparativa consistencia normal de CPC y CPC-CBC.

Comparativa de Consistencia Normal CPC con mezclas CPC-CBC			
Concepto	C.N. (%)	Agua (ml)	Agua añadida por efecto de CBC
CPC	31.43	110	-
CPC-5% CBC	37.43	131	19.09%
CPC-10% CBC	42.86	150	36.36%
CPC-20% CBC	52	182	65.45%

Se observa que al incrementar el porcentaje de CBC las pastas de cemento requieren mayor cantidad de agua para mantener la consistencia normal, esto es atribuido a la estructura porosa de las partículas de la ceniza. Se puede intuir que la mezcla correspondiente al 20% de sustitución provocaría una alta demanda de agua en la mezcla de concreto provocando la aglomeración de los agregados y el material cementante.

6.5.2. Tiempos de fraguado CPC-CBC.

Los tiempos de fraguado de las combinaciones de cemento Portland con las sustituciones tentativas de ceniza de bagazo de caña se muestran en la Tabla 70.

Tabla 70. Tiempos de fraguado CPC-CBC.

Tiempos de Fraguado CPC-CBC		
Concepto	Fraguado Inicial	Fraguado Final
CPC-5% CBC	6 horas	12 horas 52 minutos
CPC-10% CBC	6 horas 14 minutos	12 horas 41 minutos

No se llevó a cabo la determinación de los tiempos de fraguado correspondientes al 20% de sustitución por su alta demanda de agua y por consiguiente del aumento de la relación agua/cemento en la mezcla. Se observa además, que la combinación de CPC-CBC retarda los tiempos de fraguado en un tiempo aproximado de 2 horas.

6.5.3 Análisis granulométrico de la CBC. (Previo y posterior al proceso de pulverización).

Se llevó a cabo un análisis granulométrico antes y después del proceso de pulverización de la ceniza de bagazo de caña. Los resultados correspondientes al análisis granulométrico de la muestra 1 se presentan en la Tabla 71.



Tabla 71. Análisis granulométrico de CBC previo al pulverizado. Muestra 1.Masa en g.

Análisis Granulométrico de CBC				
Malla N°	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
16	4.4	1.97	1.97	98.03
30	7.8	3.50	5.47	94.53
50	17.3	7.76	13.23	86.77
100	40	17.94	31.17	68.83
200	50.5	22.65	53.82	46.19
Pasa 200	103	46.19	100	0
Total	223	-	-	-
Tamaño predominante	Pasa 200			

Los resultados correspondientes al análisis granulométrico de la muestra 2 se presentan en la Tabla 72.

Tabla 72. Análisis granulométrico de CBC previo al pulverizado. Muestra 2.Masa en g.

Análisis Granulométrico de CBC				
Malla N°	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
16	0	0	0	100
30	6.2	2.78	2.78	97.22
50	20.3	9.10	11.88	88.12
100	36.1	16.18	28.06	71.94
200	45.2	20.26	48.32	51.68
Pasa 200	115.3	51.68	100	0
Total	223.1	-	-	-
Tamaño predominante	Pasa 200			

Predominan los tamaños retenidos 50, 100, 200 y pasa N° 200. La masa inicial en cada muestra fue 230 g. Se pierden 7 g en promedio en el proceso. Los resultados correspondientes al análisis granulométrico de la muestra de caña después del proceso de pulverización se muestran en la Tabla 73.

Tabla 73. Análisis granulométrico de la CBC post-pulverizado. Masa en g.

Análisis Granulométrico de CBC				
Malla N°	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
16	0	0	0	100
30	0	0	0	100
50	0	0	0	100
100	0.3	0.13	0.13	99.87
200	15.5	6.92	7.05	92.95
Pasa 200	208.2	92.95	100	0
Total	224	-	-	-
Tamaño predominante	Pasa 200			



El proceso de pulverización es altamente efectivo, pues consiguió un 92.95% de CBC que pasa la malla N° 200, comparado con el 48.94% que pasaba antes del proceso.

6.6. DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

6.6.1. Flujo de asentamiento del concreto.

El flujo de asentamiento de las mezclas elaboradas (testigo y CPC-10%CBC) se llevó a cabo con base a la norma ASTM-C-1611. Los resultados se muestran en la Tabla 74.

Tabla 74. Resultados del asentamiento del concreto.

Mezcla de concreto	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Promedio (cm)
CPC-10%CBC	73	69	71
Testigo	71	68	69.5

La mezcla testigo presentó segregación de los agregados gruesos y tuvo una mayor extensión que la mezcla elaborada con CBC. Esto se debe a que al incluir aditivo en la mezcla testigo ésta se volvió muy fluida con una exudación excesiva, por lo tanto se extendió más al no tener la suficiente cohesión entre la pasta y el agregado, además presentó un halo. La mezcla con ceniza de CBC se extendió con gran fluidez, no presenta segregación y su aspecto es homogéneo.

6.6.2. Elaboración de especímenes.

Cada prisma y cada cilindro con CBC fue excluido del proceso de varillado y únicamente fueron golpeados con el mazo de goma para eliminar posibles burbujas de aire atrapado. Los cilindros se golpearon en 15 ocasiones distribuyendo los golpes en toda la superficie del molde, mientras que los prismas recibieron un total de 34 golpes, distribuidos como se muestra en la figura 109.

Los especímenes elaborados para la mezcla testigo se realizaron conforme a lo especificado en la norma correspondiente. En el caso del concreto con CBC algunos elementos presentaron poros internos descubiertos en las pruebas mecánicas destructivas, atribuidos a la falta de varillado en el proceso de elaboración. El tamaño de poro más grande registrado fue de hasta 2.5 cm de longitud y hasta 1.4 cm de profundidad. Los poros mencionados se aprecian en la Figura 110.

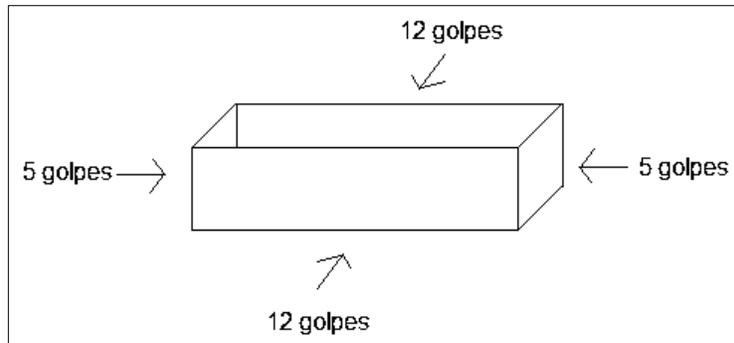


Figura 109. Golpes en elaboración de prismas. (Diagrama: E. González Castro).



Figura 110. Poros internos en concreto CPC-10%CBC. (Fotografías: E. Glez. Castro).

Algunos prismas testigo presentaron segregación variable entre los 2 cm y 4 cm, se tuvo un elemento que llegó hasta 6 cm de segregación en su parte más desfavorable, influyendo en gran medida en su desempeño a esfuerzos por flexión.



Figura 111. Segregación de agregados gruesos en vigas testigo. (Fotografías: E. González Castro).

Ambas mezclas tienen la característica de ser muy pesadas y de difícil manejo manual, esto reduce su trabajabilidad, pues el proceso de transporte se hace pesado para el ser humano y con el tiempo la eficiencia del mismo baja, y al hacerlo la calidad de los elementos se reduce.



6.7. DEL CONCRETO ENDURECIDO. PRUEBAS FÍSICO-MECÁNICAS.

Los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia mecánica se presentan a continuación. Cada gráfico presenta los valores promedio obtenidos complementados por barras de error, marcando los valores máximos y mínimos:

6.7.1. Resistencia a la compresión.

La Figura 112 muestra una comparativa de los esfuerzos a compresión promedio de ambas mezclas por cada edad de prueba. Se observa que la muestra CPC-10%CBC supera a la muestra testigo en 4 de las 6 edades de prueba. El esfuerzo máximo mostrado por la mezcla testigo se dio a los 60 días y corresponde a 46.74 MPa (117% del f'_c de proyecto) y la mezcla CPC-10%CBC consiguió un esfuerzo de 47.45 MPa (118.89% del f'_c de proyecto) a la edad de 90 días. De acuerdo a las especificaciones del cemento Portland utilizado (CPC 30R RS) se esperaba una resistencia de al menos 30 MPa a los 28 días, superada por la mezcla CPC-10%CBC, quedando por debajo de este valor la mezcla testigo. Esto puede ser atribuido al efecto del fluidificante el cual favoreció a la combinación de CPC con CBC y perjudicó a la mezcla testigo. Las variaciones descendentes en los esfuerzos de compresión de una edad de prueba a otra mayor se atribuyen al proceso de fabricación. La falla en los agregados se presentó generalmente a la edad de 60 días y en las edades anteriores la falla se presentó en la interfase agregado-pasta de cemento.

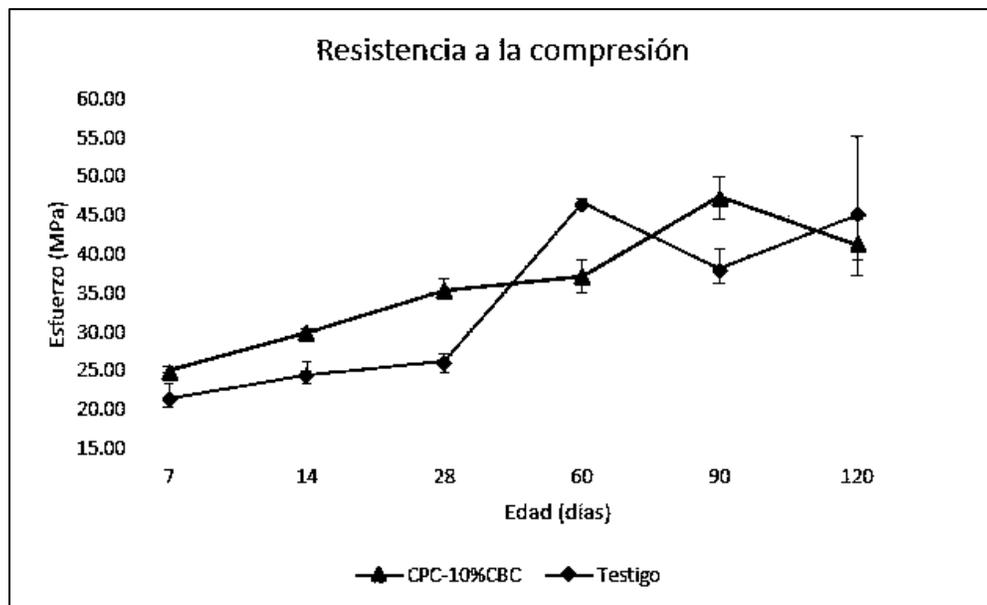


Figura 112. Resultados del esfuerzo a compresión promedio por edad de prueba.



6.7.2. Módulo de Elasticidad Estático.

La Figura 113 muestra los resultados calculados para el módulo de elasticidad estático por edad de prueba para cada mezcla elaborada. El valor del módulo de elasticidad estático depende de varias variables, destacando la resistencia y características de los agregados gruesos. A mayor resistencia a la compresión mayor es el módulo de elasticidad estático, los valores presentados son aproximados ya que se obtuvieron por medio de la ecuación 23 y no por medio de una relación esfuerzo-deformación. Al depender de los esfuerzos a compresión, la tendencia de la gráfica es la misma que la mostrada en la figura 112 y solamente varía en magnitud. De acuerdo a la tabla 38 “Módulos de Elasticidad dependiendo de la resistencia del concreto” se esperaba obtener un valor aproximado de 30,000 MPa (haciendo la conversión de unidades) lo cual se cumplió para ambas mezclas y se observa en la gráfica. Es importante conseguir módulos altos, pues estos se traducen en pocas deformaciones presentes a esfuerzos elevados.

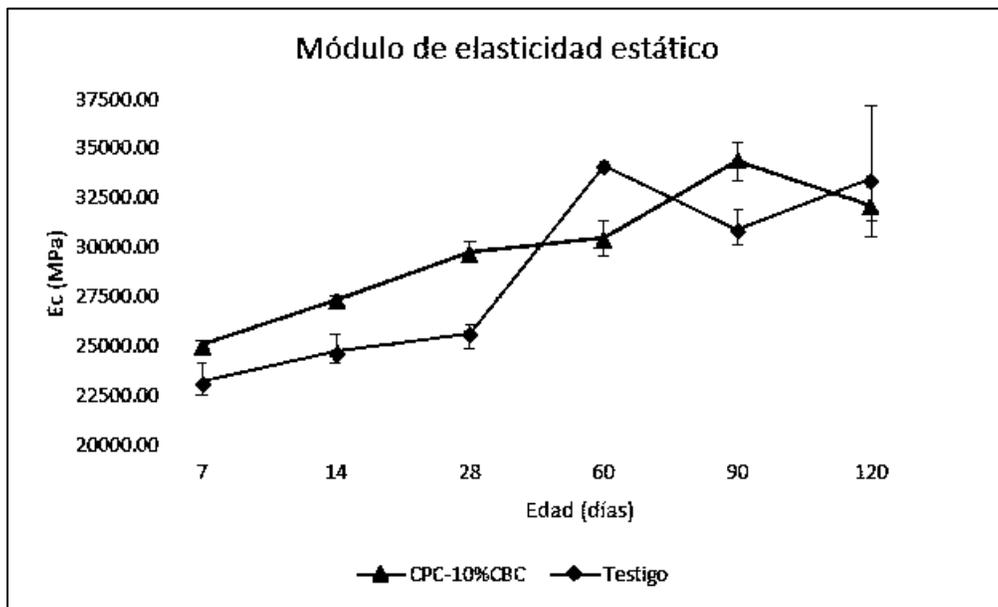


Figura 113. Resultados del módulo de elasticidad estático calculado por edad de prueba.

6.7.3. Resistencia a la compresión diametral. (Tensión indirecta).

La Figura 114 muestra los resultados obtenidos para los esfuerzos promedio a la compresión diametral (tensión indirecta) de cada mezcla elaborada para cada edad de prueba.



La mezcla testigo presentó esfuerzos mayores a la tensión comparada con la mezcla CPC-10%CBC, sin embargo el comportamiento de la mezcla con CBC presentó un incremento en su resistencia de manera proporcional a la edad. La resistencia a la tensión del concreto hidráulico se considera aproximadamente el 10% de su resistencia a la compresión. La mezcla testigo alcanzó un esfuerzo máximo de 4.53 MPa a la edad de 120 días, correspondiente al 11.36% del f_c de proyecto, por su parte la mezcla CPC-10%CBC alcanzó un esfuerzo máximo de 4.09 MPa a la edad de 120 días correspondiente a un 10.25% del f_c de proyecto, por lo que se comprueba que el valor de la resistencia a la tensión representa alrededor del 10% del esfuerzo a compresión. El modo de falla de los cilindros ocurrió de manera similar a lo sucedido en los cilindros sometidos a esfuerzos de compresión, fallando la interfase agregado-pasta de cemento en las primeras edades y presentando falla del agregado a partir de los 60 días de edad.

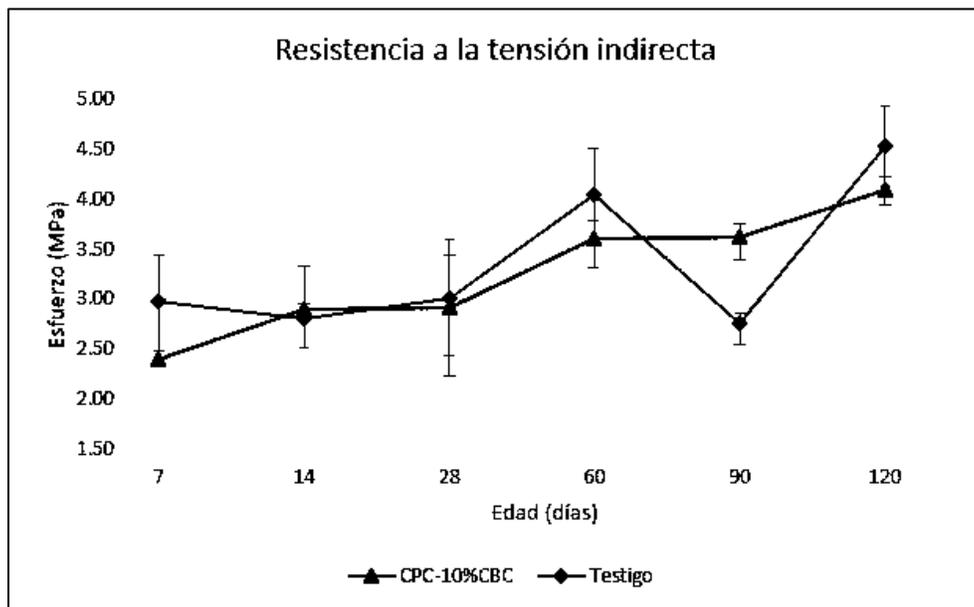


Figura 114. Resultados del esfuerzo a tensión indirecta promedio por edad de prueba.

6.7.4. Resistencia a la flexión.

La Figura 115 muestra los resultados obtenidos para los esfuerzos promedio a la flexión (valores del módulo de ruptura) de cada mezcla elaborada para cada edad de prueba. Se observa que la mezcla testigo superó a la mezcla sustituida con CBC en todas y cada una de las edades de prueba. En ambas mezclas la falla del agregado debido a los esfuerzos internos se presentó a partir de la edad de 28 días, en las edades más tempranas se presentaron problemas de adherencia entre agregados y la pasta. La tendencia de la gráfica en ambas mezclas es contraria al



comportamiento esperado, principalmente en la mezcla testigo, la que presenta su MR mayor a la edad de 14 días, lo que se atribuye al proceso de elaboración. A pesar de que algunas vigas presentaron segregación como se menciona al inicio del capítulo en la sección de “*Elaboración de especímenes*” los valores de MR no son bajos. Usualmente se considera el esfuerzo a la flexión de un concreto hidráulico como un valor comprendido entre el 10% y el 20% de su esfuerzo a la compresión, en la mezcla testigo se obtuvieron valores comprendidos entre el 13.61% y el 19.04% del f'_c de diseño, en la mezcla CPC-10%CBC se obtuvieron valores comprendidos entre el 11.13% y el 15.65% del f'_c de diseño. Cabe resaltar que estas comparaciones en relación al f'_c serían más certeras ambas pruebas se realizaran a muestras de un mismo elemento. El módulo de ruptura puede ser calculado por aplicación de carga en el centro de la viga y aplicación de carga en los tercios de la misma, el cual es más bajo, en algunas ocasiones hasta en un 15%, lo que significa que se probaron las vigas en su peor escenario.

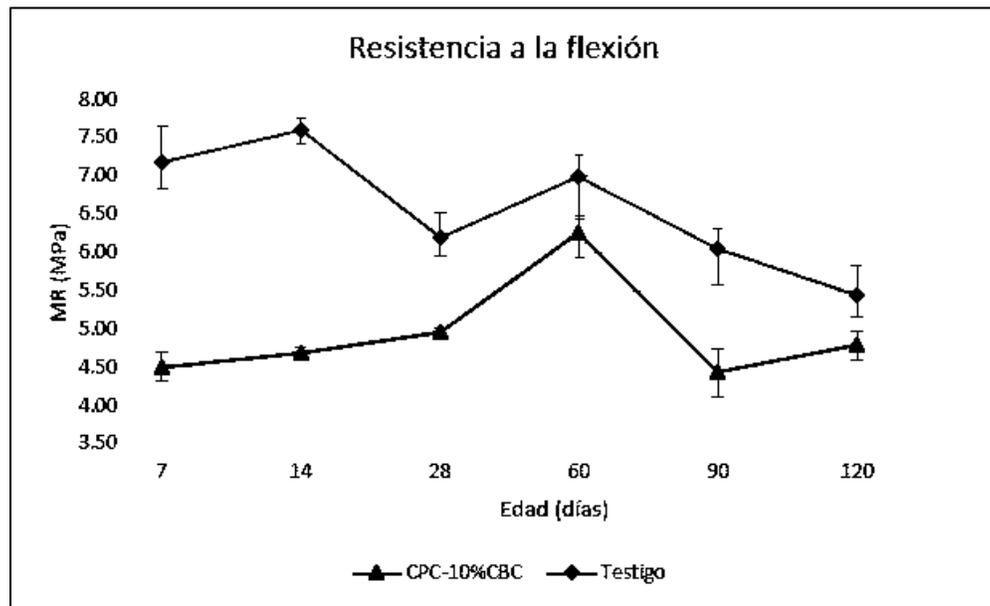


Figura 115. Resultados del esfuerzo a flexión promedio por edad de prueba.

6.7.5. Frecuencia de resonancia.

La Figura 116 muestra los resultados promedio de la frecuencia de resonancia, obtenidos para calcular el módulo de elasticidad dinámico en ambas mezclas, utilizando los valores promedio de la velocidad de pulso ultrasónico. Se observa que los valores de módulo de elasticidad estático alcanzados en las últimas edades de prueba son muy similares a los del módulo dinámico. El módulo de elasticidad dinámico puede ser evaluado experimentalmente a partir de la prueba



de resonancia y la densidad del material, y a través de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Mediante el método de la frecuencia de resonancia (ondas elásticas que viajan a través del eje longitudinal del elemento) se determinaron las frecuencias en ambas mezclas en vigas a la edad de 130 días. Los resultados obtenidos mediante el método de frecuencia de resonancia se presentan en la Tabla 75 y corresponden al promedio de 6 prismas por cada mezcla, calculados utilizando la ecuación 27 anteriormente mostrada.

Tabla 75. Módulo de elasticidad dinámico calculado mediante la frecuencia de resonancia.

Módulo de elasticidad dinámico				
Mezcla	Frecuencia (Hz)	Longitud (m)	Densidad (Kg/m ³)	Ed (MPa)
Testigo	3463	0.60	2260.49	39,039.46
CPC-10%CBC	3307.8	0.60	2259.26	35,602.53

Analizando los resultados de la Tabla 75 se observa que la densidad de ambas mezclas es prácticamente igual, sin embargo el testigo tiene un módulo de elasticidad dinámico mayor al de la mezcla CPC-10%CBC, lo que significa que el testigo es un concreto más rígido.

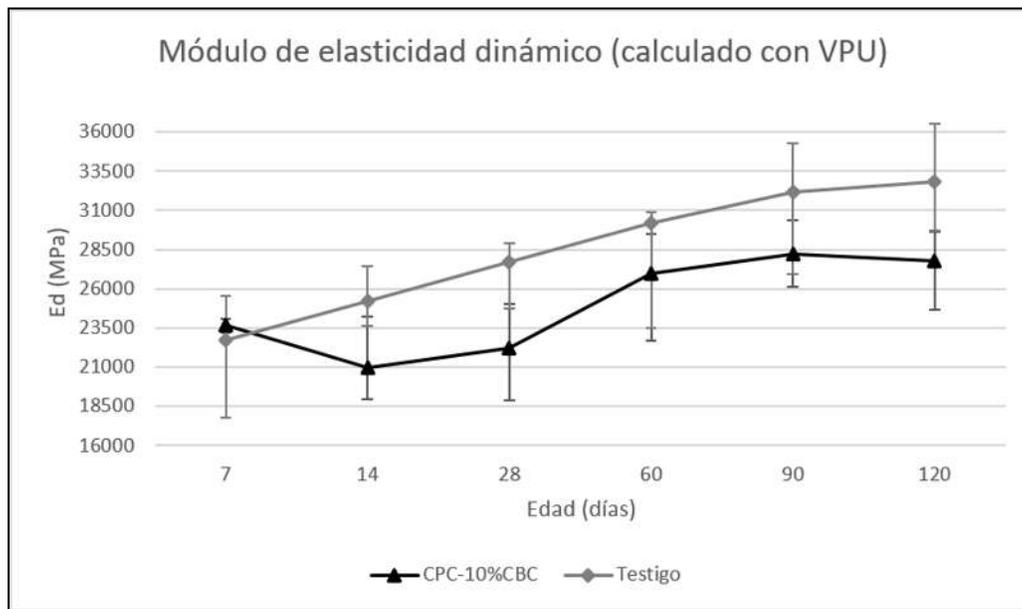


Figura 116. Resultados del módulo de elasticidad dinámico promedio por edad de prueba.



6.8. DEL CONCRETO ENDURECIDO. PARÁMETROS DE DURABILIDAD.

Los resultados correspondientes a los ensayos de durabilidad se presentan a continuación. Estos son de vital importancia para determinar si los objetivos planteados en el inicio de la investigación se cumplen e identificar los puntos fuertes así como las deficiencias que presentan las mezclas elaboradas, y así poder mejorarlas en investigaciones futuras.

6.8.1. Velocidad de Pulso Ultrasónico.

La Figura 117 muestra los resultados promedio obtenidos en relación a la velocidad de pulso de ambas mezclas. Cada prueba ejecutada fue realizada en condiciones saturadas del espécimen, inmediatamente después de sacarlos de la pila de curado, y cubriendo al espécimen con franelas húmedas para conservar sus condiciones de saturación. La velocidad de pulso aplicada a un elemento en estado saturado puede ser mayor hasta en un 5% que la obtenida de un concreto seco. Se observa que los valores de VPU incrementaron a partir de la edad de 14 días en la mezcla con CBC, lo cual puede deberse en gran medida a que los especímenes de dicha mezcla no fueron varillados. El incremento de la velocidad de pulso se interpreta como un incremento en la uniformidad del concreto por la reducción de vacíos y posibles grietas internas por acción de la hidratación de la pasta de cemento. De acuerdo a los parámetros especificados en la Red DURAR presentes en la Tabla 40, la mezcla testigo se clasifica como un concreto durable al haber alcanzado valores de VPU de 4421.67 m/s a la edad de 120 días, y la mezcla CPC-10%CBC se clasifica como un concreto durable al haber alcanzado un valor promedio de 4130.17 m/s a la edad de 90 días.

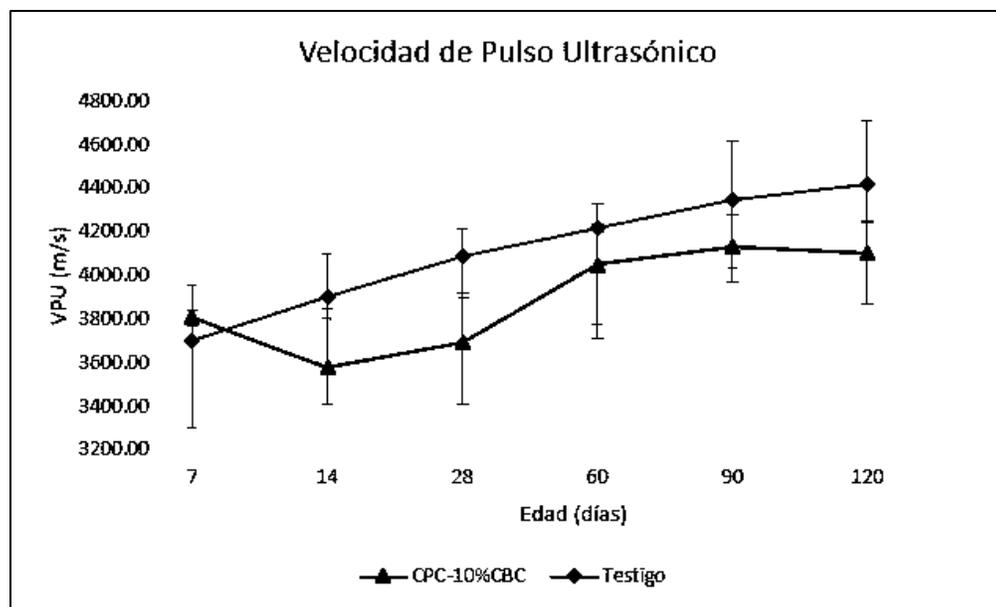


Figura 117. Resultados de la velocidad de pulso promedio por edad de prueba.



6.8.2. Resistividad eléctrica.

La Figura 118 muestra los resultados promedio obtenidos en relación a la resistividad en ambas mezclas de concreto hidráulico. Se observa que en general la mezcla testigo superó a la mezcla con CBC, la cual presentó aumentos más pequeños con el pasó de los días e hidratación de la pasta de cemento. La mezcla testigo presenta un salto muy marcado en el período de los 60 a los 90 días y posteriormente disminuye un poco a la edad de 120 días, lo que se atribuye a que corresponde a la primer mezcla elaborada, por ende la mezcla con mayor variación en la elaboración de los especímenes. Ambas mezclas alcanzaron valores bajos de resistividad (la baja resistividad indica una alta conductividad), la mezcla testigo presentó un valor máximo de 8.47 K Ω -cm a la edad de 90 días y la mezcla CPC-10%CBC un máximo de 5.46 K Ω -cm a la misma edad de prueba. De acuerdo a las especificaciones marcadas por la Red DURAR contenidas en la Tabla 43, el riesgo de corrosión de ambas mezclas es alto, ya que no se sobrepasa el límite de 10 K Ω -cm. Un factor que puede intervenir en la resistividad de un elemento de concreto es el grado de saturación de los poros, y en menor grado la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

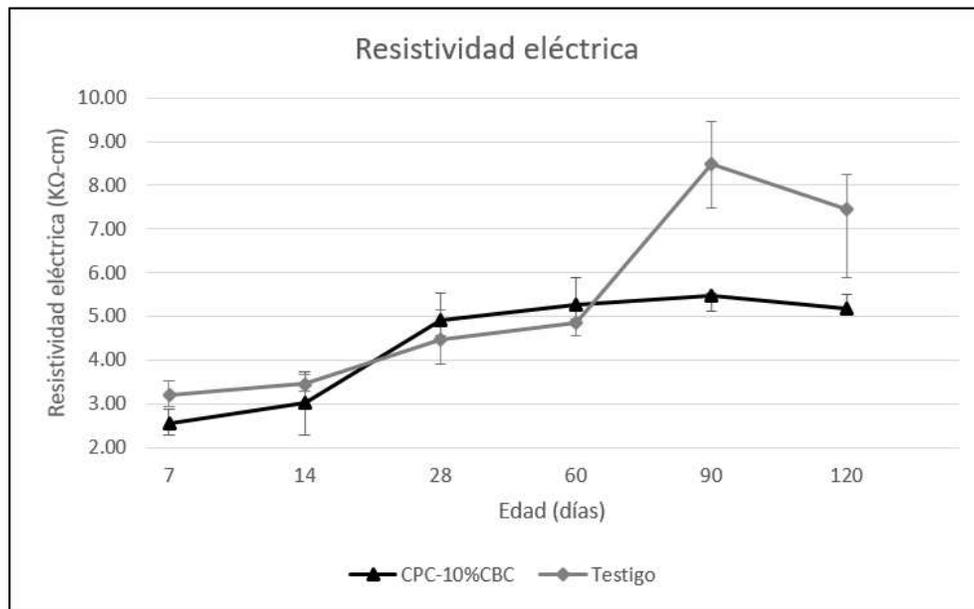


Figura 118. Resultados de la resistividad eléctrica promedio por edad de prueba.

6.8.3. Determinación de la absorción capilar y porosidad efectiva.

El inicio de la prueba de capilaridad realizó a los 155 días de edad para ambas mezclas de concreto elaboradas. La Tabla 76 contiene una serie de datos calculados para la prueba de Fagerlund correspondientes a una rodaja tomada de



la parte superior de un cilindro de concreto de la mezcla CPC-10%CBC, obtenidos mediante el procedimiento detallado en la sección 5.7.3. El análisis presentado a continuación se llevó a cabo para cada tercio (inferior, medio y superior) de los cuatro cilindros ensayados (2 cilindros por mezcla). Posteriormente se realizó un promedio de los coeficientes obtenidos los cuales se presentan en las Figuras 120 a la 123.

Tabla 76. Serie de datos para el tercio superior de un cilindro de la mezcla CPC-10%CBC.

Wo (Kg) = 0.7029		Área (m ²) = 0.007854		
Tiempo	Raíz Cuadrada	Altura (z)	Wt	(Wt-Wo)/Ao
(s)	(s ^{1/2})	(m)	(Kg)	(Kg/m ²)
0	0	0.0444	0.7029	0
300	17.32	0.0444	0.7065	0.46
600	24.49	0.0444	0.7073	0.56
900	30.00	0.0444	0.7081	0.66
1,800	42.43	0.0444	0.7092	0.80
3,600	60.00	0.0444	0.7114	1.08
5,400	73.48	0.0444	0.7128	1.26
7,200	84.85	0.0444	0.7143	1.45
14,400	120.00	0.0444	0.7179	1.91
21,600	146.97	0.0444	0.7196	2.13
86,400	293.94	0.0444	0.7301	3.46
172,800	415.69	0.0444	0.7339	3.95
259,200	509.12	0.0444	0.7355	4.15
345,600	587.88	0.0444	0.7365	4.28
432,00	657.27	0.0444	0.7377	4.43
518,400	720.00	0.0444	0.7379	4.46
604,800	777.69	0.0444	0.7386	4.55
691,200	831.38	0.0444	0.7389	4.58
777,600	881.82	0.0444	0.7396	4.67
864,000	929.52	0.0444	0.7396	4.67
950,400	974.88	0.0444	0.7402	4.75
1,036,800	1018.23	0.0444	0.7403	4.76
1,123,200	1059.81	0.0444	0.7409	4.84
1,209,600	1099.82	0.0444	0.7412	4.88
1,296,000	1138.42	0.0444	0.7414	4.90
1,468,800	1211.94	0.0444	0.7418	4.95
1.555,200	1247.08	0.0444	0.7418	4.95

Con 2 de las columnas mostradas en la tabla 76 se elabora la Figura 119, colocando los valores de la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas contra el valor de la columna (Wt-Wo)/Ao en el eje de las ordenadas. En el gráfico se aprecian dos pendientes: la primera que representa la absorción del agua por la muestra y la segunda que representa la saturación del mismo. Al ser más tendidas estas pendientes y asemejar una curva se interpreta que el material no se satura con rapidez y presenta buena resistencia a la penetración del agua y cualquier agente



disuelto en ella, por lo tanto un bajo porcentaje de porosidad efectiva. El cálculo del coeficiente m (resistencia a la penetración) se realiza con los datos de la tabla de cálculo correspondientes al tiempo y altura (cuando z es igual a H , el espesor de la probeta) del punto de quiebre, donde se intersectan ambas pendientes. Los demás coeficientes requeridos obedecen a las ecuaciones mostradas en la sección 5.7.3.

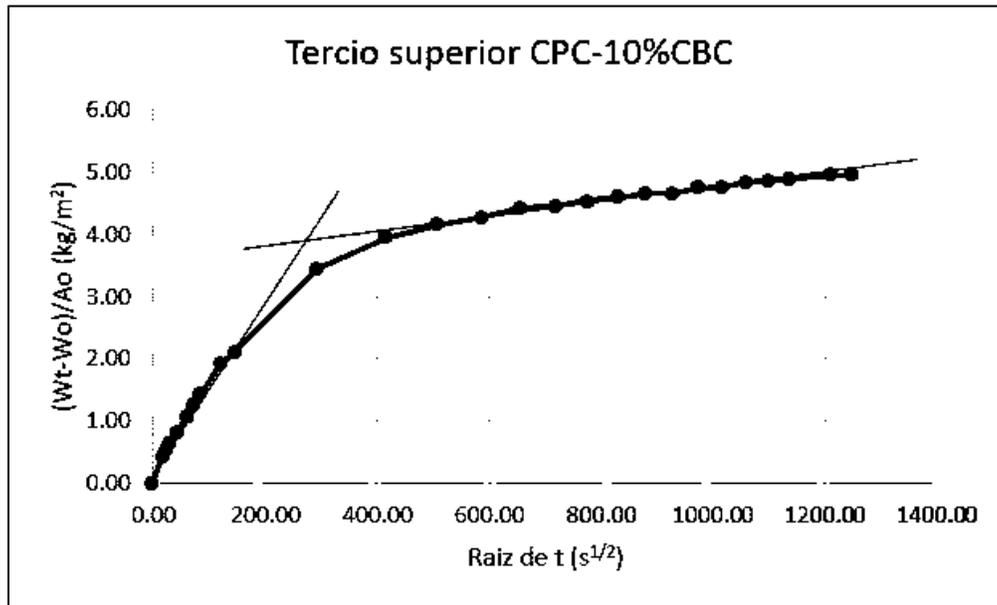


Figura 119. Ensayo de absorción capilar para una rodaja del tercio superior de un cilindro de la mezcla CPC-10%CBC.

La Figura 120 muestra la sorción capilar (S) promedio calculadas.

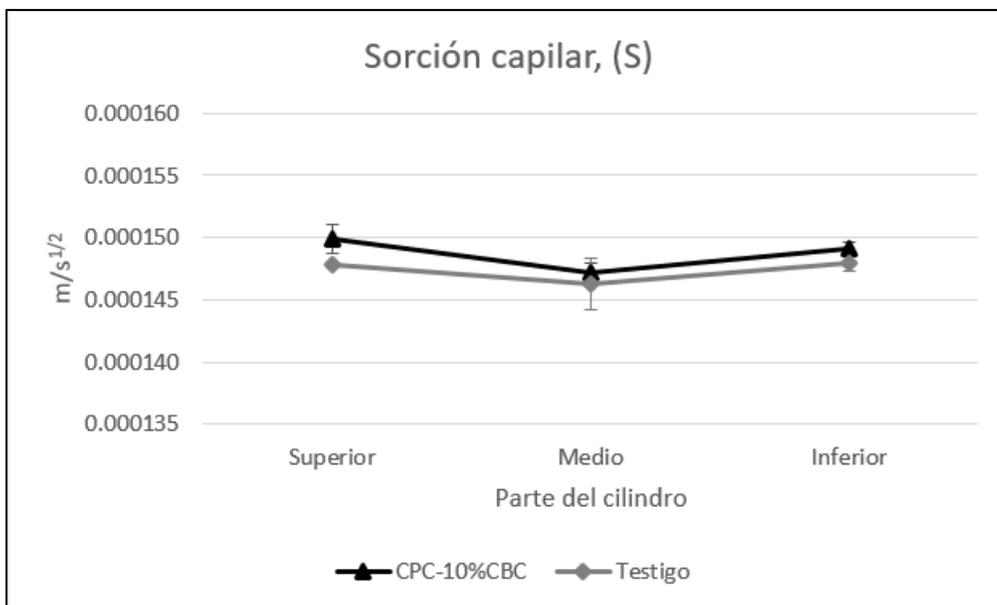


Figura 120. Resultados de la sorción capilar, (S).



El concreto con CBC presenta una mayor sorción de agua por los poros capilares, ligeramente esta sorción es mayor en el tercio superior. De acuerdo a la literatura (Red DURAR), un valor de sorción de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ es apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$, rango en que se encuentran las mezclas elaboradas, con un promedio de $1.49 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla CPC-10%CBC y $1.47 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ para la mezcla testigo. La Figura 121 muestra el coeficiente de absorción capilar (k) promedio calculado, y la Figura 122 los resultados de la resistencia a la penetración (m).

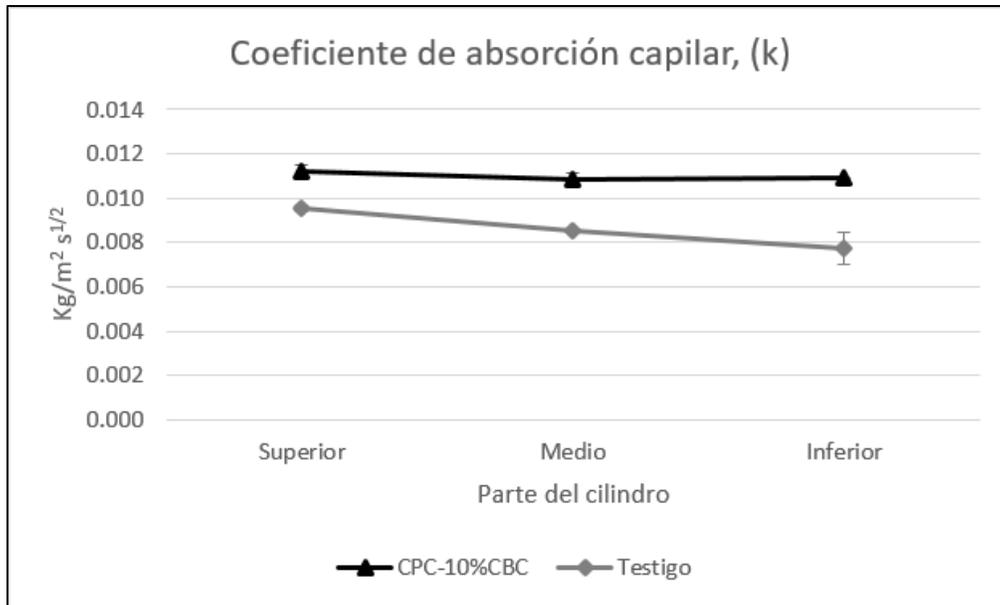


Figura 121. Resultados del coeficiente de absorción capilar, (k).

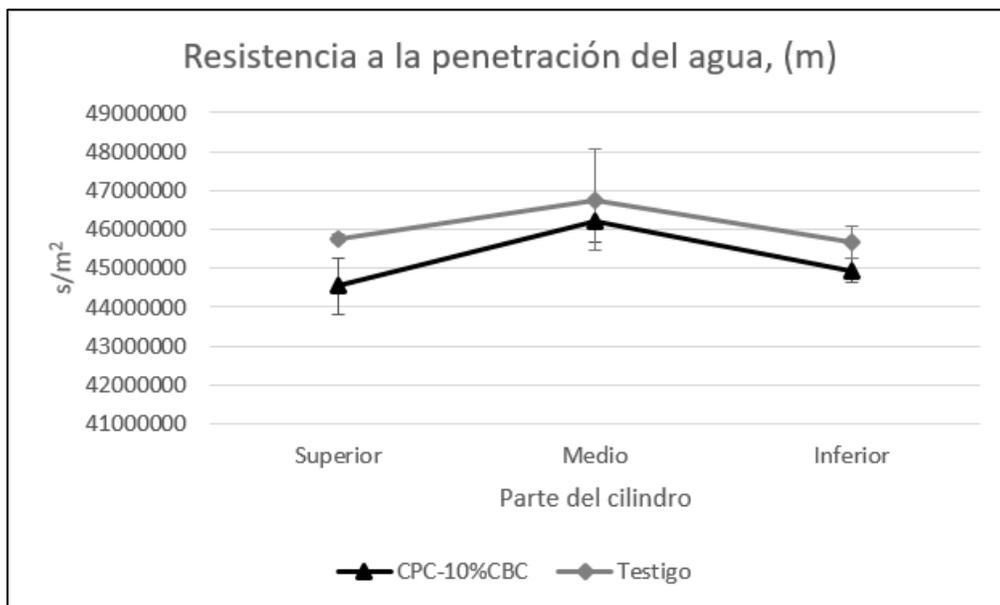


Figura 122. Resultados de la resistencia a la penetración del agua, (m).



La resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla testigo, y también en el tercio medio de ambas mezclas. Se observa que el tercio superior parece ser el más vulnerable, consecuencia probable de la exudación del concreto y posible segregación de algunos agregados. La resistencia a la penetración del agua es un valor de comportamiento inverso a los demás, pues al presentar una muestra una resistencia mayor de ser penetrada significa que la porosidad en la muestra es menor, al igual que la sorción del mismo.

Finalmente la Figura 123 muestra los resultados promedio obtenidos para la porosidad efectiva de ambas mezclas. La porosidad efectiva (ϵ_e) de la mezcla CPC-10%CBC promedio (de los 3 tercios) es igual al 7.4%, y la porosidad efectiva del testigo promedio es igual al 5.8%. De acuerdo con la Red DURAR, valores menores al 10% de porosidad indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10% y 15% indican un concreto de calidad moderada, y un concreto >15% de porosidad indican un concreto de durabilidad inadecuada. Con base en estas referencias se puede concluir que el concreto con sustitución de CBC es de alta durabilidad por absorción.

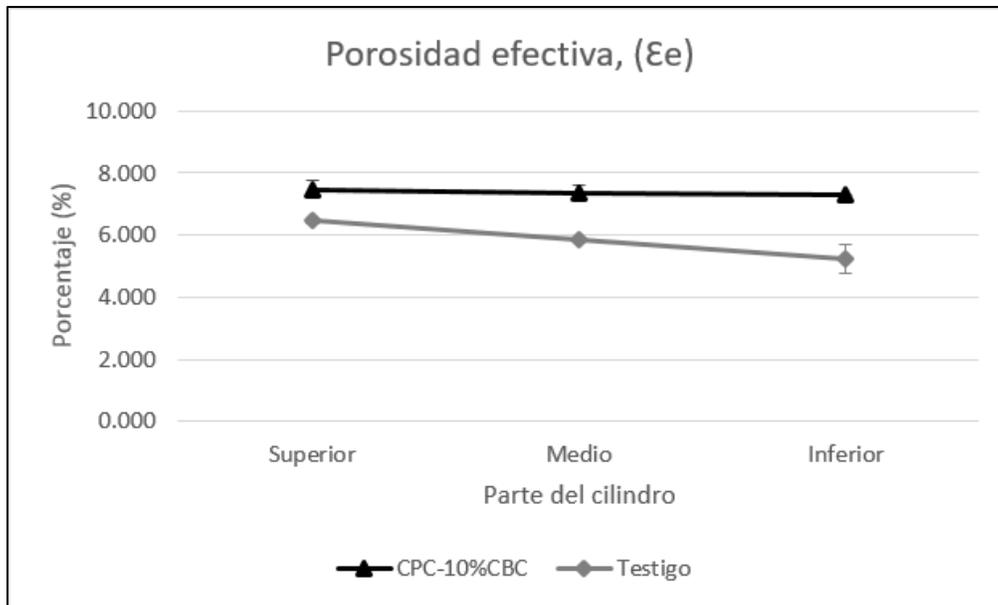


Figura 123. Resultados de la porosidad efectiva, (ϵ_e).

6.8.4. Abrasión del concreto.

Los resultados del ensaye de cántabro se presentan en las Figuras 124 a la 127. Al igual que en el ensaye de porosidad de Fagerlund, se realizó el análisis para cada tercio de los cilindros designados a los 230 días de edad. Los gráficos muestran el promedio de 3 muestras por mezcla, y en cada ciclo de desgaste se incluyen las barras de error correspondientes, señalando los porcentajes máximos



y mínimos de desgaste. La Figura 124 contiene los resultados correspondientes al tercio inferior de los cilindros y se presenta a continuación.

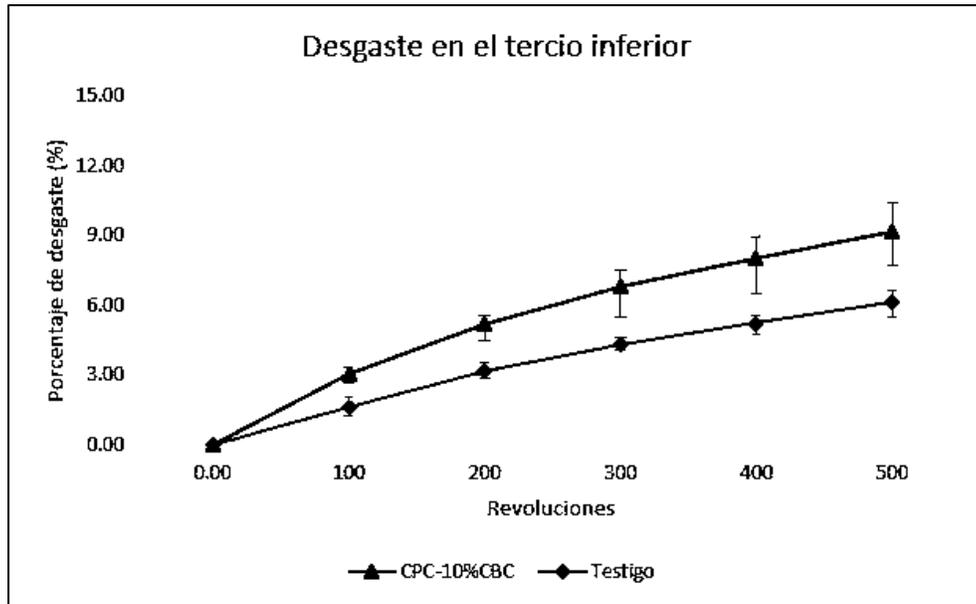


Figura 124. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio inferior.

El concreto elaborado con la CBC presenta una mayor susceptibilidad al desgaste en el tercio medio que el concreto testigo, igualmente el rango de variación es mayor y muy notable en el concreto con CBC, especialmente a medida que los ciclos de desgaste aumentan. La Figura 125 contiene los resultados correspondientes al tercio medio:

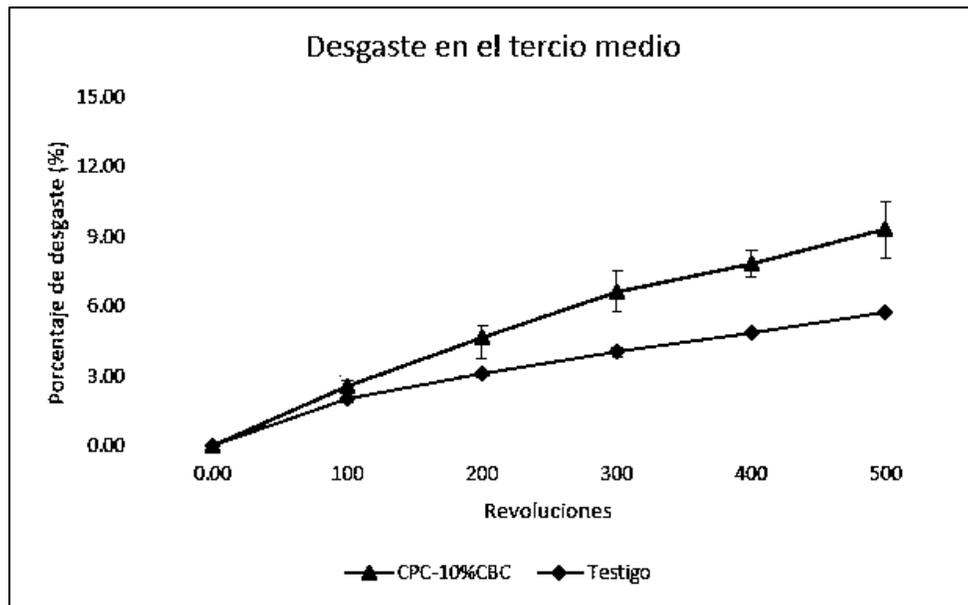


Figura 125. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio medio.



En general, el desgaste producido en el tercio medio es menor que en el tercio inferior. La Figura 126 contiene los resultados correspondientes al tercio superior.

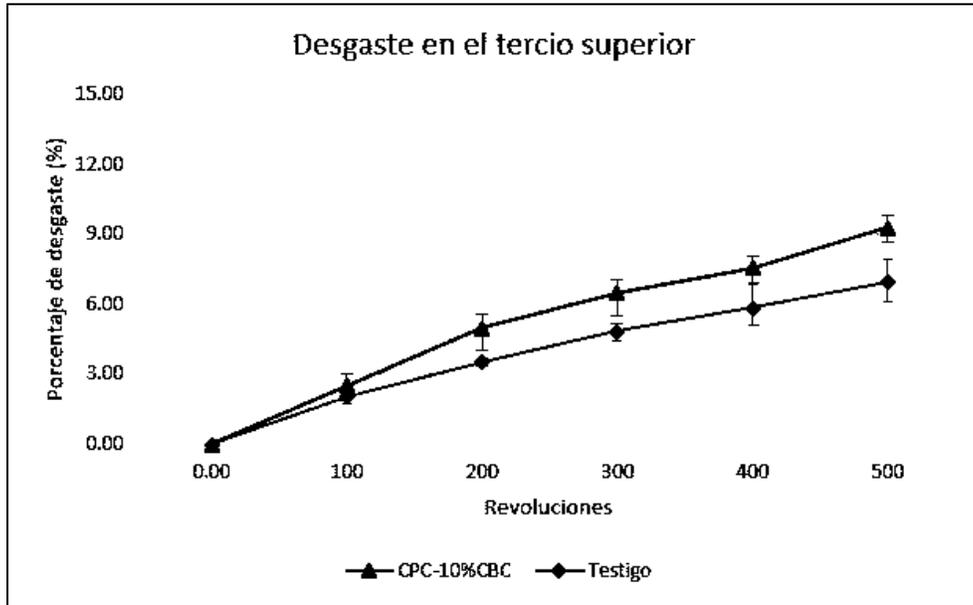


Figura 126. Resultados del desgaste por abrasión correspondientes al tercio superior.

A diferencia del tercio medio e inferior, el tercio superior del testigo tiene un rango de variación mayor, atribuido a la exudación y posible segregación en el momento de elaboración. El concreto con CBC es más susceptible al desgaste por abrasión en sus tres tercios. La Figura 127 hace una comparativa general.

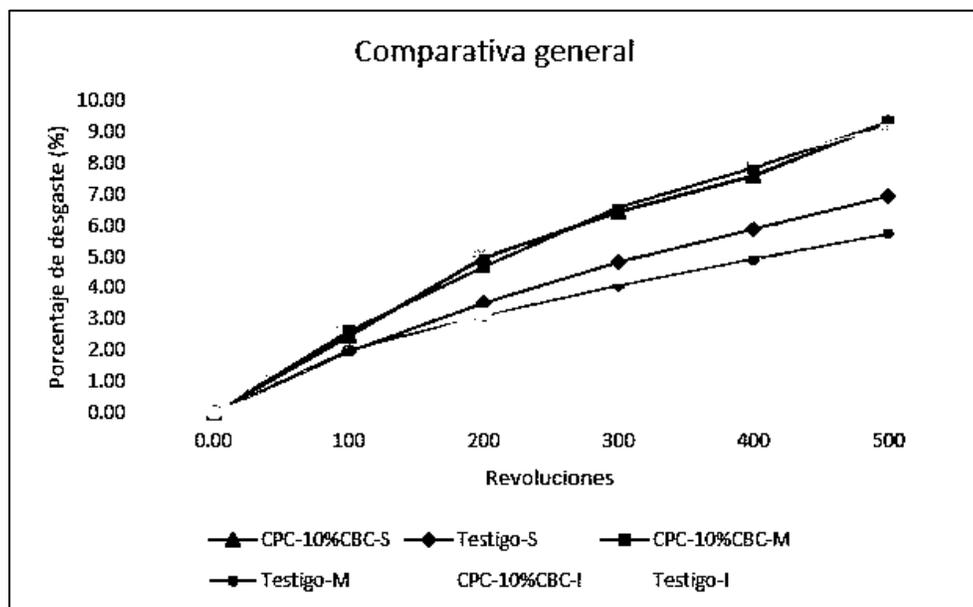


Figura 127. Comparativa general del desgaste por abrasión.



El concreto de la mezcla CPC-10%CBC es más susceptible al desgaste por abrasión en el tercio inferior, luego en el tercio medio y más resistente en el tercio superior. El concreto testigo es más débil en su tercio superior, posteriormente en su tercio inferior y más resistente en el tercio medio.

6.8.5. Ataque por sulfato de sodio.

El inicio de la prueba comenzó a los 120 días de edad secando las rodajas de cilindros en el horno por un período de 15 días hasta masa constante y posteriormente dando inicio a los ciclos de ataque por acción de sulfato de sodio. La Figura 128 contiene los resultados promedio de la pérdida de masa de las muestras ensayadas (15 rodajas de concreto por mezcla) y en él se aprecia que el concreto con sustitución de CBC es más susceptible a destruirse por los repetidos ciclos de humedecimiento y secado. La masa inicial de las rodajas de cilindros es menor que la masa registrada después del primer ciclo de exposición, lo que puede ser explicado por el fenómeno de la intrusión de sales, en el que las sales de sulfato en estado líquido entra a través de la masa del concreto y se aloja dentro del mismo en el período de inmersión marcado por la norma correspondiente (para el caso de ésta experimentación el tiempo de inmersión fue de 17 horas continuas por ciclo), después de esto viene el período de secado en el horno a temperatura constante de 50°C, en el que algunas sales pueden cambiar de fase y precipitar en un cristal sólido el cual queda alojado en los poros del concreto, y por su expansión genera presiones internas que así mismo dañan al elemento.

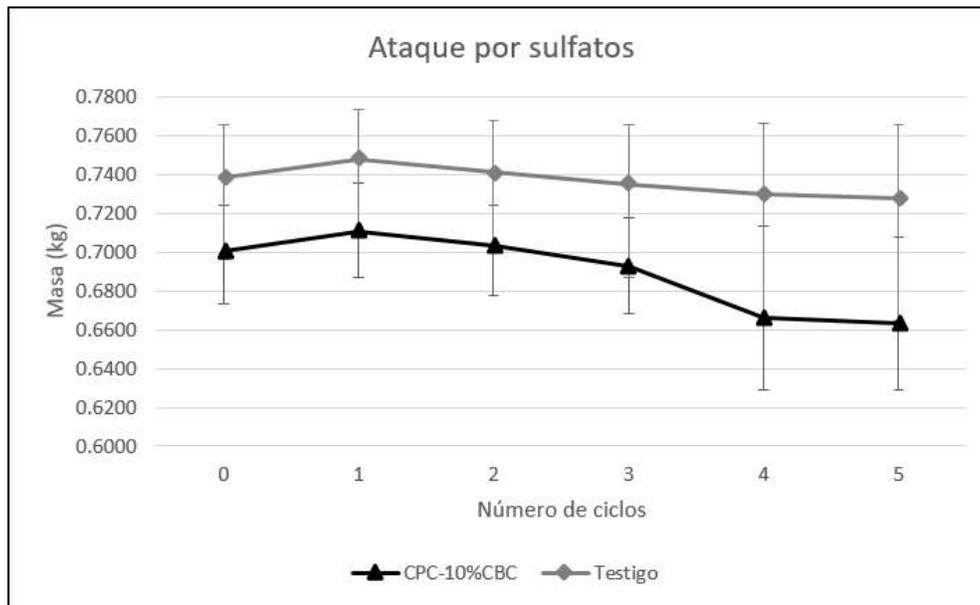


Figura 128. Resultados de la pérdida de masa por ataque de sulfatos.



La variación entre algunas muestras de concreto llegó a ser muy notoria, lo que se aprecia en las barras de error de la figura 128. Los especímenes elaborados con la mezcla de ceniza de bagazo de caña se dañaron rápidamente y perdieron masa con facilidad. Al incrementar los ciclos de prueba su estructura perdió solidez y se mostraron quebradizos al tacto. Los elementos correspondientes al concreto testigo permanecieron muy similares en apariencia y masa al inicio y final de los ciclos de ataque.

6.8.6. Carbonatación.

Los especímenes destinados para el ensaye de carbonatación estuvieron sometidos a la acción del intemperismo por un período de 155 días, iniciando en el mes de febrero de 2016 hasta julio del mismo año, iniciando a la edad de 60 días, probados a los 215 días de edad. Una vez transcurrido el período de exposición los cilindros expuestos fueron probados teniendo como eje de carga la dirección en que se espera presenten la mayor afectación, a su vez se registró la carga de ruptura para correlacionarla con su correspondiente grado de carbonatación. A continuación se presenta la Tabla 77 conteniendo el valor del esfuerzo promedio de cada mezcla de concreto y la constante de carbonatación calculada:

Tabla 77. Resultados promedio obtenidos del ensaye de carbonatación.

Resultados promedio			
CPC-10%CBC		Testigo	
K_{CO_2} (mm/año ^{0.5})	Esfuerzo (MPa)	K_{CO_2} (mm/año ^{0.5})	Esfuerzo (MPa)
2.56	3.45	3.07	3.32

La mezcla testigo presentó profundidades de carbonatación en un rango de 1 a 4 mm y la mezcla CPC-10%CBC en un rango de 1 a 3 mm. Al observar los esfuerzos soportados por cada grupo de especímenes se observa que a una mayor constante de carbonatación se produce una menor resistencia a las cargas aplicadas. Con el cálculo de la constante de carbonatación es posible predecir la velocidad de carbonatación de las mezclas estudiadas multiplicando dicha constante por la raíz cuadrada del tiempo medido en años. Así pues, tenemos que la mezcla testigo estaría alcanzando una profundidad de 13.73 mm a los 20 años de exposición, y la mezcla CPC-10%CBC una profundidad de 11.44 mm. De acuerdo a la Red DURAR los valores de la constante de carbonatación de K_{CO_2} de 2 a 3 mm/año^{0.5} pueden considerarse como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores de K_{CO_2} superiores a los 6 mm/año^{0.5} indican concretos de muy baja resistencia. Por lo tanto se clasifica a las dos mezclas como concretos de elevada resistencia a la carbonatación, sin embargo la misma Red DURAR no recomienda aplicar el modelo de cálculo en estructuras menores a los 3 años de vida, en cuyo caso deben hacerse dos o más medidas con un intervalo de 6 meses. Infiriendo un



panorama del cual se puede esperar expectativas favorables. Los resultados se muestran en la Figura 129 presentada a continuación:

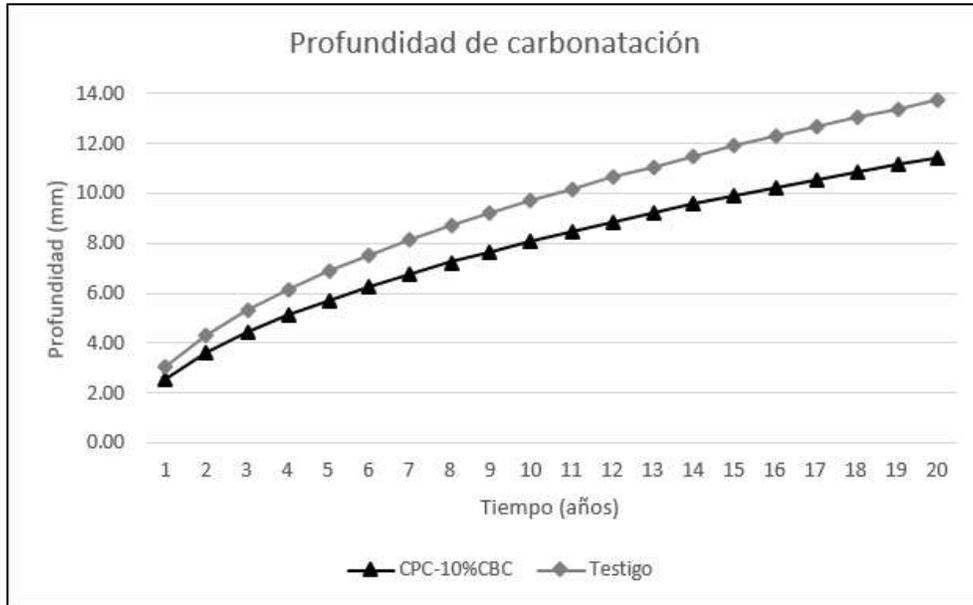


Figura 129. Resultados de la profundidad de carbonatación en una proyección a 20 años.

6.8.7. Resumen de resultados.

Finalmente se presenta la Tabla 78 como resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 78. Resumen de resultados.

Resumen de resultados		
Ensaye	CPC-10%CBC	Testigo
Fluidez	Muy fluido	Muy fluido
Trabajabilidad	Trabajable - Pesado	Trabajable-Muy Pesado
Elaboración de especímenes	Con grandes poros internos	Exudación excesiva y segregación
Resistencia a la compresión	18.89% > f'c de proyecto	17% > f'c de proyecto
Módulo de elasticidad estático	En rango de la literatura	En rango de la literatura
Resistencia a la tensión	10.25% del f'c de proyecto	11.36% del f'c de proyecto
Resistencia a la flexión	15.65% del f'c de proyecto	19.04% del f'c de proyecto
Módulo de elasticidad dinámico	En rango de la literatura	En rango de la literatura
VPU	Durable	Durable
Resistividad	Alto riesgo de corrosión	Alto riesgo de corrosión
Porosidad de Fagerlund	Buena calidad y alta compacidad	Buena calidad y alta compacidad
Resistencia a la abrasión	Mayor resistencia	Menor resistencia
Ataque por sulfatos	Menor estabilidad	Mayor estabilidad
Carbonatación	Elevada resistencia	Elevada resistencia



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.

Los concretos de alta resistencia y durabilidad se producen con materiales de alta calidad, cuidadosamente seleccionados y diseñados con la menor relación a/c posible, sin restarle importancia al proceso de elaboración, transporte, colocación, y terminado, sin embargo no es un proceso sencillo. Al fallar una parte del proceso la calidad bajará de igual manera. En la elaboración del concreto con CBC se buscó introducir un agregado grueso de alta calidad y buena resistencia, sin embargo se utilizó agregado fino ya existente en el laboratorio, el cual presentó un elevado módulo de finura fuera de norma ($MF= 3.6$), lo que pudo significar una deficiencia en la calidad a la mezcla.

Efectivamente, la utilización de CBC como material puzolánico mejora algunas características del concreto, sin embargo no se puede lograr la optimización de todas ellas de manera simultánea. Se recomienda invertir un poco de energía en la pulverización de la CBC lo cual se verá recompensado en el desempeño de la actividad puzolánica. Se determinó un porcentaje óptimo de sustitución de CP por CBC correspondiente al 10% de la masa del cemento, sin embargo puede buscarse incrementar esta cantidad de sustitución sin sacrificar la trabajabilidad de la mezcla. No se recomienda llegar al 20% de sustitución ya que la demanda de agua de mezclado se aumenta significativamente, aún con el uso de un aditivo súper plastificante. Además de las propiedades cementantes de la ceniza de bagazo de caña, funciona como un retardante del fraguado, lo cual puede verse reflejado positivamente en los tiempos de transporte y colocación del concreto en la obra civil.

La mezcla CPC-10%CBC presentó un mejor comportamiento a través del tiempo en comparativa con la mezcla testigo. Con relación a los ensayos de resistencia mecánica, el concreto ecológico destaca en su resistencia a compresión logrando superar la resistencia de proyecto en un 18.89% y al testigo en un 1.89%, un excelente resultado al reducir la cantidad de cemento. El comportamiento más inestable en ambas mezclas se presentó en los resultados de resistencia a la flexión, sin embargo se alcanzó un $MR = 6.25$ MPa para la mezcla CPC-10%CBC (15.65% del $f'c$ de proyecto), solo un 2.31% más bajo que el testigo. De acuerdo a CEMEX, se recomienda un $MR = 4.12$ MPa para vialidades urbanas secundarias, $MR = 4.41$ MPa para vialidades urbanas principales y zonas industriales, y $MR = 4.70$ MPa para carreteras y autopistas. El concreto elaborado con CBC es candidato para ser utilizado en cualquiera de estos ámbitos. Con respecto a los ensayos de tensión indirecta y el cálculo de los módulos de elasticidad estático y dinámico se obtuvieron valores acorde a la literatura.

Con respecto a los ensayos de durabilidad se logró obtener la clasificación de durable para el concreto con CBC respecto a la velocidad de pulso ultrasónico. En lo que respecta al ensaye de absorción capilar se concluyó que el concreto ecológico presenta una baja porosidad efectiva (7.4%) y una sorción capilar apta



para ambientes no tan severos. Con estos valores se clasifica como concreto de buena calidad y alta compacidad. Además como de elevada resistencia a la carbonatación. En los resultados menos favorables se encuentra la resistencia a la abrasión, en el que el concreto ecológico presentó mayor desgaste que el testigo. En la resistencia a los sulfatos los especímenes presentaron un severo daño en su estructura y propiedades resistentes. Los resultados de resistividad eléctrica clasifican al concreto como muy conductor, con alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo, de acuerdo a la red DURAR.

Debe corregirse el proceso de elaboración de este concreto ecológico y ser varillado de acuerdo a lo estipulado por la norma "NMX-C-159-ONNCCE-2004: Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio". Con esto se busca conseguir un concreto con menor porosidad, mayor homogeneidad, compacidad y densidad, por lo tanto se esperaría obtener mejores resultados en las pruebas de VPU, porosidad efectiva, sorción capilar, resistencia a la penetración del agua y un mejor desempeño en su resistencia mecánica, así mismo mayores módulos de elasticidad, en resumen una mayor durabilidad.

Finalmente se logró el objetivo principal de conseguir una mezcla de concreto hidráulico con buenas propiedades, utilizando un residuo agroindustrial como la ceniza de bagazo de caña, disminuyendo el costo de la mezcla. México es una fuente potencial en la generación de este subproducto (bagazo de caña), y su uso como material cementante en la industria de la construcción a escala nacional provocaría un gran impacto ecológico positivo, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO₂ producto de la industria del cemento.



BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, D. A. (1918). *Design of Concrete Mixtures (Diseño de Mezclas de Concreto)*. Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory. Chicago: Bulletin No. 1, PCA LS001. Obtenido de http://www.portcement.org/pdf_files/LS001.pdf
- ACICommittee201. (1982). *"Guide to durable concrete"*. American Concrete Institute, Detroit, EUA.
- Alaejos, P., & Fernández, M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix. *"ACI Materials journal"*, pág. 236.
- Alatorre, J., & Uribe, R. (1998). Agregados para concreto: cada cual por su nombre. *"Construcción y tecnología"*, 13-14.
- Alexander, M. (1996). Aggregates and the deformation properties of concrete. . *"ACI Materials journal,"* , pág. 576.
- Alvarado Alcaraz, N. d. (2010). *"Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; correlacionando matemáticamente los Módulos de Elasticidad, Estático y Dinámico, en cilindros de concreto de 10cm x 20cm"*. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil. U.M.S.N.H.
- American Society for Testing and Materials. (2003). *"ASTM-C-33-03: Especificación normalizada para agregados para concreto"*. ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2004). *"ASTM-C-266-04: Tiempo de fraguado para la pasta de cemento hidráulico por el método de las agujas de Gillmore"*. ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2004). *"ASTM-C-40-04: Método de Ensayo Normalizado para la Detección de Impurezas Orgánicas en Agregados Finos para Concreto"*. ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *"ASTM-C-1611: Método de prueba estándar para el flujo de asentamiento del concreto autocompactable"*. ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *"ASTM-C-150-16: Especificaciones de Norma para el Cemento Portland"*. ASTM.
- Arguello Hernández, S. d. (2012). *titulado "Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus"*. Morelia, México.
- Arreola Sánchez, M. (2013). *Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto*. Morelia.
- Brown, G. (1996). *Analysis and History of Cement (Análisis e Historia del Cemento)*. Keswick, Ontario.: Gordon E. Brown Associates.



- Brunauer, S. (1962). Tobermorite Gel—The Heart of Concrete (Gel de Tobermorita – el Corazón del Concreto). *Research Department Bulletin RX138, Portland Cement Association*, 20. Obtenido de http://www.portcement.org/pdf_files/RX138.pdf
- CEMEX - Manual del Constructor. (29 de May de 2016). *Cemex México*. Obtenido de Cemex México: <https://www.cemexmexico.com/Concretos/files/Manual%20del%20Constructor%20-%20Construcci%C3%B3n%20General.pdf>
- CEMEX. (2016). La Contribución de CEMEX Hacia un Futuro Bajo en Carbono. *Postura de CEMEX respecto al Cambio Climático*. México.
- CEMEX. (2016). *Materiales Yuma*. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de Materiales Yuma: http://www.materialesyuma.com/Images/ImgYuma/catalogo/Imagen_Gris%20Tolteca.png
- Centeno, R., Duarte, F., Castillo, W., & Chim, S. (1994). Propiedades mecánicas del concreto elaborado con agregados. *“Boletín académico FIUADY”*, 35.
- Cerón M., D. F. (1996). Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. *“Boletín académico FIUADY”*, 27.
- Cetin, A., & Carrasquillo, R. (1998). High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical. *“ACI Materials journal”*, pág. 253.
- Cetrade. (2016). *Cetrade.org*. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de Cetrade.org: <http://cetrade.org/v2/book/export/html/1332>
- Civilgeeks. (24 de Mayo de 2016). *civilgeeks.com*. Obtenido de civilgeeks.com:
- Concretos.Blogspot, N. d. (06 de 06 de 2016). *notas de concretos.blogspot.mx*. Obtenido de [notas de concreto.blogspot.mx](http://notasdeconcretos.blogspot.mx/): <http://notasdeconcretos.blogspot.mx/>
- Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. (2014-2015). *Cement Sustainability Initiative*. Obtenido de [Cement Sustainability Initiative](http://www.wbcdcement.org/index.php/en/about-cement/benefits-of-concrete): <http://www.wbcdcement.org/index.php/en/about-cement/benefits-of-concrete>
- Copeland, L. E., & Schulz, E. G. (1962). Electron Optical Investigation of the Hydration Products of Calcium Silicates and Portland Cement (Investigación Electrónica Óptica de los Productos de Hidratación de los Silicatos de Calcio y del Cemento Portland). *Research Department Bulletin RX135, Portland Cement Association*. Obtenido de http://www.portcement.org/pdf_files/RX135.pdf
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, É. I. (Mayo-Agosto de 2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Red de revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 7, 39-46.
- Chan, P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *“ACI Materials journal”*, pág. 357.



- CHRISTIANSON S.A. de C.V. (s.f.). CRISOTÁN R-5. Dispersantes para concretos. Boletín Técnico. *CRISOTÁN R-5. Dispersantes para concretos. Boletín Técnico*. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- DURAR. (2000). IMCYC. Recuperado el 04 de Junio de 2016, de IMCYC: <http://www.imcyc.com/cyt/junio/durabilidad.htm>
- Durar, R. (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (Tercera ed.). México: CYTED.
- Eadic. (24 de Mayo de 2016). *Eadic.com*. Obtenido de Eadic.com: www.eadic.com
- Federación Interamericana del Cemento. (2013). *Informe Estadístico*. Bogotá, Colombia: Ángela Plazas Impresos. Recuperado el 15 de Octubre de 2015
- Galeón. (2016). *Galeón.com*. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de Galeón.com: http://callano.galeon.com/#_Toc354563450
- Geeks, C. (04 de Junio de 2016). *Civil Geeks*. Obtenido de Civil Geeks: <http://civilgeeks.com/2011/12/11/durabilidad-del-concreto/>
- Google Maps. (Diciembre de 2015). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com.mx/maps/dir//19.7644743,-101.1625545/@19.7652367,-101.1635078,443m/data=!3m1!1e3!4m2!4m1!3e0>
- Google maps. (2016). *Google maps*. Obtenido de Google maps: <https://www.google.com.mx/maps/place/Ingenio+Pedernales+S.A,+de+C.V./@19.1399892,-101.4703663,796m/data=!3m1!1e3!4m13!1m7!3m6!1s0x84327912241fe68d:0xa44ab46c0e7e43c9!2sPEDERNALES+1,+MCH!3b1!8m2!3d19.14223!4d-101.46613!3m4!1s0x0000000000000000:0x4d2d6c4d95>
- Google maps. (2016). *Google maps*. Obtenido de Google maps: <https://www.google.com.mx/maps/place/San+Bernab%C3%A9,+Mich./@19.7213538,-101.3933342,1602m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x842da6f8fed56727:0xa419cad57cee99af!8m2!3d19.7243222!4d-101.3962628>
- Guia del emprendedor. (2016). *Guia del emprendedor*. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de Guia del emprendedor: <http://www.guiadelemprendedor.com.ar/Azucar.htm>
- Guzmán, A., Guitiérrez, C., Amigó, V., Mejía de Gutiérrez, R., & Delvasto, S. (20 de Junio de 2011). Valoración puzolánica de la hoja de la caña de azúcar. *Materiales de Construcción*, 61, 213-225.
- Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón*. Sao Paulo, Brasil.
- Holcim México. (29 de Mayo de 2016). *Holcim*. Obtenido de Holcim: <http://www.holcim.com.mx>
- I.N.V.E.-307-07. (2007). *I.N.V.E.-307-07: Densidad del Cemento hidráulico*. I.N.V.E.



- Ingeniería Real. (2016). *Ingeniería Real. Diseño y Construcción*. Recuperado el 23 de Junio de 2016, de Ingeniería Real. Diseño y Construcción.: <http://ingenieriareal.com/uso-de-la-prueba-equivalente-de-arena/>
- Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. (Octubre de 2006). Cemento y Concreto resistentes a sulfatos. *El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones*, 44-47.
- J.F. Martirena-Hernández, B. M. (1998). Use of Wastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Lime-Pozzolana Binders: Study of the Reaction. *Cement & Concret Research*, 28(11), 1525-1536. doi:DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00130-6
- Klieger, P. (1996). Early-High-Strength Concrete for Prestressing. *Research Department Bulletin*.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (Primera ed.). Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association. Recuperado el 11 de Abril de 2016
- Kosmatka, S., & Panarese, W. (1992). “Diseño y control de mezclas de concreto”. *IMCYC*, 32-34.
- La Jornada en Línea. (06 de Febrero de 2014). Estudia IPN el uso de bagazo de caña para hacer concreto hidráulico. *La Jornada en Línea*, pág. 1.
- Márquez Montes, S. (2010). “Efecto de la sustitución parcial de cemento portland por (cbca) en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos”. Jalapa.
- Materials, A. S. (2003). “Especificación normalizada para agregados para concreto”. ASTM-C-33-03.
- Mehta, K., & Monteiro, P. (1998). “Concreto, estructura, propiedades y materiales”. *IMCYC*, 38.
- Neville. (1999). Tecnología del Concreto. *IMCYC*, 163.
- Neville, A. (1997). Aggregates bond and modulus of elasticity of concrete. “*ACI Materials journal*”, pág. 72.
- Neville, A. (1998). *Tecnología del Concreto* (Primera ed.). México, México: Trillas.
- Neville, A., & Brooks, J. (1999). “*Tecnología del concreto*”. México: Pearson.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology* (Second Edition ed.). England: Pearson.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). “*NMX-C-077-ONNCCE-1997: Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos*”. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). “*NMX-C-088-ONNCCE-1997: Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos*”. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). “*NMX-C-089-1997-ONNCCE: Método de prueba estándar para las frecuencias de resonancia fundamentales longitudinales de especímenes de concreto*”. ONNCCE.



- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). "NMX-C-163-1997-ONNCCE: Método de prueba estándar para la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). "NMX-C-170-ONNCCE-1997: Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (1997). "NMX-C-177-1997-ONNCCE: Industria de la construcción - concreto - determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2003). "NMX-C-416-ONNCCE-2003: Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-071-ONNCCE-2004: Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-073-ONNCCE-2004: Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-122-ONNCCE-2004: Industria de la Construcción-Agua para concreto-Especificaciones". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-159-ONNCCE-2004: Método de prueba estándar para la elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-191-ONNCCE-2004: Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2004). "NMX-C-275-ONNCCE-2004: Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2006). "NMX-C-084-ONNCCE-2010: Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla N° 200 en agregados por lavado". ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2006). "NMX-C-166-ONNCCE-2006: Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado". ONNCCE.



- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2006). *NMX-C-059-ONNCCE-2006: Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Vicat*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *"NMX-C-152-ONNCCE-2010: Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *"NMX-C-414-ONNCCE-2010: Industria de la construcción – Cementos hidráulicos–Especificaciones y métodos de prueba"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2013). *"NMX-C-109-ONNCCE-2013. Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *"NMX-C-083-ONNCCE-2014: Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *"NMX-C-111-ONNCCE-2014. Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico. Especificaciones y métodos de prueba"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *"NMX-C-164-ONNCCE-2014: Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *"NMX-C-165-ONNCCE-2014: Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. (2004). *"NMX-C-030-ONNCCE-2004: Práctica estándar para el muestreo de agregados"*. ONNCCE.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. (2010). *"NMX-C-057-ONNCCE-2010: Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico"*. ONNCCE.
- Özturan, T., & Çeçen, C. (1997). Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different. *"Cement and concrete research"*, 165.
- Palbol, L. (1996). Optimización de los agregados para concreto. *"Construcción y tecnología"*, 30.
- Prefabricados Alberdi. (24 de Mayo de 2016). *Prefabricados Alberdi*. Obtenido de Prefabricados Alberdi: www.prefabricadosalberdi.com
- Radio Santa Fe. (25 de Mayo de 2016). *Radiosantafe.com*. Obtenido de Radiosantafe.com: www.radiosantafe.com



- Reyes Bernabé, C. (2015). *“EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN”*. Morelia.
- Rick, M. (Diciembre de 2000). “La Carbonatación, Enemigo olvidado del Concreto”. (I. M. Concreto, Ed.) *Revista Construcción y Tecnología*.
- Ríos González, E. (2011). *“Empleo de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) como Sustituto Porcentual del Agregado Fino en la Elaboración de concreto Hidráulico”*. Xalapa, Veracruz, México.
- Rodríguez Galán, A. (2010). *“Evaluación de cbca como sustituto parcial de cemento portland en concreto hidráulico, obtenida en el ingenio de la Concepción, Ver.”*. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Romo, M. (2009). *Fundamentos del hormigón simple*. Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
- S. Marquez-Montero, E. M.-B.-Z.-M.-L.-R.-C. (2010). *EFFECTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO PORTLAND POR CBCA EN LA DURABILIDAD DE CONCRETOS EXPUESTOS A CLORUROS Y SULFATOS*. Xalapa, Veracruz, México: ALCONPAT.
- Salazar J., A. (2016). *Ecoingeniería*. Recuperado el 07 de Junio de 2016, de Ecoingeniería: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>
- Segarra Foradada, J. (2005). *“Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón”*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Shetty, M. (2005). *“Concrete Technology Theory and Practice”*. Ram Nagar, New Dheli, India: Editorial S. Chand and Companu LTD.
- Skyscrapercity. (24 de Mayo de 2016). *Skyscrapercity.com*. Obtenido de Skyscrapercity.com: www.skyscrapercity.com
- Taylor, P. C., Whiting, D. A., & Nagi, M. A. (2000). *Threshold Chloride Content of Steel in Concrete (Contenido de Cloruros Límite para el Acero en el Concreto)*. Portland Cement Association,. Obtenido de http://www.portcement.org/pdf_files/SN2169.pdf
- Tolosa Correa, R. A. (s.f.). La inserción de subproductos. Una mirada desde los materiales de construcción. *Ideas ambientales*.
- UNAM. (2013-2014). 400 partes por millón. *El faro, la luz de la ciencia*(153-154), 3.
- Unión Nacional de Cañeros, A.C.-GNPR. (2014). *“Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2005-2014”*. Comité Ejecutivo Nacional 2014-2018. Obtenido de <http://www.caneros.org.mx/estadisticas.html>
- Uribe, R. (1991). El control de calidad en los agregados para concreto 3a parte. *“Construcción y tecnología”*, 34.



Whiting, D. A. (1997). *Origins of Chloride Limits for Reinforced Concrete (Origen de los Límites de Cloruro para el Concreto Reforzado)*. Portland Cement Association. Obtenido de http://www.portcement.org/pdf_files/

Whiting, D. A., Taylor, P. C., & Nagi, M. A. (2002). *Chloride Limits in Reinforced Concrete (Límites de Cloruro en el Concreto Reforzado)*. Portland Cement Association.

Wikipedia. (18 de Agosto de 2015). *Enciclopedia Wikipedia*. Obtenido de Enciclopedia Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Aditivo_superplastificante