

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DEL CURADO CON CO₂ EN MAMPOSTERÍA
FABRICADA CON SISTEMAS CEMENTANTES TERNARIOS**

POR

JONATHAN ALFONSO DEL REAL DÁVALOS

**Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN
CIENCIAS con orientación en Materiales de Construcción**

Director de tesis: Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez.

Co-director de tesis: Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel.

Enero de 2013



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-029-2013

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

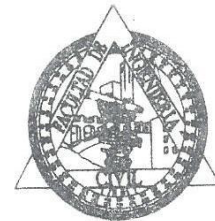
Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **ING. JONATHAN ALFONSO DEL REAL DÁVALOS**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución. De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 24 de enero del 2013



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

C.c.p. Archivo.
Rtp.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels: (81) 1340-4388 Ext. 7234 y 7216 ó
(81)1442-4400 Ext. 4447 y 5206
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por este conducto se **APRUEBA** la tesis “**Influencia del curado con CO₂ en mampostería fabricada con sistemas cementantes ternarios**”, que presenta el **Ing. Jonathan Alfonso Del Real Dávalos**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, lo anterior después de haber leído, evaluado y constatado la calidad y los cambios sugeridos a la tesis.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan.

ATENTAMENTE

“ALERE FLAMMAM VERITATIS”

Cd. Universitaria, a 22 de enero de 2013

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Director de Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 83294000, ext 7216
14424400, ext 4447, 4448
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE**

Estimado Dr. Valdez,

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Co-Director de la Tesis **“Influencia del curado con CO₂ en mampostería fabricada con sistemas cementantes ternarios”**, que presenta el Ing. **JONATHAN ALFONSO DEL REAL DÁVALOS**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 21 de enero de 2013

DR. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO SAN MIGUEL
CO DIRECTOR



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66450
Tels. y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx


Cd. De México, 11 de enero de 2013

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez:

En relación a su oficio en el que me informa que fui designado como evaluador de la Tesis: **“Influencia del curado con CO₂ en mampostería fabricada con sistemas cementantes ternarios”**, que presenta el **Ing. Jonathan Alfonso Del Real Dávalos**, como requisito parcial para obtener el grado de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informarle que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes cualquier duda o aclaración que considere pertinente.



M. A. Juan Cristóbal Villalobos Lomelín
Gerente de Investigación y nuevos Desarrollos
Grupo Calidra, S. A de C.V.
Evaluador de Tesis



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: JONATHAN ALFONSO DEL REAL DÁVALOS

Tema de la tesis: INFLUENCIA DEL CURADO CON DIÓXIDO DE CARBONO, EN MAMPOSTERÍA FABRICADA CON SISTEMAS CEMENTANTES TERNARIOS.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA
Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



Ciudad Universitaria, a 28 de ENERO de 2013.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels: (81) 83294000 Ext. 7216
(81)1442-4400 Ext. 4447 y 5206
www.ingenieriacivil.uanl.mx

DEDICATORIA

A Dios

Por brindarme la oportunidad y la dicha de la vida, acompañándome en cada paso que doy. Por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante toda mi vida.

A mis Padres

Sandra L. Dávalos Torres (Q.E.P.D.) y José T. Del Real Salazar (Q.E.P.D.) por darme la vida y su amor. En mi corazón siempre guardaré el recuerdo de su infinito amor, sé que siempre estarán a mi lado para iluminar mi camino. Los amo.

A mi Abuela

Estela Torres Reyna, por ser mi segunda madre, apoyándome como pilar fundamental de mi desarrollo personal y profesional, a pesar de todas las dificultades a las que nos hemos enfrentado. De todo corazón y con un infinito amor "muchas gracias".

A mi Familia y Amigos

Por estar siempre a mi lado y ser partícipes de todas las experiencias que se presentan en esta vida.

A todos, eternamente gracias.

"No todo será como lo esperas. Con el tiempo se aprende que la capacidad de adaptación es y será siempre la mejor estrategia para la felicidad"

Anónimo

"El éxito en la vida podría definirse como el crecimiento continuo de la felicidad y la realización progresiva de unas metas dignas"

Deepak Chopra

Jonathan Alfonso Del Real Dávalos

AGRADECIMIENTOS

Para mi familia, por su incondicional confianza y apoyo moral. Gracias por permitirme ser parte de ustedes.

A mi Director de tesis, Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, por su apoyo, paciencia y acertada asesoría, durante el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Gerardo Fajardo San Miguel, como codirector de tesis, por sus comentarios, sugerencias y correcciones, que me permitieron concluir satisfactoriamente esta investigación.

Al M.A. Juan C. Villalobos Lomelín, por formar parte de esta investigación como asesor externo de la misma.

A mis compañeros: M.C. Alejandro Herrera, M.C. Héctor Campos, M.C. Aldo Campos, M.C. Armando Escobar, M.C. Bonifacio Manríquez, M.C. Ricardo De León, Ing. Eduardo Garza, M.C. Omar Díaz, Ing. Octavio Rivera, M.C. Anayanci Campos, M.C. Ulises De los Santos, Ing. Francisco Vásquez, Ing. José César Aguilar, Ing. Rogelio Soto, Ing. Myrna Guevara, Arq. Éric Sánchez, Ing Venustiano Ríos, M.C. René Hinojosa, Ing. Dulce Cruz, Ing. Carolina Arenas. Por su apoyo incondicional en la elaboración de esta tesis; pero, sobre todo por su amistad.

Al Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil “Dr. Raymundo Rivera Villarreal” de la U.A.N.L., a cargo del Dr. Alejandro Durán Herrera, por toda su ayuda y apoyo, así como al personal de dicho departamento; en especial a los Sres. Catarino Ortiz, Alberto Rubio, Gerónimo Delira y Juan Sánchez por todas las facilidades brindadas para el uso del equipo y las instalaciones.

Al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, a cargo del Dr. José Manuel Mendoza Rangel, por su ayuda y apoyo para realizar esta investigación, así como al Sr. Gumaro Tovar, personal de dicho departamento.

Al Laboratorio de Ecomateriales, por los apoyos brindados con el uso de equipo del laboratorio y las asesorías del personal en la realización de esta investigación.

A la Dirección de la Facultad de Ingeniería Civil, a la Subdirección de Estudios de Posgrado de la misma Facultad, y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por su total apoyo.

Al CONACYT, por el apoyo económico otorgado como becario según el proyecto 118420 “Apoyo complementario para investigadores en proceso de consolidación”. Sin ese apoyo fundamental, esta Tesis no hubiera sido posible.

A la empresa MINORTE, S.A. de C.V. (Grupo CALIDRA), por la aprobación del convenio específico para desarrollar la presente investigación.

A mis amigos: Ing. Ángel Garza, Ing. Joaquín Martínez y C.P. Enrique Nava, por su amistad y confianza.

Finalmente, para todas las personas que contribuyeron de una u otra forma en la realización de este trabajo.

ÍNDICE

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tablas.....	xvi
Resumen	xviii

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES..... 20

1.1. El Cambio climático.....	21
1.1.1. El clima.....	21
1.1.2. Problemas de la atmósfera.....	21
1.1.3. El efecto invernadero y el calentamiento global.....	22
1.1.4. Los gases de efecto invernadero (GEI).....	23
1.1.4.1. El Protocolo de Kyoto.....	25
1.1.4.2. Emisiones de los gases de efecto invernadero.....	25
1.1.5. Gases de efecto invernadero en México.....	27
1.2. La sustentabilidad.....	30
1.2.1. La vivienda en México.....	33
1.3. El cemento y el concreto.....	34
1.3.1. Propiedades y aplicaciones.....	35
1.4. Los materiales puzolánicos.....	37
1.4.1. Sistemas cementantes.....	39
1.4.1.1. La ceniza volante.....	40
1.4.1.1.1. Características y propiedades de la ceniza volante.....	40
1.4.1.2. La cal.....	43
1.5. La mampostería.....	45
1.5.1. Mampostería de roca, arcilla y concreto.....	46
1.5.2. El bloque de concreto.....	47
1.5.3. La mampostería vibro-comprimida.....	48
1.6. La carbonatación.....	49
1.6.1. La carbonatación en la mampostería.....	52
1.6.2. Métodos para medir la carbonatación.....	52

1.6.2.1. El indicador de fenolftaleína.	52
1.6.2.2. Análisis termogravimétricos (TGA).	53

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES.....	57
--------------------------	-----------

2.1. Justificación del estudio.....	67
2.2. Objetivos.	68
2.3. Hipótesis.	69

CAPÍTULO 3

MÉTODO EXPERIMENTAL	71
----------------------------------	-----------

3.1. Adquisición y preparación de los materiales.....	71
3.1.1. Descripción de los materiales	71
3.1.1.1. Los cementantes	71
3.1.1.2. Los agregados.....	73
3.1.2. Almacenaje de los materiales.	73
3.2. Caracterización de los materiales.....	73
3.2.1. Los cementantes.....	74
3.2.2. Pruebas físicas de los agregados.	75
3.2.3. El aditivo	76
3.3. Desarrollo experimental.....	76
3.3.1. Bloques de concreto curados a vapor.....	78
3.3.1.1. Fabricación de especímenes.....	78
3.3.1.2. Curado de los especímenes	81
3.3.1.3. Resistencia a la compresión y absorción.....	82
3.3.2. Bloques de concreto curados con CO ₂	85
3.3.3. Incremento de peso en bloques de concreto sometidos a carbonatación. ..	87
3.3.4. Inspección visual de los bloques de concreto en condiciones ambientales. 87	
3.3.5. Determinación de Ca(OH) ₂ y CaCO ₃ en pastas de cementantes mediante análisis termogravimétricos.	88

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	92
4.1 Caracterización de los materiales.....	92
4.1.1. Los cementantes.....	92
4.1.2. El agregado.	95
4.2 Desarrollo experimental.....	98
4.2.1. Proporcionamiento de las mezclas.	98
4.2.2. Bloques curados a vapor.	100
4.2.2.1. Resistencia a la compresión.....	100
4.2.2.2. Absorción.	103
4.2.3. Bloques carbonatados.	105
4.2.3.1. Resistencia a la compresión.....	105
4.2.3.2. Absorción.	108
4.2.3. Incremento de peso en los bloques sometidos a carbonatación.	109
4.2.4. Inspección visual de bloques de concreto en condiciones ambientales. ...	114
4.2.5. Análisis termogravimétricos y térmicos diferenciales en la determinación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaCO_3 de las pastas cementantes.	114
4.2.6. Características generales y análisis de costos.....	127
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES.....	134
REFERENCIAS	136
ANEXO A	145
ANEXO B	153
ANEXO C	163

Índice de Figuras	Página
Figura 1. Emisiones de CO ₂ generadas por la categoría de energía en el mundo durante el año 2009.	26
Figura 2. Contribución por categoría de emisión en el periodo 1990-2002.	28
Figura 3. Elementos fundamentales del desarrollo sustentable.	32
Figura 4. Clasificación de las puzolanas.	37
Figura 5. Materiales puzolánicos. De la izquierda a la derecha: ceniza volante (clase C), metacaolín (arcilla calcinada), humo de sílice, ceniza volante (clase F), escoria y esquisto.	38
Figura 6. Micrografía y microscopía de la ceniza volante.	41
Figura 7. Ciclo de la cal.	44
Figura 8. Tipos de mampostería de piedras naturales.	45
Figura 9. Diferentes tipos de elementos de mampostería (de izquierda-derecha): piedra seminatural, piedra tallada, ladrillo de arcilla, bloque de concreto.	47
Figura 10. Bloques de concreto.	48
Figura 11. Esquema del perfil de pH en un concreto parcialmente carbonatado.	53
Figura 12. Resultados de TGA en muestras de concreto cortadas a diferentes profundidades.	54
Figura 13. Materiales cementantes. De izquierda a derecha, cemento portland ordinario, ceniza volante, ceniza volante tamizada e hidróxido de calcio.	72
Figura 14. Arena 4B para bloques de concreto.	73
Figura 15. Frasco de Le Chatelier.	74
Figura 16. Equipo Microtrac S3500 para obtener la distribución de tamaño de las partículas. .	74
Figura 17. Equipo para determinar la fineza por la malla 325.	75
Figura 18. Método general para la evaluación de los bloques de concreto.	77
Figura 19. Método general para la evaluación de las pastas cementantes.	77
Figura 20. Mezcladora marca Eirich, utilizada en la producción de los morteros.	79
Figura 21. Mezclado de los materiales.	79
Figura 22. Mortero para bloque de concreto: a) Colocación y almacenamiento, b) Protección, c) Consistencia.	80
Figura 23. Fabricación de un bloque de concreto: a) Máquina bloquera de vibrocompresión, b) Adición de mortero, c) Vibrocompresión, d) Desmolde, e) Fin de la fabricación, f) Bloque de concreto terminado.	81
Figura 24. Equipo y periodo de curado. a) Cámara ambiental, b) Bloques de concreto curados.	82
Figura 25. Bloques de concreto secados en el horno.	83
Figura 26. Medición de las dimensiones del bloque.	83
Figura 27. Preparación de bloques de concreto para ensaye a compresión: a) Placa de cabeceo, b) Bloques después del cabeceo, antes de someterse a ensaye a compresión.	84
Figura 28. Máquina Universal de Pruebas Riehle, durante la ejecución de la prueba de resistencia a la compresión en bloques de concreto.	84

Figura 29. Prueba de absorción. a) Saturación del bloque durante 24 horas, b) Condición saturado superficialmente seco, c) Obtención del peso sumergido.	85
Figura 30. Determinación del peso seco de los bloques de concreto.	85
Figura 31. Curado con CO ₂ . a) Cámara de carbonatación, b) Panel de control para regulación de humedad relativa, temperatura y concentración de CO ₂ , b) Bloques de concreto antes de la carbonatación.....	86
Figura 32. (Izquierda a Derecha). Muestras secadas en horno a 40 °C. Equipo de molienda: Mortero de Ágata, malla No. 200 y brochas. Muestras molidas almacenadas en bolsas de plástico.	90
Figura 33. Equipo SDT-Q600-TA para TGA-DTA.....	90
Figura 34. Distribución del tamaño de partícula en los cementantes.	94
Figura 35. Distribución granulométrica de la arena 4B.....	96
Figura 36. Distribución granulométrica ajustada para arena 4B.....	97
Figura 37. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.....	100
Figura 38. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C- CV, curados a vapor.....	101
Figura 39. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C- CVT, curados a vapor.	102
Figura 40. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.	103
Figura 41. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C - CV, curados a vapor.	104
Figura 42. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C - CVT, curados a vapor.	105
Figura 43. Resistencia a la compresión en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados a vapor y con CO ₂	106
Figura 44. Resistencia a la compresión en bloques de sistema ternario CP + C + CV y CP + C + CVT, curados a vapor y con CO ₂	107
Figura 45. Absorción en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados a vapor y con CO ₂	108
Figura 46. Absorción en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CV y CP + C + CVT, curados a vapor y con CO ₂	109
Figura 47. Incremento de peso en bloques sometidos a carbonatación.	113
Figura 48. Curvas TGA-DTA de pastas con 100 CP, curadas con vapor de agua.	115
Figura 49. Curvas TGA-DTA de pastas con 95 CP + 5 C, curadas con vapor de agua.....	115
Figura 50. Curvas TGA-DTA de pastas con 90 CP + 10 C, curadas con vapor de agua.....	116
Figura 51. Curvas TGA-DTA de pastas con 85 CP + 15 C, curadas con vapor de agua.....	116
Figura 52. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30CV, curadas con vapor de agua.	117
Figura 53. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30CVT, curadas con vapor de agua.	117

Figura 54. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 15 C + 25 CVT, curadas con vapor de agua.	118
Figura 55. Curvas TGA-DTA de pastas con 100 CP, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	118
Figura 56. Curvas TGA-DTA de pastas con 95 CP + 5 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	119
Figura 57. Curvas TGA-DTA de pastas con 90 CP + 10 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	119
Figura 58. Curvas TGA-DTA de pastas con 85 CP + 15 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	120
Figura 59. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30 CV, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	120
Figura 60. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30 CVT, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	121
Figura 61. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 15 C + 25 CVT, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO ₂	121
Figura 62. Contenido de Ca(OH) ₂ en pastas curadas a vapor y CO ₂	123
Figura 63. Contenido de CaCO ₃ en pastas curadas a vapor y CO ₂	124
Figura 64. Especificaciones físicas de bloques de concreto estructurales y resultados de bloques de concreto experimentales.	128

Índice de Tablas	Página
Tabla 1. Principales países emisores de CO ₂	26
Tabla 2. Potencial de calentamiento global de los GEI.....	27
Tabla 3. Emisiones de CO ₂ equivalente por categoría de emisión.	28
Tabla 4. Emisiones de GEI en la categoría de energía, 1990-2002.	29
Tabla 5. Emisiones de GEI por gas, categoría de procesos industriales, 1990-2002, Gg en equivalentes de CO ₂	29
Tabla 6. Clasificación de la ceniza volante, de acuerdo con sus características.....	42
Tabla 7. Niveles de temperatura más comunes para identificar productos hidratados.	54
Tabla 8. Densidad de los cementantes.	92
Tabla 9. Composición química de los cementantes, % en masa.....	93
Tabla 10. Tamaños en los que se retiene el 10, el 50 y el 90% del material.....	94
Tabla 11. Finezas de los cementantes.....	95
Tabla 12. Propiedades físicas de la arena 4B.....	95
Tabla 13. Granulometría de la arena 4B.	96
Tabla 14. Proporcionamientos de la mezcla de referencia y sistema binario cemento – cal.	98
Tabla 15. Proporcionamientos de la mezcla de referencia y sistema ternario cemento – cal – ceniza volante.	99
Tabla 16. Proporcionamientos de la mezcla de referencia y sistema ternario cemento – cal – ceniza volante tamizada.....	99
Tabla 17. Incremento de peso en los bloques de concreto de referencia, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.	109
Tabla 18. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema binario CP – C, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.	110
Tabla 19. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema ternario CP – C - CV, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.....	111
Tabla 20. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema ternario CP – C - CVT, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.....	112
Tabla 21. Contenido de H ₂ O, CaO, Ca(OH) ₂ , CO ₂ y CaCO ₃ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas a vapor.	122
Tabla 22. Contenido de H ₂ O, CaO y Ca(OH) ₂ , CO ₂ y CaCO ₃ en pastas, curadas con CO ₂ por 24 horas.	122
Tabla 23. Fijación de CO ₂ en pastas cementantes.	125
Tabla 24. Masas de CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CO ₂ y H ₂ O en 267 kg/m ³ de pasta, antes de la carbonatación.....	126
Tabla 25. Masas de CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CO ₂ y H ₂ O en 267 kg/m ³ de pasta, después de la carbonatación.....	126

Tabla 26. Fijación del CO ₂ en 267 kg/m ³ de pasta cementante.....	126
Tabla 27. CO ₂ fijado para un bloque de concreto.	127
Tabla 28. Costo de los cementantes empleados para fabricación de bloques de concreto en el área metropolitana de Monterrey.	129
Tabla 29. Comparación de los costos en sistemas cementantes.	129

RESUMEN

En esta investigación se produjeron bloques de concreto con materiales cementantes alternativos, considerando subproductos industriales. Se diseñaron mezclas de concreto para que los bloques cumplieran las normas mexicanas. Los bloques fueron sometidos a un curado a vapor de agua y en una atmósfera de alta concentración de CO_2 .

En el caso del curado a vapor, se utilizó una temperatura de 60°C y $\text{HR} > 90\%$. En el proceso de curado con CO_2 , los especímenes se mantuvieron entre 27°C - 30°C , HR 60-70% y una concentración del 20% de CO_2 . Se estudiaron mezclas binarias y ternarias basadas en cemento portland ordinario (CP), ceniza volante (CV) y cal (C). Se analizó la caracterización de los materiales, las proporciones de mezcla y los ensayos de resistencia a la compresión y absorción de los bloques de concreto.

El uso de métodos termogravimétricos mostró el efecto del vapor de agua y la carbonatación en pastas representativas de los bloques de concreto, determinando la concentración de la portlandita y los carbonatos, así como la concentración del CO_2 fijado en el bloque.

Los resultados mostraron que es posible tener un ahorro en el consumo de cemento del 30%, resistencias a la compresión superiores a la referencia hasta en un 7%, en promedio, absorciones menores que el 8% y una fijación de CO_2 en un 7%.

CAPÍTULO

1

GENERALIDADES

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Desde tiempos remotos, el ser humano ha tratado de conocer y entender los fenómenos y maravillas que se encuentran en el planeta. Llevar a cabo estas actividades no ha sido nada fácil y para ello fue necesario modificar algunas condiciones del planeta, con la finalidad de hacer este proceso más sencillo y adaptable a las propias condiciones. Con el paso del tiempo y tras un mejor conocimiento de lo que le rodea, el hombre optó por mejorar sus condiciones de vida, aprovechando lo que la naturaleza le podía ofrecer y empleando materias primas en las actividades de transformación para alcanzar una mayor satisfacción de sus necesidades, desarrollando materiales y herramientas que dieron lugar a una mejor forma de vida de la humanidad.

Hoy los avances tecnológicos y la investigación de nuevos materiales, permiten que el ingeniero civil, disponga de ellos para mejorar la infraestructura del lugar. Con estos nuevos materiales se construirán edificaciones cada vez más sustentables, confortables y durables.

Los beneficios de contar con todos estos avances e investigaciones han hecho posible que el hombre pueda lograr metas fijadas con el paso del tiempo, que en un principio parecían ser solamente ideas inalcanzables, pero que hoy en día son una realidad, de tal forma que se han podido construir naves espaciales que son capaces de transportarnos a otros planetas, submarinos que pueden ofrecernos la oportunidad de conocer lugares inexplorables en el mar, islas artificiales donde pudiesen habitar las personas y que se desarrollen grandes urbes, de edificios majestuosos dotados con todos los sistemas de calidad, etc. Quizá en un tiempo no muy lejano las ideas todavía sin materializarse pudiesen convertirse en una asombrosa realidad.

Para conseguir sus metas, cualesquiera que éstas sean, el ser humano con los conocimientos y las herramientas disponibles ha tratado de consumirlas, sin embargo esto en ocasiones ha traído consigo afectaciones al medio ambiente. Estos cambios en el medio se ven reflejados en diferentes acontecimientos, como son: escasez de agua, contaminación, deforestación, sobrepoblación, extinción de especies, etc., que traen consigo consecuencias naturales desastrosas como son: huracanes, terremotos, tornados y aumento en la temperatura promedio del planeta, fenómeno llamado hoy en día “*cambio climático*”.

El cambio climático, tema principal hoy en todo el mundo, es preocupante, ya que este problema crece año con año y los daños producidos por el mismo son catastróficos; es por ello que diferentes organizaciones e instituciones están tratando de dar solución a este problema, aplicando nuevos métodos de preservación de los recursos naturales, además de la reducción en la contaminación ambiental que genera el ser humano. La finalidad es que con el tiempo esto pueda erradicarse y preservar las condiciones de vida plena en el planeta.

1.1. El Cambio climático.

1.1.1. El clima.

Para entender el fenómeno del cambio climático global, primero hay que entender lo que es el clima. El clima terrestre es producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y, muy importante, la vida en el planeta (plantas, animales de bosques, selvas y océanos en la atmósfera).

Las condiciones ambientales de nuestro planeta, varían día a día. Sin embargo, a esas variaciones (temperatura, lluvia, etc.) no se les llama clima, sino “estado del tiempo”.

En buena parte del planeta se espera frío en el invierno y calor en el verano. Así mismo, se espera que en la primavera inicien las lluvias y que éstas sean más intensas y regulares en el verano. Esto que esperamos se llama clima.

Para medir al clima es necesario medir diariamente las condiciones de temperatura, lluvia, humedad y viento; además de observar las condiciones de nubosidad, la trayectoria de los huracanes y de las masas de aire frío que entran por el norte a nuestro país.

El estado del tiempo se observa en lapsos (días) en cada localidad, región o país. El clima de una localidad, región o país se determina a partir de años de estudio de observaciones y mediciones del estado del tiempo [1,2].

1.1.2. Problemas de la atmósfera.

Cuando un parámetro meteorológico, como la precipitación o la temperatura, sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida e incluso cambios en las características del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.) resultado de la actividad humana. Es por ello que se constituye un reto científico distinguir que produce cambios en el clima de un año a otro, o en escalas mayores de tiempo.

De acuerdo con los científicos que han analizado este fenómeno, cada vez se tendrán climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos. Los estudios del fenómeno han concluido que el cambio climático es producto, principalmente, de la actividad humana. El uso intensivo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gasolinas, diesel, gas natural y los combustibles derivados del petróleo) y la quema y pérdida de bosques son dos de las principales causas de este problema.

La convención de 1992, en el marco de Organización de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), dio a conocer una definición del fenómeno; [3] "cambio climático", menciona que un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Este fenómeno se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta, directamente vinculada con el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, producto de actividades humanas relacionadas con la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón) y el cambio de uso de suelo (deforestación).

A lo largo de sus más de 4000 millones de años, la Tierra ha sufrido gran cantidad de cambios climáticos. Todos los cambios climáticos han originado una disminución de la biodiversidad y un cambio del hábitat y del paisaje. Han generado también distintos modos de producción, la apertura o cierre de ciclos comerciales y, consiguientemente, la aparición de nuevos inventos, técnicas o herramientas de evolución social. La naturaleza y sus habitantes debieron acomodarse a un desarrollo sostenible y a una dimensión social nueva [4].

1.1.3. El efecto invernadero y el calentamiento global.

La energía que recibimos del Sol y que llega a la parte alta de la atmósfera se compone de radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja. Para cuando esta energía solar llega a la superficie de la Tierra, ya ha sido absorbida en parte por el ozono, el vapor de agua y otros componentes de la atmósfera, además de la vegetación; de manera que la energía que realmente llega a la superficie terrestre se distribuye en un 49% de radiación infrarroja, un 42% de luz visible y un 9% en radiación ultravioleta.

En definitiva, alrededor de un 30% de la energía que recibe la Tierra se refleja y devuelve al espacio, mientras que el 70% restante se absorbe, pero no de manera uniforme (es mayor en los polos, por ejemplo) sino que existen unas diferencias que producen fenómenos de convección, corrientes atmosféricas que transportan calor, evaporación y condensación que producen el clima.

Según la cantidad de radiación infrarroja que emite la Tierra (240 W.m^2), se sabe que su temperatura debería ser de unos $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. Pero lo cierto es que la Tierra tiene una temperatura media de 15°C . La energía a la que equivalen los $33 \text{ }^\circ\text{C}$ de

diferencia entre las temperaturas anteriores, permite que exista una estabilidad en la temperatura del planeta y con ello la existencia de vida en él. Gracias a una concentración adecuada de gases atmosféricos, tales como el dióxido de carbono, el metano y los óxidos de nitrógeno, se retiene la energía necesaria para generar estos 33 °C y se libera al espacio la energía restante.

El efecto invernadero es un fenómeno natural y beneficioso, pero el problema se presenta cuando por causas humanas se produce un aumento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero. Esto genera que la energía quede atrapada y se libere más lentamente, lo que aumenta este efecto y produce un calentamiento global del planeta.

Según el informe de 2001 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (PICC), la temperatura media de la Tierra ha aumentado 0.6°C en los últimos 100 años, pero es muy difícil saber si este incremento se debe a causas naturales o a las actividades humanas, debido a que el clima es un sistema tremendamente complejo en el que influyen gran cantidad de factores.

Para analizar las variaciones en el clima y su relación con ciertas variables, se crean complejos modelos con base en sistemas de ecuaciones que intentan simular su comportamiento real y tratan de hacer predicciones sobre su evolución. Estos modelos, al margen de pequeñas diferencias entre ellos, han coincidido en establecer una relación directa entre el calentamiento global y el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera por la acción humana. De hecho, en su informe de 1995, el PICC afirmó que el conjunto de evidencias sugiere un cierto grado de influencia humana en el clima global [3].

De continuar la tendencia que desde 1976 sigue el calentamiento global, la configuración de nuevas condiciones climáticas, aunque no precisamente de equilibrio, no se harán esperar y podría tener lugar un acontecimiento completamente inédito: un cambio climático cuyo principal detonante tendría como origen causas antropogénicas.

En un orden de ideas podríamos considerar la siguiente secuencia: un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (H₂O, CO₂, O₃, CH₄, N₂O y algunos aerosoles), sobre todo dióxido de carbono (CO₂), potencia dicho efecto, repercutiendo en el aumento progresivo de la temperatura media global de la baja atmósfera y de la superficie terrestre (calentamiento global), lo que paulatinamente, y de manera sostenida en el tiempo, conlleva la modificación de las condiciones climáticas iniciales a un nuevo estado (cambio climático) [5].

1.1.4. Los gases de efecto invernadero (GEI).

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [6]: "Por gases de efecto invernadero se entiende aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos (de origen humano), que absorben y reemiten radiación infrarroja". Así mismo, son los responsables de la

existencia del efecto invernadero, fenómeno que mantiene la temperatura de la Tierra y que permite la presencia de vida en el planeta.

Como se ha mencionado anteriormente, los GEI se consideran de origen natural y antropógenos. Los naturales son vapor de agua (H_2O), bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y ozono (O_3); por otra parte, los de origen antropógeno considerados en el protocolo de Kyoto son: bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), perfluorometano (CF_4), perfluoroetano (C_2F_6), hidrofluorocarbonos (nombres comerciales: HFC-23, HFCS-134a, HFC-152a), hexafluoruro de azufre (SF_6).

Los GEI que existen de manera natural se mantienen con cierto equilibrio dentro de la atmósfera, debido a los procesos geofísicos del planeta; tales como el ciclo del agua y el ciclo del carbono.

Sin embargo, las actividades humanas han aumentado la concentración de los GEI en la atmósfera. El origen de algunos GEI provenientes de actividades humanas es [7]:

- a) El bióxido de carbono (CO_2) proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural, o sus derivados) en la producción de energía, en el funcionamiento de los procesos industriales, y en su uso en el sector transporte; también proviene de los procesos industriales [como la producción de cemento, cal, sosa, amoníaco, carburos de silicio o de calcio, acero, y aluminio], la deforestación que provoca la descomposición de la materia orgánica- y de la quema de la biomasa vegetal.
- b) El metano (CH_4) proviene de la agricultura (p.ej. cultivo de arroz), el uso del gas natural [el metano es un componente del gas natural], la descomposición de los residuos en los rellenos sanitarios, y del hato ganadero.
- c) El óxido nitroso (N_2O) se genera en la producción de ácido nítrico, el uso de fertilizantes, en incineración de residuos, y en la quema de combustibles en el sector transporte.
- d) El perfluorometano, el perfluoroetano y los hidrofluorocarbonos (HFC) se generan en la producción de aluminio, espumas de poliuretano, ciertos solventes de limpieza especializados, aerosoles, y compuestos empleados en extintores. También pueden emitirse a la atmósfera por fugas o mal uso de los gases refrigerantes contenidos en refrigeradores, congeladores, equipos de aire acondicionado de casas, comercios y automóviles, y en equipos de refrigeración de empresas, transporte (tráileres refrigerados), o de empresas productoras de hielo.
- e) El hexafluoruro de azufre (SF_6) se genera durante la producción de ciertos tipos de aluminio, en fundiciones de aluminio o magnesio, y puede emitirse a la atmósfera por fugas o accidentes con equipo eléctrico de alto voltaje que emplea al SF_6 como aislante.

1.1.4.1. El Protocolo de Kyoto.

El Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático fue establecido en el marco de la CMNUCC, y representa un acuerdo internacional que tiene como objetivo reducir las emisiones de seis GEI que causan el calentamiento global, siendo éstos: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). El valor acordado deberá ser menor al 8% a nivel global, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990.

El acuerdo del Protocolo ha inducido a que los gobiernos establezcan leyes y políticas para cumplir sus compromisos, a las empresas a considerar el medio ambiente en sus políticas y acciones a la hora de tomar decisiones sobre sus inversiones y, además, ha propiciado la creación del mercado del carbono.

En general, el Protocolo de Kyoto es considerado como un primer paso hacia un régimen verdaderamente mundial de reducción y estabilización de las emisiones de GEI, y proporciona la arquitectura esencial para cualquier acuerdo internacional sobre el cambio climático que se firme en el futuro [8].

1.1.4.2. Emisiones de los gases de efecto invernadero.

Con el inicio de la Revolución Industrial, la concentración de los GEI de la atmósfera se incrementó como sigue: bióxido de carbono (CO₂), 31%; metano (CH₄), 51%, y óxidos de nitrógeno (N₂O), 17% [9].

Sin embargo, para el siglo XX y XXI esto no ha sido así, ya que la mayor concentración de las emisiones de GEI se concentran en el CO₂ que representa el 70 %, mientras que el CH₄ representa un 23 % y el N₂O un 7 % [10].

De acuerdo con el PICC, se han considerado seis categorías de emisiones de GEI, que son [11,12]: Energía (1), Procesos Industriales (2), Solventes (3), Agricultura (4), Silvicultura (5) y Desechos (6). Estas categorías consideran todos los grupos de GEI, por lo tanto, hoy en día cada una de ellas busca en su mayor parte reducir principalmente las emisiones de CO₂.

En el nivel mundial, la mayor contribución de las emisiones provienen de la categoría de energía, es por ello que se han cuantificado las emisiones de CO₂ en todo el mundo hasta el año 2009; considerando principalmente esta categoría, ya que dentro de ella se encuentran clasificados los combustibles fósiles, principal fuente de emisión y problema en el nivel mundial. La distribución de las emisiones comprende nueve regiones: Lejano Oriente, Medio Oriente, Oceanía, África, Norteamérica, Europa Oriental, Europa Occidental, Latinoamérica y Asia, cuyos porcentajes se muestran en la **Figura 1**. El total de emisiones de CO₂ estimadas para el año 2009 fue de 30.398 mil millones de toneladas métricas.

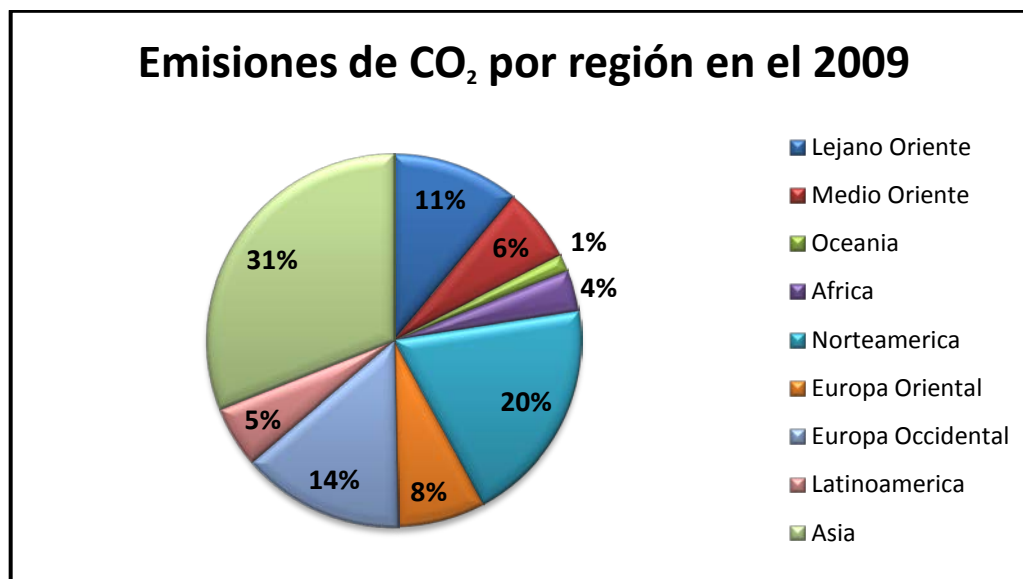


Figura 1. Emisiones de CO₂ generadas por la categoría de energía en el mundo durante el año 2009 [13].

En las nueve regiones consideradas existen ciertos países que tienen mayor contribución; tal es el caso de los Estados Unidos, que aportan un 91 % de la región de Norteamérica. En la región de Centro y Sudamérica, México y Brasil contribuyen con el 52% de las emisiones; México contribuye con 443.6 (26.6%) de las 1663.4 millones de toneladas de dióxido de carbono que se emiten en la región. Otros países que emiten más de 100 millones de toneladas de CO₂ son: Venezuela (161.9) y Argentina (166.9).

Existen 15 países que contribuyen con un 73.6% de las emisiones mundiales de CO₂; entre ellos se encuentra México, en la posición 12, con 1.46%. Además de considerar a China y a Estados Unidos como los dos principales emisores, con 7706.8 y 5424.5 millones de toneladas de CO₂ respectivamente, lo que representa el 43.2% [13]. A continuación se muestran en la **Tabla 1** las principales emisiones de CO₂ en el nivel mundial, para la categoría de energía.

Tabla 1. Principales países emisores de CO₂ durante el periodo de 2005–2009 [14].

Emisiones de CO ₂ (Millones de Toneladas) en la categoría de energía						
Posición Mundial	País	Año				
		2005	2006	2007	2008	2009
1	China	5512.70	5817.14	6256.70	6800.47	7706.83
2	Estados Unidos	5991.47	5913.68	6018.13	5833.13	5424.53
3	Rusia	1652.69	1675.47	1627.20	1671.97	1556.66
4	India	1183.28	1282.68	1368.38	1463.30	1591.13

Continuación tabla anterior						
Posición Mundial	País	Año				
		2005	2006	2007	2008	2009
5	Japón	1241.26	1239.89	1254.44	1215.48	1097.96
6	Alemania	847.36	850.62	827.23	823.07	765.56
7	Canadá	623.43	597.23	610.00	598.46	540.97
8	Reino Unido	583.06	585.50	569.89	563.88	519.94
9	Corea del Sur	493.80	484.21	503.10	521.77	528.13
10	Irán	449.22	475.85	489.33	512.06	528.60
11	Sudáfrica	432.53	444.60	463.73	483.68	451.22
12	México	397.81	436.95	444.26	452.05	443.61

1.1.5. Gases de efecto invernadero en México.

Las estimaciones de emisiones antropogénicas se informan desglosadas por gases y categorías de emisión. En muchos informes las emisiones se emplean en unidades de CO₂ equivalente, utilizando para ellos los potenciales de calentamiento global proporcionados por el PICC en su Segundo Informe de Evaluación, mismos que se basan en los efectos de los GEI en un horizonte temporal de 100 años (**Tabla 2**).

Tabla 2. Potencial de calentamiento global de los GEI.

ESPECIE	FÓRMULA QUÍMICA	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL
Bióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Oxido nitroso	N ₂ O	310
HFC-23	CHF ₃	11700
HFC-32	CH ₂ F ₂	650
HFC-125	C ₂ HF ₅	2800
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	1000
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	23900
Perfluorometano	CF ₄	6500
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	9200

El concepto de CO₂ equivalente se define como la concentración de bióxido de carbono que podría causar el mismo grado de forzamiento radiactivo que una mezcla determinada de dióxido de carbono y otros GEI. Es decir, las cantidades emitidas por otros gases diferentes al CO₂ multiplicados por su potencial de calentamiento global, dan como resultado la emisión que representaría el gas como CO₂. En México, tomando en cuenta las categorías de emisiones de GEI clasificadas por el PICC, se tienen registros de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de ellas del año 1990 al 2002 los cuales se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Emisiones de CO₂ equivalente por categoría de emisión [12].

Categoría de emisión	Emisiones en millones de toneladas de CO ₂ equivalente						
	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
1 Energía	312.02	321.83	342.89	349.43	394.12	398.62	389.49
1A Consumo de combustibles fósiles	279.86	291.04	308.93	311.19	351.76	356.79	350.41
1B Emisiones fugitivas	32.16	30.79	33.96	38.24	42.36	41.83	39.08
2 Procesos Industriales	32.45	32.87	39.24	42.74	50.97	55.85	52.10
4 Agricultura	47.42	46.04	45.50	44.07	45.44	45.52	46.14
6 Desechos	33.35	36.93	46.86	52.89	62.65	63.21	65.58
Total	425.24	437.67	474.49	489.13	553.18	563.2	553.31

Las emisiones de las categorías de solventes y silvicultura no fueron contabilizadas, debido a que las emisiones producto de ellas fueron prácticamente despreciables en comparación a las otras categorías.

Las **Figura 2** muestra en forma gráfica la contribución porcentual por categoría de emisión.

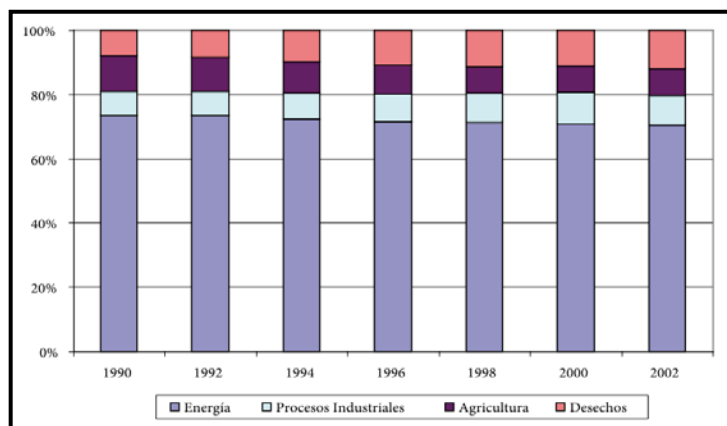


Figura 2. Contribución por categoría de emisión en el periodo 1990-2002.

Las emisiones por tipo de gas en la categoría de energía son mencionadas en la **Tabla 4**.

En 2002, la contribución de los diferentes sectores que son parte de la subcategoría de consumo de combustibles fósiles, en lo que respecta a fuentes fijas y de área generaron 236029 Gg. A continuación se describen cada uno de los sectores que integran esta subcategoría:

- El 64.7% (152710.7 Gg) del total de las emisiones de GEI generadas por las fuentes fijas de combustión, pertenecen a las industrias de la energía.
- El 21.7% (51218.3 Gg) son generadas por los sectores de manufactura e industria de la construcción.
- El 13.6% (32099.9 Gg) restante lo producen los sectores residencial, comercial y agropecuario.

Tabla 4. Emisiones de GEI en la categoría de energía, 1990-2002.

GEI	Emisiones en Gg de CO ₂ equivalente						
	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
CO ₂	276490	287518	305152	307889	349233	353868	346361
CH ₄	34371	33086	36280	39964	43005	42605	40634
N ₂ O	1166	1232	1467	1578	1891	2155	2501
Total	312027	321836	342899	349431	394129	398628	389496

Otra categoría importante a considerar por su acelerado crecimiento y desarrollo en los últimos años, además de tomar interés en esta investigación es la de procesos industriales, cuyas producciones de cal, cemento y utilización de caliza vienen implícitas.

Las emisiones generadas por gas en la categoría de procesos industriales se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Emisiones de GEI por gas, categoría de procesos industriales, 1990-2002, Gg en equivalentes de CO₂.

GEI	Emisiones en Gg de CO ₂ equivalente						
	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
CO ₂	31142.8	32168.7	38001.7	39519.7	44016.4	50442.1	47069.1
CH ₄	107.7	98.3	92.4	100.5	98.7	96.8	76
N ₂ O	502.2	310	43.4	1010.6	709.9	254.2	111.6
HFC	--	40.4	463.6	1469.8	2770.6	4414	4425.2
PFC	701.2	257.5	642.6	638.1	642.6	635.9	405.1
SF ₆	2.4	3.4	3.9	5.2	6.1	8.1	15.2
Total	32456.3	32878.3	39247.6	42744	48244.3	55851.1	52102.2

Considerando el enfoque de la presente investigación y la información mencionada anteriormente, los problemas de mayor importancia por estudiar, para reducir las emisiones de GEI, son las categorías de Energía y Procesos industriales, ya que dentro de ellas se ubica el sector de la industria de la construcción, que se basa en la utilización de diversos materiales que tienen como materias primas el cemento y el acero.

En la fabricación del cemento portland se generan diferentes contaminantes que son liberados al ambiente, principalmente a la atmósfera, con este tipo de emisiones se incorporan más GEI, siendo el más importante y dañino el CO₂. Al producir una tonelada de cemento se genera aproximadamente una cantidad igual de CO₂, por lo cual se hace prioritario reducir o bien captar este tipo de emisiones. En 2007, los principales productores de cemento fueron Estados Unidos, India y China con las cantidades de 100, 180 y 1300 millones de toneladas, respectivamente. La industria cementera aporta el 5% de las emisiones de CO₂ del mundo [15,16].

En los últimos años, el concreto ha sido el material de construcción más utilizado en el mundo, cerca de 25 billones de toneladas se usan cada año y este número continua incrementándose. Al incrementarse el consumo de concreto, también se incrementa el consumo de cemento y otros materiales como el acero de refuerzo, generando grandes emisiones de GEI principalmente CO₂, siendo este tan solo un ejemplo de los problemas ambientales que se tienen y que se requiere remediar [17].

El problema del cambio climático, calentamiento global y la excesiva emisión de GEI es un problema que ha generado muchas consecuencias entre las que se destaca: las áreas desérticas serán más cálidas, pero no más húmedas, lo que provocará graves efectos, sobre todo donde hay escasas de agua, como en África y Oriente Medio. Casi la mitad de los glaciares se fundirán y si tenemos en cuenta que el 11% de la superficie terrestre es hielo, resultan bastante creíbles las previsiones sobre el aumento del nivel del mar de entre 0.4 y 0.65 m, haciendo desaparecer muchas zonas costeras. Las precipitaciones aumentarán entre un 3 y un 15%; además, muchas tierras de cultivo, podrían perderse, al convertirse en desiertos.

Por todo lo anterior, la humanidad ha comenzado a comprender los problemas a que se enfrenta y ha comenzado a cuidar más el medio ambiente, a trabajar con lo indispensable sin necesidad de sobreexplotar los recursos disponibles y a llevar una convivencia solidaria con el medio que le rodea, para garantizar un futuro más prometedor, es decir ha intentado ser más sustentable.

1.2. La sustentabilidad.

La sustentabilidad es un concepto que desde hace varias décadas ha llamado la atención a especialistas de diferentes disciplinas: biólogos, sociólogos, antropólogos, geógrafos, ingenieros civiles, urbanistas y arquitectos, entre otros, quienes han intentado definir cada vez con mayor precisión su significado; actualmente ésta ha tomado gran importancia debido al temor mundial por el calentamiento global, el cambio climático, y las consecuencias catastróficas que ambos conllevan.

Esta historia se inició en la década de los años setenta, cuando la defensa del medio ambiente se convirtió en uno de los temas más importantes de las campañas y agendas políticas en distintos países. Fue precisamente en junio de 1972, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, celebrada en

Estocolmo, Suecia, cuando creció la convicción de que se estaba atravesando por una crisis ambiental de nivel mundial.

A partir de esta conferencia, donde se reunieron 103 estados miembros de las Naciones Unidas y más de 400 organizaciones gubernamentales, se reconoció que el medio ambiente es un elemento fundamental para el desarrollo humano. Con esta perspectiva se iniciaron programas y proyectos que trabajarían para construir nuevas vías y alternativas con el objetivo de enfrentar los problemas ambientales y, al mismo tiempo, mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales para las generaciones presentes y futuras [18].

En 1987, la Comisión de Medio Ambiente de la ONU emitió un documento titulado "Nuestro futuro común", también conocido con el nombre de Informe Brundtland. En este estudio se advertía que la humanidad debía cambiar sus modalidades de vida y de interacción comercial, si no deseaba el advenimiento de una era con inaceptables niveles de sufrimiento humano y degradación ecológica. Así mismo apareció el término desarrollo sostenible que se define como:

"El desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades".

Posteriormente, del 3 al 14 de junio de 1992, se celebró la segunda "Cumbre de la Tierra", en Rio de Janeiro. Ahí se dio origen a la Agenda 21, donde fueron aprobados los Convenios sobre el Cambio Climático, el Convenio sobre la Diversidad Biológica, la Declaración de Río y la Declaración de Principios Relativos a los Bosques. Fue en este foro donde se comenzó a dar amplia publicidad al término desarrollo sostenible al público en general y, cabe citar, que precisamente ahí fue donde se modificó la definición original del Informe Brundtland:

"El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades"

La Declaración de Johannesburgo, sobre el Desarrollo Sostenible, se realizó en el marco de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo (Sudáfrica) del 2 al 4 de septiembre de 2002, en la cual se reafirmó el compromiso mundial en pro del desarrollo sostenible.

En la Declaración, los firmantes asumieron la responsabilidad colectiva de promover y fortalecer, en los planos local, nacional, regional y mundial, los tres principios básicos del desarrollo sustentable: economía, sociedad y medio ambiente, los cuales se presentan en la **Figura 3**. El desarrollo sustentable se definió como:

"El desarrollo sustentable atiende las necesidades actuales sin sacrificar la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas"

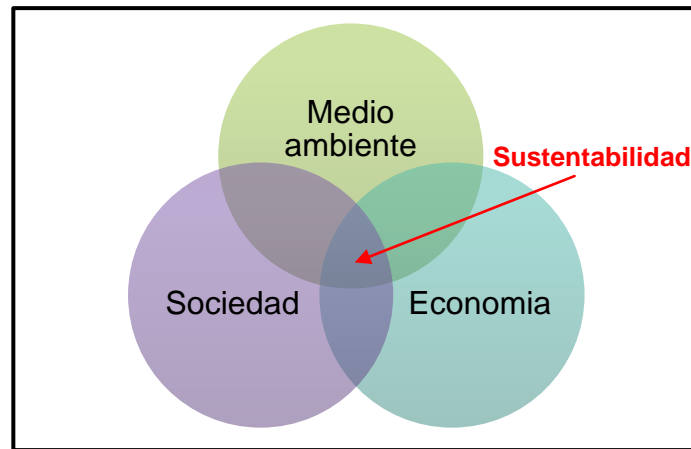


Figura 3. Elementos fundamentales del desarrollo sustentable.

En Johannesburgo se reconoció la realidad de que la sociedad mundial tiene los medios y los recursos para responder a los retos de la erradicación de la pobreza y el logro del desarrollo sostenible que enfrenta toda la humanidad. Estableciéndose que unidos se redoblarían los esfuerzos para que esos recursos disponibles sean aprovechados en beneficio de todos.

Se exhortó a los países desarrollados que no lo hayan hecho a que tomen medidas concretas para alcanzar los niveles internacionalmente convenidos de asistencia oficial para el desarrollo. Se reconoció que el desarrollo sostenible exige una perspectiva a largo plazo y una amplia participación en la formulación de políticas, la adopción de decisiones y la ejecución de actividades a todos los niveles [18,19].

En resumen, habría que decir que la sustentabilidad hace referencia en primer lugar a los seres humanos, el concepto clave es mantener las condiciones planetarias favorables para el desarrollo de la vida humana en los niveles global y local. Pero para lograr este objetivo es preciso cumplir ciertos requisitos, el primero es equilibrar las necesidades humanas con la capacidad de carga del planeta para proteger a las generaciones futuras. Esto significa que los efectos de las actividades humanas se mantengan dentro de límites que eviten la destrucción de la diversidad, la complejidad y el funcionamiento de los sistemas ecológicos que soportan la vida

La aplicación de la sustentabilidad en la vida diaria ha ido aumentando con el tiempo y cada persona que integra desde un hogar hasta una emblemática empresa o industria está llevando a cabo esta tarea tan importante.

En los últimos años la industria de la construcción ha venido aplicando procesos sustentables en su labor productiva, con materiales que son producidos con subproductos industriales o desechos, consumiendo en menor grado materias primas de mayor contaminación, aplicando equipos de construcción que consuman menos energía y sean más eficientes, evitando la deforestación e invasión en zonas de protegidas de flora y fauna que propician la extinción de algunas especies o la pérdida de ecosistemas.

En México, la industria de la construcción, además de hacer más sustentables sus actividades productivas, intenta aprovechar esto para ofrecerle a la sociedad sobre todo a la de escasos recursos, la oportunidad de utilizar materiales sustentables para construir una vivienda digna.

1.2.1. La vivienda en México.

El acceso a una vivienda digna es una condición necesaria para el desarrollo pleno del individuo. A escala mundial, se dedican importantes recursos públicos para mejorar la vivienda, y en algunos países se utiliza como herramienta para combatir la pobreza.

Al hablar de vivienda, en la mayoría del país se refiere a una construcción hecha de materiales de construcción basados en mampostería, ya sea de arcilla, concreto o mortero, con y sin refuerzo. La mampostería es una estructura económica, pero con un potencial estructural adecuado que cumple los requisitos para edificar una vivienda.

El sector vivienda ha sufrido un rezago histórico, que actualmente sigue vigente y además en aumento. En 2000 el rezago era de 4.3 millones de viviendas al año 2000, compuesto por 1.8 millones de viviendas nuevas que es necesario construir para reponer las viviendas muy deterioradas y para atender a los hogares sin vivienda que existían en el 2000, y 2.5 millones de viviendas que es necesario mejorar mediante ampliaciones y otras obras.

En el país, para 2010, el parque habitacional en su conjunto es de 35;617,724 viviendas. La mayor parte se encuentra habitada (28;607,568), lo que representa 80.4% del conjunto. En cambio, están deshabitadas 4;997,806 viviendas particulares (14.0%) y el resto 2;012,350 (5.6%), se utiliza de manera temporal.

En términos absolutos, las viviendas particulares habitadas se incrementaron 6.7 millones en los últimos 10 años; con una tasa de crecimiento entre 2000 y 2010 de 2.6 por ciento. Lo que significa que el parque habitacional sigue crecimiento por encima de la tasa de crecimiento poblacional.

En el periodo 2006-2012 se requería construir 4.4 millones de viviendas nuevas y mejorar más de 2.9 millones. Siendo las zonas urbanas donde se presentaría mayor demanda, en una razón de 4 a 1 respecto a lo rural, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) considera que los principales retos son: contar con reservas territoriales suficientes, haciendo énfasis en la importancia de los conjuntos habitacionales emblemáticos y propiciar el crecimiento armónico de las ciudades, tomando en cuenta un desarrollo sustentable.

La zona sur del país es la que presenta las mayores necesidades de mejoramiento de vivienda, mientras que la mayor demanda por vivienda nueva se ubica precisamente en los Estados y municipios de mayor crecimiento poblacional, como en la Baja California.

La propuesta de CONAVI para atender esta situación es encontrar alternativas de financiamiento acordes con su ingreso y una política de subsidios para los hogares de bajos ingresos, particularmente para las zonas rurales. [20,21].

La población de clase social baja requiere que la industria de la construcción tome conciencia de sus problemas de vivienda y, por ello, la aplicación de nuevos materiales, equipos o accesorios sustentables que cuiden al medio ambiente y beneficien a la sociedad actual y futura podría ser una solución, ya que estos brindarían resultados similares a los de uso común y resultarían ser más económicos.

Además, las instituciones de investigación prestan sus servicios para la innovación de este rubro. El trabajo en la generación de nuevos materiales de construcción ha comenzado a generar expectativas que poco a poco se verán reflejadas en resultados prometedores que ayuden a un futuro mejor.

1.3. El cemento y el concreto.

El uso de materiales de cementación tiene una larga historia. El primer material aglomerante empleado por el hombre fue la arcilla, el que aún hoy en día se sigue utilizando. Los constructores del pasado usaban la arcilla para unir piedras o rellenar huecos entre las varas y los troncos, para formar una estructura sólida.

El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en 1985, cuando fue descubierto un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah El, en Galilea, Israel. El concreto fue fabricado usando cal, producida con caliza calcinada (cal viva, cal virgen); la cual, al mezclarse con el agua, se endureció formando el concreto.

Aproximadamente, en 2500 AC, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes mencionan que fue un mortero también de cal, mientras que otros mencionan que el material cementante se produjo por la quema de yeso. En 500 AC, el arte de la producción de morteros de cal llegó a la Grecia antigua. Los helenos usaban materiales con cal como aglomerante (conglomerante) 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. Se han encontrado ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 AC. La palabra concreto se deriva del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porque algunas cales poseían propiedades hidráulicas, mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton, frecuentemente llamado el “padre de la ingeniería civil en Inglaterra”, concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, que contenían materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos.

El desarrollo del cemento portland fue 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 que 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.

Aspdin fue el primero en prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero en patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. A partir de entonces el uso del cemento fue extendiéndose por todo el mundo, sus propiedades han sido mejoradas y en conjunto con agregados y adiciones minerales han creado concretos de alto comportamiento, capaces de satisfacer las necesidades de los proyectos demandados por la sociedad [22].

1.3.1. Propiedades y aplicaciones.

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidratados, con la característica de que fraguan y 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, finos (arena) y gruesos (grava), ya sean de piedra triturada, piedra machacada (semi-triturada), pedrejón (piedra redondeada o piedra de río) u otro material granular, la pasta actúa como adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y usado en el mundo.

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

Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece. La hidratación continúa mientras 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 resistente. La función principal del curado, es mantener una temperatura y contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación (colado) y del acabado, para que propiedades deseadas tales como: la durabilidad, la resistencia mecánica, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad adimensional,

resistencia a congelación y deshielo, puedan desarrollarse en el concreto endurecido [22].

Es recomendable colocar una lámina de agua sobre el concreto endurecido; pero también es efectivo el rociado o aspersión de la superficie, y la colocación de materiales que retengan la humedad o que impidan su pérdida. En la actualidad existen técnicas como las membranas de curado o el curado autógeno.

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado; y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente diseñado, cada partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con ella.

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento. Cuando grandes cantidades de agua se usan innecesariamente éstas diluyen la pasta de cemento (el pegamento del concreto). Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

- ❖ Aumento de la resistencia a la compresión y flexión.
- ❖ Durabilidad.
- ❖ Aumento de la resistencia a la intemperie.
- ❖ Mejor unión entre el concreto y la armadura.
- ❖ Reducción de la contracción (retracción) y de los agrietamientos (fisuración).
- ❖ Menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado.

Cuanta menos agua se usa, mejor es la calidad del concreto, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezcla resultan en mezclas más rígidas (secas); pero, con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejor calidad del concreto. Esta técnica se usa en prefabricados, especialmente en la mampostería vibro-comprimida, dando excelentes resultados.

Tanto las propiedades del concreto fresco (plástico) como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos químicos, normalmente en forma líquida, durante la dosificación. Los aditivos químicos comúnmente se emplean para:

- ❖ El ajuste del tiempo de fraguado o de endurecimiento.
- ❖ La reducción de la demanda de agua.
- ❖ El aumento de la trabajabilidad (manejabilidad).

- ❖ La inclusión de aire.
- ❖ El ajuste de otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

Después de terminar el proporcionamiento, la dosificación, el colado, la consolidación, el acabado y el curado; adecuados, según las necesidades requeridas, el concreto se endurece y se transforma en un material no combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable, que requiere un mínimo mantenimiento para su conservación. Además, el concreto puede ser moldeado en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en un número ilimitado de aplicaciones, es por ello que es uno de los materiales de construcción de mayor uso en el mundo. Este material tiene un gran futuro y cada vez más aplicaciones.

1.4. Los materiales puzolánicos.

Las puzolanas se definen como aquellos materiales silico o silico-aluminosos, que por sí solos poseen poco o nulo valor cementante, pero que finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, a la temperatura ordinaria, para formar compuestos con propiedades cementantes [23]. En la **Figura 4** se muestra la clasificación de las puzolanas

Las puzolanas naturales son materiales derivados de las erupciones volcánicas, con excepción de las tierras diatomáceas, que se forman por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. En el caso del material de las erupciones volcánicas éste está compuesto principalmente por aluminosilicatos que al enfriarse bruscamente resultan en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea, con minerales pobremente cristalinos.

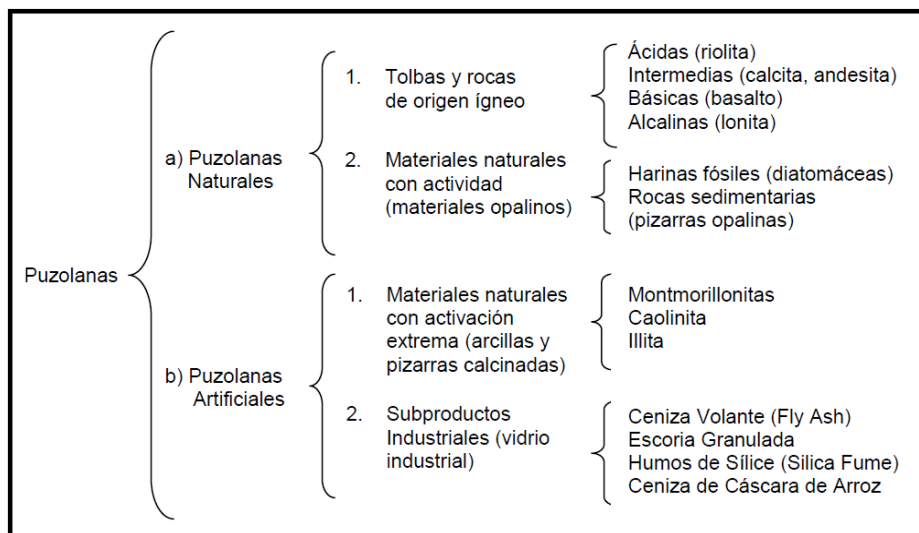


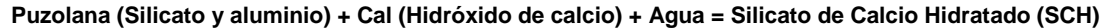
Figura 4. Clasificación de las puzolanas [24].

Los primeros en utilizar las puzolanas naturales fueron los fenicios, después los griegos, pero la palabra puzolana se acuñó en Italia y se utilizó para describir las

cenizas volcánicas de Pozzouli, una ciudad cerca de Nápoles. Los romanos utilizaron las cenizas de las erupciones del Monte Vesubio, mezcladas con cal para producir mortero que se empleó para construir sus edificaciones (mampostería), esta técnica también fue empleada por las culturas de Mesoamérica, como los Totonacas. Aunque dicho estudio fue de manera empírica, permitió a los antiguos ingenieros diseñar estructuras que hasta hoy en día se conservan prácticamente intactas, como las pirámides del Tajín, en México o el Panteón en Italia con más de 1000 años de antigüedad, demostrando las bondades de emplear puzolanas como cementantes alternativos.

Las puzolanas artificiales son subproductos industriales, que antiguamente se consideraban como desperdicio y contaminantes del medio ambiente, tal es el caso de la ceniza volante (residuo de la quema de carbón mineral para la producción de energía eléctrica), el humo de sílice (residuo de la producción de metales y aleaciones de silicio), las escorias de fundición y la ceniza obtenida de la quema de la cascarilla de arroz.. En la **Figura 5** se muestran ejemplos de algunas puzolanas.

Todas las puzolanas tienen una característica en común: contienen sílice reactiva, la cual al combinarse con el hidróxido de calcio (portlandita) en presencia de humedad y a temperatura ambiente, forma silicatos de calcio hidratados (C-S-H) similares a los que se forman durante la hidratación del cemento pórtland. Básicamente, la reacción puzolánica es de la siguiente manera:



Al fabricar concreto, si la puzolana se mezcla con el cemento pórtland en una proporción adecuada (entre 20-30%), teóricamente toda la cal producida por la hidratación del cemento pórtland puede ser transformada en C-S-H.



Figura 5. Materiales puzolánicos. De la izquierda a la derecha: ceniza volante (clase C), metacaolín (arcilla calcinada), humo de sílice, ceniza volante (clase F), escoria y esquisto [22].

El uso de materiales cementantes (antiguamente llamados suplementarios o complementarios), como se les denomina a las puzolanas en la tecnología del concreto, ha crecido desde la década de los 70s. La mayoría de estos materiales son subproductos de procesos industriales. En 2000 se tenía una producción mundial de subproductos de fuentes metalúrgicas y plantas termoeléctricas de 500 millones de toneladas [25].

Las puzolanas se agregan al concreto como parte del sistema cementante, ya sea en adición o sustitución parcial del cemento portland. El porcentaje empleado dependerá de sus propiedades y de los efectos esperados en el concreto; siendo generalmente usadas para mejorar una propiedad particular del mismo, como la resistencia a la reactividad álcali- agregado, aumento de la trabajabilidad, la reducción de la segregación, el sangrado y el calor de hidratación e incluso aumento de la resistencia mecánica.

Debe tenerse cuidado en la selección de la cantidad óptima de estos materiales. Esta información se debe establecer mediante pruebas para determinar si el material realmente mejora la propiedad en estudio. Una inadecuada dosificación puede ser perjudicial y los efectos buscados no se logran. También hay que tomar en cuenta que los materiales cementantes reaccionan de manera diversa con los diferentes tipos de cementos portland; en especial, con los cementos adicionados, ya que la puzolana reacciona el hidróxido de calcio que se encuentra disponible, compuesto que es aportado generalmente por el clínker, que disminuye la cantidad disponible en los cementos adicionados.

Así que, de forma general, el empleo de puzolanas en el concreto es deseable no sólo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía, sino también por los beneficios que estos materiales pueden ofrecer al mismo.

1.4.1. Sistemas cementantes.

Actualmente, debido a la facilidad de acceso a los materiales puzolánicos y otros cementantes, principalmente la cal, los productores de concreto pueden combinar dos o más de estos materiales, para optimizar las propiedades del concreto.

Las mezclas ternarias (que usan tres materiales cementantes) se están haciendo cada vez más comunes. Como puede verse, los sistemas cementantes están ligados íntimamente con las puzolanas, ya que éstas los conforman. Las mezclas binarias principalmente se emplean en los cementos adicionados, donde se combina cemento portland con “filler” de caliza o alguna puzolana. Las ternarias generalmente son producidas en las plantas concreteras, ya que es difícil encontrar en el mercado un cemento adicionado con diferentes puzolanas u otros cementantes y más aún, que sean las que requiere el proyecto.

Esto, en lugar de perjudicar al productor de concreto, le ayuda; ya que le da la libertad para elaborar el sistema cementante que el cliente requiere; prácticamente un

traje a la medida. En la actualidad, se emplean sistemas cementantes ternarios y cuaternarios en la producción de concretos de alto comportamiento o desempeño, para la fabricación de nuevos rascacielos y la tendencia es aumentar su uso y reducir el consumo de cemento portland en la producción de concreto. Consecuentemente, el reemplazo de cemento por materiales cementantes constituye no sólo una solución adecuada a algunos problemas de índole tecnológico, sino también a cuestiones económicas y de protección del medio ambiente, favoreciendo un desarrollo sustentable en la industria del concreto y sus derivados.

1.4.1.1. La ceniza volante.

Uno de los materiales cementantes de mayor uso en la industria del cemento y concreto es la ceniza volante, debido a su disponibilidad y bajo costo. En 1992 se produjeron 500 millones de toneladas de ceniza de carbón, y únicamente 32 millones de toneladas se usaron como puzolana por las industrias del cemento y del concreto, lo que representa aproximadamente un 7 por ciento de la ceniza total disponible.

En 2001, la producción anual de ceniza volante en los Estados Unidos fue de 68 millones de toneladas, de las cuales solamente un 34% se usó en diversas aplicaciones, entre las que destaca el concreto (ACAA). En China, cerca de 100 millones de toneladas de ceniza volante se descargan anualmente de las plantas carboeléctricas, pero solamente se utiliza la cuarta parte [26].

Para 2010, la producción mundial de ceniza volante se estimó en cerca de 780 millones de toneladas anuales. Además, se prevé la utilización de la ceniza volante, especialmente en la producción del concreto, teniendo beneficios ambientales, cuidando los recursos naturales y generando nuevos materiales sustentables. Así mismo, ofrecerá durabilidad a las estructuras, reducirá el uso de energía, se disminuirán las emisiones de GEI, se reducirán los depósitos de almacenamiento de la ceniza volante y con ello los riesgos potenciales de contaminación del aire [26-28].

De acuerdo con el American Concrete Institute (ACI) en su comité 116R, el concepto de ceniza volante se define como: “residuo finamente dividido que resulta de la combustión del carbón mineral en plantas generadoras de energía y que es transportado por los colectores de gases desde la zona de combustión hasta los sistemas removedores de partículas”. La ceniza volante es removida de los gases de combustión por los sistemas colectores de polvos, ya sea mecánicamente o por precipitadores electrostáticos, antes de ser descargados a la atmósfera.

1.4.1.1.1. Características y propiedades de la ceniza volante.

La ceniza volante está constituida de pequeñas partículas esféricas, algunas cenizas pueden presentar formas diversas, como lo son las cenosferas huecas o las plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores. Mientras que las cenizas volantes presentan una forma esférica, las partículas de cemento portland son sólidas y de forma angular, como se muestra en la **Figura 6**. Los tamaños de las partículas de

la ceniza volante varían aproximadamente de 1 a 100 μm , siendo el tamaño promedio de partículas de 20 μm .

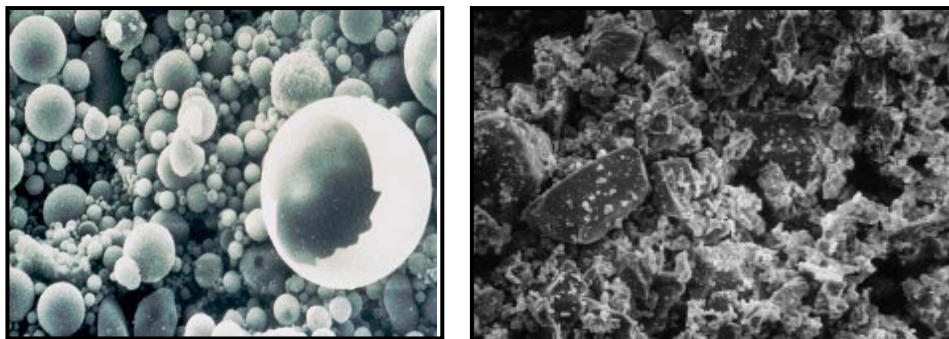


Figura 6. Micrografía y microscopía de la ceniza volante.

Las cenizas pueden tener diferentes fases minerales y composiciones químicas, porque están íntimamente relacionadas con el tipo y la cantidad de impurezas contenidas en el carbón utilizado en las plantas productoras de energía. El carbón de la misma fuente y usado en la misma planta, producirá, en teoría, el mismo tipo de ceniza volante, pero debido al proceso industrial empleado, la ceniza volante de una misma planta puede variar en su composición química.

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Las cenizas volantes pueden clasificarse de acuerdo con la ASTM C 618, reconociendo dos tipos de ceniza volante: la ceniza volante clase F y la clase C.

La ceniza volante clase F se produce usualmente en plantas de energía donde se quema antracita o extracto de carbón, por ejemplo en la parte Este de los Estados Unidos. Por otro lado, la ceniza volante de clase C es la que se produce en la quema de lignita o carbón de forma bituminosa, por ejemplo en el Sur y Oeste de los Estados Unidos [22].

La clasificación se basa principalmente en la composición química presente en cada una de las cenizas, pérdida por incineración (ignición) y contenido de óxido de calcio como se muestran en la **Tabla 6**.

En México, las cenizas volantes se han clasificado en tres grupos [22]: el grupo silico-aluminoso, las cuales corresponden principalmente a la clase F de ASTM C 618; el grupo silico-cálcico, que corresponde principalmente a la clase C de ASTM C 618 y el grupo sulfo-cálcico, el cual tiene a la vez un alto contenido de calcio y azufre.

Tabla 6. Clasificación de la ceniza volante, de acuerdo con sus características.

	Clase C	Clase F
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 50 %	> 70
CaO	> 10 %	< 10 %
SO_3	< 5.0 %	< 5.0
Alcalis disponibles como Na_2O	< 1.5 %	< 1.5 %
Pérdida a la incineración (LOI)	< 6.0 %, generalmente es < 1 %	< 6.0 % generalmente es > 3 %
Humedad	< 3.0 %	< 3.0

A pesar de las características físico-químicas de estas diferentes clasificaciones, no es sencillo incorporar una ceniza volante en una categoría en particular y predecir su comportamiento puzolánico en el concreto. Se ha encontrado que la mayoría de las cenizas volantes son materiales puzolánicos, pero algunas pueden no ser puzolánicas, mientras que otras poseen características cementantes por sí mismas.

En el norte del país, la ceniza volante se genera en las centrales carboeléctricas José López Portillo “Carbón I” y la “Carbón II” ubicadas en Nava, Coahuila, teniendo una producción anual de 3 millones de toneladas y 30 millones de toneladas almacenadas en bancos, cantidades que corresponden solamente a la carboeléctrica Carbón I.

Esta puzolana artificial fue clasificada por la ASTM como tipo F, por su baja cantidad de óxido de calcio, y la denominan localmente como “integral”, ya que tiene una granulometría compuesta por 3 diferentes tamaños de partículas, resultante del sistema de recolección de las plantas.

La puzolana reacciona con el hidróxido de calcio y agua para formar silicatos de calcio hidratados, que son semejantes a los formados por el cemento portland al hidratarse y son los principales responsables de las propiedades físicas y mecánicas de dicho compuesto. El hidróxido de calcio puede adicionarse en forma de cal hidratada o producido en la reacción de hidratación del cemento Portland (portlandita).

La capacidad que posee la puzolana para reaccionar con el hidróxido de calcio, depende principalmente de su estructura química: una estructura vítrea (amorfa), permite que el hidróxido de calcio reaccione con la sílice activa, formando los silicatos de calcio hidratados. Entre más amorfa sea, mayor será su reactividad, aportando S-C-H que incrementaran la resistencia mecánica del compuesto.

Para incrementar la reactividad de la puzolana se puede disminuir el tamaño de la partícula, ya que al hacerlo se aumenta el área superficial, lo que permite una mejor reacción puzolánica. También se puede acelerar dicha reacción mediante el empleo de un curado a temperatura mayor que la ambiental. Así, un curado con vapor de agua apoyará la resistencia a edades tempranas del compuesto. De esta manera se podrían

conjugar estas dos acciones para aumentar la reactividad de la ceniza volante en la fabricación de concretos y tener resultados favorables [29].

1.4.1.2. La cal.

La importancia histórica de la cal en la construcción se encuentra ampliamente documentada [30-34]. Los morteros de cal fueron utilizados en muchas de las grandes estructuras construidas por civilizaciones como los romanos, quienes fueron los primeros en usarlos ampliamente en sus edificaciones, desarrollando métodos de fabricación, en general, con base en cementante natural de cal y estableciendo técnicas apropiadas para su aplicación [35].

En el siglo XVIII, los trabajos de Smeaton condujeron al conocimiento científico sobre las propiedades de la cal hidráulica, lo que derivó en la tecnología y la patente del cemento Portland [36]. Desde el siglo XIX hasta hoy, la aparición del cemento Portland ordinario (OPC, por sus siglas en inglés) produjo un decrecimiento importante en el uso de la cal en la construcción, porque el OPC brinda un endurecimiento inicial más rápido y mayor resistencia a edades tempranas [37].

Existen beneficios derivados del uso de la cal en la industria de la construcción, algunos de los cuales se mencionan a continuación: su producción requiere menos energía en comparación con el cemento portland, para elevar las temperaturas al punto de calcinación, lo que implica menor emisión de GEI. Los morteros de cal permiten un acomodamiento en la mampostería, mientras los basados en CPO presentan una tolerancia menor a dicho movimiento. Además, presentan una menor conductividad térmica; mayor impermeabilidad y mejor adherencia para materiales de mampostería comparado con productos basados en CPO [38].

Los morteros de cal continúan interactuando con el ambiente después de endurecer durante el proceso de carbonatación y se adaptan a los cambios en las estructuras [39]. El endurecimiento por carbonatación se produce cuando el contenido de humedad ha disminuido lo suficiente y el Ca(OH)_2 reacciona con el CO_2 del aire formando CaCO_3 . Este proceso no puede realizarse bajo el agua; la carbonatación ocurre lentamente desde el exterior hacia el interior del mortero.

Las diferencias crecientes de los precios del combustóleo y otros combustibles usados por los fabricantes de cal son afectados directamente por el mercado internacional del petróleo, que contribuye a una mayor incertidumbre y volatilidad en los precios; de acuerdo con datos de la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL) la producción nacional anual de cal es de 6'000,000 de toneladas, mientras que el mercado demanda 4'000,000 de toneladas; esta industria mexicana vive una crisis propiciada por un mercado ofertado y costos crecientes, por lo que requiere cambios para su supervivencia. El incremento de calidad y la diversificación de productos con valor agregado, a partir de cal como materia prima, significan opciones para la viabilidad de empresas y empleos en México.

En el ciclo de la cal que se muestra en la **Figura 7**, la piedra caliza (CaCO_3) constituye en su estado natural el punto de partida obligado para la producción de la cal. Una vez extraída, se lleva a una instalación de trituración primaria donde se reduce hasta un tamaño máximo de entre 80 y 200 mm. La obtención de una u otras granulometrías varía en función del tipo y diseño del horno empleado (verticales, horizontales, y rotatorios). En la siguiente etapa, la calcita se calcina a una temperatura de entre 900 y 1200°C y luego, mediante transportes adecuados, la cal viva obtenida se lleva a silos de almacenamiento, desde donde puede ser distribuida en sacos o a granel. La siguiente etapa del proceso es la producción de cal hidratada o apagada; la cal viva se lleva al hidratador, donde se mezcla con la cantidad adecuada de agua para satisfacer su afinidad higroscópica. El ciclo se cierra con la carbonatación, reacción del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono del aire, con lo que regresa a un estado análogo al punto de partida como CaCO_3 .

En la actualidad existen varias marcas de cal comercial para la construcción que provienen de diferentes canteras, lo que las hace heterogéneas. La cal de los productores mexicanos afiliados a la ANFACAL está regulada por la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996, que establece que la cal hidratada para la construcción se clasifica en cuanto a su composición química en tipo único y en un mismo grado de calidad.

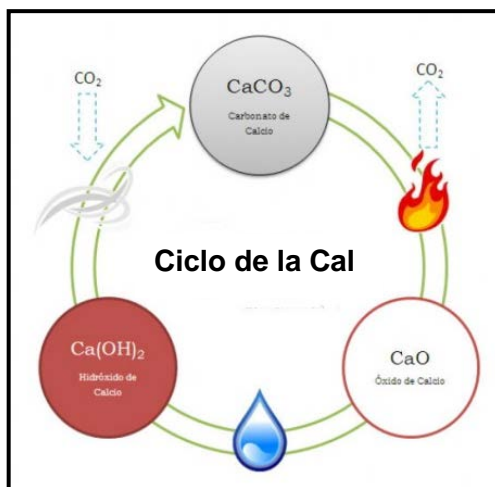


Figura 7. Ciclo de la cal.

Las marcas comerciales más populares en México son regularmente las disponibles en cada región, pero sobresalen: Calidra, El Tigre, Calfina, Perla, Incalpa, Cobra, Muro, Huescalapa, Santa Fe, Polar, Noroeste, Santa Emilia, Banderilla, Nachón, Teziutecas, Santa Cruz, Calizas Universales, Tehuacán, María Luisa, Santa María, Gloria, Guadalajara, Hidracán, San Lorenzo, Tirado, Nay, Colimán, Pet-Cal, Petrocal, El Piñón, Torreón, Chiapas, Panini, El Refugio, Oax, Santa Lucía, Aguascalientes, San Martín, Azteca, La Tehuana, Calfin, Calfort, Los Arcos, Maciel, Teloloapan, Zapotiltic, Calteco, Diamante, San Antonio, Carlan, Duracal, Titán, Mitza, BYM, Balún Canán, Del Valle, Porter, Marfil, Suprema, Toluca, Valasa, Tabora,

Edifical, Tepeyahualco, Topo, Calhifornia e Icor; diseminadas en el territorio mexicano incluidos algunos estados no productores (Chihuahua, Durango, Tlaxcala, y Nayarit), han sido indistintamente empleadas a lo largo de muchas décadas con resultados satisfactorios [40].

La cal tiene una infinidad de aplicaciones, tanto en el sector industrial y doméstico, como en el de la construcción. En este último sector, la cal como hidróxido de calcio puede aplicarse como mortero de juntas o recubrimientos, fabricación de pintura, estabilización de suelos o en la fabricación de mampostería. La aplicación en mampostería viene ampliándose en tiempos recientes, debido a las buenas propiedades de la pieza fabricada, reducción de costos y el cuidado al medio ambiente, es decir un proceso más sustentable.

1.5. La mampostería.

La mampostería se define como la elaboración de estructuras mediante la disposición ordenada de unidades (bloques, ladrillos, etc.), cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con el elemento que se va a construir (muro, bóveda, etc.), y cuyo peso y tamaño depende del sistema de manejo que se vaya a emplear [41].

El componente básico para la construcción de mampostería es la unidad o pieza, que por su origen puede ser natural o artificial. Las unidades de piedra natural se utilizan sin labrar o labradas. En México suelen distinguirse los siguientes tipos de mampostería, de acuerdo con la forma en que ha sido labrada la piedra natural. **Figura 8.**

- a) Mampostería de primera. La piedra se labra en paralelepípedos regulares con su cara expuesta de forma rectangular. Las unidades de este tipo reciben el nombre de sillares.
- b) Mampostería de segunda. La piedra se labra en paralelepípedos de forma variable siguiendo la configuración natural con que llega de la cantera.
- c) Mampostería de tercera. La piedra se utiliza con la forma irregular con que llega de la cantera, aunque procurando que la cara expuesta sea aproximadamente plana.

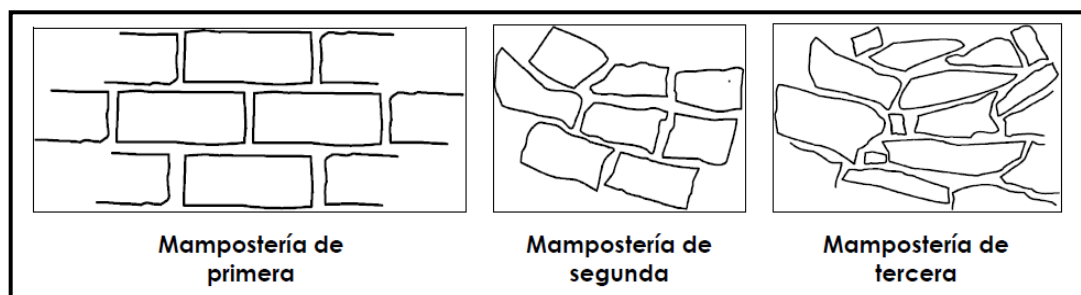


Figura 8. Tipos de mampostería de piedras naturales.

Existe una gran variedad de piezas de mampostería (piedras artificiales) que se utilizan en la construcción. Éstas difieren entre sí, tanto por la materia prima utilizada, como por las características geométricas de las piezas y por los procedimientos de fabricación empleados las materias primas más comunes son el barro, el concreto, con agregados normales o ligeros, y la arena con cal [41,42].

Los procedimientos de construcción son muy variados: desde los artesanales como el cocido en horno para los ladrillos comunes, hasta los industrializados (vibro compactación, para los bloques de concreto, y extrusión para el bloque hueco de barro).

Según la NMX-C-404, las piezas de mampostería que se utilizan con fines estructurales se clasifican en: ladrillos, bloques y tabicónes. Las características de cada una de ellas se mencionan a continuación:

Ladrillo: Fabricado de forma prismática, con arcillas comprimidas o extruídas, mediante un proceso de cocción o de otros materiales con procesos diferentes. Las dimensiones nominales mínimas deben ser 5 cm de alto, 10 cm de ancho y 19 cm de largo sin incluir la junta de albañilería.

Bloque: Fabricado por moldeo del concreto y/o de otros materiales, puede ser macizo o hueco. Las dimensiones nominales de las piezas deben basarse en el módulo de 10 cm en múltiplos o submúltiplos, estando incluida la junta de albañilería de 1 cm de espesor. Sus dimensiones mínimas deben ser de 10 cm de altura, 10 cm de ancho y 30 cm de largo. Las dimensiones de la pared deben ser de 2.5 cm como mínimo.

Tabicón: Componente macizo para uso estructural de forma prismática fabricado de concreto u otros materiales. Las dimensiones nominales mínimas deben ser de 6 cm de alto, 10 cm de ancho y 24 cm de largo.

1.5.1. Mampostería de roca, arcilla y concreto.

Una gran cantidad de materiales han sido utilizados como mampostería. Cuando las civilizaciones se desarrollaban en las riveras de los ríos, los depósitos aluviales eran utilizados para producir ladrillos. La cultura mesopotámica se ubico entre los ríos Tigris y Éufrates, y creó toda una arquitectura de ladrillos. Por su parte, los pueblos que existieron en las vecindades de las montañas utilizaron rocas, entre ellos los egipcios.

La primera mampostería de roca fue un conjunto de agregados naturales que eran seleccionados y se apilaban utilizando tierra como mortero entre ellos. Actualmente, el uso que se da a las rocas no es de tipo estructural, sino más bien como fachada. El basalto y el granito son algunos tipos de rocas comunes utilizadas en las construcciones de mampostería.

El uso de los ladrillos de arcilla en las construcciones se inició hace poco más de 10,000 años. Los ladrillos secados al sol fueron utilizados en las ciudades de Babilonia, Egipto, España, Centro y Sudamérica, así como en las reservaciones indias de los Estados Unidos. Aquí comenzó el uso del adobe cuyo nombre proviene del árabe “atob” que significa ladrillo secado al sol. En la actualidad, el proceso completo de fabricación de ladrillos está altamente mecanizado, por lo que permite reducir costos y tiempos de producción.

Las primeras unidades de mampostería de concreto aparecieron casi al mismo tiempo que el proceso de curado a vapor y del desarrollo de cemento de mejor calidad. Los primeros bloques de concreto no fueron muy populares, debido a que eran sólidos, y por lo tanto bastante pesados. Sin embargo, hoy en día este sistema de unidades se mantiene con un gran auge en su fabricación, predisponiendo de menores costos y buen comportamiento estructural, **Figura 9 [42,43]**.

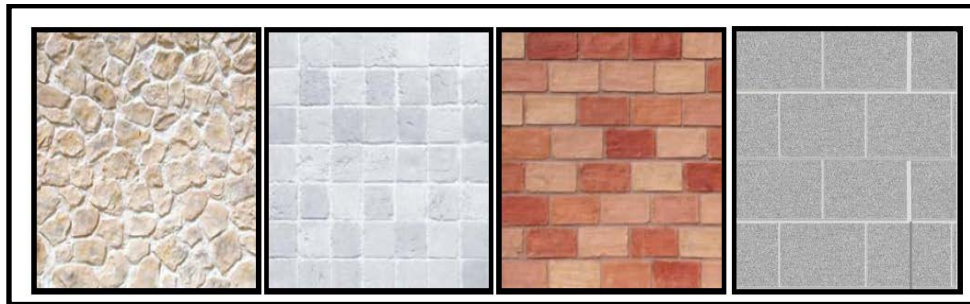


Figura 9. Diferentes tipos de elementos de mampostería (de izquierda-derecha): piedra seminatural, piedra tallada, ladrillo de arcilla, bloque de concreto.

1.5.2. El bloque de concreto.

El primer bloque de concreto fue diseñado en 1890 por Harmon S. Palmer en los Estados Unidos. Después de 10 años de experimentación, Palmer patentó el diseño en 1900. Los bloques de Palmer fueron de 20.3 x 25.4 x 76.2 cm. En 1905, aproximadamente, 1500 compañías estadounidenses se encontraban manufacturando bloques de concreto. Estos bloques eran sólidos y sumamente pesados, en los que se utilizaba la cal como material cementante. La introducción del cemento Portland y su uso intensivo, abrió nuevos horizontes a este sector de la industria.

A principios del siglo XX aparecieron los primeros bloques huecos para muros; la ligereza de estos nuevos bloques significó, por sus múltiples ventajas, un gran adelanto.

Las primeras máquinas que se utilizaban en la entonces incipiente industria se limitaba a simples moldes metálicos, en los cuales se compactaba la mezcla manualmente; este método de producción se siguió utilizando hasta los años veinte, época en que aparecieron máquinas con martillos accionados mecánicamente, más tarde se descubrió la conveniencia de la compactación lograda basándose en vibración

y compresión; actualmente, las más modernas y eficientes máquinas para la elaboración de bloques de concreto utilizan el sistema de vibro compactación [44].

Entre las grandes ventajas ofrecidas por los bloques de concreto se encuentran: calidad uniforme y garantizada del elemento, mayor rendimiento de la mano de obra, excelente adherencia a los recubrimientos y aislamiento térmico y acústico.

El bloque de concreto (como los presentados en la **Figura 10** merece mayor atención por parte de los desarrolladores de vivienda, rubro que ha tenido un crecimiento intenso en los últimos años. Este crecimiento se debe a los innegables beneficios económicos, la sustentabilidad del elemento ya que no atenta contra el medio ambiente (reduciendo cantidad de material o sustitución de este por otro considerado como desecho o que requiere menor energía en su obtención) y los ahorros energéticos permanentes, [45].

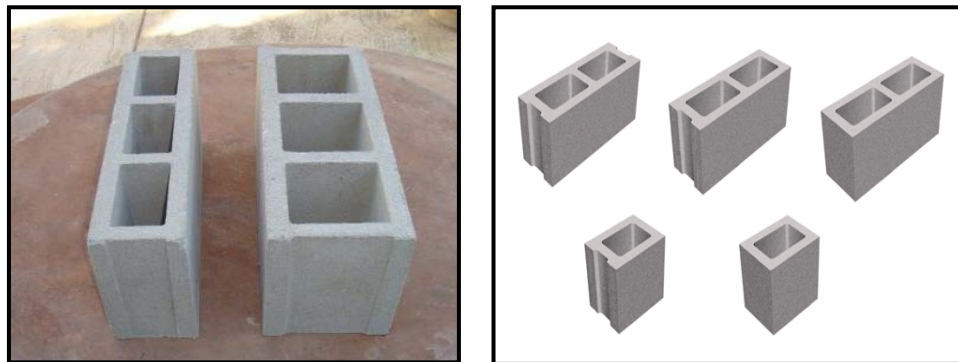


Figura 10. Bloques de concreto.

1.5.3. La mampostería vibro-comprimida.

La mampostería continuó su refinamiento y ha acompañado a la humanidad en el desarrollo de su infraestructura, teniendo actualmente una variedad de procesos para elaborar mampostería de concreto; pero ha sobresalido uno en especial: el de la mampostería vibro-comprimida. Este método de fabricación permite desmoldar inmediatamente el elemento después que ha sido colado; para ello se emplea un concreto o mortero de baja trabajabilidad y con revenimiento 0 (mezcla seca) que se somete a una vibro-compactación, que permite consolidarlo adecuadamente. De esta manera se logra producir varios elementos prefabricados, sin necesidad de contar con una gran cantidad de moldes, lo que simplifica el proceso haciéndolo muy eficiente y relativamente económico, en comparación con el sistema convencional, donde se tiene que esperar hasta que el concreto fragüe y se endurezca en el molde, para poder retirarlo.

Otra ventaja, es que las piezas tienen un mejor curado, ya que el agua, independientemente del tipo de curado (generalmente a aspersión o a vapor), tiene una mayor área de contacto con la pieza, debido a que por lo menos 5 caras del elemento se encuentran expuestas y en los que tienen huecos, el curado es más

efectivo. Esto facilita el desarrollo de los compuestos químicos del cementante hidráulico (silicatos de calcio hidratados), generando un fraguado rápido, lo que permite alcanzar la resistencia mecánica de diseño del concreto o mortero en poco tiempo: de 24 a 36 horas.

En la mampostería vibro-comprimida es crítica la eficiencia del equipo empleado, tanto en la forma que se vibra y comprime el elemento, como en el tiempo que se emplea. Este es el método de asentamiento práctico más eficaz conseguido hasta ahora, dando un concreto de características bien definidas; como son: la resistencia mecánica, la compacidad y un buen acabado. Con una vibro-compactación ineficiente se tendrá una consolidación inadecuada, sin importar la cantidad de cementante que se use por pieza. Generalmente un ciclo de vibro-compactación (incluye el llenado del molde y el desmolde) oscila en 0.5-1 minuto. Así que la eficiencia en la producción de un elemento vibro-comprimido esta dado por el tiempo de duración del ciclo y la cantidad de cementante utilizado por pieza.

Hoy en día se ha llegado a una gran eficiencia en la producción de este tipo de prefabricados, logrando prácticamente toda la automatización del proceso, lo que permite producir con un solo equipo entre 30 y 50 mil piezas (depende el tipo de elemento) en una jornada de 8 horas. Una de las características de este tipo de prefabricados es que tienen una matriz abierta, por la forma en que se produce, generando una mayor absorción y porosidad [44,46,47].

Este tipo de prefabricados es idóneo para el empleo de materiales cementantes, ya que el uso de puzolanas daría un mejor acabado, reduciría la absorción y la porosidad, además de generar nuevos compuestos cementantes, lo que traería consigo una mayor resistencia mecánica, y sin olvidar el aporte sustentable que conllevaría su uso. Además, el efecto beneficioso de la carbonatación en la estructura de los prefabricados ha comenzado a llamar la atención y por ello en años recientes se han realizado diversos estudios en bloques de concreto, cuyo objetivo es aprovechar este proceso natural disminuyendo emisiones de CO₂, y generando nuevos materiales de construcción.

1.6. La carbonatación.

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se produce cuando se quema en un exceso de oxígeno cualquier tipo de carbón o de compuestos que contengan carbono e interviene directamente en nuestro ciclo biológico, en el fenómeno denominado lluvia ácida y en el efecto invernadero.

La transferencia del dióxido de carbono de y hacia la atmósfera es una parte esencial del ciclo de carbono, que empieza con el proceso de la fotosíntesis conducido por los vegetales y ciertos microorganismos. Los animales consumen carbohidratos y otras moléculas complejas que contienen carbono y, al respirar, emiten CO₂. Cuando las plantas y los animales mueren, los microorganismos del suelo los descomponen; el carbono de sus tejidos se oxida a CO₂ y retorna a la atmósfera. Además, hay un

equilibrio dinámico entre el CO₂ atmosférico y los carbonatos de los océanos y los lagos; pero de esto se sabe poco al respecto.

Al presentarse una alteración en el equilibrio que existe con la concentración de GEI en la atmósfera, se generan los problemas antes mencionados de calentamiento global, cambio climático y efecto invernadero, de forma inusual, que generan los problemas que hoy en día se padecen.

El CO₂ es capaz de reaccionar con las estructuras de concreto, pues al combinarse con el agua forma el ácido carbónico, que tiende a bajar el pH a valores cercanos a 6.0 y es considerado como un ácido muy débil, teniendo un efecto despreciable al entrar en contacto con la superficie del concreto.

La carbonatación del concreto es un fenómeno natural, que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto, alrededor del mundo.

En el concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico, aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, creando un ambiente propicio para que el acero de refuerzo pueda ser atacado y corroerse. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del capital que cuesta remediar sus efectos [48].

La corrosión del acero de refuerzo es el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y los elementos de concreto reforzado. En ambientes tropicales no marinos, la carbonatación del concreto induce posteriormente la corrosión del acero de refuerzo, siendo el principal mecanismo de corrosión en el concreto reforzado [49].

Químicamente, la carbonatación del concreto origina la disminución de pH que ocurre cuando el CO₂ del medio ambiente penetra en los poros capilares y reacciona con la humedad dentro de los poros y convierte el hidróxido de calcio de alto pH a carbonatos neutros, reduciendo, por consiguiente, el valor del pH.

Las reacciones básicas de la carbonatación en el concreto se manifiestan de la siguiente forma [50]:

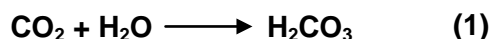
Fase 1

Los poros en el concreto normal, bajo condiciones cíclicas de humedad, contienen:

- Agua (H₂O)
- Hidróxido de Calcio [Ca(OH)₂]

Fase 2

Cuando el CO₂ del aire entra en los poros del concreto, se forma ácido carbónico.

**Fase 3**

El ácido carbónico neutraliza el hidróxido de calcio y forma carbonato de calcio sólido, de pH neutral.



Así mismo, el ácido carbónico puede reaccionar pero en menor cantidad con los SCH del concreto para formar carbonatos:



El mecanismo de carbonatación se ha representado en forma general como sigue [51]:



El proceso de carbonatación es completamente natural y se ve afectado también por variables naturales, consecuencia de las condiciones donde se encuentre el concreto. La carbonatación depende principalmente de tres factores:

- a) El contenido de humedad.
- b) La permeabilidad del concreto.
- c) La concentración del CO₂ disponible en el ambiente.

Para que la carbonatación se lleve a cabo, la humedad debe estar presente; sin embargo, para que la reacción sea más rápida ésta debe encontrarse entre un 50 y un 75%. Cuando la humedad es menor, hay insuficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades importantes de hidróxido de calcio. Por encima del 75 % de humedad relativa, la situación es inversa y los poros suelen bloquearse con agua. Aunque se permite que libremente se disuelva el hidróxido de calcio, el ingreso del CO₂ en los poros saturados es restringido en gran medida [52].

Un concreto permeable puede carbonatarse rápidamente. Pudieran añadirse a las estructuras de concreto reforzado muchos años de protección contra la carbonatación que produzca corrosión, si los constructores siguieran algunas prácticas para producir concretos de baja permeabilidad. Esto incluye la utilización de relaciones A/C bajas, mejorar el vibrado, usar puzolanas, por ejemplo la ceniza volante y realizar un curado adecuado. Todas estas prácticas reducirán la permeabilidad y, por consiguiente, será más difícil la difusión del CO₂ en el interior del concreto.

La concentración presente en la atmósfera de CO₂ (0.03%), basta para que se lleve a cabo el proceso de carbonatación en el concreto. Esta concentración puede incrementarse en lugares específicos como estacionamientos con poca ventilación,

cierto tipo de industrias, etc, acelerando el proceso tomando en cuenta también las condiciones ambientales y propias del concreto en el momento.

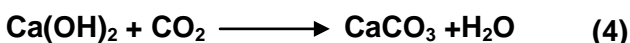
El avance de la carbonatación, en general, dependerá principalmente de la humedad relativa, la concentración de CO₂, la presión de penetración y la temperatura del ambiente donde se coloca el concreto.

1.6.1. La carbonatación en la mampostería.

Se ha hablado de los problemas presentes en el concreto reforzado cuando está expuesto a un medio con CO₂. En áreas urbanas, donde la industria es predominante, este problema es mayor. Sin embargo, como ya se mencionó, cuando el refuerzo no está presente en el concreto, la carbonatación puede ser favorable.

La mampostería, como ejemplo de material sin refuerzo, puede ser una opción viable para evaluar las propiedades de dicho material sometido a un proceso de carbonatación.

Las piezas de mampostería están fabricadas principalmente con mortero. Al mezclarse el cemento con agua, inicia la hidratación del mismo, lo que conlleva finalmente a la formación de SCH y portlandita [Ca(OH)₂]. La portlandita libre reacciona con el CO₂ del ambiente para formar carbonatos de calcio estables, según la siguiente fórmula (4):



Para que se lleve a cabo el proceso anterior es importante mencionar que deberán estar presentes, entre otros factores, una humedad relativa adecuada, temperatura ambiente y concentración de CO₂.

La carbonatación producirá carbonatos que son insolubles y reducen la porosidad, aumentando por consiguiente la resistencia a la compresión y densificando la pieza de mampostería,

Además, se contribuirá a disminuir las emisiones de CO₂ al ambiente, ya que el CO₂ del ambiente puede ser solidificado como carbonatos estables en la pieza de mampostería. Estudios orientados en esta área de investigación han dado a conocer resultados favorables para la industria de la construcción, en la aplicación de materiales más sustentables [68,71,72,73,75].

1.6.2. Métodos para medir la carbonatación.

1.6.2.1. El indicador de fenolftaleína.

Las principales ventajas de este método se refieren a su forma práctica, esquemática y rápida de aplicación. Este método denota un frente de carbonatación representado por el viraje de color del indicador que contiene fenolftaleína. Sin embargo, como su nombre lo indica, este método es un indicador de pH y sólo se limita

a conocer que en el concreto existe un área con un pH igual o superior a 9.5 y otra área que es menor o igual a este valor de pH como puede observarse en la **Figura 11**.

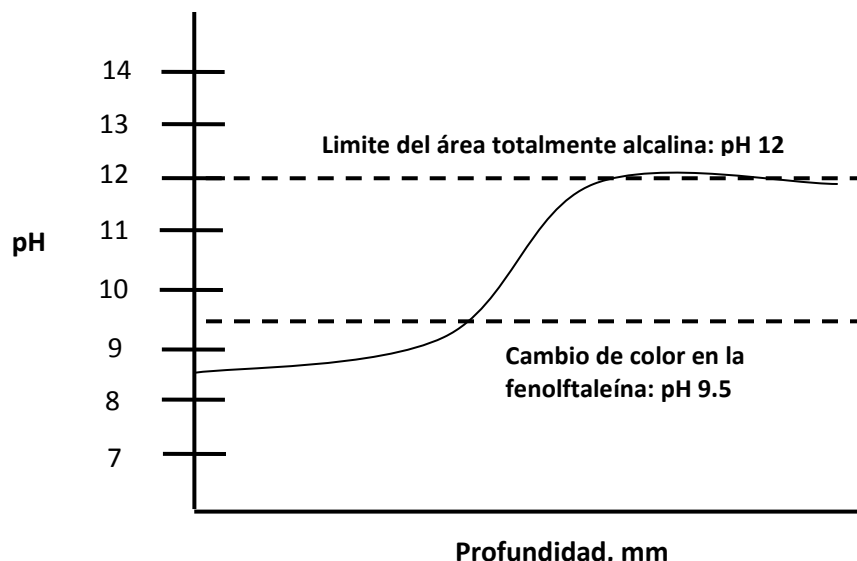


Figura 11. Esquema del perfil de pH en un concreto parcialmente carbonatado [53].

1.6.2.2. Análisis termogravimétricos (TGA).

Este método consiste en la medida constante de la masa de una muestra sujeta al incremento constante de la temperatura, con el objetivo de cuantificar las reacciones que envuelven las emisiones de gases. Por tanto, esta técnica es aplicable a la medición de la carbonatación, ya que es posible cuantificar la portlandita y el carbonato de calcio proveniente de la carbonatación. Sin embargo, dado que el concreto es heterogéneo y también que la calcita de la arena caliza puede perturbar las medidas del carbonato de calcio producto de la carbonatación, las muestras de TGA son poco representativas y, por tanto, es comúnmente aplicado para las pastas [53-55].

La identificación de los distintos componentes hidratados de la pasta de cemento se debe a que estos procesos muestran una banda característica en los diagramas del análisis térmico diferencial y termogravimétrico, que se corresponden con los procesos de deshidratación y descarbonatación de los compuestos presentes en la matriz cementicia que se muestra en la **Tabla 7**.

La deshidratación de la mayoría de compuestos hidratados del cemento se encuentra en el nivel de temperaturas comprendido entre los 20°C y los 400°C. La deshidratación de los silicatos cálcicos hidratados se debe a la pérdida de agua presente en los poros y a su agua estructural. La pérdida total de esta agua tiene lugar cuando la muestra se calienta hasta los 400°C aproximadamente, pero, dependiendo de la temperatura, el tipo de agua es diferente. Hasta los 100°C la pérdida de masa producida corresponde al agua libre, aproximadamente a 120°C se pierde agua

interlaminar y a temperaturas mayores, entre 150 y 350°C, tiene lugar la pérdida del agua unida a la estructura, que forma parte de los compuestos del gel. Estos niveles pueden desplazarse dentro de un cambio de intervalo debido a los cambios de la composición química de la estructura.

Tabla 7. Niveles de temperatura más comunes para identificar productos hidratados [56].

Compuesto	Nivel de Temperatura (°C)
Silicatos Cálcidos Hidratados (C _x S _y H _z)	120 – 180
Trisulfato Cálcido Hidratado (AFt)	130 – 150
Yeso	145 – 165
Monosulfato Cálcido Hidratado (AFm)	170 – 190
Aluminatos Cálcidos Hidratados (C _x A _y H _z)	250 – 300
Hidróxido Cálcido (Ca(OH) ₂)	400 – 550
Carbonatos (CaCO ₃)	600 - 800

El contenido de portlandita se evalúa por la pérdida de peso producida durante su descomposición y la volatilización de las correspondientes moléculas de agua, que dan lugar en la curva a un pico centrado en la zona 400-550°C. Entre los 600 y 800 °C se encuentra la región de descarbonatación, en la que aparecen las pérdidas de CO₂ correspondientes a la calcita.

En la **Figura 12** se muestra un perfil de un concreto parcialmente carbonatado por la prueba de TGA.

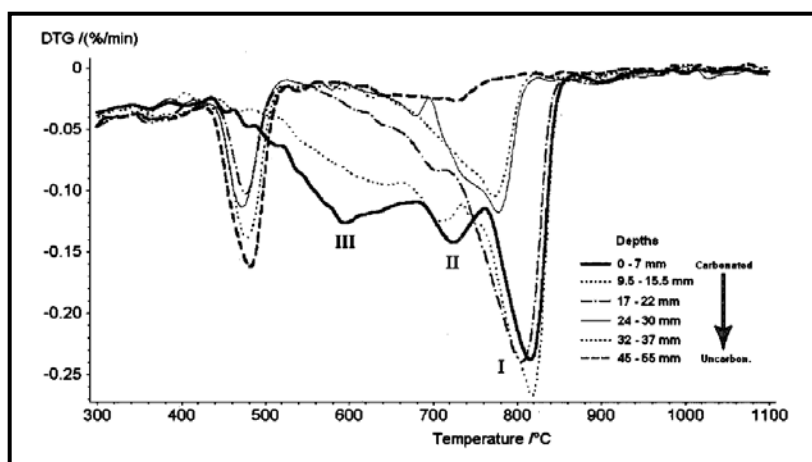


Figura 12. Resultados de TGA en muestras de concreto cortadas a diferentes profundidades.

El pico I se asocia con la carbonatación de la portlandita, ya que el proceso de carbonatación origina carbonatos bien cristalizados y, por tanto, necesitan más temperatura para disociarse, mientras que los picos II y III se asocian con la carbonatación de los silicatos de calcio hidratados. Sin embargo, dado que la presencia de agregados calcáreos complica el cálculo con base en los carbonatos, es óptimo basar los cálculos en el pico que aparece en el nivel de temperatura de 430-530 °C que corresponde a la presencia de portlandita [57].

CAPÍTULO

2

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Los sistemas cementantes han sido factor importante en la generación de los concretos o morteros modernos. Estos sistemas cementantes como se mencionó en el capítulo anterior, están constituidos por sistemas formados con cemento portland y sistemas binarios y ternarios con puzolanas o cualquier otro tipo de cementante.

En años recientes, la industria de la construcción se ha esforzado en implementar programas para cuidar el medio ambiente, salvaguardando los recursos y las reservas naturales, reduciendo los consumos de energía de sus equipos y consumiendo en menor cantidad materias primas productoras de una gran cantidad de emisiones de GEI, siendo el CO₂ el gas de mayor consideración. Los sistemas cementantes actuales son una solución a la alta demanda del concreto en el mundo, siendo éste el principal material de construcción.

La tecnología del concreto ha estado estudiando la incorporación de puzolanas en la producción de concreto con las prestaciones y requerimientos solicitados por las construcciones de hoy. Los estudios mostraron que esto era no sólo factible, sino recomendable, ya que su empleo mejora las propiedades del concreto, además de que no sólo existen puzolanas naturales, sino también artificiales, las que se generan principalmente por los procesos industriales de la metalurgia (escoria granulada de alto horno), quema de carbón en termoeléctricas y hornos (ceniza volante) y la producción de componentes electrónicos de silicio (humo de sílice).

Gracias a los estudios de la tecnología actual del concreto, se pueden combinar diversas puzolanas, generando así sistemas cementantes ternarios y cuaternarios, los que se utilizan para producir concreto de alto comportamiento, empleado en las construcciones actuales (rascacielos, puentes marítimos, túneles, etc.). Este tipo de sistemas emplea generalmente puzolanas artificiales, debido a su fácil acceso y relativo bajo costo. Pero a pesar de todos estos conocimientos sobre las puzolanas, aún falta desarrollar investigación para poder aprovecharlas al máximo, así como difundir sus beneficios y hacer más práctico su uso.

Además del uso de materiales puzolánicos, en los últimos años se ha estado considerando el efecto del dióxido de carbono en el concreto cuando no existe refuerzo. Algunos de los estudios están encaminados a la evaluación con mampostería.

Diversos estudios demuestran las ventajas del uso de CO₂ en el concreto, aplicando un curado acelerado con el mismo gas. Entre las ventajas, se encuentran una mayor densificación del elemento de concreto, mejoramiento de la resistencia a la compresión y captura de CO₂ en la matriz cementante por la formación de carbonatos sólidos, entre otros.

El uso de puzolanas y el curado con CO₂ pueden significar una medida para crear materiales sustentables, que reduzcan emisiones de GEI, utilicen materiales de desecho y permitan preservar los recursos naturales.

Para apoyar y delimitar los alcances de la investigación se realizó una búsqueda bibliográfica. No obstante, fue difícil encontrar bibliografía sobre sistemas cementantes y carbonatación formados con materiales semejantes a los empleados en este proyecto. Por consiguiente, la búsqueda se enfocó en investigaciones que aportaran información relevante sobre el tema y que tuvieran alguna coincidencia en los materiales utilizados.

A continuación se presentan, y de forma resumida, las aportaciones de investigaciones relevantes orientadas al objetivo esta investigación.

a) Carbonatación.

Klemm y Berger [58] fabricaron cilindros de 1.225 pulgadas de diámetro por 1 ó 1.5 pulgadas de altura, para estudiar la influencia de la relación A/C, relación arena/cemento, presión de compactación de los especímenes, poshidratación de mezclas carbonatadas y curado por medio de autoclave. Los cementos utilizados fueron: cemento blanco y cemento tipo II, de acuerdo con la ASTM y como agregado arena graduada de Ottawa. Las probetas fueron sometidas a un curado en una cámara de carbonatación durante 5 minutos, con una atmósfera de CO₂ al 100 % y presión de inyección de 56 psi. Para la etapa de poshidratación, algunos especímenes después de curado con CO₂, fueron sumergidos para ensayarse a edades de 1, 3, 7 y 14 días. Los resultados mostraron que a menor relación A/C mayor resistencia a la compresión y profundidad de carbonatación. A medida que aumenta la relación arena/cemento la resistencia a la compresión disminuye, mientras que a mayor compactación de los cilindros la resistencia aumenta. Con una poshidratación los resultados fueron muy similares con o sin un curado previo de CO₂. Finalmente, la aplicación de autoclave como medio de curado genera resistencias a compresión altas; sin embargo, la deficiencia de este medio de curado recae en el alto costo en su implementación, por lo cual es restringido su uso.

Fattuhi, utilizó mezclas de concreto con dosificaciones de 2.04:3.06:1.00:0.70 para grava:arena:cemento portland ordinario:agua, para elaborar prismas con dimensiones de 50 x 50 x 285 mm y cubos de 50 mm de lado. La evaluación consistió en someter estos especímenes a un curado en una cámara de carbonatación con H.R. del 50-70 % y temperatura entre 20-26 °C, a la edad de 29 días, este curado posterior a los precurados llevados a cabo a ambiente y sumergidos en agua. Se evaluaron

resistencias a la compresión y profundidad de carbonatación, donde se concluyó el efecto adverso al disminuir dichos parámetros, aplicando un curado sumergiendo los especímenes en agua, ya que se saturan los especímenes, lo cual minimiza el efecto de la carbonatación y los coloca en una condición crítica al efectuarse el ensaye a compresión [59].

Duran Atis [60] llevo a cabo el estudio de mezclas de concreto con 50 y 70% de reemplazo de ceniza volante con respecto al cemento portland normal, sometiendo los especímenes a carbonatación acelerada. Los materiales utilizados fueron cemento portland, ceniza volante, grava y arena, que cumplen las Normas Británicas y un superplastificante (carboxílico). Las mezclas se dividieron en 5, de acuerdo con el reemplazo de ceniza volante y una referencia con un 100 % de cemento portland, así como el uso de superplastificante en algunas mezclas, que contenían ceniza volante. Se fabricaron cubos de 50 mm de lado para realizar la prueba de carbonatación acelerada, utilizando una cámara de carbonatación, con una concentración del 5 % de CO₂ a presión de 1 bar, temperatura ambiente 20 °C y humedad relativa de 65 ± 5 % durante 2 horas. Además, se elaboraron otros cubos de 100 mm de lado para resistencia a la compresión, con dos formas de curado, una con una humedad relativa del 100 % y otra con 65 %, ambos curados con temperatura de 20 °C, durante 3, 7, 28 y 90 días. Los resultados mostraron que la carbonatación aumenta con el reemplazo de ceniza al 70 %, pero es inferior al sustituir un 50 %; ambos con respecto a la referencia. También se observó que la carbonatación disminuye con el paso del tiempo. En lo que se refiere a la resistencia a la compresión, ésta es menor a edades iniciales; sin embargo, a edades de 28 y 90 días éstas tienen resultados superiores en comparación con referencia, además de darse mejores propiedades en un curado con humedad relativa del 100 %.

El curado con CO₂ puede llegar a desarrollar resistencias rápidas a la compresión, en materiales de construcción fabricados con cemento portland, lo cual permite reducir el tiempo y la energía requerida para acelerar el curado. Lo anterior fue el resultado del análisis del concreto curado con CO₂ y la masa ganada del mismo, estudiado por **S. Monkman** y sus colaboradores [61] quienes evaluaron dos tipos de cemento portland, tipo 10 y 30 con diferentes contenidos de agregados de cuarzo (con intervalo de 0.2 a 2 mm de tamaño) o de peso ligero (4.75 mm) en cantidades de 0, 25, 50, 75%, después de evaluar estos cementos bajo estas circunstancias, se sometieron a dos tiempos distintos de carbonatación, 2 horas dentro de una cámara de carbonatación acelerada a 500 kPa y a 7 días de carbonatación. Los resultados fueron favorecedores para el cemento tipo 30, puesto que desarrolló mejores resistencias y adquirió mayor masa, el porcentaje óptimo de agregados incluidos en la mezcla fue de 25%, a partir del cual se manifiestan cambios considerables de resistencias y masas ganadas. Además, se identificó que mientras menor sea el contenido de agregados en la mezcla, los resultados serán benéficos puesto que se aumentan las cavidades para que los carbonatos puedan reaccionar en mayor medida.

Arandigoyen y Alvarez [62] elaboraron pastas mixtas de cal y cemento sustituyendo cal en proporciones de 100, 90, 80, 70, 60, 50 y 40% para medir el proceso de carbonatación en ellas. Las probetas elaboradas fueron prismáticas con dimensiones de 40 x 40 x 160 mm, que fueron curadas en condiciones de laboratorio (H.R. $60 \pm 10\%$ y $20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) y con concentración de CO_2 ambiental (0.033%). Por otra parte, algunas probetas fueron tomadas para colocarse en una cámara de carbonatación con CO_2 comercial al 100% hasta que las probetas quedaran completamente carbonatadas. Cuando el porcentaje de cemento se incrementa, dando lugar a una microestructura más compleja, a pesar de la velocidad lenta del proceso de secado, éste no retrasa el proceso de carbonatación. El aumento en el consumo de cal retrasa la velocidad de carbonatación; sin embargo, en sustituciones de hasta 60% el frente de carbonatación avanza de forma favorable. La hidratación del C_3S que tiene lugar durante los primeros días del proceso de curado del espécimen tampoco retrasa el proceso de carbonatación.

Y. Shao y colaboradores [63] estudiaron el potencial de los silicatos de calcio del concreto para secuestrar CO_2 a través de un curado en una cámara de carbonatación acelerada bajo una presión de 0.5 MPa y a una temperatura ambiente ($23\text{ }^\circ\text{C}$), durante 2 horas con una concentración de CO_2 del 100%. El CO_2 capturado fue cuantificado directamente por la masa ganada del espécimen. Al examinar los resultados se concluyó que bajo las condiciones anteriores es posible secuestrar de 9 a 16% de CO_2 por masa de cemento portland.

Shi y Wu [64] examinaron el efecto de diversos parámetros como lo son las relaciones A/C, tiempo de curado, presión del dióxido de carbono en el curado y temperatura en el consumo de dióxido de carbono y resistencia en concretos y morteros. Reportaron que la principal reacción del CO_2 con los minerales del cemento ocurre durante los primeros 15 minutos sin tomar en cuenta la presión del CO_2 y el preacondicionamiento. Además encontraron que al incrementar la presión del CO_2 el consumo del mismo también aumenta, pero la resistencia no tiene un efecto significativo.

El curado con CO_2 en la producción de diferentes productos de construcción, evaluando dos sistemas de curado, tanto para un sistema abierto con una alta concentración de CO_2 a una presión de 150 kPa, así como otro sistema cerrado con baja concentración de CO_2 aproximadamente del 14 % contenido en un tanque con una mezcla de gases de combustión a presión regulada de 500 kPa, durante 30 a 40 minutos, fue estudiado por **Shao y colaboradores [65]**. Los elementos de concreto tuvieron un comportamiento favorable, sometidos a dichos curados, puesto que se incrementaron las resistencias a la compresión y fue posible cuantificar la cantidad de CO_2 capturado en porcentaje de masa de la pieza de concreto. Basado en los resultados se concluyó que es posible reducir las emisiones de CO_2 al capturarse un porcentaje de dicho gas y mejorar las propiedades en los elementos de concreto.

El efecto de un preacondicionamiento antes de efectuar un curado con CO_2 en mezclas de concreto para bloques fue estudiado por **Shi y colaboradores [66]** Los

materiales para la mezcla fueron cemento tipo III de acuerdo con la ASTM 150 y como agregados, esquistos expandibles como agregado ligero y arena natural silíceas como agregado normal. Durante la investigación se tuvieron dos condiciones de precondicionamiento, medio ambiente seco con una humedad relativa de $55 \pm 10\%$ y temperatura de 22 ± 3 °C, por otra parte un ambiente húmedo con humedad relativa de 98% y a la misma temperatura del ambiente seco. Posterior a este precondicionamiento se efectuó un curado con CO₂, en una cámara de carbonatación aplicando dos presiones 10 y 20 psi. Además, se realizó un curado a vapor que fuera comparado con los curados antes mencionados. Al finalizar la investigación se encontró que el precondicionamiento en un ambiente seco y carbonatación durante 2 horas ofrece resultados muy favorecedores, prácticamente similares a un curado con vapor de los especímenes, así mismo este precondicionamiento tuvo mejores resultados que llevar a cabo un precondicionamiento en ambiente húmedo. En conclusión se menciona que efectuar apropiados curados con CO₂, puede contribuir a mejorar la sustentabilidad, puesto que requiere menor tiempo de curado el elemento estructural en comparación a un curado a vapor y además reacciona el CO₂ en su matriz reduciendo las emisiones de este gas.

Castellote y colaboradores [67] estudiaron los cambios químicos y el análisis de fases en pastas carbonatadas con cemento portland ordinario, a diferentes concentraciones de CO₂ (0.03 % correspondiente a concentración natural, 3, 10 y 100% para una concentración acelerada). Encontraron un comportamiento de la microestructura muy similar entre las pastas carbonatadas con una concentración de 0.03 y 3%. Sin embargo con altas concentraciones del 10 y 100 % las diferencias fueron más significativas.

b) Mampostería.

Shi y colaboradores [68] estudiaron el efecto del curado con CO₂ y vapor en bloques de concreto ligeros. Se tomaron de manera aleatoria algunos bloques durante la producción en una planta local y posteriormente se distribuyeron para someterlos a un curado a vapor durante 24 horas y con CO₂ en una cámara con autoclave a presión de 600 mmHg e inyección de CO₂ de 10 Psi durante 2 Horas. Los puntos a evaluar fueron resistencia a la compresión, absorción y contracción por secado. Después del curado, algunos bloques se sometieron inmediatamente a las pruebas antes mencionadas, mientras que otros, después de un periodo de exposición en un ambiente frío de manera natural durante 120 y 180 días. Además, se tomaron algunos bloques posterior al curado y se mantuvieron en un ambiente húmedo durante 28 días. Los resultados de resistencia a la compresión y absorción fueron muy similares entre los bloques curados a vapor y con CO₂, inmediatamente después de ambos curados y de la exposición al ambiente frío. La contracción por secado presente fue menor en los bloques curados con CO₂. No obstante, los resultados de las pruebas realizadas a los bloques curados en ambiente húmedo, fueron superiores para los bloques curados a vapor.

Ceniza volante y ceniza de fondo son dos subproductos de la combustión del carbón en plantas carboeléctricas, las cuales fueron estudiadas por **Wei y colaboradores** en concretos para unidades de mampostería [69]. Los materiales fueron cemento tipo I de acuerdo a ASTM, ceniza volante tipo C y F, así como ceniza de fondo tipo C y F pero se utilizó como reemplazo de agregado natural, siendo los agregados arena y grava naturales. La sustitución varió de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 % de cemento con respecto a la ceniza volante, así mismo la ceniza de fondo se reemplazó del 40 - 60 % con respecto al agregado natural. Las relaciones A/Cem estuvieron del intervalo 0.40 a 0.60 los especímenes se fabricaron en un molde cúbico de 50.8 mm de lado y se le proporcionó, además, una vibración adicional a la mezcla. Las condiciones de curado fueron por una parte, estándar por aspersión a 22 °C durante los días previstos de ensaye 3, 7 y 28 días, así mismo, la condición de 24 horas de curado a vapor a temperaturas de 50 a 90 °C, para posteriormente curarse de forma estándar. Las mezclas con ceniza volante tipo C proporcionaron mejores resultados a compresión en comparación a clase tipo F. El sistema de curado acelerado a vapor incrementa los ciclos de producción, pero es importante destacar la importancia de la temperatura, puesto que a bajas temperaturas la reacción de hidratación puede ser lenta, mientras que a temperaturas altas podrían causar una no uniformidad de la microestructura lo que provocaría bajas resistencias, por ello una temperatura optima para este tipo de curado sería de 65 °C. Por último la incorporación de ceniza de fondo deberá ser parcial, con respecto a los agregados de la mezcla donde se tendrán resultados favorables en las propiedades del concreto, siempre y cuando se consideren las condiciones de calidad.

Las cenizas volantes se utilizaron por el profesor **Tarun R. Naik** y colaboradores [70] en la producción de mampostería. Ellos investigaron la manufactura de diversos productos de mampostería con grandes cantidades de ceniza volante. Se realizaron diferentes proporcionamientos en los cuales la cantidad de ceniza volante fue variando de 20 a 50 % para mezclas de bloques y ladrillos, y de 15 a 30 % para pavimentos. La resistencia a la compresión de todos los materiales fabricados con ceniza volante fue inferior a la de la referencia y decrecía con el aumento de la edad. La ceniza volante no causa impacto en la densidad de los materiales de mampostería, pero permitió reducir la contracción por secado.

U. Atici y A. Ersoy [71] elaboraron bloques de concreto con diferentes proporciones de ceniza volante y encontraron que cuando la ceniza posee alto valor en las perdidas por ignición (carbón), se necesita mayor cantidad de agua para la hidratación de la mezcla y por esta razón, la resistencia a la compresión del bloque disminuyó. Encontraron que una sustitución de CV en un 15 % presenta resistencias superiores a la referencia.

Durante el trabajo de tesis de **Herrera González** [72], se estudió el efecto de la ceniza volante, hidróxido de calcio, cemento portland y algunos activadores como el sulfato de sodio, el hidróxido de sodio, el sulfato de calcio y el cloruro de calcio. Algunos morteros fueron sometidos a diferentes condiciones de curado, tanto

convencional, a temperatura de 25 °C y humedad relativa del 60 %, como a vapor con humedad relativa de 100 % a diferentes temperaturas que van de 40 a 80 °C. Los especímenes preliminares fueron cubos de mortero con arena de sílice, posteriormente, la evaluación final sería con base en la producción de bloques de concreto, utilizando arena 4B como agregado de la mezcla. Se encontró que con una dosificación de 30% de ceniza volante, 60 % de cemento portland, 6 % de hidróxido de calcio y 4 % de sulfato de calcio (yeso), a una temperatura de curado a vapor de 60 °C, los bloques de concreto elaborados cumplían la normativa para aplicarse como elemento estructural.

Lamb Bernal y Ramírez Cardona [73] fabricaron bloques de concreto de 15 x 20 x 40 cm, en nivel industrial, en los que se reemplazó el cemento por ceniza volante, hasta en un 20%. Las proporciones de la mezcla de los diferentes lotes de bloques se obtuvieron de un diseño experimental de mezcla, en el que las variables independientes fueron: la cantidad de agua, el cemento y la ceniza volante, y la variable respuesta, la resistencia. El cemento utilizado fue tipo III, de acuerdo con la ASTM y la ceniza volante se clasificó como tipo C de acuerdo con su composición. Los agregados, tanto fino como grueso, fueron de origen natural, en proporción 1:1.25. Las mezclas se realizaron en una mezcladora de eje horizontal, para posteriormente vibrocomprimirse. El curado se realizó inmediatamente después de la fabricación de los bloques, en un lugar cerrado, con una temperatura de 40 °C y presión atmosférica. Los ensayos de resistencia se realizaron a los 7 días posteriores a la fabricación. Se pudo observar que, reemplazando un 15% de cemento por ceniza volante y adicionado 276kg de agua en el lote, se obtuvo una resistencia de 14.38 MPa, un 49,8% mayor que la resistencia requerida para la comercialización del bloque de 15 x 20 x 40 cm. En el proceso no se presentó dificultad en el moldeo, y el producto final poseía las características físicas y mecánicas requeridas, por lo cual esta dosificación puede emplearse en la fabricación de bloques de buena manufactura y ahorrando consumo de cemento.

La investigación desarrollada por **Shi y Zou** estudió el efecto del CO₂ como medio de curado acelerado [74]. Se utilizaron cemento portland, arena de río y grava, como las materias primas de las piezas de mampostería fabricadas. Los bloques se preconditionaron, tanto de forma seca como húmeda antes de efectuar el curado con CO₂. Además, se fabricaron especímenes para curarse a vapor. La diferencias de resistencias registradas entre los especímenes curados a vapor durante un lapso de 20 a 24 horas y un curado con CO₂ con una presión de 0.2 MPa en autoclave durante un periodo de 4 a 5 horas fue muy similar. Así mismo, el periodo de preconditionamiento con humedad aproximadamente del 50 % arrojó resultados favorables deduciendo un curado más eficiente de CO₂, con lo cual se generaron mejores resistencias a la compresión.

C. Shi y colaboradores [75] evaluaron las diferentes propiedades en los bloques de concreto cuando son sometidos a un curado con CO₂, y utilizando materiales propios de la localidad. Las pruebas se realizaron considerando el curado a

vapor en un horno con temperatura entre 20 °C y 55 °C como referencia y curado con CO₂ en una cámara de carbonatación acelerada. Las resistencias a la compresión fueron muy similares, siendo los materiales curados a vapor los que presentaron resistencias ligeramente mayores. Para los parámetros de agua de absorción y contracción por secado, los resultados favorecieron a los bloques curados con CO₂ cuyo valor fue menor en comparación con los de la referencia. La energía de consumo representa 1/10 para curado con CO₂ en comparación a la de curado con vapor, pero el costo de realización de los curados es mayor para el de CO₂ en comparación con el de vapor. Shi añade que conforme las tecnologías avancen y se tenga un mejor conocimiento para desarrollar mejores técnicas de secuestro de CO₂, estos costos disminuirán, lo cual generaría una nueva solución basada en sustentabilidad y creación de nuevos productos.

c) Cementantes alternativos.

Malhotra V. M. [76]. Desarrolló una investigación en concretos ecológicos mediante el empleo de altos consumos de ceniza volante (50% o más). Se aborda el potencial que este subproducto industrial representa ya que se encuentra en grandes cantidades y, por ende, su empleo ayudaría al medio ambiente, además de contribuir a la producción de un concreto con mejores propiedades físicas y mecánicas, así como una mayor durabilidad.

En la investigación de **Bhanumathidas y Kumar Mehta [77]**, se analizaron el comportamiento de mezclas de concreto ternarias, donde se utilizaron ceniza volante Tipo F, ceniza de cascara de arroz con un tamaño de partícula promedio de 7 µm y cemento portland Tipo III de acuerdo con la ASTM. Los agregados empleados fueron caliza, como agregado grueso, con un tamaño máximo de 19 mm y arena de río, como agregado fino, con un módulo de finura de 2.8, además de un superplastificante para algunas mezclas. La sustitución de las mezclas en masa con respecto al cemento portland para la ceniza volante fueron de 50 y 40 % y para la ceniza de cáscara de arroz sin sustitución y con un 10%. Además, se utilizaron diferentes relaciones a/cem de 0.45, 0.50 y 0.33 adicionando el superplastificante a esta última relación. Las mezclas en estado fresco fueron sometidas a pruebas de revenimiento, contenido de aire y peso volumétrico. Los especímenes fabricados para pruebas de resistencia a la compresión y penetración de cloruros fueron cilindros de 102 mm de diámetro por 203 mm, que fueron curados en agua a edades de ensaye de 3, 7 28 y 91 días, tomando sólo 28 días para la penetración de cloruros. Los resultados mostraron que la utilización de la ceniza volante y la ceniza de cáscara de arroz son una buena combinación con cemento portland tipo III, puesto que a edades de 91 días la resistencia a la compresión fue mejor, en comparación con la referencia (100 % cemento portland), considerando el uso de superplastificante y con la sustitución de 50 % cemento portland, 40 % ceniza volante y 10% ceniza de cáscara de arroz; además, esta mezcla mostró la mejor resistencia a la penetración de los cloruros. Se concluye que el uso de mezclas ternarias puede ser una buena opción para desarrollar concretos de buena calidad.

Cultrone y colaboradores [78], elaboraron cuatro morteros de cal, con ceniza volcánica como puzolana y aditivos inclusores de aire. Como agregado se utilizó arena sílice en una relación cementante/agregado por volumen de 1:3. Se realizaron pruebas de XRD, OM (microscopía óptica), SEM y peso constante. Los especímenes de estudio fueron cilindros de 5 cm de alto y 3 cm de diámetro, que fueron curados en una cámara de carbonatación a 25 °C, H.R. 50 % y 1.25 dm³ de CO₂ dosificado. Cada dos días fueron extraídos dos especímenes de cada mezcla, hasta cumplir una edad final de 30 días. En cuanto a los resultados obtenidos, se concluyó que los especímenes con cal solamente fueron los que tuvieron una carbonatación mayor y el efecto de los aditivos no tuvo una influencia considerable en las mezclas de cualquier tipo.

d) Termogravimetría.

Borges y colaboradores [79] estudiaron la carbonatación del hidróxido de calcio y los silicatos de calcio hidratado en pastas que contenían altas cantidades de escoria de alto horno con respecto al cemento portland. Las pastas se curaron durante 90 días, a temperaturas de 20 y 60°C. Posteriormente se sometieron a un curado con CO₂ en una cámara de carbonatación con H.R. 60%, 25 °C y concentración del 5% por 21 días. El uso de análisis termogravimétricos y la difracción de rayos X fueron el medio para conocer el avance del proceso de carbonatación, a partir de la formación de carbonatos de calcio e hidróxido de calcio. Los resultados mostraron que las pastas curadas a altas temperaturas presentaron una carbonatación menor, tanto por la reacción del hidróxido de calcio como de los silicatos de calcio hidratado con el CO₂; esto atribuido a la densificación de la microestructura de las pastas por parte de hidratación de la escoria de alto horno que impide una difusión mayor del CO₂ dentro de la matriz.

Recientemente, **Cheng-Feng Chang y colaboradores [80]** han probado, mediante técnicas analíticas, la existencia de tres zonas: una totalmente carbonatada con pH inferior a 9, otra parcialmente carbonatada con pH entre 9 y 11,5, y una tercera zona sin carbonatar, con pH superior a 11,5; mostrando que la profundidad de carbonatación determinada mediante la fenolftaleína está aproximadamente en la mitad de la profundidad del frente real de carbonatación. En este trabajo utilizaron, además de los datos obtenidos mediante ATD y TG, la derivada de la curva de TG, DTG, para delimitar mejor la temperatura de la transformación del carbonato cálcico, indicando que este valor se encuentra entre 550 y 950°C.

Gaztañaga [81] compara en su tesis doctoral las cantidades de CO₂ absorbidas en pastas de cemento fabricadas con dos cementos sin adiciones: uno de ellos resistente a los sulfatos, y con un cemento de aluminato de calcio. Para el estudio utilizó también TG-ATD, observando que a medida que aumenta el tiempo de carbonatación, el pico correspondiente a la transformación del carbonato cálcico se desplaza hacia temperaturas mayores.

Parrott [82] utilizó la Termogravimetría de forma cuantitativa, además de otras técnicas en pastas cementantes elaboradas con cemento portland y algunas adiciones

de escoria de alto horno, para determinar gráficamente las pérdidas de peso debidas al carbonato de calcio y a la portlandita, a partir de los escalones producidos por las descomposiciones de ambos a temperaturas alrededor de 450°C y 650°C, respectivamente.

El análisis de la bibliografía y la organización de cada una de las referencias en un tema particular de acuerdo con la información que presentan, permitieron orientar los alcances de esta investigación, así como proponer una solución a un problema que inquieta a la sociedad. El estudio descrito en las secciones siguientes aporta una opción como proceso sustentable, en el que se propone la utilización de sistemas cementantes conformados por cemento portland, cal y cementantes puzolánicos de un subproducto industrial; lo anterior, con el fin de desarrollar mampostería de concreto. Así mismo, se empleará un curado acelerado, utilizando una atmósfera con alta concentración de CO₂, que en un futuro se pudiese emplear en la industria de la construcción para disminuir con esto la emisión de GEI.

2.1. Justificación del estudio.

El aumento en las emisiones de GEI a la atmósfera y la sobreexplotación de los recursos naturales han sido algunos de los problemas más severos que enfrenta el ser humano, cuya principal consecuencia se ve reflejada en el cambio climático del planeta.

La industria del cemento es la base fundamental de la industria de la construcción. La producción del cemento portland requiere altos consumos de energía y durante su proceso de producción se genera entre un 5 y 7% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, siendo este el principal gas de efecto invernadero.

Es necesario innovar en el campo de los materiales prefabricados apoyando a los procesos sustentables, los cuales son utilizados con mayor frecuencia, para mejorar las condiciones de vida, sin dañar al medio ambiente y salvaguardando los recursos naturales para el futuro.

La producción de mampostería empleando sistemas cementantes conformados por cemento portland y cementantes alternativos, así como un curado con CO₂, es una opción que contribuye a mitigar el problema. Lo anterior, transformará subproductos industriales en materiales de construcción con valor agregado. Además, se utilizan otros tipos de cementantes que requieren menor energía en su producción, con lo cual se reducirá la explotación de las materias primas de origen natural y la concentración de contaminantes en la atmósfera.

2.2. Objetivos.

General.-

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de bloques de concreto producidos con sistemas cementantes binarios, de cemento portland y cal y sistemas ternarios producidos con cemento portland, cal y un subproducto industrial (ceniza volante); ambos sistemas sometidos a un proceso de curado a vapor y carbonatación acelerada.

Particulares.-

- Caracterizar física y químicamente el sistema cementante constituido por: cemento portland, ceniza volante y cal.
- Optimizar el sistema cementante en función de la menor cantidad de cemento portland y la resistencia mecánica establecida en la norma.
- Evaluar el efecto de un proceso de carbonatación acelerada en la resistencia a la compresión y la absorción de mampostería curada a vapor.
- Determinar la fijación de CO_2 en las piezas de mampostería del sistema cementante mediante pruebas termogravimétricas.

2.3. Hipótesis.

La mampostería producida con el sistema cementante formulado por cemento portland, un subproducto industrial (ceniza volante) y cal de construcción curada con vapor de agua y sometido a un proceso acelerado de carbonatación con CO_2 , será un producto prefabricado sustentable considerando el uso de subproductos industriales, menor consumo de cemento portland y sustitución de cementante, obteniendo propiedades físico-mecánicas similares a las generadas con sólo cemento portland ordinario, cumpliendo la Norma Mexicana (NMX-C-404-2005).

CAPÍTULO

3

MÉTODO

EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 3

MÉTODO EXPERIMENTAL

Con base en los objetivos planteados, se diseñó un esquema experimental para evaluar el comportamiento físico y mecánico de bloques de concreto producidos con sistemas cementantes binarios, de cemento portland y cal y sistemas ternarios producidos con cemento portland, cal y un subproducto industrial (ceniza volante); ambos sistemas sometidos a un proceso de curado a vapor y a un proceso de carbonatación acelerada.

A continuación se describe cada uno de los métodos experimentales para evaluar los bloques de concreto, así como pastas cementantes con las mismas dosificaciones, determinando las propiedades de los cementantes y agregados, de acuerdo con las normativas correspondientes y el uso de equipo de laboratorio.

3.1. Adquisición y preparación de los materiales.

Los materiales utilizados en el desarrollo de esta investigación fueron adquiridos en empresas locales, excepto la ceniza volante, que procede de la Central Termoeléctrica “José López Portillo-Carbón I” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ubicada en Nava, Coahuila, México.

Como preparación de cada uno de los materiales se desarrollaron algunas pruebas para obtener sus propiedades, que posteriormente se aplicaron en el diseño y la evaluación de los especímenes estudiados.

3.1.1. Descripción de los materiales

A continuación se describen, en forma general, las características de los materiales empleados en esta investigación.

3.1.1.1. Los cementantes

Los materiales cementantes utilizados son cemento portland, ceniza volante y cal (hidróxido de calcio). Dichos cementantes se muestran en la **Figura 13**.

Cemento Portland Ordinario 40 (CP)

Se utilizó cemento portland ordinario (CPO 40) marca CEMEX, que cumple lo especificado en la norma NMX-C-414-2004 y ASTM C 150-05. Se conforma de 95-

100% de clinker con sulfato de calcio (CaSO_4). De acuerdo con sus propiedades físicas especificadas, el CP debe alcanzar una resistencia mínima a la compresión a los 28 días, de 40 MPa.

Ceniza Volante Integral (CV)

La CV es un subproducto industrial, clasificado como puzolana artificial, que se obtiene de los sistemas colectores de polvos de las plantas productoras de energía eléctrica que queman carbón como materia prima, carboeléctricas. La ceniza volante empleada proviene de la Central Termoeléctrica “José López Portillo-Carbón I”, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), localizada en Nava, Coahuila, aproximadamente a 400 km de la ciudad de Monterrey. Esta ceniza es denominada localmente como integral, ya que tiene una granulometría compuesta, formulada con tres diferentes distribuciones de tamaños de partículas, lo anterior, resultante del sistema de recolección de las plantas.

Ceniza Volante Tamizada (CVT)

La CV fue tamizada por la malla 200 ($75\mu\text{m}$), con el propósito de evaluar el efecto cementante de la ceniza volante al disminuir el tamaño promedio de partículas. La finalidad de este proceso es tener un control del tamaño de la partícula y reducir impurezas, ya que a menor tamaño de partícula, se aumenta el área superficial de las mismas, favoreciendo con ello la reactividad de la ceniza volante con el hidróxido de calcio.

Cal (C)

Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la que es una base fuerte formada por el metal calcio unido con dos grupos hidróxidos. El óxido de calcio, al combinarse con el agua, se transforma en hidróxido de calcio. La cal utilizada proviene de la empresa CALIDRA (Grupo MINORTE) en su presentación comercial como Piracal, para utilizarse como cal de construcción. Cumple las especificaciones de la normativa mexicana NMX-C-003-1996.



Figura 13. Materiales cementantes. De izquierda a derecha, cemento portland ordinario, ceniza volante, ceniza volante tamizada e hidróxido de calcio.

3.1.1.2. Los agregados.

Arena de caliza 4B (AC)

La arena utilizada está formada por granos triturados de caliza (CaCO_3) con una pureza del 98% y una absorción relativamente baja. Se adquirió a granel de la empresa Triturados el Roble ubicada en la Carretera a las Pedreras, en Escobedo N.L. Dicha arena cumple la norma NMX-C-111 y en la **Figura 14** se observa una muestra. Sin embargo, su granulometría está diseñada para su aplicación exclusiva en la fabricación de bloques de concreto.



Figura 14. Arena 4B para bloques de concreto.

3.1.2. Almacenaje de los materiales.

Los materiales fueron embolsados y protegidos contra cualquier condición ambiental; así mismo, fueron trasladados a las instalaciones del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, específicamente al departamento de Tecnología del Concreto y al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción.

Los cementantes (cemento portland, ceniza volante y cal) fueron embolsados en condiciones secas, herméticamente sellados, identificados y almacenados en fracciones para facilitar su uso en la producción de la mampostería.

Los agregados fueron depositados en tambos de 200 litros, en condición seca. Estos depósitos fueron sellados para cuidarlos de las condiciones ambientales y evitar contaminación.

3.2. Caracterización de los materiales

Los materiales se caracterizaron para obtener sus propiedades físicas, químicas y morfológicas, necesarias para diseñar adecuadamente los proporcionamientos de los morteros (cementantes + agua + arena) y posteriormente producir la mampostería vibro-comprimida. Dichas propiedades se obtuvieron mediante métodos de prueba estándar, establecidos por la ONNCCE y la ASTM, y para las siguientes pruebas:

3.2.1. Los cementantes.

Densidad

Esta propiedad se determinó de acuerdo con lo descrito en ASTM C-188, empleando el frasco de Le Chatelier con keroseno, **Figura 15**.



Figura 15. Frasco de Le Chatelier.

Análisis químico

Las muestras de los cementantes fueron llevadas a los laboratorios de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL, donde se les realizó un análisis químico. Para dichos análisis fue necesario utilizar espectroscopia de fluorescencia de rayos x y espectroscopia de absorción atómica de acuerdo a ASTM C 114 y ASTM C-1084,

Distribución del tamaño de la partícula.

La distribución del tamaño de partícula de los materiales cementantes, se determinó mediante un analizador marca Microtrac S3500, por vía húmeda, utilizando alcohol isopropílico como medio de dispersión. Este equipo tiene la capacidad de analizar materiales con diferentes morfologías. El equipo lleva a cabo su función, a través de un rayo láser que mide la luz que se dispersa por las partículas de un material. La cantidad y la dirección de la luz que se dispersa se miden mediante un detector óptico, proyectando la distribución del tamaño de las partículas. El equipo para desarrollar este procedimiento se muestra en la **Figura 16**.



Figura 16. Equipo Microtrac S3500 para obtener la distribución de tamaño de las partículas.

Fineza por la malla 325 (45 μm)

Se empleó la malla 325 (45 μm) para obtener el valor de la fineza de los cementantes, lo anterior según lo establecido en la norma ASTM-C-430. El equipo utilizado consta de una malla con un tamiz de 45 μm , manguera conectada a un manómetro y un rociador, para regular la presión y el flujo del agua. La **Figura 17** muestra el equipo para realizar este procedimiento.



Figura 17. Equipo para determinar la fineza por la malla 325.

3.2.2. Pruebas físicas de los agregados.

Para diseñar los proporcionamientos de los morteros que se utilizaron en la producción de los bloques, es necesario conocer las propiedades físicas de los agregados, que se pueden determinar, tomando muestras representativas, de acuerdo con los siguientes análisis:

- ❖ **Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS):** se obtuvo mediante el procedimiento indicado en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba”.
- ❖ La *masa específica* y *absorción* de agua de la arena se obtuvo mediante el procedimiento indicado en la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Agregados – Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino – Método de Prueba”.
- ❖ Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se utilizaron los siguientes métodos estándar:
 - a) Muestreo del agregado de acuerdo con la norma NMX C-30-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción–Agregados–Muestreo”.
 - b) Reducción de la muestra de acuerdo con la norma NMX C-170-1997-ONNCCE “Industria de la Construcción–Agregados–Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para las Pruebas”.

- c) Determinación de la granulometría de acuerdo con la norma NMX C-111-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción–Agregados para Concreto Hidráulico–Especificaciones y Métodos de Prueba”.

3.2.3. El aditivo

Se utilizó el aditivo plastificante EUCON BP para cumplir dos funciones principales; como agente desmoldeante y para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. El aditivo líquido plastificante, se usa para proveer de alto a moderado rayado (Swipe) en bloques de concreto, tubos, tejas ladrillos en concreto y adoquines. Tiene propiedades lubricantes que mejoran tanto los tiempos de alimentación como los ciclos de producción.

La dosificación recomendada varía entre 65-196 mL/100 kg de cemento, pero es necesario realizar pruebas preliminares para ajustar una dosificación adecuada. Para este trabajo se dosificó una concentración media de la recomendación (124 mL/100 kg de cemento).

3.3. Desarrollo experimental

El desarrollo del método experimental para evaluar los bloques de concreto se presenta en el esquema descrito en la **Figura 18**, así mismo en la **Figura 19** se muestra el método para investigar lo relacionado con la evaluación de la fijación del CO₂ en las pastas cementantes. Con esta información se pretende estimar cuantitativamente la fijación del CO₂ por bloque producido.

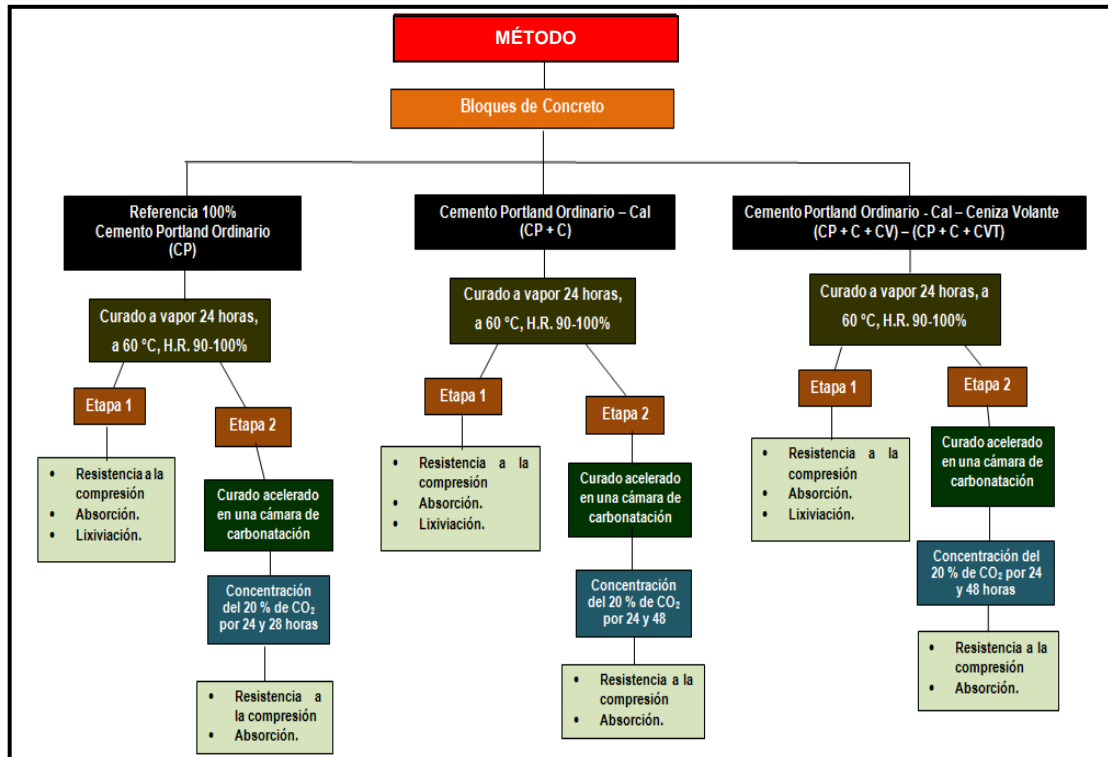


Figura 18. Método general para la evaluación de los bloques de concreto.

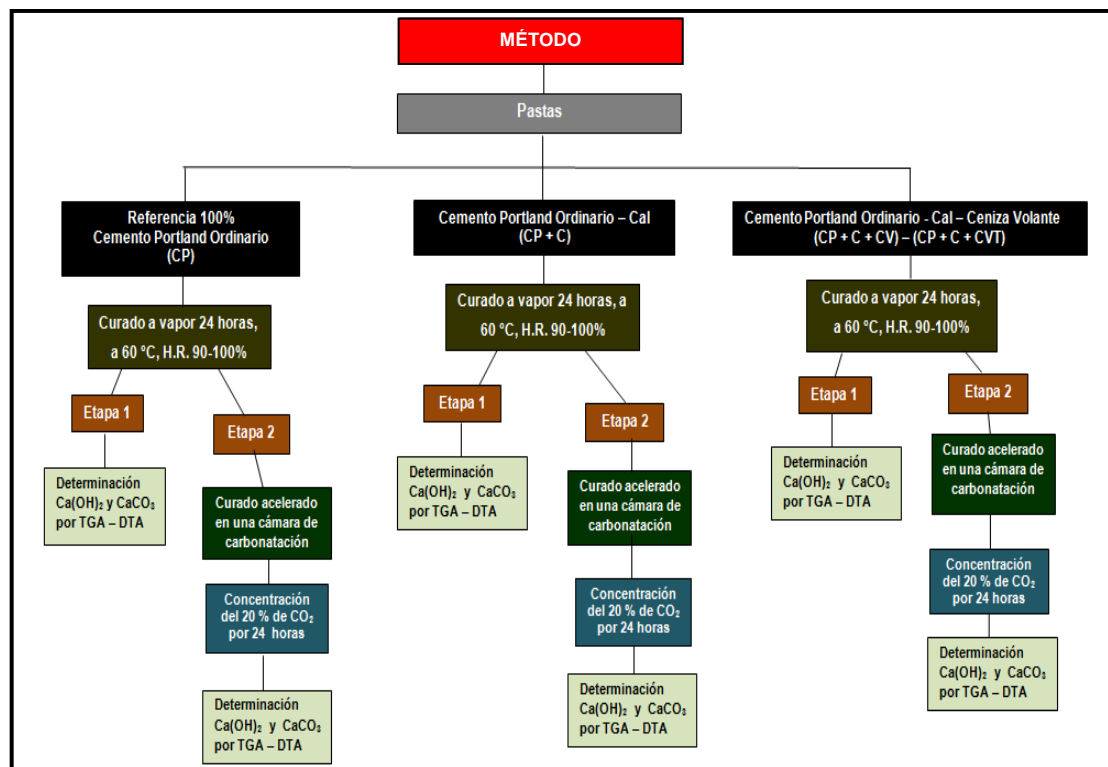


Figura 19. Método general para la evaluación de las pastas cementantes.

Para diseñar una mezcla de concreto se requiere determinar las propiedades de los materiales (cementantes y agregados), tales como la densidad, la absorción de los agregados y el peso volumétrico seco suelto. Con las propiedades se calcula el peso por metro cúbico; sin embargo, hay que definir la relación agua/cemento (A/C) o la relación agua/cementante (A/Cem), cuando hay más de un cementante en el diseño de la mezcla o cuando se emplea una puzolana. Como ya se ha mencionado, esta proporción influye directamente en sus propiedades reológicas y mecánicas.

Se establecieron los parámetros de diseño de las mezclas de tanteo con el propósito de definir el mortero de referencia y el experimental. Lo anterior según las recomendaciones del ACI 318 (American Concrete Institute) y la PCA (Portland Cement Association).

Se realizaron diversas mezclas de prueba para optimizar las proporciones del mortero en la mezcla de referencia, ya que se deseaba una mezcla con bajo consumo de cemento y una resistencia a la compresión mínima de 60 kg/cm². Con la mezcla optimizada se procedió a la fabricación de los bloques de concreto.

3.3.1. Bloques de concreto curados a vapor.

3.3.1.1. Fabricación de especímenes.

En las pruebas preliminares se fabricaron dos bloques de concreto por cada mezcla, lo anterior para evaluar su resistencia a la compresión. Posteriormente, y una vez concluidas estas, se fabricaron las mezclas definitivas, produciendo tres especímenes para determinar la resistencia a la compresión y dos para obtener su absorción.

Los especímenes fabricados fueron bloques de concreto con dimensiones de 15 x 20 x 40 cm y espesor de 2.54 cm. A continuación se menciona el proceso de fabricación de los bloques de concreto.

A).- Después de haber realizado la caracterización de los materiales y una vez definidos los proporcionamientos de las mezclas de los morteros, se determinaron las cantidades de los materiales por cada mezcla, para producir los especímenes. Para tener un mejor control de la mezcla, fue necesario pesar cada uno de los materiales tanto sólidos como líquidos.

B).- Ya pesados los materiales, se procedió al mezclado. En nuestro estudio se utilizó una mezcladora marca Eirich con capacidad de 40 L (**Figura 20**). El principio mecánico de rotación a contraflujo de la máquina, por parte del aspa y tambor permite homogenizar perfectamente la mezcla. Por las características antes mencionadas, esta mezcladora se considera de alta eficiencia e ideal para mezclas rígidas o secas, tales como el tipo de mortero seco utilizado en la producción de los bloques de concreto de la investigación.



Figura 20. Mezcladora marca Eirich, utilizada en la producción de los morteros.

C).- La mezcladora deberá estar libre de suciedad y humedecerse para evitar pérdida del agua de mezcla. Los materiales se introdujeron en la mezcladora, en el siguiente orden: primero la arena, enseguida los cementantes y finalmente el agua, **Figura 21**. El mezclado consiste tres etapas:

- a) Mezclado en seco de la arena con los cementantes durante 1 minuto.
- b) Ya mezclados la arena y los cementantes se agregó el agua de absorción y se procedió a mezclar durante 30 segundos.
- c) A los materiales ya humedecidos se les agregó el agua de reacción, y se procedió a un mezclado final por un tiempo de 3.5 minutos.

Por lo tanto, la duración total del mezclado fue de 5 minutos.



Figura 21. Mezclado de los materiales.

D).- Terminado el mezclado, **Figura 22**, el mortero se colocó en una carretilla previamente humedecida e inmediatamente se cubrió para evitar pérdida de humedad por evaporación del agua. En un procedimiento industrial, el mortero es transportado por bandas o cucharones directamente a la máquina bloquera. El aspecto que presenta la mezcla es de poca trabajabilidad prácticamente con un revenimiento cero, es por ello que se le llama mezcla seca.



a)

b)

c)

Figura 22. Mortero para bloque de concreto: a) Colocación y almacenamiento, b) Protección, c) Consistencia.

E).- El mortero fue trasladado al lugar de fabricación de los especímenes. Para la fabricación de los bloques se utilizó una máquina bloquera manual de vibro-compresión marca JOPER, con capacidad para fabricar 600 bloques en un turno de 8 horas, además de contar con motor monofásico de $\frac{3}{4}$ HP. Ya instalado previamente el molde en la bloquera, se humedeció y en la parte inferior se colocó una tarima de madera que sirvió como base para el traslado y la ubicación del bloque fabricado. Se añadió el mortero en el molde, hasta llenarlo; se encendió el motor por un lapso de 3 segundos para acomodar el material, posteriormente se añadió el material faltante hasta nuevamente llenar el molde. Se bajó el pisón y se encendió el motor para aplicar una vibrocompactación, este proceso se realizó en un tiempo de 6 a 8 segundos. Con lo anterior, el bloque ya estaba formado. Para sacarlo del molde, se dejó el pisón en la posición y se levantó el molde. Finalmente, con mucho cuidado, considerando que la mezcla estaba fresca y la forma de la pieza se debe a la vibro compactación, se retiró la pieza con la ayuda de la tarima y se ubicó en un lugar asignado. La **Figura 23** muestra el procedimiento anterior.



a)

b)

c)

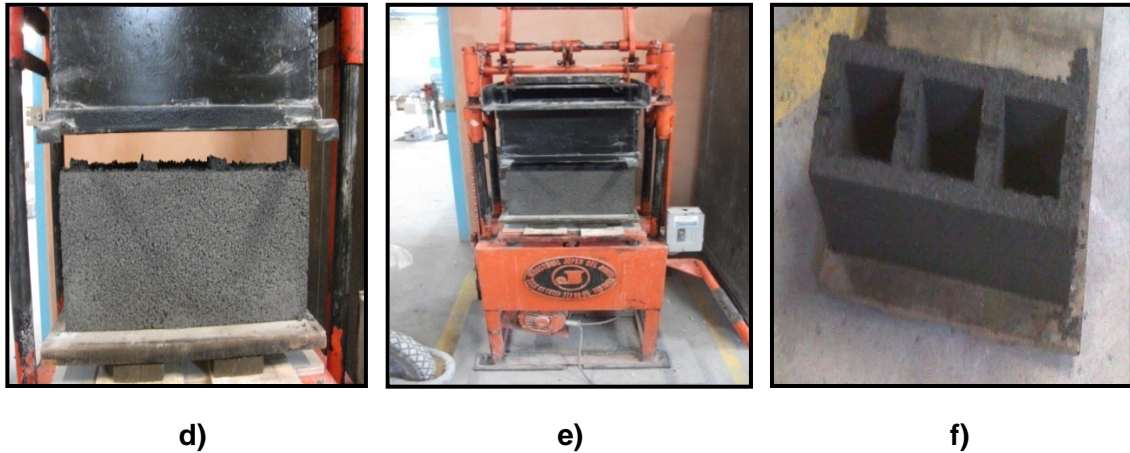


Figura 23. Fabricación de un bloque de concreto: a) Máquina bloquera de vibrocompresión, b) Adición de mortero, c) Vibrocompresión, d) Desmolde, e) Fin de la fabricación, f) Bloque de concreto terminado.

3.3.1.2. Curado de los especímenes

Tradicionalmente, en nuestro país existen dos métodos principales de curado. El primero es un curado con vapor de agua a presión atmosférica local y el segundo es un curado por irrigación (aspersión) de los bloques.

La aplicación de vapor de agua a presión atmosférica es uno de los métodos más antiguos y más usados para acelerar el curado del concreto.

La ventaja del curado de concreto con vapor de agua a presión atmosférica (curado con vapor a baja presión) sobre otros métodos de curado acelerado, es que el medio se encuentra cerca de la saturación de humedad, minimizando, así, la evaporación del agua del elemento, lo cual es de relevante importancia cuando se trata de elementos de descimbrado total o parcial (bloques, tubos, etc.). De esta forma en un solo día de curado se logra tener una unidad lista para el mercado.

Los bloques de concreto de peso normal, curados mediante este método, de acuerdo con el Comité 517 del ACI “Recommended Practice for Atmospheric Pressure Steam Curing of Concrete” [83], deberán someterse a un curado inicial, antes de aplicar vapor por un periodo mínimo de 2 horas. Así mismo, después de este curado inicial, la aplicación de vapor en conjunto con el incremento de la temperatura para el periodo de saturación se deberá llevar a cabo en un periodo de 12 a 24 horas, con un nivel de temperatura de 60 a 74 °C.

De acuerdo con **Kuening y Carlson**, los bloques de concreto en condiciones de curado a vapor a altas temperaturas sugieren una humedad relativa del horno entre 80 y 100% sin que éstas puedan repercutir en la resistencia y otras propiedades de las piezas de mampostería [84].

El curado por irrigación consiste en rociar los bloques de concreto, ya almacenados en el patio durante cierto tiempo, varias veces al día. Por lo general esta operación dura de 3 a 7 días y en algunos casos menos de tres días. Este curado no es tan efectivo como el de vapor a presión atmosférica local, pero pruebas de laboratorio han demostrado que los bloques obtenidos son de calidad aceptable.

Además de estos métodos utilizados en nuestro país, se ha observado en otros países que el curado de bloques de concreto mediante vapor de alta presión es considerablemente superior a otros métodos de curado, pues mejora muchas características entre las cuales se encuentran una alta resistencia inicial: mayor durabilidad y reducción de la contracción por secado. Desgraciadamente, la desventaja de este método estriba en la instalación y mantenimiento de autoclaves, procedimientos sumamente costosos [85,86].

Al iniciar el curado de los bloques de concreto elaborados en esta investigación, posterior al desmoldeo, las piezas fueron ubicadas en un lugar del laboratorio en donde la temperatura oscilara entre los 25 ° y los 30 °C, durante 2 horas, como periodo de curado inicial.

El curado de los bloques de concreto se llevó a cabo de forma acelerada empleando vapor de agua. Para ello se utilizó un una cámara ambiental, **Figura 24**, ajustando condiciones de H.R. de 90 – 100% y temperatura de 60 °C, durante un periodo de 24 horas [29,72].



Figura 24. Equipo y periodo de curado. a) Cámara ambiental, b) Bloques de concreto curados.

3.3.1.3. Resistencia a la compresión y absorción.

Una vez que los bloques de concreto han sido curados durante un periodo de 24 horas, se dejan bajo las condiciones de laboratorio durante una hora. Posteriormente son secados al horno a una temperatura de 100 – 110 °C, puesto que al momento de ensaye no deberán encontrarse en condición crítica (húmedos o saturados) [87]. Para este estudio se encontró un periodo de tiempo de secado con

duración de 2 a 3.5 horas. El equipo utilizado para secado fue un horno de inducción con capacidad de 1 m³, **Figura 25**.



Figura 25. Bloques de concreto secados en el horno.

Después del secado, se eligen los bloques para el ensaye de resistencia a la compresión y la absorción. Para el ensaye de resistencia a la compresión se tomaron tres especímenes, mientras que para la prueba de absorción dos. En ambos casos, después del secado, los especímenes se dejaron en condiciones ambientales de laboratorio durante dos horas. Durante este tiempo, los bloques fueron medidos y pesados, verificando que las dimensiones cumplieran con los requerimientos de la NMX-C-038-2004. Este proceso se muestra en la **Figura 26**.

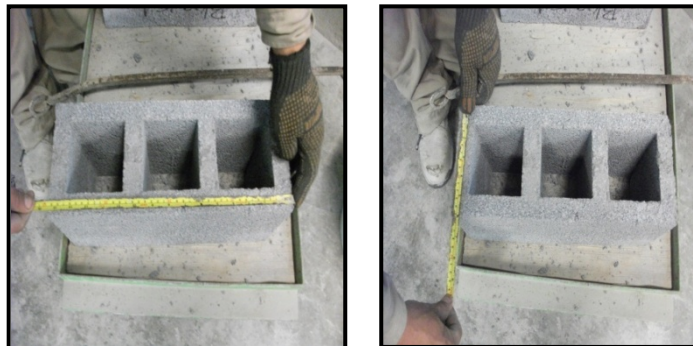


Figura 26. Medición de las dimensiones del bloque.

La preparación de los bloques antes de ensayarse a compresión, se llevó a cabo de acuerdo con la NMX-C-036-2004, aplicando un cabeceo, con un mortero que contenía azufre. Este procedimiento se muestra en la **Figura 27**.

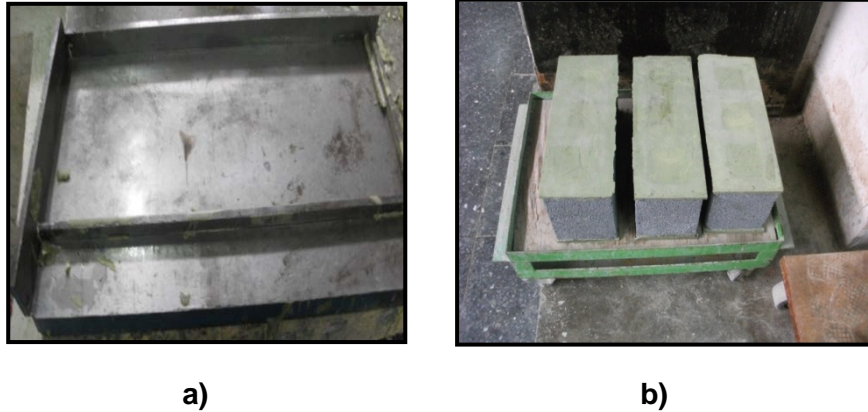


Figura 27. Preparación de bloques de concreto para ensaye a compresión: a) Placa de cabeceo, b) Bloques después del cabeceo, antes de someterse a ensaye a compresión.

El ensaye a compresión se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-036-2004. Las pruebas de resistencia a la compresión de los bloques de concreto se realizaron en una Máquina Universal de pruebas marca Riehle con capacidad de 150 toneladas. El arreglo del ensaye según la norma se presenta en la **Figura 28**.



Figura 28. Máquina Universal de Pruebas Riehle, durante la ejecución de la prueba de resistencia a la compresión en bloques de concreto.

Ahora bien, para la prueba de absorción, ésta se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-037-2005. Como se mencionó anteriormente, después de secar los bloques y esperar a que se adaptaran a las condiciones de laboratorio, estos se pesaron y posteriormente se sumergieron en agua durante 24 horas. Después de las 24 horas, se pesaron en condición de saturado superficialmente seco y, además, se pesaron de forma sumergida. Por último, se sometieron a un secado durante 24 horas a 100-110 °C para obtener su peso seco. Este proceso se muestra en la **Figura 29**.

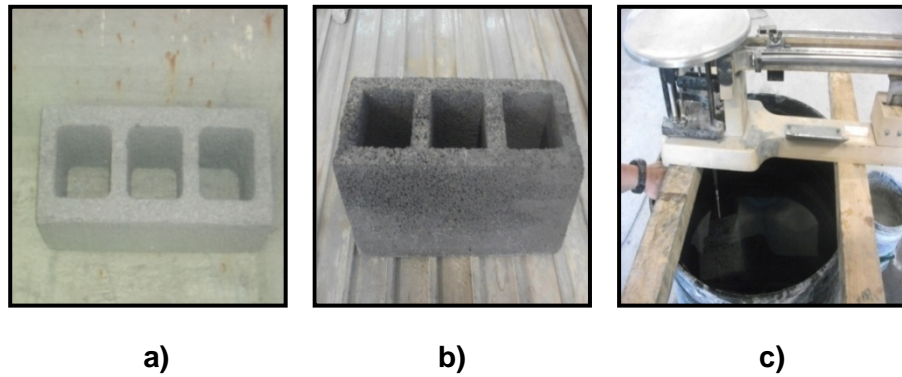


Figura 29. Prueba de absorción: a) Saturación del bloque durante 24 horas, b) Condición saturado superficialmente seco, c) Obtención del peso sumergido.

3.3.2. Bloques de concreto curados con CO₂.

Como se ha mencionado, el fenómeno de la carbonatación puede afectar al concreto reforzado; sin embargo, para elementos sin refuerzo, este proceso puede llegar a ser benéfico.

La aplicación de un curado con CO₂ en materiales de mampostería, principalmente bloques de concreto, está siendo investigada recientemente por diferentes grupos de investigación.

Como parte del diseño experimental, en la presente investigación se pretende evaluar el efecto de la carbonatación en mampostería vibrocomprimida y con tres sistemas cementantes.

A continuación se menciona el procedimiento de curado con CO₂ de los bloques de concreto:

A). Después de curar los bloques con vapor de agua por un tiempo de 24 horas, los bloques fueron secados en un horno a 100 -110 °C, durante un periodo de tiempo de 2 a 3.5 horas, hasta lograr un peso constante de secado. Este peso seco se registró (**Figura 30**) con el fin de conocer si después del curado con CO₂ los bloques adquieren un mayor peso, gracias a la formación de carbonatos de calcio.



Figura 30. Determinación del peso seco de los bloques de concreto.

B). Posterior al secado, los bloques fueron transportados y ubicados dentro de una cámara de carbonatación, en la cual se fija la H.R. entre 60 y 75%, temperatura de 25 – 30 °C y una concentración de CO₂ en el aire de 20%. Algunos de estos parámetros se fijaron según la información bibliográfica analizada y con la posibilidad de ser reproducidos en un sistema industrializado. Como se ha mencionado, la temperatura y la humedad son condiciones críticas que permiten acelerar el proceso de carbonatación, teniendo la concentración permanente de CO₂ en la cámara de carbonatación acelerada. El equipo utilizado en este proceso se muestra en la **Figura 31**.



Figura 31. Curado con CO₂. a) Cámara de carbonatación, b) Panel de control para regulación de humedad relativa, temperatura y concentración de CO₂, b) Bloques de concreto antes de la carbonatación.

C). La cámara de carbonatación fue sellada, iniciando la inyección del CO₂ a una presión de 10 psi (68.9 kPa) y el tiempo de curado. Los bloques fueron curados por un tiempo de 24 y 48 horas.

D). Al terminar el tiempo de curado, los bloques fueron inmediatamente pesados, registrando el peso conocido como peso posterior a la carbonatación. Este peso se vio modificado por el efecto de la carbonatación, densificando el bloque; sin embargo, la reacción de carbonatación además de producir carbonatos genera agua, es por ello que nuevamente se secan durante un periodo de 2 a 3.5 horas a peso constante, lo anterior con el objetivo de eliminar esta agua y conocer aproximadamente la ganancia de peso por la formación de los carbonatos. Este último peso seco se registró y se conoce como “peso seco después de la carbonatación”.

E). Terminado el secado y el registro correspondiente del peso del bloque, se seleccionaron los bloques que serían sometidos a las pruebas de resistencia a la compresión y la absorción. Los procedimientos de ensaye fueron los mismos que los descritos en la sección 3.3.1.3. para los especímenes curados a vapor.

Después de realizados los ensayos de resistencia a la compresión, algunos bloques fueron rociados con fenolftaleína, con la finalidad de tener un parámetro visual de la carbonatación en los bloques curados con CO₂.

3.3.3. Incremento de peso en los bloques de concreto sometidos a carbonatación.

Una vez que se ha llevado a cabo el proceso de carbonatación, la mampostería tiende a densificarse, gracias a la formación de carbonatos de calcio insolubles. Por esta razón, en la presente investigación se desarrolló un análisis del incremento de peso que produce la carbonatación en las piezas fabricadas, formando un bloque de concreto más denso.

La carbonatación se produce cuando el dióxido de carbono y el hidróxido de calcio reaccionan formando carbonatos de calcio y agua. Lo anterior es importante mencionarlo, ya que, para medir el incremento en el peso de los bloques de concreto, es necesario eliminar esta agua libre a través de un secado, para finalmente obtener un peso asociado únicamente con la formación de carbonatos de calcio.

El análisis del incremento en el peso de los bloques de concreto por efecto de la carbonatación se desarrolló de la siguiente forma: después del curado con vapor, los bloques de concreto fueron secados de la misma forma a lo señalado antes del ensaye de resistencia a la compresión; posteriormente, este peso seco fue registrado. Una vez realizado lo anterior, el bloque de concreto se trasladó a la cámara de carbonatación para someterse a curado. Al finalizar el periodo de curado con CO_2 , el bloque de concreto fue pesado; sin embargo, en esta condición, dicho bloque presentó cierta humedad, considerada como producto de la carbonatación; por lo tanto, fue necesario efectuar un secado para eliminar esta humedad. Secado el bloque de concreto bajo las mismas condiciones al curado con vapor, se pesó éste y se registró como peso seco después de la carbonatación. La diferencia entre el peso seco del curado con vapor y el registrado después de la carbonatación es el incremento del peso producto de la carbonatación del bloque de concreto.

Los bloques de concreto estudiados se componen de sistemas de referencia, binarios y ternarios. Las mezclas que integran dichos sistemas serán las mismas que las utilizadas para bloques de concreto curados con CO_2 .

3.3.4. Inspección visual de los bloques de concreto en condiciones ambientales.

La inspección visual llevada a cabo en la presente investigación se planteó de manera interna para verificar la presencia de eflorescencias en los bloques de concreto seleccionados, este procedimiento es un parámetro indicador de la interacción de estos bloques con el medio, de esta forma la nula presencia de eflorescencias define un bloque de concreto de mayor calidad. La inspección consiste en observar la tonalidad de los bloques de concreto, constituidos por los distintos sistemas cementantes, además de la presencia de eflorescencias en la superficie de estos bloques.

La lixiviación produce eflorescencias, que son cristales de sales generalmente de color blanco que se depositan sobre las superficies de la mampostería y el concreto. Algunas sales solubles en agua pueden ser transportadas por capilaridad a través de

los poros y ser depositadas en la superficie cuando se evapora el agua por efecto de los rayos solares y/o del aire. Este fenómeno generalmente tan sólo se trata de un problema estético.

El hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento portland es soluble en agua, lo que conlleva a que pueda ser lixiviado desde el interior de la mampostería hacia la superficie formando eflorescencias. Sin embargo, el hidróxido de calcio al estar en contacto con el dióxido de carbono en el aire, reacciona para formar carbonatos de calcio insolubles, disminuyendo con ello el problema producido por este fenómeno [87].

Como se ha mencionado, la lixiviación está presente en unidades de mampostería (ladrillos y bloques de concreto). Para evaluar lo anterior, se elaboraron 2 bloques de concreto con cada una de las siguientes mezclas, curados únicamente con vapor:

- a) 100 CP
- b) 90 CP + 10 C
- c) 85 CP + 15 C
- d) 50 CP + 10 C + 40 CV
- e) 60 CP + 10 C + 30 CV

El criterio de selección de las mezclas, se basó en el contenido de hidróxido de calcio, puesto que, a medida que se tienen cantidades mayores de hidróxido de calcio libre, existe una probabilidad mayor de presentarse eflorescencias.

Una vez fabricados los bloques de concreto, estos fueron expuestos a condiciones ambientales, durante un periodo de tiempo de 10 meses (Diciembre 2011 – Septiembre 2012). El monitoreo se realizó mediante registro fotográfico durante este tiempo.

El lugar de exposición para el monitoreo de este fenómeno en las piezas de mampostería, fue la azotea del Instituto de Ingeniería Civil, dicho recinto está ubicado en Cd, Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

3.3.5. Determinación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaCO_3 en pastas de cementantes mediante análisis termogravimétricos.

La carbonatación, como se ha mencionado con anterioridad, puede ser un problema en las estructuras de concreto reforzado; sin embargo, en piezas exentas de refuerzo de acero esto pudiera no ser así. El efecto de la carbonatación en piezas de mampostería, hablando de forma específica bloques de concreto, puede generar beneficios, de los cuales uno de ellos es la fijación del CO_2 en la matriz cementante, al reaccionar éste con el hidróxido de calcio para formar carbonatos, agentes que ayudan a densificar la matriz del elemento de concreto.

Por ello, la cuantificación del hidróxido de calcio y carbonatos de calcio presentes en las unidades de mampostería del estudio es de suma importancia para determinar la fijación de CO_2 aproximada en la matriz.

Existen diferentes métodos y técnicas para determinar el contenido de hidróxido de calcio en una mezcla de cementantes hidráulicos, entre las cuales se encuentran la combinación de los análisis termogravimétricos (TGA) y térmicos diferencial (DTA).

Ya que el bloque de concreto está constituido por una gran proporción de agregado calizo, esto afectaría la evaluación del cambio en la formación de los carbonatos por efecto de la carbonatación, por lo cual esta técnica no aplicaría. Considerando lo anterior y además que los agentes responsables de la reacción de carbonatación son los cementantes, se procedió a evaluar la carbonatación utilizando pastas cementantes.

Para el estudio de las pastas, esta técnica es muy útil, porque permite observar la pérdida de masa debida a reacciones de deshidratación y descarbonatación. La medida de los picos observados en el termograma permite determinar la variación en la masa de la muestra.

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión de los bloques de concreto serán los factores que determinarán las dosificaciones de las pastas que se elaborarán para este análisis. Una vez establecido esto, la preparación de las pastas es la siguiente:

- Se mezcla perfectamente la cantidad de cemento, cal o puzolana de acuerdo con las proporciones correspondientes a los bloques estudiados, en un recipiente cilíndrico.
- Se añade el agua indicada y se mezcla hasta obtener una pasta homogénea.
- Una vez finalizado el mezclado, se coloca parte de la mezcla en bolsas de plástico sin sellar, para un periodo de curado similar a los bloques de concreto.

Después del curado se toman muestras de las pastas y se sumergen en acetona o metanol con la finalidad de detener el proceso de hidratación [88,89].

Las muestras se secan en un horno a 40 °C por un periodo de 4 a 5 horas. Posteriormente, se muelen en un mortero de ágata. Esta muestra se criba por un tamiz de 75 µm (No. 200). A la postre se traslada la muestra sellada, evitando con ello algún efecto de agentes ambientales. Posteriormente se determinan los análisis termogravimétricos de TGA y DTA. El proceso de preparación se muestra en la **Figura 32**.

El equipo que se ha utilizado para realizar esta prueba es un módulo SDT-Q600-TA, que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica (TGA) y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA). El equipo se muestra en la **Figura 33**.



Figura 32. (Izquierda a Derecha). Muestras secadas en horno a 40 °C. Equipo de molienda: Mortero de Ágata, malla No. 200 y brochas. Muestras molidas almacenadas en bolsas de plástico.

El equipo cuenta con una electrobalanza horizontal, un horno y sensores de temperatura que están en comunicación con un ordenador, donde se registran y se procesan los datos. Se utilizan crisoles de alúmina con tapa sellable, además del uso de nitrógeno como gas inerte en un flujo de 100mL/min para el funcionamiento adecuado del equipo.



Figura 33. Equipo SDT-Q600-TA para TGA-DTA.

Se utilizan dos crisoles: uno de los cuales es utilizado con material de referencia, en este caso alúmina, y el otro con el material por investigar. Es necesario ajustar una cantidad superior a los 7 mg, además de mantener una diferencia mínima entre las cantidades de alúmina y el material de análisis.

CAPÍTULO

4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados encontrados de las pruebas experimentales descritas en el capítulo 3. Se analizan y discuten los resultados de mampostería elaborada con los diferentes sistemas cementantes y en las condiciones de curado descritas; así como la evaluación de las pastas en el proceso de carbonatación.

4.1 Caracterización de los materiales.

Se presenta la caracterización de los materiales tanto para los cementantes como para el agregado.

4.1.1. Los cementantes.

Densidad

Los resultados de la densidad de los materiales cementantes se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Densidad de los cementantes.

Cementante	Densidad g/cm ³
Cemento Portland (CP)	3.08
Ceniza Volante (CV)	2.06
Ceniza Volante Tamizada (CVT)	2.14
Cal (C)	2.25

Por lo regular, las puzolanas u otros materiales cementantes presentan densidades menores al cemento portland, tal es el caso de los cementantes utilizados. Las densidades son de suma importancia en el diseño de mezclas para definir los proporcionamientos y las dosificaciones adecuadas.

Análisis químico

El análisis químico de los cementantes se puede observar en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Composición química de los cementantes, % en masa.

Elemento	CP	CV	C
Dióxido de Silíceo (SiO₂)	21.2	72.7	0.8
Óxido de Aluminio (Al₂O₃)	3.4	19.6	0.3
Óxido Férrico (Fe₂O₃)	1.8	2.1	0.1
Óxido de Calcio (CaO)	62.9	1.4	97.1
Óxido de Magnesio (MgO)	1.5	0.6	0.70
Óxido de Potasio (K₂O)	0.7	0.6	0
Dióxido de Titanio (TiO₂)	0	1.0	0
Óxido de Sodio (Na₂O)	0.5	0.1	0
Perdida por Ignición a 900 °C	2.0	1.8	0
Sulfatos (SO₄)	5.0	Menor a 0.1	0
Suma	99.0	99.9	99.0
Na₂O equivalente	0.9	0.5	----

En relación con los resultados del análisis químico, la ceniza volante presenta una composición de óxidos mayores (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) de 94.5%, y una pérdida por ignición de 1.8%, por lo tanto de acuerdo con lo establecido en ASTM-C-618, la ceniza volante se clasifica como clase F. En dicha norma, se establece como máximo una pérdida por ignición del 6%, la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ deberá ser mínimo del 70% y el contenido de álcalis menor al 1.5%.

Otra forma de clasificación para la ceniza volante se basa en el contenido de CaO, que al ser mayor que el 10%, la ceniza volante se clasifica como tipo C. De acuerdo con el contenido de CaO de la ceniza volante utilizada de 1.4%; por lo tanto, la ceniza volante utilizada es clasificada como tipo F [22].

El contenido de CaO y el tamaño promedio de partícula son dos variables que influyen en la actividad puzolánica, ya que, conforme el contenido de CaO es mayor y el tamaño de partícula disminuye, la reacción puzolánica tiende a aumentar.

El cemento portland, de acuerdo con su composición química, cumple la normativa ASTM-C-150 y la NMX-C-414, puesto que la pérdida por ignición y el óxido de magnesio son menores al 5% y se tiene un contenido de sulfato de hasta un 5%. Lo anterior se atribuye a que durante la fabricación del cemento se tiene un control estricto de calidad.

En cuanto a la cal de construcción (hidróxido de calcio), ésta cumple las especificaciones de la NMX-C-003 y ASTM-C-207, ya que su contenido de óxido de calcio es mayor que el 80% (mínimo requerido) y cuenta con menos del 5% de óxido de magnesio que especifica dicha norma.

Distribución del tamaño de la partícula.

El análisis de la distribución del tamaño de las partículas de los cementantes utilizados se muestra en la **Figura 34**.

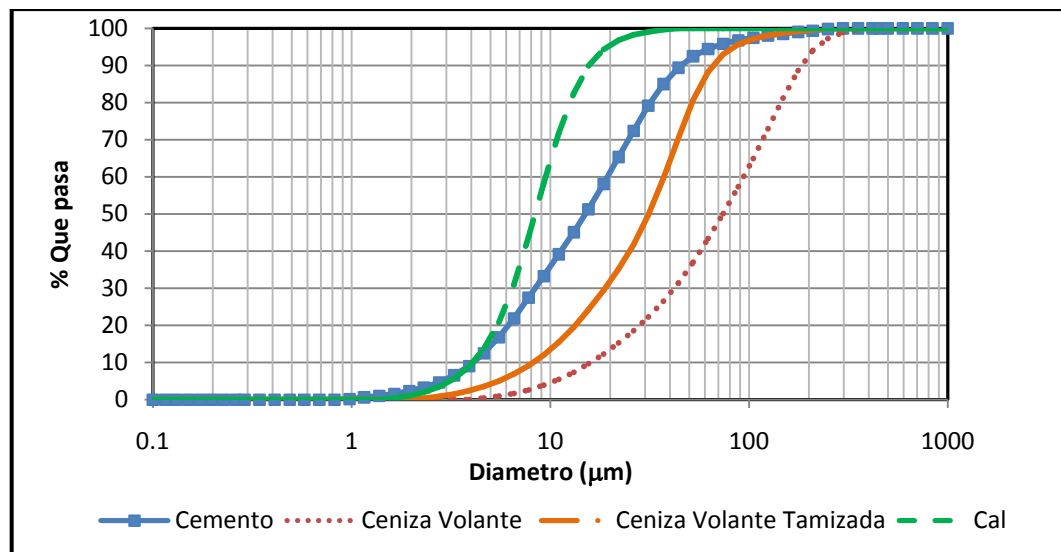


Figura 34. Distribución del tamaño de partícula en los cementantes.

El tamaño medio en el que se retiene el 10, 50 y 90% de cada material cementante se presenta en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Tamaños en los que se retiene el 10, el 50 y el 90% del material.

Cementante	10% µm	50% µm	90% µm
Cemento Portland (CP)	44	15.6	4.6
Ceniza Volante (CV)	176	74	15.6
Ceniza Volante Tamizada (CVT)	62.2	31.1	7.8
Cal (C)	15.6	9.3	4.6

Como se puede observar, el tamaño promedio de partícula de la ceniza volante ya sea integral o tamizada es mayor al cemento portland y la cal, lo cual indica que su reactividad se verá disminuida al tener menor área superficial, así mismo, la ceniza volante tamizada disminuirá su tamaño de partículas, esto incrementará su área superficial específica y su reactividad. Lo anterior se constata, ya que la ceniza volante integral presenta un tamaño promedio de partícula de 74 µm aproximadamente 5 veces mayor que el tamaño de partícula del cemento portland, mientras la ceniza volante tamizada es alrededor de 2 veces. Además, las partículas de ceniza volante que no reaccionen por causa del tamaño de sus partículas, pueden cumplir otra función similar a un agregado, al comportarse como un filler. Otro aspecto relevante, es considerar que la cal presenta un tamaño de partícula menor que el del cemento, lo que podría ayudar a que la combinación de cemento con cal genere buena reactividad que se manifieste en una ganancia de resistencia mecánica

La ceniza volante comparada con otros materiales puzolánicos, como el humo de sílice o el micron³ tiene un mayor tamaño de partícula; ya que, por ejemplo, el humo de sílice es 100 veces más pequeño que el cemento portland.

Fineza por la malla 325 (45µm)

Los resultados de la prueba de fineza por la malla 325 (45µm) son mostrados en la **Tabla 11**. Esta prueba permite realizar una comparación entre los cementantes utilizados, puesto que mientras más fino, se incrementa su área superficial específica y como consecuencia la reactividad puede incrementarse, promoviendo una ganancia de resistencia mecánica a edades tempranas. Esta propiedad tanto en el cemento portland como para la ceniza volante esta especificada en la ASTM-C-150 y ASTM-C-618, respectivamente.

Tabla 11. Finezas de los cementantes.

Cementante	% Pasa Malla 325 (45µm)
Cemento Portland (CP)	97.20
Ceniza Volante (CV)	49.50
Ceniza Volante Tamizada (CVT)	79.44
Cal (C)	98.46

La ceniza volante presenta una retención en la malla 325 de 50.5% (pasa 49.5%). De acuerdo con la norma ASTM-C-618, se establece que para una ceniza volante tipo F la cantidad máxima retenida en la malla 325 es de 35%; por lo tanto, la ceniza volante del estudio no cumple esta especificación. Con el objetivo de no invertir mayor cantidad de energía en el proceso, e investigar su contribución en ambas condiciones de curado y en los sistemas cementantes, se consideró pertinente utilizar el material en esta condición. En relación a la ceniza volante tamizada, ésta cumple lo estipulado en la normativa, puesto que lo retenido en la malla 325 fue de 20.6% (pasa 79.4%).

Los resultados muestran que el cemento portland y la cal (hidróxido de calcio) tienen una fineza mayor con respecto a la ceniza volante, lo cual indicaría una mayor reactividad.

4.1.2. El agregado.

En la **Tabla 12** se presentan los resultados de las pruebas de Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS), absorción y peso específico de la arena utilizada (4B).

Tabla 12. Propiedades físicas de la arena 4B.

Agregado	Densidad g/cm ³	Absorción %	PVSS g/cm ³
Arena 4B	2.6	1.8	1.6

En lo que respecta al análisis granulométrico de la arena, se realizaron las pruebas previas hasta obtener la granulometría de arena para uso en concreto de acuerdo con las especificaciones de la NMX-C-111. La granulometría se muestra en forma tabulada en la **Tabla 13** y en forma gráfica en la **Figura 35**.

Tabla 13. Granulometría de la arena 4B.

Malla No.	Retenido (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Pasa	Especificación NMX-C-111-ONNCCE-2004	
					Límite inferior	Límite Superior
1/2"	0	0.0	0	100.0	100	100
3/8"	0	0.0	0.0	100.0	100	100
4	38	7.6	7.6	92.4	95	100
8	143	28.7	36.3	63.7	80	100
16	126	25.3	61.5	38.5	50	85
30	69	13.8	75.4	24.6	25	60
50	52	10.4	85.8	14.2	10	30
100	31	6.2	92	8.0	2	10
P. 100	40	8.0		0.0	0	0
Suma	499	100.0	358.5			

El módulo de finura de la arena 4B fue de 3.58, lo que representa que se tiene arena con partículas gruesas; esto también puede observarse en la gráfica de la granulometría de la arena 4B. La granulometría se encuentra fuera de los requerimientos de la norma.

En nuestra región no existe normativa para la arena 4B que se usa en la elaboración de bloques de concreto. La adaptación de una granulometría para este fin, se basa en pruebas realizadas en el laboratorio para cada lugar de producción, considerando las características de los materiales utilizados en la producción de los bloques de concreto. No obstante, las granulometrías son similares entre cada fabricante.

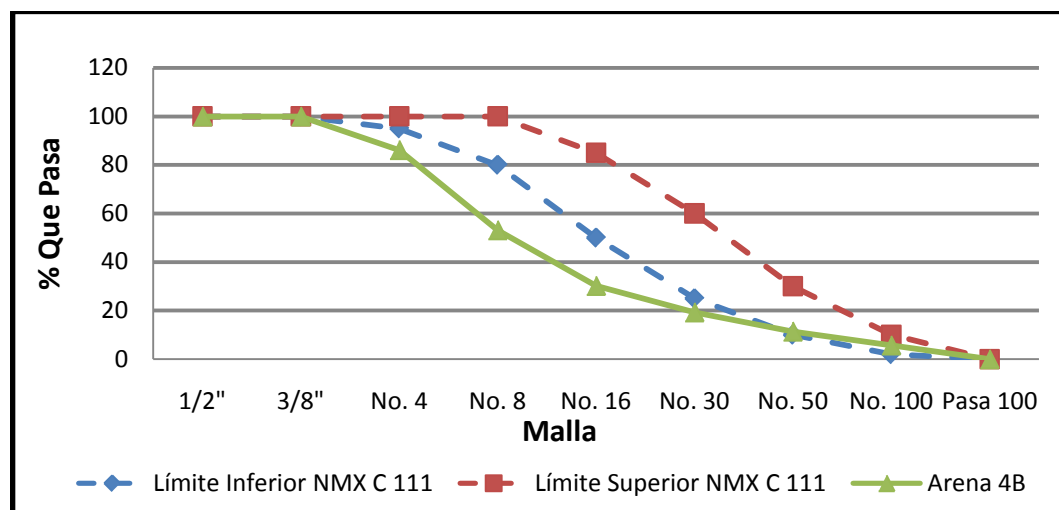


Figura 35. Distribución granulométrica de la arena 4B.

Debido a lo anterior, algunos aspectos técnicos que se utilizan para seleccionar y/o recomendar la distribución granulométrica en las arenas que se usan para elaborar bloques de concreto, son los siguientes:

- a) La apariencia.
- b) La resistencia a la compresión.
- c) La absorción y la permeabilidad.

El principio básico para recomendar una determinada granulometría en un agregado o la combinación de diferentes agregados, trata de lograr que el porcentaje de vacíos(n) del material sea el mínimo.

Para lograr lo anterior, en una muestra de agregado, se requerirá que los granos de tamaño más pequeño ocupen los vacíos que dejan al acomodarse los granos de tamaño más grande.

Se han realizado diversas pruebas en laboratorio por parte de algunas empresas [90], o de algunos investigadores como **William Grant [91]**, donde se han ajustado los tamaños de partícula de la arena y granulometría, de tal forma que atendiendo cuestiones técnicas, teóricas y prácticas de productores de bloques, se sugirió la distribución granulométrica que se muestra en la **Figura 36**.

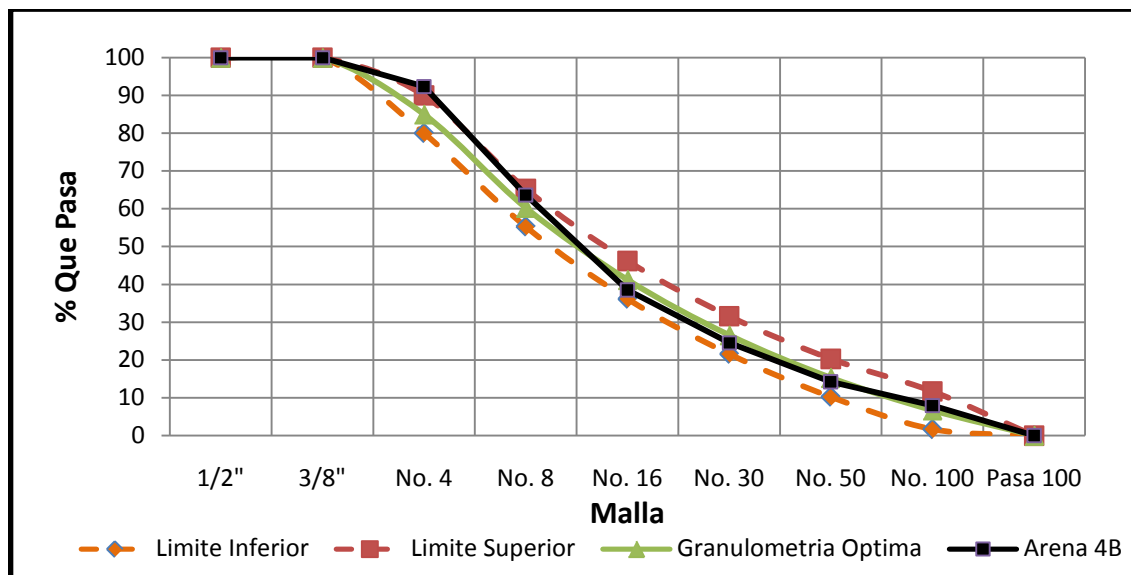


Figura 36. Distribución granulométrica ajustada para arena 4B [90].

Entre más alta sea la capacidad de acomodo de la mezcla, debido a la potencia de vibrado del equipo, puede recomendarse la curva más cercana hacia el límite inferior y viceversa.

De acuerdo con las recomendaciones granulométricas, la arena 4B utilizada para la fabricación de los bloques, cumple los límites, así mismo, de acuerdo con la

recomendación de la potencia de vibrado de la mezcla, al considerar que la máquina presenta una potencia de media a baja, la curva se adapta mejor al límite superior.

4.2 Desarrollo experimental.

Con los resultados de la caracterización de los materiales y a su vez del diseño de los proporcionamientos de las mezclas de mortero para producir los bloques de concreto, se realizaron pruebas preliminares que permitieron definir el consumo de cementante y relación A/Cem de las mezclas definitivas.

4.2.1. Proporcionamiento de las mezclas.

Se fabricaron bloques de concreto con mezclas preliminares considerando un consumo de cemento de 90, 110, 130 y 150 kg/m³, así como relaciones A/Cem de 0.40, 0.45, 0.50 y 0.60. Con base en los resultados de resistencia a la compresión para cada una de las mezclas, se ajustó el consumo de cemento y la relación A/Cem.

Otro parámetro que definió la relación A/Cem final fue la trabajabilidad de la mezcla. Es conocido que a menor relación A/Cem la resistencia a la compresión aumenta; sin embargo, con el uso de estas relaciones, la mezcla elaborada presentaba poca trabajabilidad. Finalmente, tomando en cuenta la condición anterior, así como la resistencia a la compresión deseada, del orden de los 60 kg/cm², la relación A/Cem final del diseño para la mezcla de referencia es de 0.6 y un consumo de cementante de 167 kg/m³.

Al encontrar las dosificaciones para la mezcla de referencia, se propusieron diferentes sustituciones en porcentaje de peso total del cementante, esto sustituyendo ceniza volante y cal por cemento portland. Se realizaron dos series de mezclas, binarias y ternarias. Las mezclas binarias utilizaron como cementantes cemento portland y cal, mientras que las mezclas ternarias ceniza volante, cemento portland y cal. Es importante mencionar que las mezclas ternarias utilizaron ceniza volante en dos condiciones, tamizada y sin tamizar. Los proporcionamientos mantuvieron constante la relación A/Cem y consumo de cementante. En las **Tablas 14, 15 y 16** se muestran los proporcionamientos de las mezclas de referencia, binarias y ternarias.

Tabla 14. Proporcionamiento de la mezcla de referencia y sistema binario cemento – cal.

Consumo de Cementante 167 kg/m ³		A/Cem 0.60			
Cementante Sustitución % en peso del material cementante	Cemento kg/m ³	Cal kg/m ³	Agua kg/m ³	Arena kg/m ³	Aditivo kg/m ³
100 CP	167.0	0	100.0	2000.2	0.2
95CP + 5C	158.7	8.4	100.0	1997.6	0.2
90CP + 10C	150.3	16.7	100.0	1995.0	0.2
85CP + 15C	142.0	25.1	100.0	1992.3	0.2

Tabla 15. Proporcionamientos de la mezcla de referencia y sistema ternario cemento – cal – ceniza volante.

Consumo de Cementante 167 kg/m ³			A/Cem 0.60			
Cementante Sustitución % en peso del material cementante	Cemento kg/m ³	Cal kg/m ³	Ceniza volante kg/m ³	Agua kg/m ³	Arena kg/m ³	Aditivo kg/m ³
100 CP	167.0	0	0	100.0	2001.2	0.2
35CP + 5C + 60CV	58.5	8.4	100.2	100.0	1955.2	0.2
35CP + 10C + 55CV	58.5	16.7	91.9	100.0	1956.1	0.2
35CP + 15C + 50CV	58.5	25.1	83.5	100.0	1957.0	0.2
40CP + 5C + 55CV	66.8	8.4	91.9	100.0	1958.8	0.2
40CP + 10C + 50CV	66.8	16.7	83.5	100.0	1959.7	0.2
40CP + 15C + 45CV	66.8	25.1	75.2	100.0	1960.6	0.2
50CP + 5C + 45CV	83.5	8.4	75.2	100.0	1965.8	0.2
50CP + 10C + 40CV	83.5	16.7	66.8	100.0	1966.7	0.2
60CP + 5C + 35CV	100.2	8.4	58.5	100.0	1972.9	0.2
60CP + 10C + 30CV	100.2	16.7	50.1	100.0	1973.8	0.2
70CP + 5C + 25CV	116.9	8.4	41.8	100.0	1980.0	0.2
70CP + 10C + 20CV	116.9	16.7	33.4	100.0	1980.9	0.2
70CP + 15C + 15CV	116.9	25.1	25.1	100.0	1981.8	0.2

Tabla 16. Proporcionamientos de la mezcla de referencia y sistema ternario cemento – cal – ceniza volante tamizada.

Consumo de Cementante 167 kg/m ³			A/Cem 0.60			
Cementante Sustitución % en peso del material cementante	Cemento kg/m ³	Cal kg/m ³	Ceniza volante kg/m ³	Agua kg/m ³	Arena kg/m ³	Aditivo kg/m ³
100 CP	167.0	0	0	100.0	2001.2	0.2
50CP + 5C + 45CVT	83.5	8.4	75.2	100.0	1969.4	0.2
50CP + 10C + 40CVT	83.5	16.7	66.8	100.0	1969.9	0.2
60CP + 5C + 35CVT	100.2	8.4	58.5	100.0	1975.7	0.2
60CP + 10C + 30CVT	100.2	16.7	50.1	100.0	1976.2	0.2
60CP + 15C + 25CVT	100.2	25.1	41.8	100.0	1976.7	0.2
70CP + 5C + 25CVT	116.9	8.4	41.8	100.0	1981.9	0.2
70CP + 10C + 20CVT	116.9	16.7	33.4	100.0	1982.5	0.2

Con la relación A/Cem y el consumo de cementante se definieron las sustituciones con respecto al porcentaje de masa de las mezclas binarias con cemento - cal, y ternarias cemento-ceniza volante-cal.

Todos los bloques de concreto, se sometieron durante su fabricación, a un curado a vapor, y posteriormente mezclas de referencia (100 CP), binarias (95 CP + 5 C, 90 CP + 10 C, 85 CP + 15 C) y ternarias (60 CP + 5 C + 35 CV, 60 CP + 10 C + 30 CV, 70 CP + 5 C + 25 CV, 70 CP + 10 C + 20 CV, 70 CP + 15 C + 15 CV, 60 CP + 5 C + 35 CVT, 60 CP + 10 C + 30 CVT, 60 CP + 15 C + 25 CVT) fueron seleccionadas para

someterlos a un curado con CO_2 , con la finalidad de estudiar el comportamiento del bloque sometido a este proceso.

4.2.2. Bloques curados a vapor.

Los resultados correspondientes a esta condición de curado se muestran de forma tabulada en el anexo A, así mismo de forma grafica en las figuras de este capítulo.

4.2.2.1. Resistencia a la compresión.

Los resultados de resistencia a la compresión de bloques de concreto curados a vapor identificados como referencia y sistema binario cemento-cal se muestran en la en la **Figura 37**.

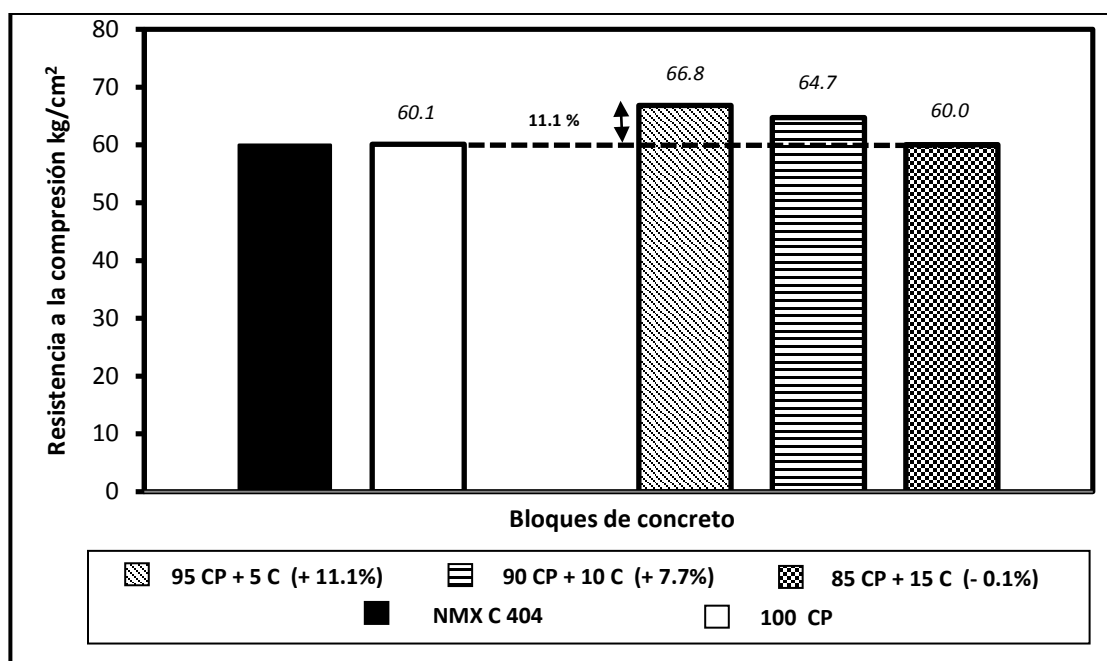


Figura 37. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.

Los resultados muestran que todas las mezclas obtuvieron valores de resistencias a la compresión ligeramente superiores a lo establecido en la norma NMX-C-404 (60 kg/cm²). La mezcla de referencia supera la resistencia mínima, con un esfuerzo de 60.1 kg/cm². Las mezclas binarias muestran una ganancia de resistencia de hasta 11.1% con respecto a la referencia (100 CP), tal es el caso de la mezcla compuesta por 95 CP + 5 C.

Cabe mencionar que durante la fabricación de estos bloques de concreto la trabajabilidad de la mezcla se mejoró con la adición de la cal, lo que se ve reflejado en los resultados mostrados, puesto que una mayor trabajabilidad, genera una vibrocompresión más eficiente de la mezcla, reduciendo oquedades y densificando la

pieza fabricada, lo que a su vez favorece a la resistencia mecánica y la absorción. Además, se mejora el desmoldeo de la pieza. Se debe considerar el aporte económico y el beneficio ambiental al disminuir el consumo de cemento portland para obtener la misma resistencia mecánica [37,38].

Finalmente, se puede observar cómo a medida que aumenta el consumo de cal en la mezcla, la resistencia a la compresión disminuye; esto se debe a la reducción en el consumo de cemento, que es responsable de la formación de los SCH, los cuales generan la resistencia mecánica. Si bien, como se mencionó anteriormente, la cal mejora la trabajabilidad de la mezcla, es importante considerar un consumo máximo de la misma, de acuerdo con los resultados que se obtengan.

Los resultados de la resistencia a la compresión de los bloques conformados por el sistema ternario cemento portland – cal – ceniza volante se muestran en la **Figura 38**. La sustitución de ceniza volante por cemento portland en el sistema cementante, fue con el propósito de aprovechar la reacción puzolánica entre la CV y la portlandita generada por el cemento portland y la cal adicionada, para formar SCH adicionales responsables de la resistencia mecánica.

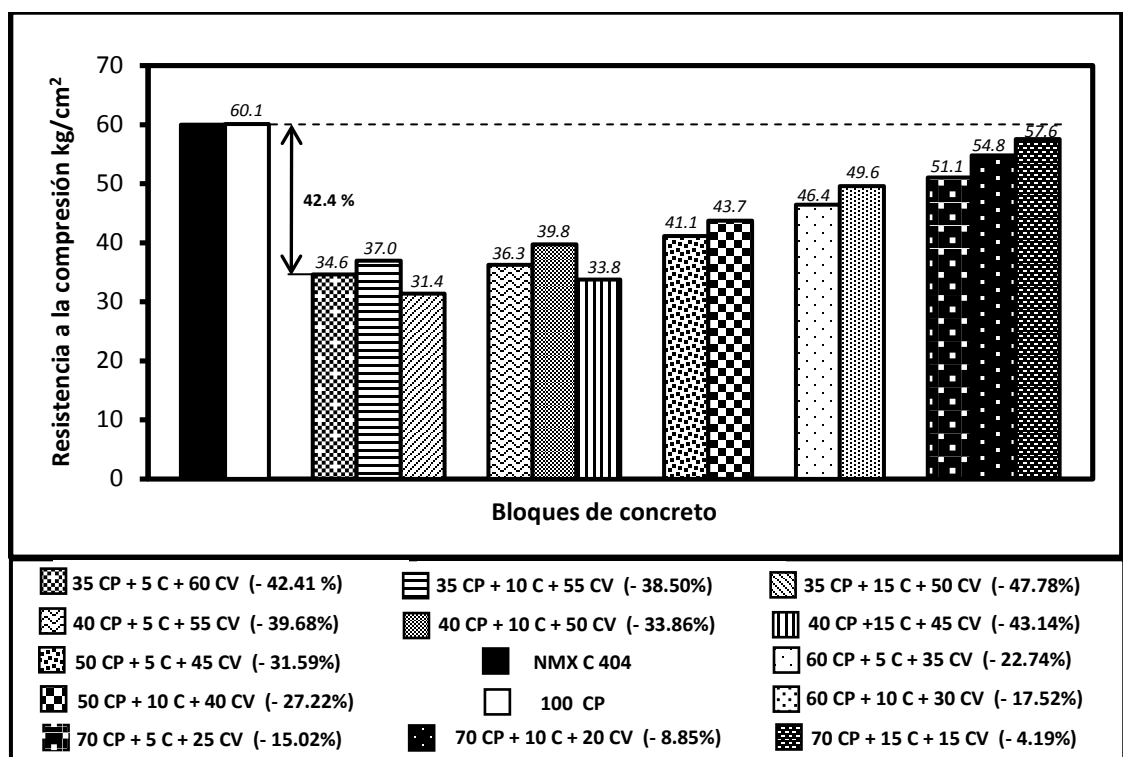


Figura 38. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C- CV, curados a vapor.

Como era de esperarse, los resultados de la resistencia a la compresión tuvieron una mejora con el incremento del consumo de cemento portland y la disminución de la cantidad de ceniza volante.

Se puede observar que para un proporcionamiento con 70% CP y una sustitución de 15% C y 15% CV se alcanza prácticamente la resistencia objetivo, con una diferencia del orden del 4%; es decir, con las características de los cementantes empleados se puede sustituir hasta un 30% del CP para alcanzar la resistencia especificada.

Se fabricaron bloques de concreto con ceniza volante tamizada, los resultados de resistencia a la compresión, se muestran en la **Figura 39**. De igual forma que las mezclas ternarias con ceniza volante integral, a medida que aumenta el consumo de cemento y disminuye la cantidad de ceniza volante, las resistencias a compresión mejoran.

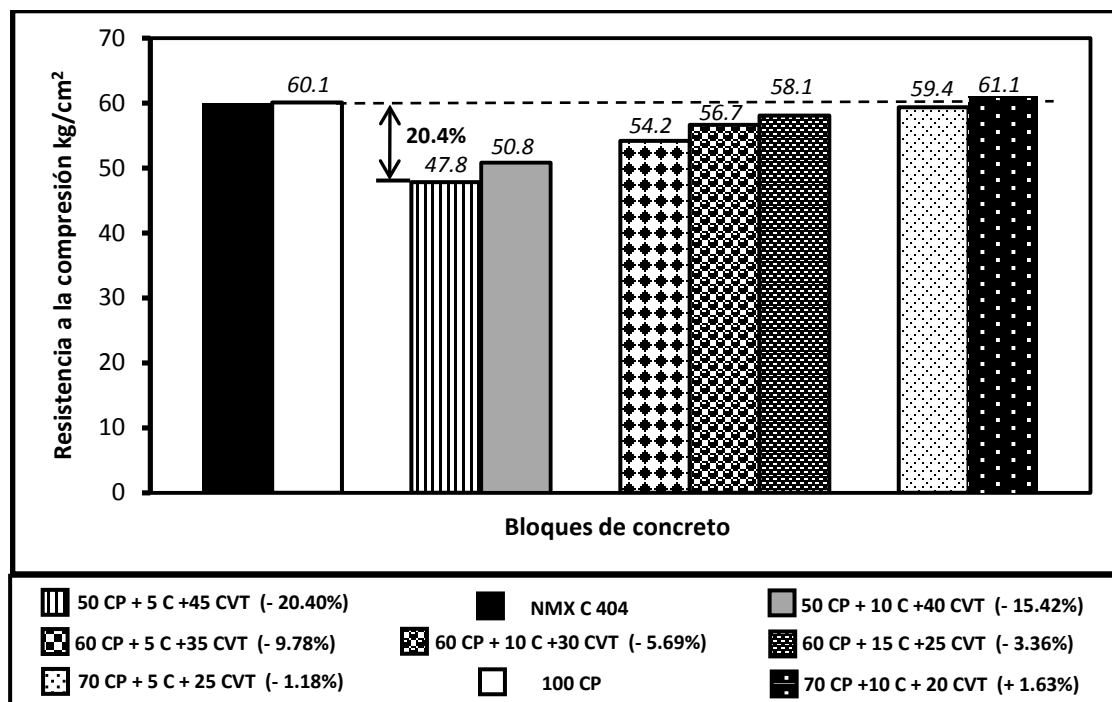


Figura 39. Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C- CVT, curados a vapor.

El tamizado, como era de esperarse, ayuda en la reactividad, al disminuir el tamaño de partícula y aumentar el área superficial. La mezcla con 70 CP + 10 C + 20 CVT desarrolló una resistencia a la compresión de 61.1 kg/cm², es decir 1.6% mayor con respecto a la referencia, cumpliendo de esta forma con lo especificado por la norma. Por lo tanto, es posible producir bloques de concreto que cumplen con las resistencias especificadas, sustituyendo hasta un 30% de CP por los cementantes empleados.

Comparando el resultado de la mezcla de 70 CP + 10 C + 20 CVT, con el obtenido al adicionar ceniza volante integral, cuyo valor es de 54.8 kg/cm², la mezcla con ceniza volante tamizada registra una resistencia a la compresión mayor, producto de una mejor reactividad puzolánica o posiblemente a un efecto filler. Los resultados de

las mezclas con las mismas dosificaciones, pero diferente ceniza volante, muestran una mejora en las resistencias a compresión del orden de 5 a 8 kg/cm² con el uso de CVT.

Considerando el uso de la cal en los sistemas ternarios, los resultados muestran que a medida que el consumo de ceniza volante disminuye, manteniendo constante el CP, las resistencias a la compresión mejoran. Para que el hidróxido de calcio reaccione con la ceniza volante, es importante dosificarlo adecuadamente y que la ceniza volante presente reactividad, lo anterior ayudará a desarrollar mejores resistencias mecánicas.

4.2.2.2. Absorción.

La **Figura 40** muestra los resultados de absorción de las mezclas de referencia y binarias.

Con base en la Norma NMX C 404, la absorción máxima permisible para bloques de concreto de uso estructural, deberá ser menor al 12%. Se puede observar en los resultados, cómo todas las mezclas cumplen lo señalado en la norma, con absorciones por debajo del 6.5%.

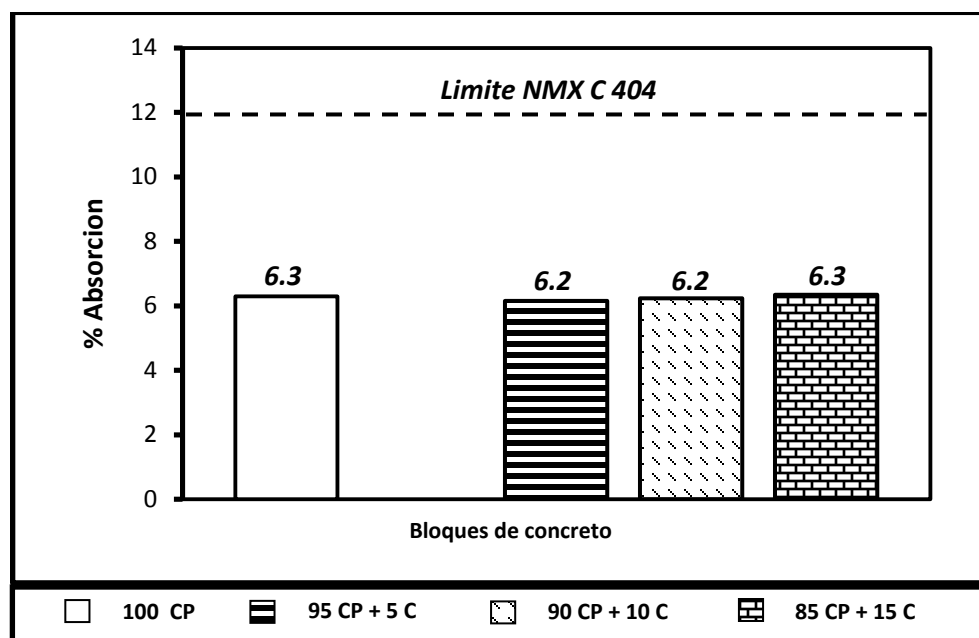


Figura 40. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.

Los beneficios de la cal en la mezcla se mencionaron en 4.2.2.1. Una mejora en la trabajabilidad y eficiencia de la vibrocompresión, trae consigo una disminución de oquedades, lo que a su vez genera una menor absorción de los bloques de concreto. El incremento de los productos de hidratación por la reacción puzolánica reducen la absorción, estos contribuyen para densificar el bloque de concreto. Una disminución en

el consumo de cemento, reduce la formación de SCH. Sin embargo estos beneficios no son perceptibles en los resultados, puesto que los valores de las mezclas son muy similares, esto puede atribuirse a la estructura porosa de los bloques.

Los resultados de absorción en mezclas ternarias se muestran en la **Figura 41**. Todas las mezclas cuentan con valores por debajo del límite establecido en la norma.

Al aumentar el consumo de cemento y disminuir la cantidad de ceniza volante, se mejora la absorción ligeramente. Esta tendencia es similar a la generada en los resultados de resistencia a la compresión. Los productos de hidratación densifican la matriz cementante y con ello se reduce la absorción, se observa que mezclas con un mayor consumo de cemento y adecuadas cantidades de ceniza volante y cal, generan SCH propios del cemento y los producidos adicionalmente por la reacción puzolánica.

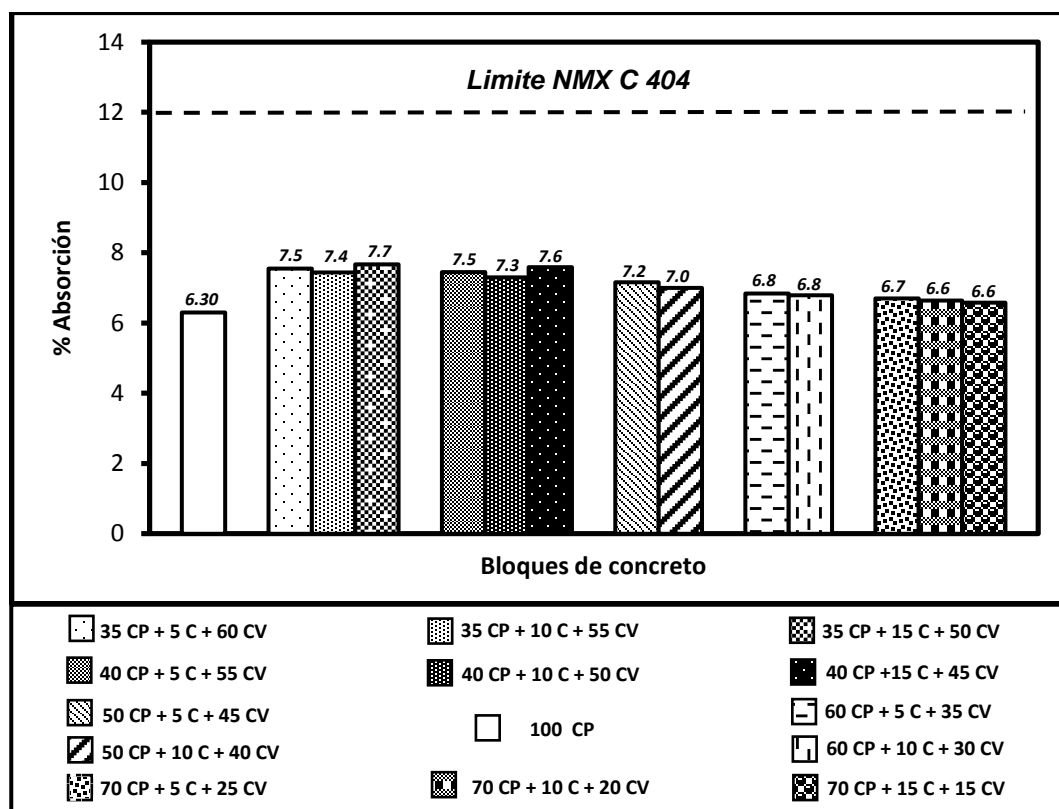


Figura 41. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C - CV, curados a vapor.

La absorciones se mejoran ligeramente en las mezclas ternarias utilizando ceniza volante tamizada, los resultados se muestran en la **Figura 42**.

En los resultados se observan absorciones muy similares a las generadas en los sistemas binarios y referencia. Comparando resultados de mezclas con las mismas dosificaciones, pero con el uso de diferente tipo de ceniza volante, las absorciones se mejoran ligeramente con el uso de ceniza volante tamizada. La diferencia de resultados entre cada sistema cementante no es muy notoria, sin embargo todas las

mezclas cumplen el límite especificado en la norma. La contribución del tamaño de partícula en la mejora de la reactividad de la ceniza volante, gracias al tamizado, en comparación a la resistencia a la compresión, no tuvo un efecto tan pronunciado en la absorción.

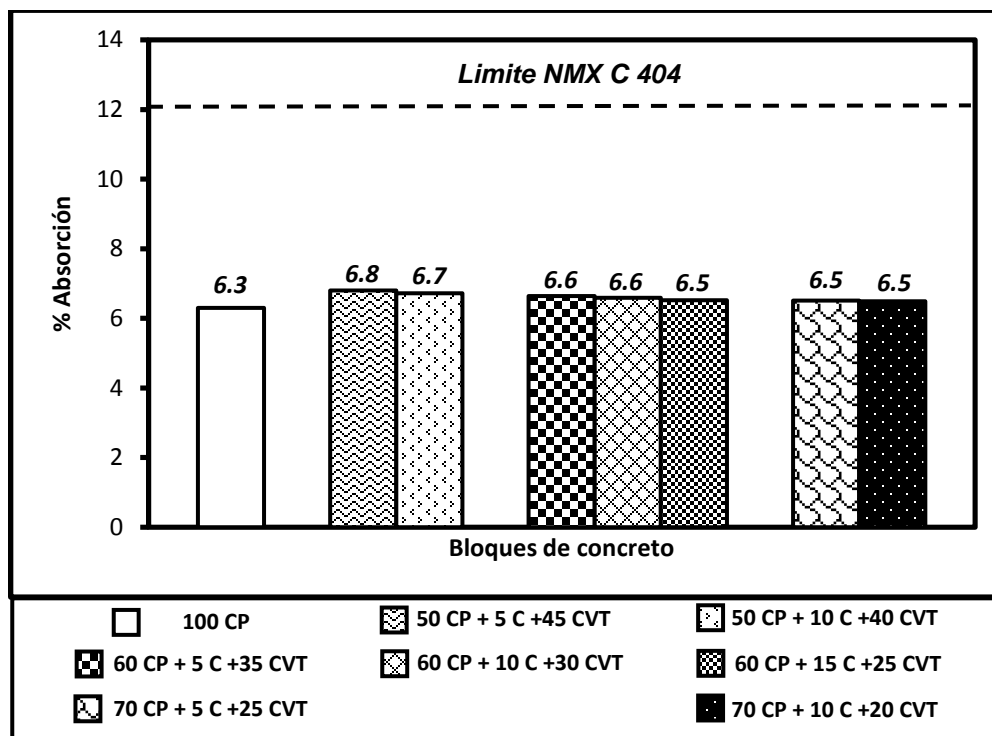


Figura 42. Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C - CVT, curados a vapor.

4.2.3. Bloques carbonatados.

Los resultados correspondientes a esta condición de curado se muestran de forma tabulada en el anexo A, así mismo de forma gráfica en las figuras de este capítulo.

4.2.3.1. Resistencia a la compresión.

Los resultados de resistencia a la compresión en bloques de concreto fabricados con mezclas binarias CP + C y referencia, sometidos a un curado con CO₂, se muestran en la **Figura 43**.

El empleo de un curado con CO₂ en los bloques de concreto es con la finalidad de estudiar el efecto en la resistencia a la compresión y la absorción. Lo anterior como opción de reutilización de los gases de descarbonatación y combustión emitidos en las plantas productoras de cemento y cal.

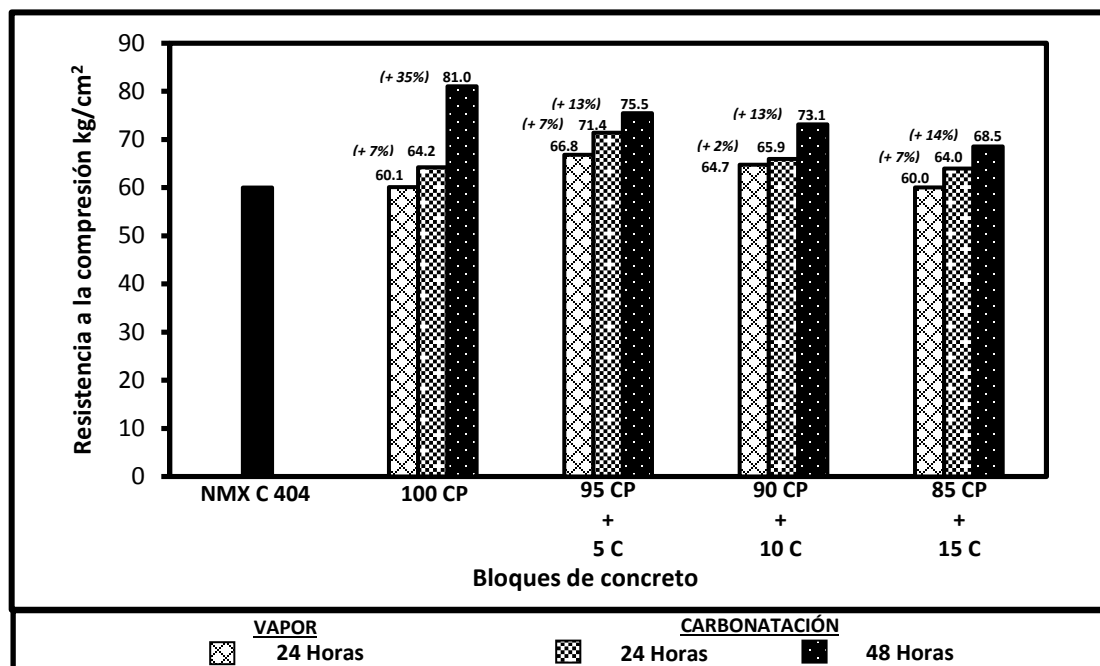


Figura 43. Resistencia a la compresión en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados a vapor y con CO₂.

Como se puede observar en la **Figura 43**, los resultados de resistencias a la compresión en los sistemas de referencia y binarios, cumplen lo especificado en la norma, empleando ambos tipos de curado (con vapor de agua y CO₂).

Comparando el efecto del curado con CO₂, en la mezcla de referencia se tiene un incremento de hasta 7% en su resistencia a la compresión, durante un periodo de curado por 24 horas con CO₂, lo anterior con respecto al curado con vapor. Así mismo, se tiene un incremento del 35% de la resistencia con un periodo de carbonatación de 48 horas. Con lo anterior, se confirma que existe una cantidad de portlandita que reacciona con el CO₂ para formar carbonatos de calcio. Esto densifica el bloque de concreto, aumentando su resistencia mecánica.

El curado con CO₂ en los sistemas binarios CP + C, presenta de forma similar al sistema de referencia, una mejora en sus resistencias a la compresión. El efecto del curado con CO₂, mejora las resistencias hasta en un 14% con respecto al curado estándar. Por lo anterior, es posible fabricar bloques de concreto que cumplen lo señalado en la norma, reduciendo el consumo de cemento al sustituir parte de la mezcla por cal de construcción y efectuar un curado con CO₂, que permita mejorar las resistencias mecánicas, así como el inclusión de CO₂ en la matriz cementante, por la formación de carbonatos de calcio en el proceso de carbonatación

Una dosificación adecuada de cal (hidróxido de calcio), en combinación con un eficiente curado con CO₂, permite obtener resultados como los anteriores, que

muestren el beneficio del curado con CO₂, al densificar los bloques de concreto gracias a la formación de carbonatos de calcio.

Los resultados del sistema ternario conformado por CP + C + CV se muestran en la **Figura 44**. En forma similar a lo generado con un curado a vapor, la tendencia indica que a medida que el consumo de cemento aumenta y la cantidad de ceniza volante disminuye, se mejoran las resistencias a compresión. El efecto del curado con CO₂ en este tipo de sistema cementante es mínimo. Sin embargo, el uso de un curado prolongado con CO₂, ayuda en la generación de resistencias a compresión, que permitan cumplir la normativa. La disponibilidad del hidróxido de calcio es importante en este sistema cementante, ya que bajo estas condiciones se mejora la reactividad puzolánica, y posteriormente puede reaccionar con el CO₂ durante el proceso de carbonatación para formar carbonatos.

El uso de la ceniza volante tamizada en el sistema ternario empleando un curado con CO₂, mejora la reactividad de la mezcla, este efecto se muestra en los resultados de la **Figura 44**. El incremento se manifiesta al comparar ambas cenizas volantes, la ceniza volante sin tamizar presenta mejoras en la resistencia a la compresión, con respecto al curado a vapor desde 0.5% hasta un 2.5%, mientras que el uso de ceniza volante tamizada permite ganancias de resistencias del orden de 2.3 a 6.3%. El beneficio de un curado adicional con CO₂, permite que mezclas que únicamente fueron curadas en un sistema estándar (vapor) y no obtuvieran la resistencia especificada, puedan obtener valores superiores a esta.

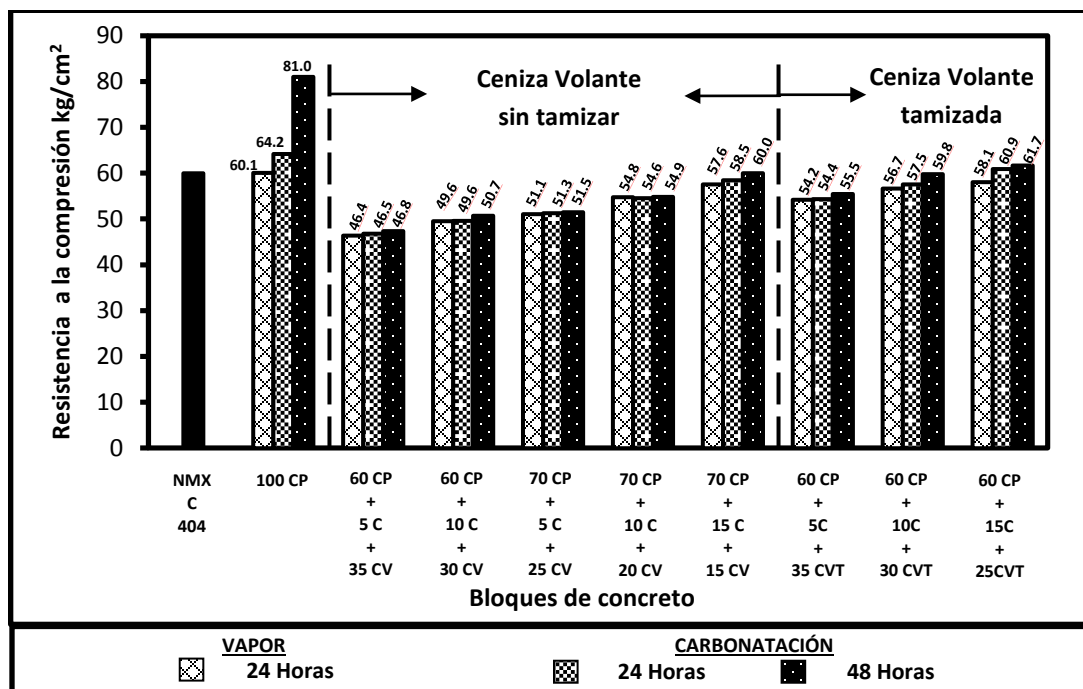


Figura 44. Resistencia a la compresión en bloques de sistema ternario CP + C + CV y CP + C + CVT, curados a vapor y con CO₂.

Con los resultados anteriores, es posible fabricar bloques de concreto con una reducción en el consumo de cemento portland del orden del 40%, empleando un curado con CO_2 para obtener las resistencias a la compresión especificadas. Esto ayuda en el aporte económico y ambiental, al disminuir el consumo de cemento, uso de subproductos industriales y empleo de un curado como medio de fijación de CO_2 .

4.2.3.2. Absorción.

Los resultados de absorción de cada una de las mezclas de referencia y binarias sometidas a un curado con CO_2 , se muestran en la **Figura 45**.

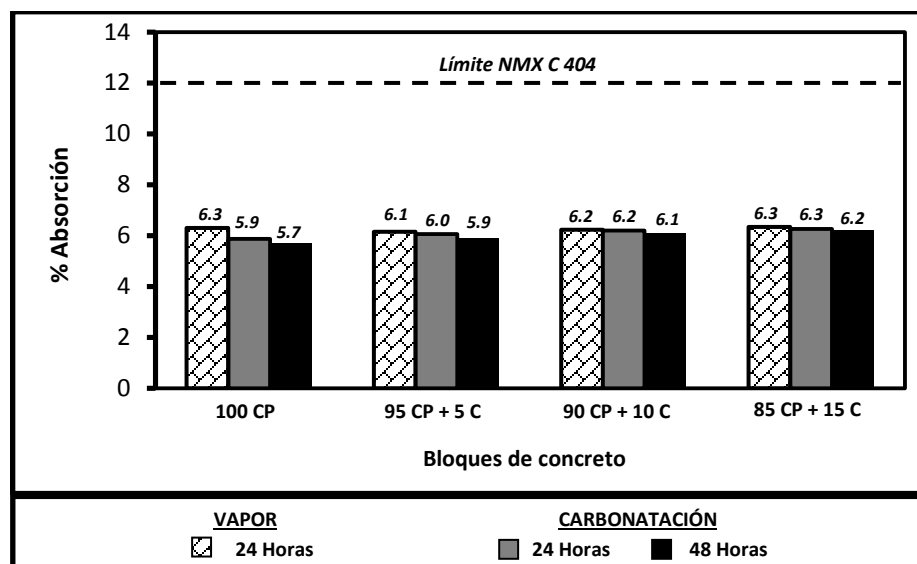


Figura 45. Absorción en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados a vapor y con CO_2 .

Las absorciones de cada una de las mezclas cumplen las especificaciones de la normativa. Los valores obtenidos se encuentran por debajo del 6.5%. El efecto del curado con CO_2 en esta propiedad, es mínimo, la diferencia entre cada mezcla es menor al 0.5%. Además, se puede observar, cómo con periodo de curado con CO_2 mayor, la absorción tiende a disminuir. El beneficio del curado con CO_2 en la resistencia a la compresión y absorción, nos indica un efecto densificador en los bloques de concreto al producirse CaCO_3 y por productos de hidratación.

Todas las mezclas mostradas en la **Figura 46**, que corresponden a la referencia y el sistema ternario CP + C + CV y CP + C + CVT, presentan absorciones inferiores al 7%, cumpliendo el límite máximo del 12% especificado en la norma.

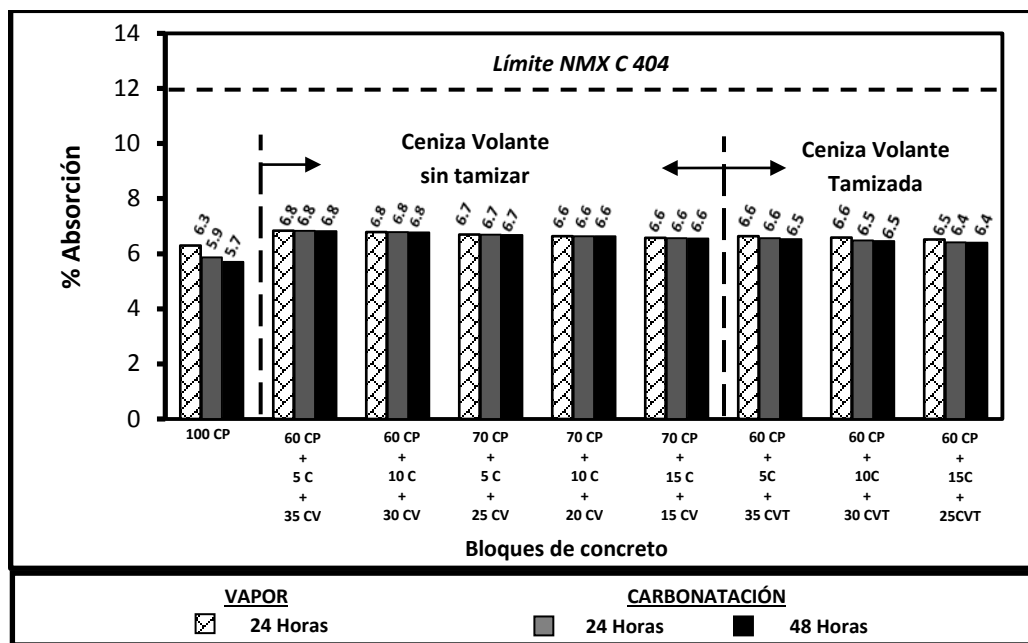


Figura 46. Absorción en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CV y CP + C + CVT, curados a vapor y con CO₂.

En los resultados del sistema ternario, se observan valores similares entre las mezclas con ceniza volante sin tamizar y ceniza volante tamizada. El efecto del tamizado en esta propiedad, a diferencia de las resistencias a la compresión, es ligeramente mejor. El uso de un curado con CO₂, al igual que los sistemas de referencia y binarios, tiene un efecto mínimo en las absorciones.

4.2.3. Incremento de peso en los bloques sometidos a carbonatación.

Como se mencionó en el capítulo anterior, otro medio para evaluar el proceso de carbonatación, se llevó a cabo, midiendo la ganancia de peso aproximado en las piezas elaboradas. Los resultados se muestran en las Tablas 17 a la 20.

Tabla 17. Incremento de peso en los bloques de concreto de referencia, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.

Referencia 100 CP						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13222	13527	13374	152	151.8
2		13405	13701	13546	141	
3		13134	13408	13292	158	
4		13096	13363	13252	156	
1	48 horas	13340	13654	13555	215	212.0
2		13412	13752	13618	206	
3		13540	13851	13754	214	
4		13138	13447	13351	213	

Nota. Los pesos se expresan en gramos.

Tabla 18. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema binario CP – C, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.

95 CP + 5 C						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13183	13463	13347	164	174.5
2		13251	13529	13432	181	
3		13385	13661	13563	178	
4		13294	13566	13469	175	
1	48 horas	13276	13612	13463	187	184.3
2		13147	13505	13327	180	
3		13157	13505	13345	188	
4		13048	13361	13230	182	
90 CP + 10 C						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13271	13580	13433	162	158.3
2		13222	13513	13384	162	
3		13110	13430	13264	154	
4		13220	13553	13375	155	
1	48 horas	13308	13690	13486	178	176.3
2		13164	13537	13334	170	
3		13173	13514	13359	186	
4		13247	13652	13418	171	
85 CP + 15 C						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13134	13449	13280	146	149.5
2		13126	13430	13277	151	
3		13276	13582	13433	157	
4		13224	13478	13368	144	
1	48 horas	13199	13545	13352	153	163.5
2		13089	13423	13256	167	
3		13263	13545	13427	164	
4		13159	13530	13329	170	

Nota. Los pesos se expresan en gramos.

Tabla 19. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema ternario CP – C - CV, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.

60 CP + 5 C + 35 CV						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13224	13434	13265	41	48.3
2		13212	13400	13267	55	
3		13180	13400	13224	44	
4		13073	13256	13126	53	
1	48 horas	13034	13213	13077	43	49.0
2		13166	13403	13214	48	
3		13128	13227	13181	53	
4		13237	13449	13289	52	
60 CP + 10 C + 30 CV						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	12949	13100	13003	54	52.8
2		13048	13202	13101	53	
3		13191	13400	13245	54	
4		13100	13313	13150	50	
1	48 horas	13043	13277	13096	53	54.0
2		13229	13476	13279	50	
3		13131	13381	13187	56	
4		13291	13491	13348	57	
70 CP + 5 C + 25 CV						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13102	13326	13177	75	69.5
2		13146	13361	13209	63	
3		13164	13390	13229	65	
4		13010	13263	13085	75	
1	48 horas	13151	13435	13219	68	70.0
2		13033	13262	13107	74	
3		13385	13613	13455	70	
4		13218	13499	13286	68	
70 CP + 10 C + 20 CV						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13304	13548	13388	84	81.3
2		13177	13441	13256	79	
3		13224	13451	13299	75	
4		13351	13588	13438	87	
1	48 horas	13372	13561	13457	85	82.0
2		13272	13577	13358	86	
3		13213	13521	13293	80	
4		13005	13189	13082	77	

Nota. Los pesos se expresan en gramos

Tabla 20. Incremento de peso en los bloques de concreto de sistema ternario CP – C – CVT, sometidos a carbonatación durante 24 y 48 horas.

60 CP + 5 C + 35 CVT						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13345	13529	13416	71	71.8
2		13410	13604	13477	67	
3		13330	13474	13402	72	
4		13213	13370	13290	77	
1	48 horas	13108	13318	13186	78	74.3
2		13183	13384	13249	66	
3		13233	13468	13310	77	
4		13487	13699	13563	76	
60 CP + 10 C + 30 CVT						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13246	13444	13334	88	85.5
2		13398	13597	13480	82	
3		13176	13373	13260	84	
4		13153	13342	13241	88	
1	48 horas	13089	13331	13177	88	90.3
2		13204	13454	13301	97	
3		13219	13454	13308	89	
4		13184	13420	13271	87	
60 CP + 15 C + 25 CVT						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13246	13562	13346	100	104.5
2		13398	13581	13503	105	
3		13176	13395	13283	107	
4		13153	13406	13259	106	
1	48 horas	13089	13245	13196	107	112.8
2		13204	13458	13324	120	
3		13219	13477	13332	113	
4		13184	13352	13295	111	
70 CP + 15 C + 15 CVT						
Bloque	Periodo de curado	Antes de carbonatación	Después de carbonatación		Incremento Peso	Incremento peso promedio
		Peso Seco	Peso húmedo	Peso Seco		
1	24 horas	13253	13496	13362	109	103.0
2		13389	13639	13486	97	
3		13359	13610	13472	113	
4		13442	13653	13535	93	
1	48 horas	13419	13707	13536	117	114.8
2		13386	13665	13489	103	
3		13438	13728	13552	114	
4		13346	13619	13471	125	

Nota. Los pesos se expresan en gramos

En la **Figura 47** se presenta una representación gráfica de los resultados, donde se puede observar un incremento de peso superior en las mezclas de referencia y sistemas binarios CP + C, en comparación a los sistemas ternarios CP + C + CV y CP + C + CVT.

La tendencia mostrada en los resultados de la Figura 50, es muy similar a la que se presenta en los resultados de resistencia a la compresión. En el caso de la mezcla de referencia, se obtuvo una resistencia a la compresión de 81 kg/cm² y un incremento de peso de hasta 212 g. Estos valores, pudiesen deberse a la reacción de la portlandita con el CO₂, para formar carbonatos de calcio, mejorando la resistencia a la compresión e incrementando el peso del bloque de concreto.

A medida que se incrementa el periodo de curado, el cemento sigue hidratándose, lo que puede llegar a generar una cantidad mayor de hidróxido de calcio para reaccionar con el CO₂. Este análisis pudiese relacionarse con el efecto producido en los resultados de la mezcla de referencia.

En los bloques de concreto con mezclas binarias, se observa un incremento de peso menor a medida que aumenta el contenido de cal en la mezcla. Sin embargo, conforme el periodo de curado es mayor, en cada mezcla, se observa un incremento en el peso de los bloques de concreto. Con lo anterior, se puede suponer, que a medida que aumente el contenido de cal en la mezcla, es necesario prolongar el periodo de curado para incrementar el peso de los bloques de concreto por efecto de la formación de carbonatos de calcio.

En los resultados de las mezclas ternarias, podemos observar como el incremento de peso es menor, esto puede atribuirse a la reacción puzolánica llevada a cabo entre la CV y el hidróxido de calcio, es decir, con la reacción anterior, se disminuye la cantidad de productos por carbonatar (reducción del hidróxido de calcio disponible)..

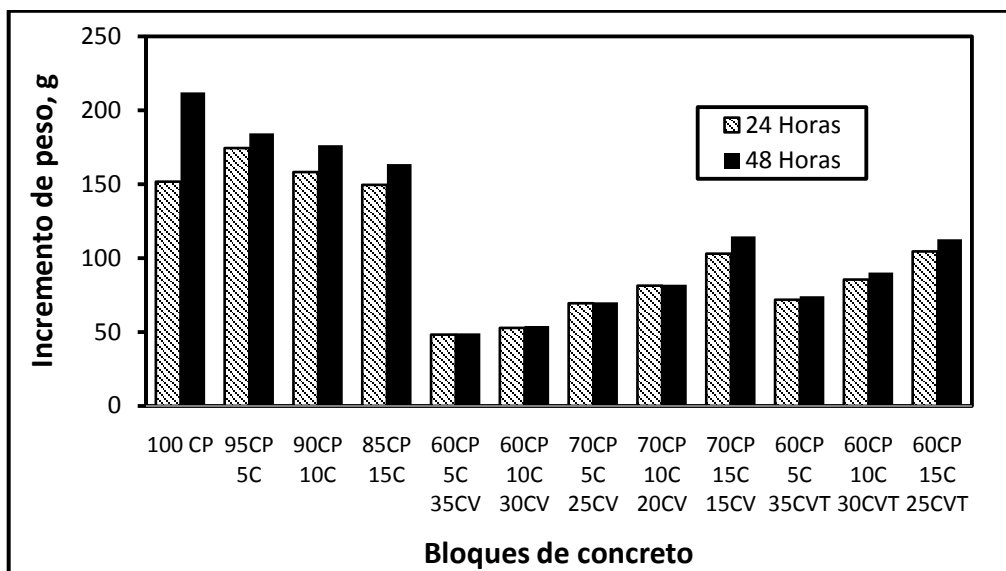


Figura 47. Incremento de peso en bloques sometidos a carbonatación.

4.2.4. Inspección visual de los bloques de concreto en condiciones ambientales.

Para este estudio como se menciona en el capítulo 3, se fabricaron bloques de concreto expuestos a condiciones ambientales. El registro fotográfico se muestra en el anexo B.

La primera inspección visual se orientó hacia las tonalidades de los bloques de concreto, compuestos de diferentes materiales cementantes. Los bloques elaborados con mezclas binarias, presentaron una coloración más clara, en comparación a los que contenían 100 CP y CV. La ceniza volante, presenta una coloración oscura, puesto que contiene partículas de carbón, que le dan esta tonalidad. Por lo anterior, bloques elaborados con mezclas ternarias, presentaron una coloración oscura.

Posteriormente, la siguiente evaluación fue con el objetivo de visualizar la formación de eflorescencias, producto del proceso de lixiviación ambiental. En los tres primeros meses (enero, febrero y marzo) de exposición, la condición ambiental fue de lluvias intermitentes y con humedades relativas en promedio superiores al 80%, además, se presentaron algunos días con temperaturas inferiores a los 10 °C. Los meses de abril y mayo tuvieron temperaturas de los 25° a 32 °C y condiciones ambientales secas con HR menores a 60%.

Los últimos meses de junio a septiembre, se han caracterizado por condiciones ambientales con temperaturas de hasta 40 °C y ligera presencia de lluvias.

Bajo estas condiciones ambientales, los bloques de concreto no presentaron eflorescencias a causa de la lixiviación en ninguno de los sistemas cementantes en estudio.

4.2.5. Análisis termogravimétricos y térmicos diferenciales en la determinación de Ca(OH)_2 y CaCO_3 de las pastas cementantes.

Analizando las curvas TGA-DTA es posible determinar de forma cualitativa y cuantitativa, el contenido de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y carbonatos de calcio (CaCO_3) en pastas cementantes.

La finalidad por la cual se determinan estos compuestos, es analizar detalladamente el proceso de carbonatación, en base a la formación de carbonatos de calcio y consumo de hidróxido de calcio. Así mismo, con el análisis anterior, calcular la cantidad la cantidad del CO_2 que reacciona en el sistema cementante (fijación de CO_2). Es importante mencionar que el contenido de carbonatos de calcio derivado de las curvas TGA-DTA, en el presente estudio, se tomó únicamente proveniente de la carbonatación del hidróxido de calcio, así mismo se descartan otras fases presentes en los intervalos de temperatura donde se obtuvieron los compuestos anteriores

En las **Figuras** de la **48** a la **61**, se muestran las curvas TGA-DTA de cada una de las pastas en estudio, las cuales fueron curadas inicialmente por 24 horas con vapor

de agua a 60 °C, y posteriormente sometidas a un proceso de carbonatación acelerada por 24 horas.

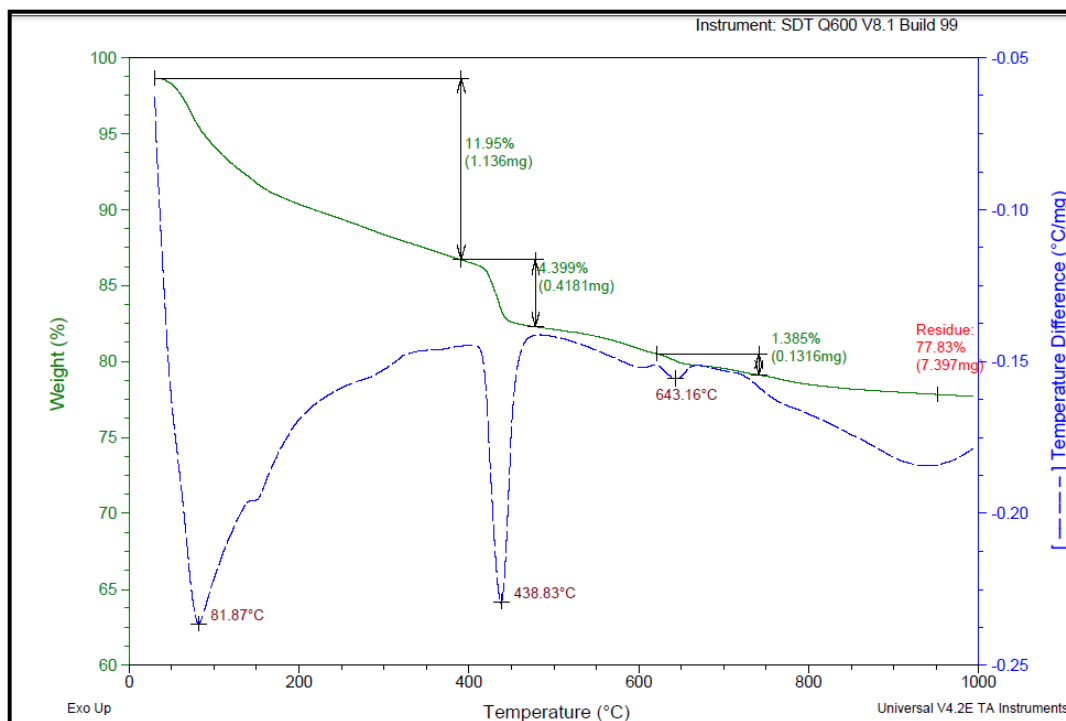


Figura 48. Curvas TGA-DTA de pastas con 100 CP, curadas con vapor de agua.

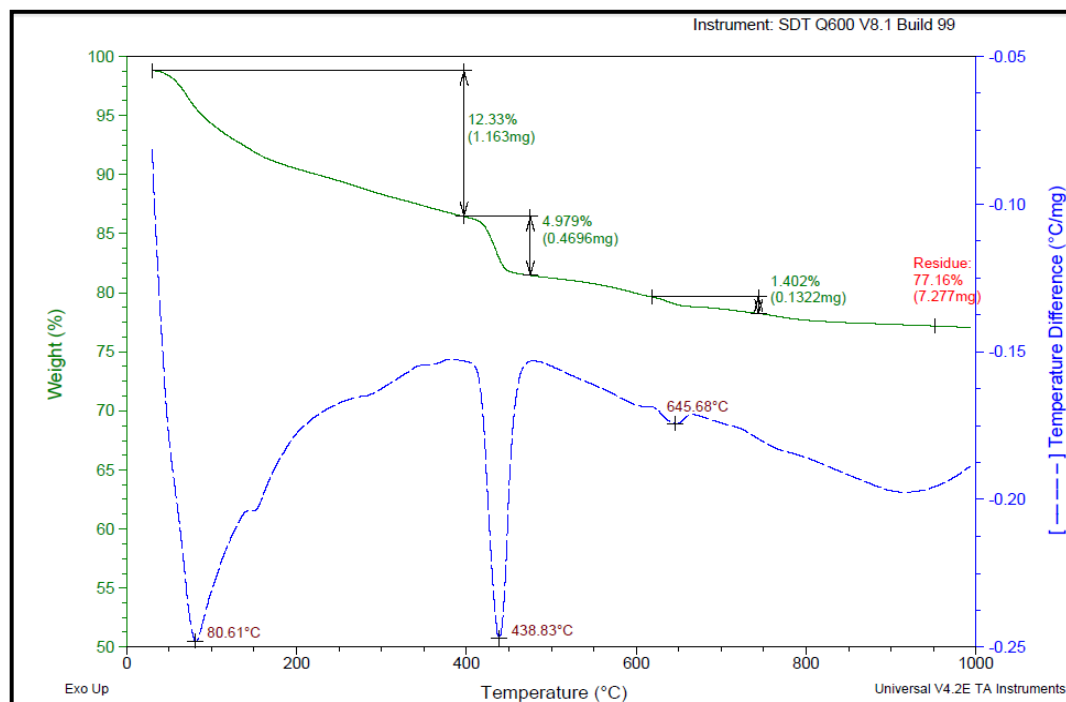


Figura 49. Curvas TGA-DTA de pastas con 95 CP + 5 C, curadas con vapor de agua.

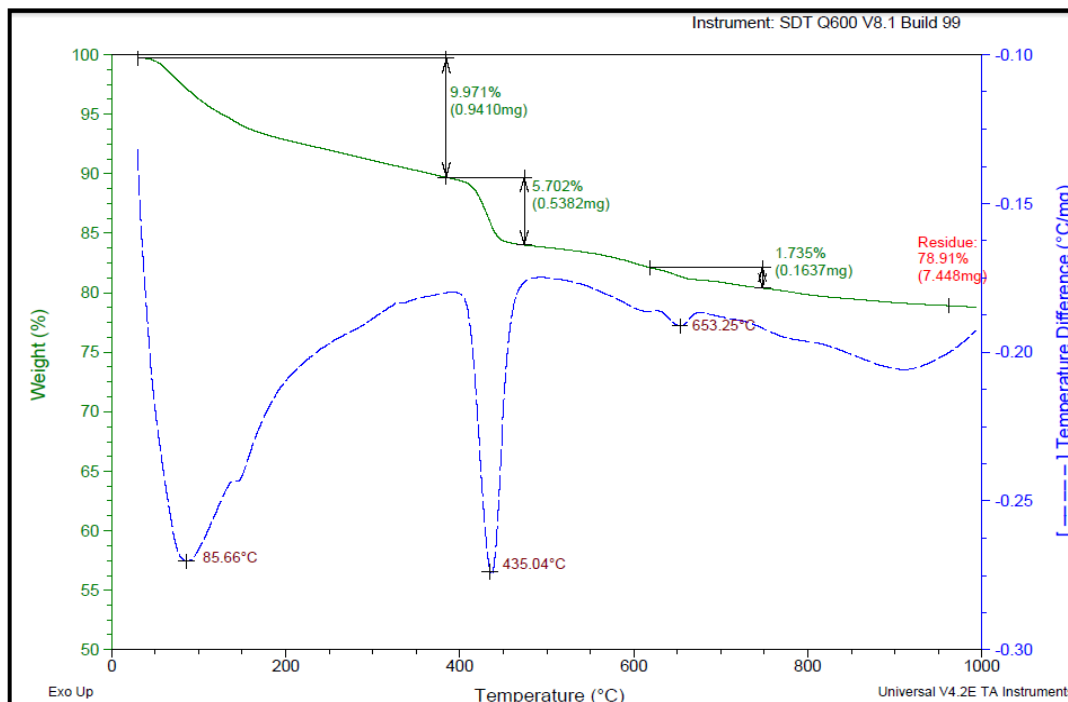


Figura 50. Curvas TGA-DTA de pastas con 90 CP + 10 C, curadas con vapor de agua.

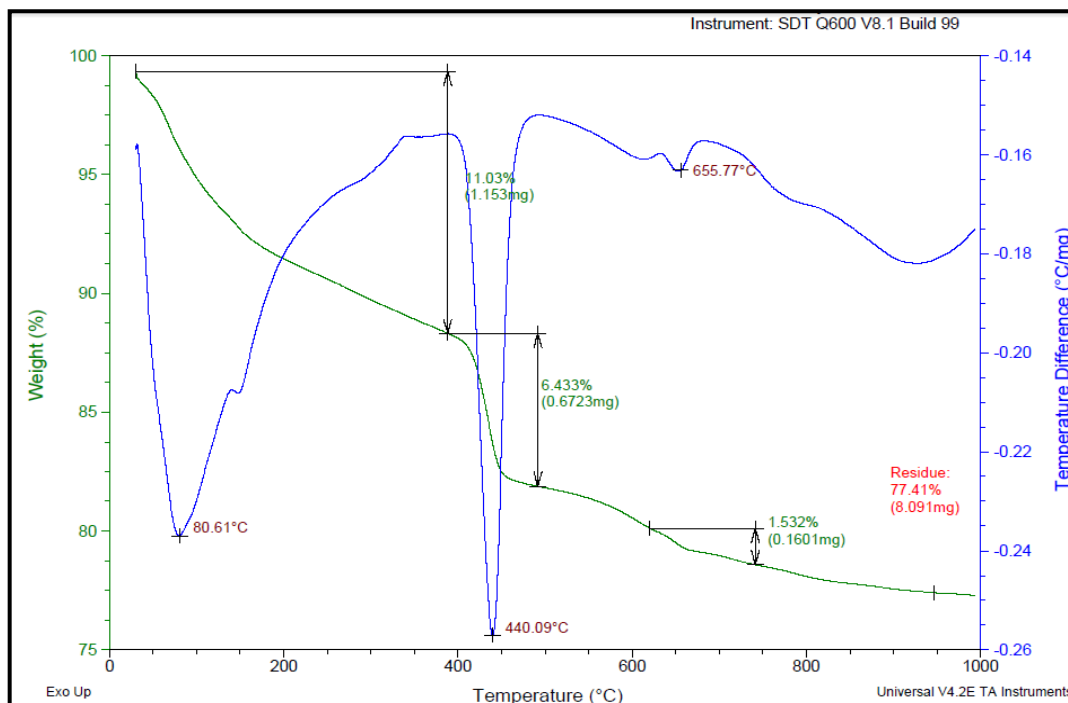


Figura 51. Curvas TGA-DTA de pastas con 85 CP + 15 C, curadas con vapor de agua.

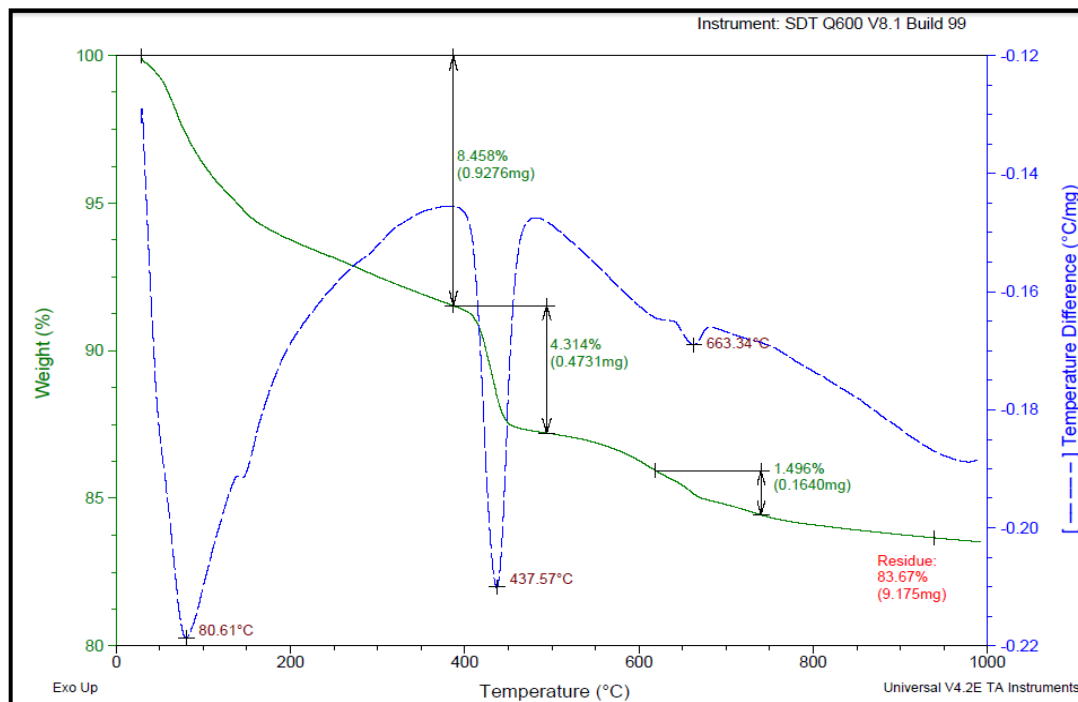


Figura 52. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30CV, curadas con vapor de agua.

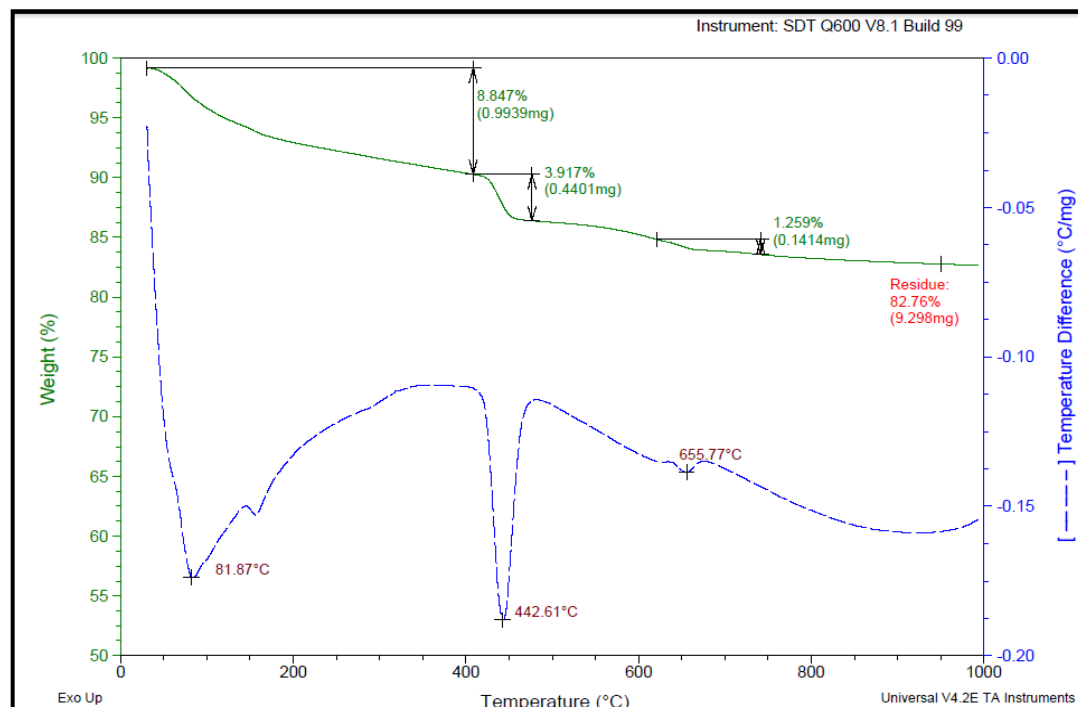


Figura 53. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30CVT, curadas con vapor de agua.

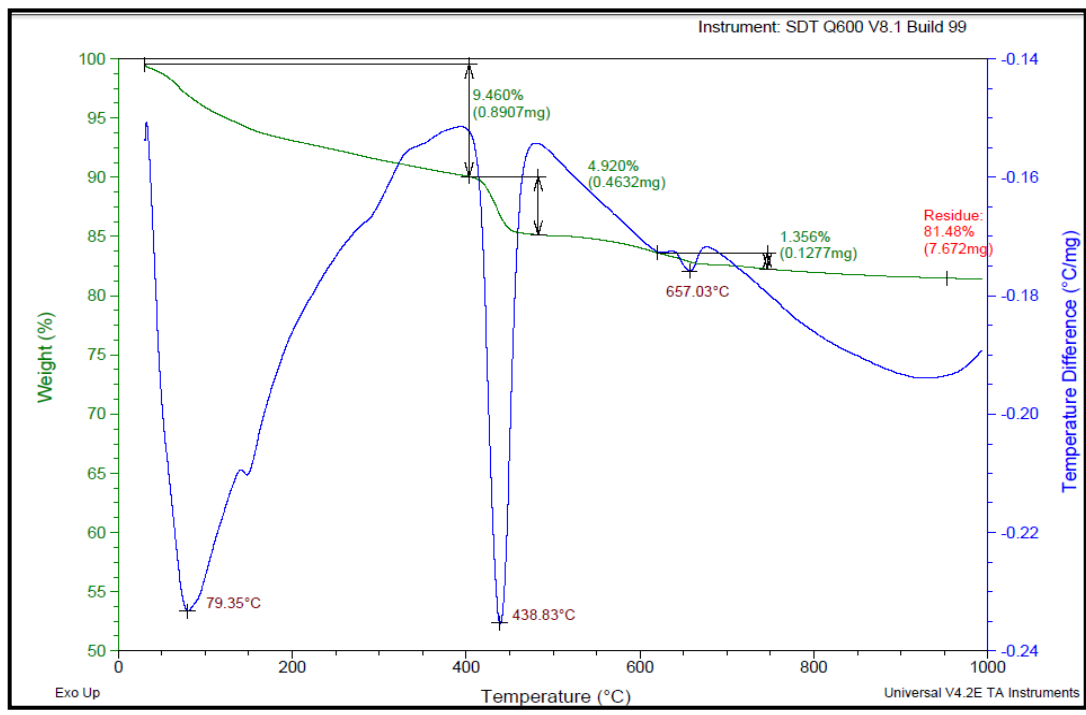


Figura 54. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 15 C + 25 CVT, curadas con vapor de agua.

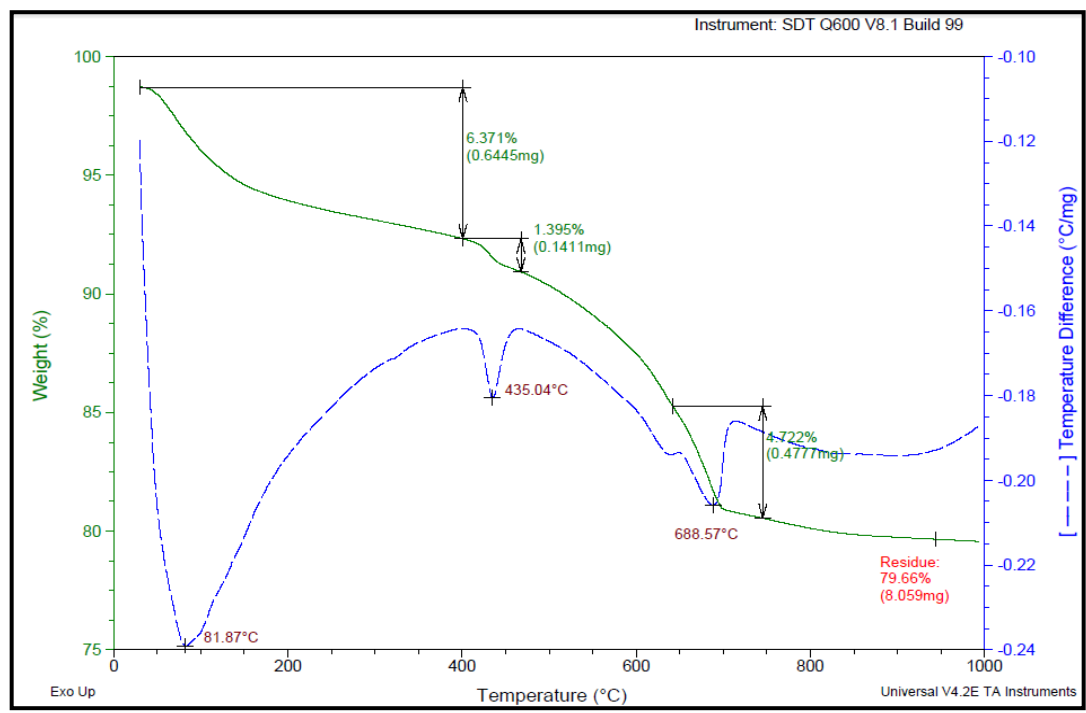


Figura 55. Curvas TGA-DTA de pastas con 100 CP, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

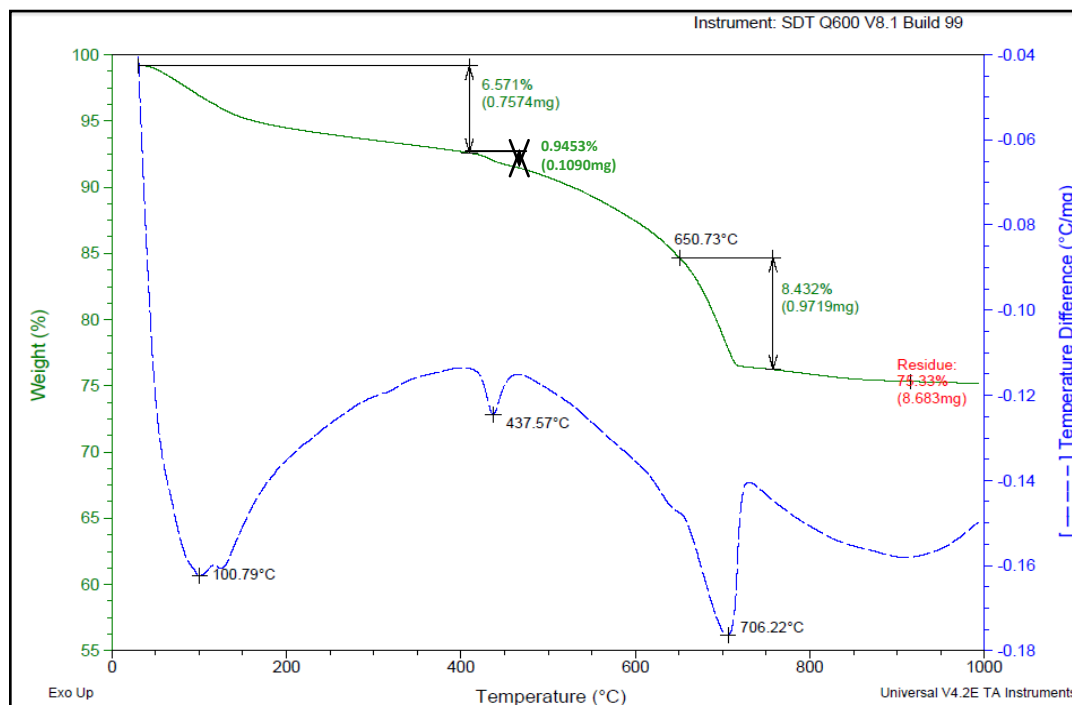


Figura 56. Curvas TGA-DTA de pastas con 95 CP + 5 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

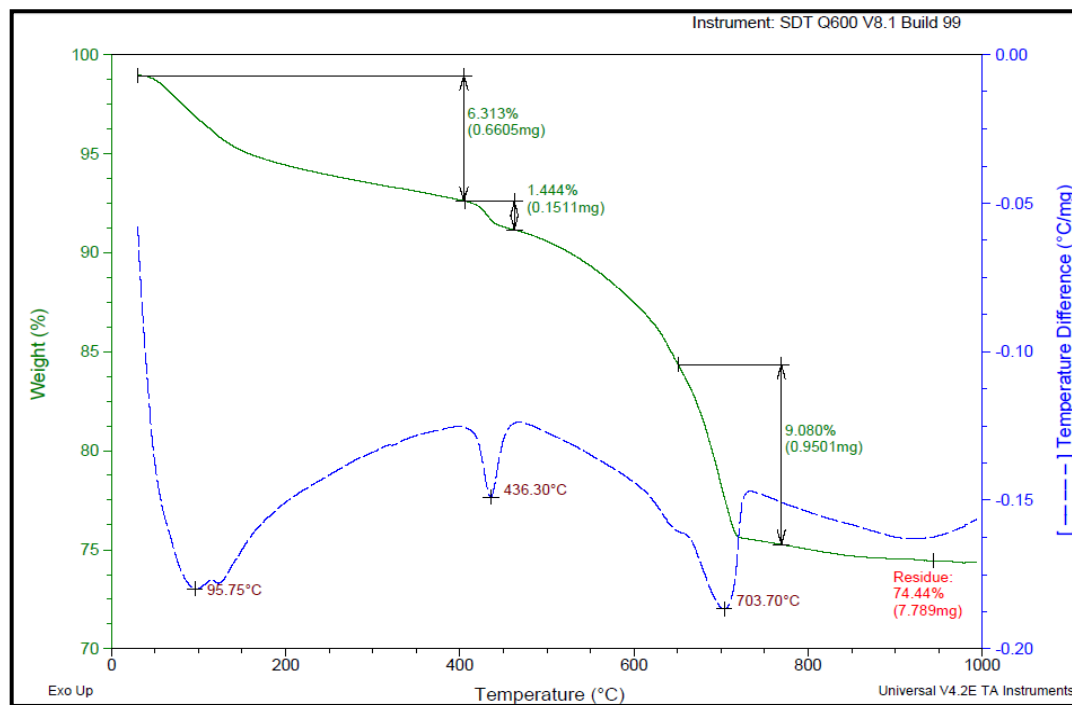


Figura 57. Curvas TGA-DTA de pastas con 90 CP + 10 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

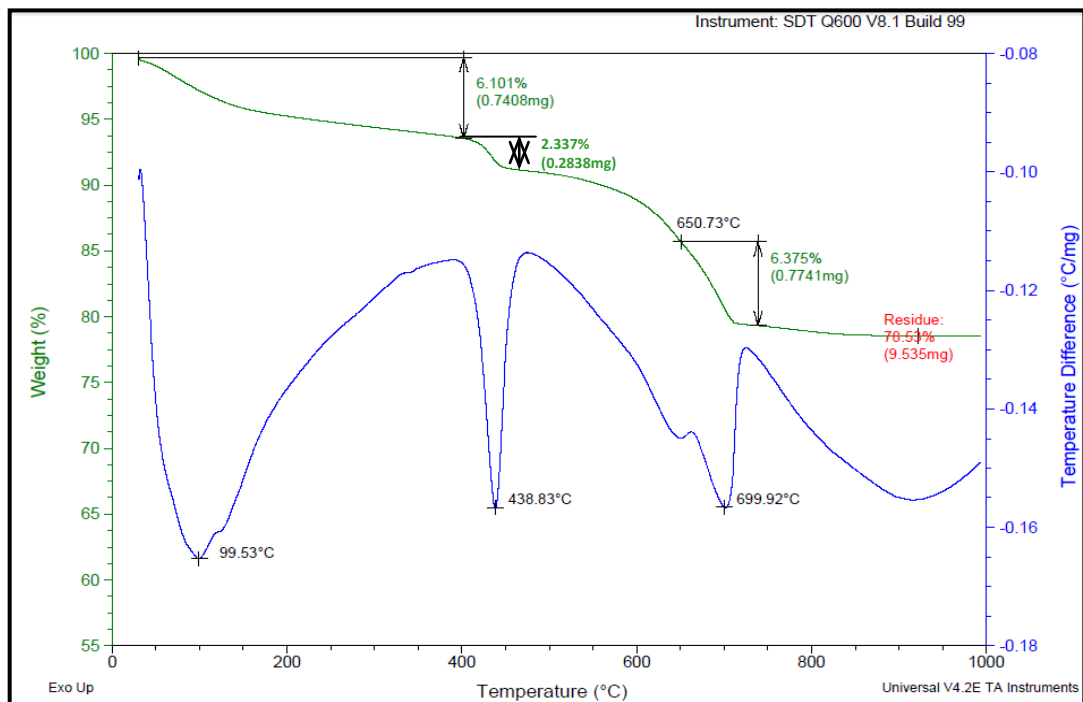


Figura 58. Curvas TGA-DTA de pastas con 85 CP + 15 C, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

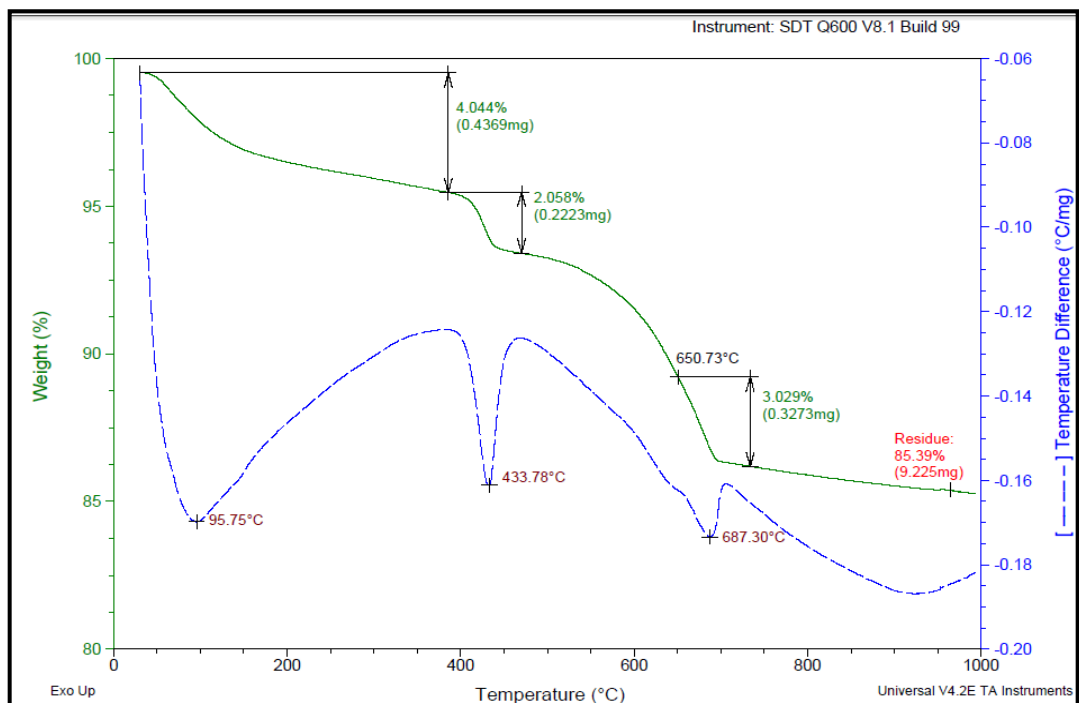


Figura 59. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30 CV, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

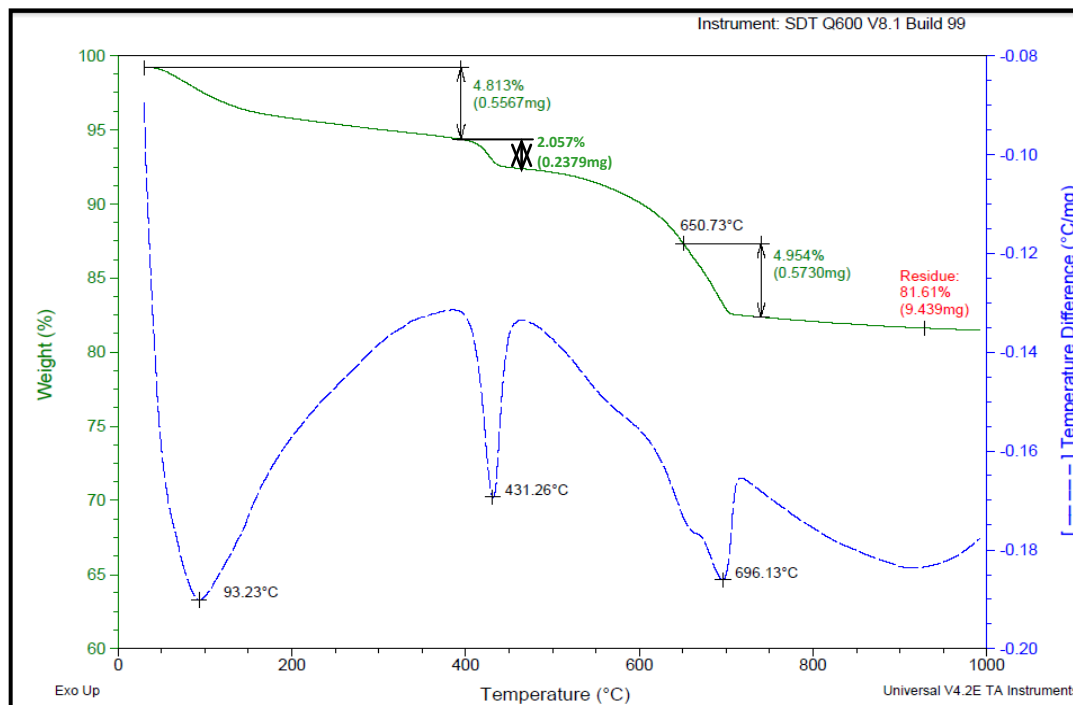


Figura 60. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 10 C + 30 CVT, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

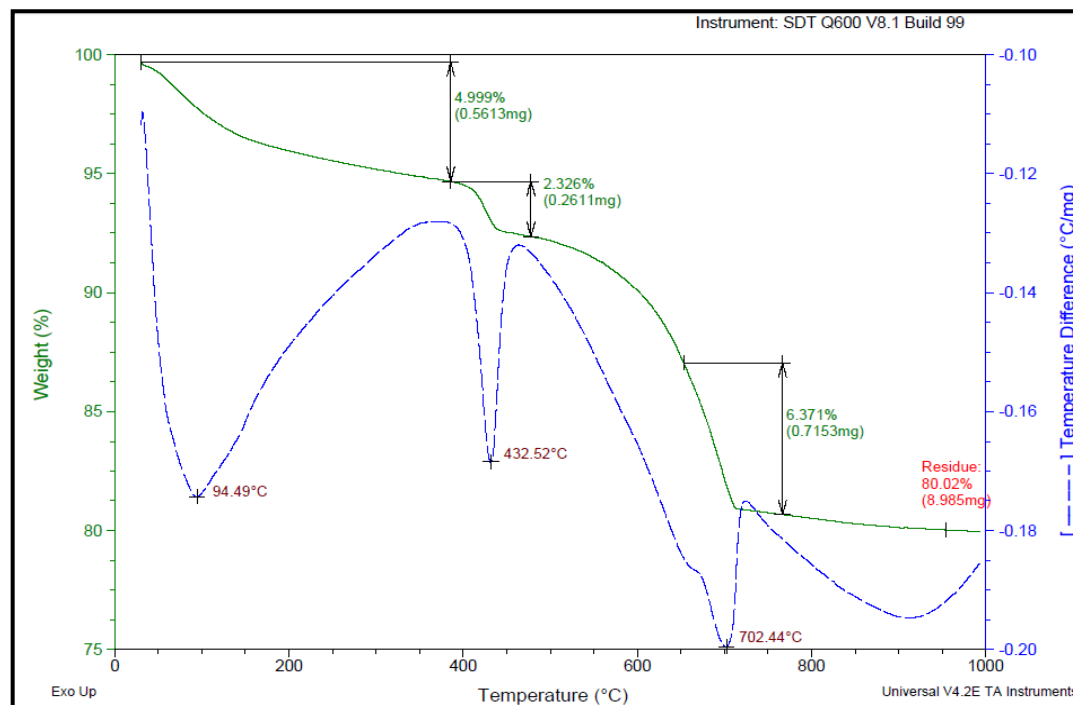


Figura 61. Curvas TGA-DTA de pastas con 60 CP + 15 C + 25 CVT, curadas durante 24 horas en un ambiente con CO₂.

Mediante las curvas TGA-DTA, se determina el contenido de H₂O y CO₂, así mismo, con análisis estequiométricos se determina el hidróxido de calcio y carbonato de calcio. Los cálculos para determinar estos compuestos se describen en el anexo C.

Los resultados del análisis de las curvas TGA-DTA se muestran en las **Tablas 21 y 22** para pastas curadas 24 horas a vapor y 24 horas con una atmósfera rica en CO₂.

Tabla 21. Contenido de H₂O, CaO, Ca(OH)₂, CO₂ y CaCO₃ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas a vapor.

Deshidratación del Ca(OH) ₂			
Pasta	De curva	Por estequiometría	
	TGA-DTA	% CaO	% Ca(OH) ₂
	% H ₂ O		
100 CP	4.4	13.7	18.1
95 CP + 5 C	5.0	15.5	20.5
90 CP + 10 C	5.7	17.7	23.4
85 CP + 15 C	6.4	20.0	26.4
60 CP + 10 C + 30 CV	4.3	13.4	17.7
60 CP + 10 C + 30 CVT	3.9	12.2	16.1
60 CP + 15 C + 25 CVT	4.9	15.3	20.2
Descomposición del CaCO ₃			
Pasta	De curva	Por estequiometría	
	TGA-DTA	% CaO	% CaCO ₃
	% CO ₂		
100 CP	1.4	1.7	3.1
95 CP + 5 C	1.4	1.8	3.2
90 CP + 10 C	1.7	2.2	3.9
85 CP + 15 C	1.5	1.9	3.5
60 CP + 10 C + 30 CV	1.5	1.9	3.4
60 CP + 10 C + 30 CVT	1.3	1.6	2.9
60 CP + 15 C + 25 CVT	1.4	1.7	3.1

Tabla 22. Contenido de H₂O, CaO y Ca(OH)₂, CO₂ y CaCO₃ en pastas, curadas con CO₂ por 24 horas.

Deshidratación del Ca(OH) ₂			
Pasta	De curva	Estequiometría	
	TGA-DTA	% CaO	% Ca(OH) ₂
	% H ₂ O		
100 CP	1.4	4.3	5.7
95 CP + 5 C	0.9	2.9	3.8
90 CP + 10 C	1.4	4.5	5.9
85 CP + 15 C	2.3	7.2	9.5
60 CP + 10 C + 30 CV	2.1	6.4	8.5
60 CP + 10 C + 30 CVT	2.1	6.4	8.5
60 CP + 15 C + 25 CVT	2.3	7.2	9.5

Continuación tabla anterior			
Descomposición del CaCO_3			
Pasta	De curva	Estequiometría	
	TGA-DTA % CO_2	% CaO	% CaCO_3
100 CP	4.7	6.0	10.7
95 CP + 5 C	8.4	10.7	19.1
90 CP + 10 C	9.1	11.6	20.7
85 CP + 15 C	6.4	8.1	14.5
60 CP + 10 C + 30 CV	3.0	3.8	6.8
60 CP + 10 C + 30 CVT	5.0	6.3	11.3
60 CP + 15 C + 25 CVT	6.4	8.1	14.5

Los resultados de los contenidos de hidróxido de calcio y carbonato de calcio se muestran de forma grafica en las **Figuras 62 y 63**.

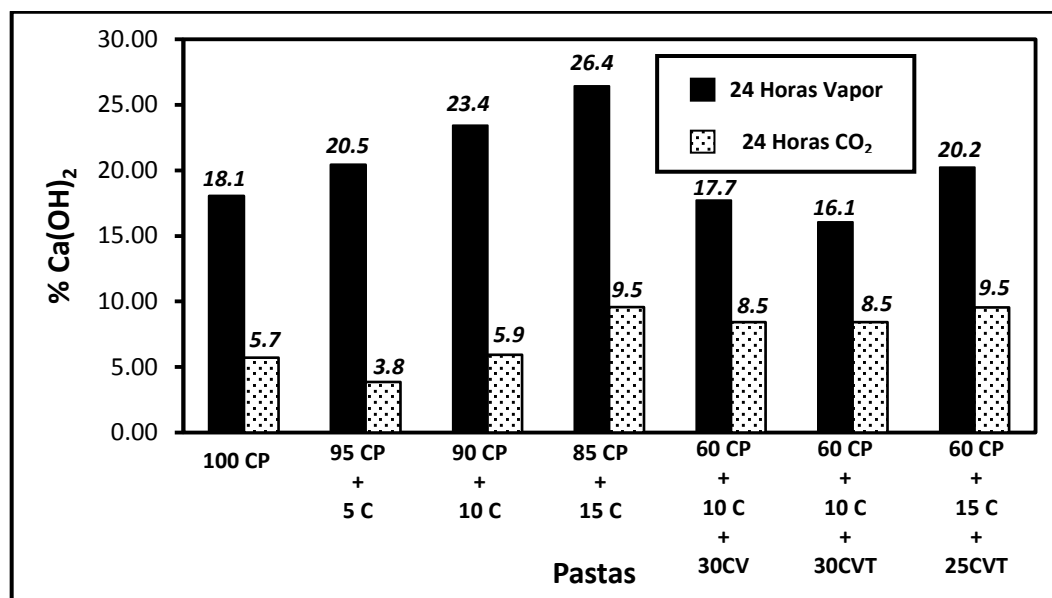


Figura 62. Contenido de Ca(OH)_2 en pastas curadas a vapor y CO_2 .

Como se muestra en la **Figura 62**, el contenido de hidróxido de calcio en las pastas cementantes curadas a vapor es congruente con el contenido inicial de la muestra, puesto que a medida que aumenta la cantidad de cal en la mezcla, la presencia de hidróxido de calcio en el análisis termogravimétrico es mayor.

Para el caso de la mezcla de referencia (100 CP), el contenido del Ca(OH)_2 de la pasta sin carbonatar alcanza un valor de 18.1%, dicho valor es similar a lo reportado por otros investigadores en las reacciones de hidratación del CPO [89,92].

Partiendo de lo anteriormente mencionado, si se analiza la mezcla 85 CP + 15 C y tomando el hidróxido de calcio adicionado como puro, se estima que la concentración producto de la hidratación del cemento portland es de 15.4%, que aunado con el 15% de cal adicionada se espera un contenido total de hidróxido de

calcio del orden del 30%. Como se puede observar en la **Figura 62**, el contenido del hidróxido de calcio obtenido en las curvas TGA-DTA se calcula en un 26.4%. Esta diferencia se debe a la reacción del hidróxido de calcio con la sílice y alúmina reactiva durante el proceso de hidratación.

Por otro lado, y como era de esperarse, la exposición en un ambiente rico en CO_2 durante 24 h disminuye el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en las mezclas binarias. Al respecto, se confirma que la carbonatación incrementa el contenido de carbonatos de calcio, reduciendo el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a valores entre 3.8 y 9.5%, lo que representa una disminución promedio del orden de 16.9%.

En relación a las mezclas ternarias, en las que se fijó el consumo de CP a 60%, se observa que disminuye el contenido de hidróxido de calcio entre 7.6 y 10.7%, atribuible a la reacción puzolánica por la presencia de CV y a la formación de CaCO_3 producto del proceso de carbonatación. Analizando la mezcla 60 CP + 15C + 25CVT, se estima que el contenido de hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento portland es de 10.9% y, en conjunto con el 15% adicionado de cal, se espera un contenido total aproximado del 26%. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la curva TGA-DTA, en la Figura 65 se observa un contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del 20.2%, la diferencia que existe entre estos contenidos, puede atribuirse a la reacción puzolánica con la CVT. Así mismo, la sílice reactiva que reacciona con este contenido, es alrededor a un tercio de la sílice reactiva total disponible; es decir, del orden del 3%. Con lo anterior, se puede observar que la ceniza volante tiene una reactividad baja; sin embargo, los resultados de resistencia a la compresión muestran, que la reacción puzolánica y el efecto filler son apropiados para obtener los resultados deseados.

Se constata que la CVT curada con vapor de agua, consume 1.6% más de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que la CV sin tamizar.

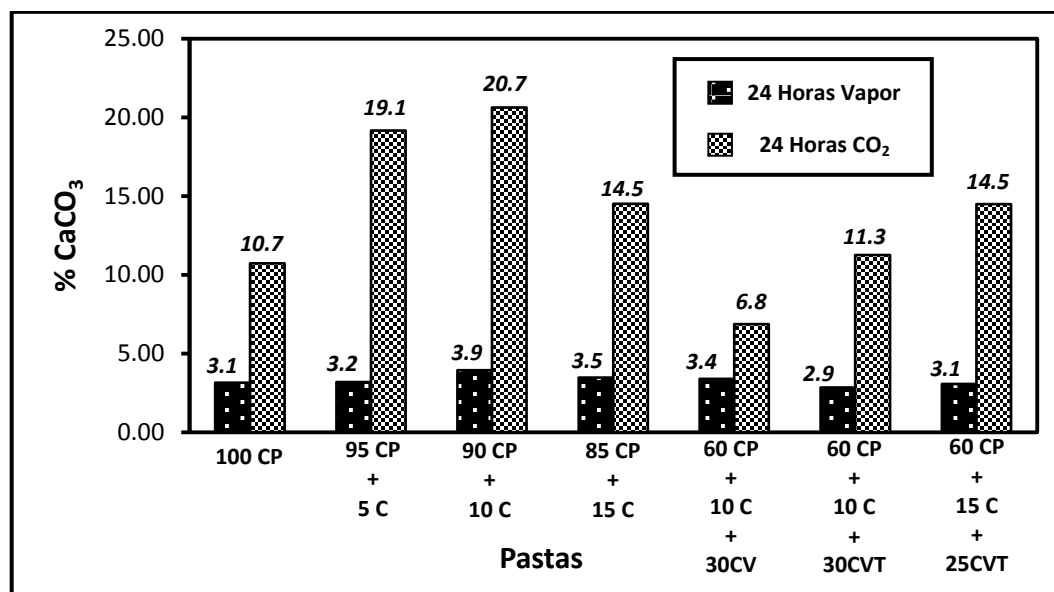


Figura 63. Contenido de CaCO_3 en pastas curadas a vapor y CO_2 .

La **Figura 63**, muestra el contenido de CaCO_3 presentes en las pastas curadas 24 h a vapor: los valores oscilan entre 2.9 y 3.9%, esto se debe a la variación del consumo de CP utilizado en cada pasta, además de una ligera precarbonatación del CP y C, por la reacción con el CO_2 del ambiente. Cabe señalar que la norma mexicana permite una dosificación de hasta un 5% de filler calcáreo en el CP, con los resultados obtenidos se demuestra que el CP cuenta con este compuesto.

Posterior al proceso de carbonatación, el contenido de CaCO_3 en las diferentes pastas se incrementa a valores entre 6.8 a 20.7%. En el caso de las pastas binarias se presenta un incremento promedio de CaCO_3 de 14.5%, mientras que el mayor porcentaje para pastas ternarias se presenta en la mezcla 60CP + 15C + 25CVT alcanzando un incremento de 11.4%, lo que representó un incremento en la resistencia de 3 kg/cm^2 .

De las curvas TGA-DTA es posible determinar el CO_2 liberado por la descomposición del carbonato de calcio. La reducción del hidróxido de calcio en las mezclas de referencia y binarias podría deberse a la reacción de carbonatación, no así en las mezclas ternarias donde una parte de hidróxido de calcio puede reaccionar con la puzolana (ceniza volante) para formar SCH. Por esta razón, en las mezclas se asociara el proceso de carbonatación únicamente con la formación de carbonatos de calcio, lo cual permite que el CO_2 de la reacción siguiente pudiera considerarse como el CO_2 fijado en la mezcla:



En la **Tabla 23** se muestran los valores de CO_2 fijados en pastas carbonatadas.

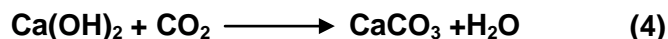
Tabla 23. Fijación de CO_2 en pastas cementantes.

Pasta	% CO_2 Vapor	% CO_2 Carbonatación	% CO_2 Fijado
100 CP	1.4	4.7	3.3
95 CP + 5 C	1.4	8.4	7.0
90 CP + 10 C	1.7	9.1	7.4
85 CP + 15 C	1.5	6.4	4.9
60 CP + 10 C + 30 CV	1.5	3.0	1.5
60 CP + 10 C + 30 CVT	1.3	5.0	3.7
60 CP + 15 C + 25 CVT	1.4	6.4	5.0

Los resultados muestran un rango de fijación de 1.5 a 7.4% de CO_2 . Como era de esperarse, en las pastas binarias se presenta una fijación mayor, puesto que tienen mayor cantidad de Ca(OH)_2 por carbonatar. Así mismo, se destaca el incremento de la fijación en sistemas ternarios de 1.5 a 5.0% de CO_2 .

Basado en un análisis estequiométrico, es posible determinar la fijación de CO_2 en masa dentro de la pasta cementante. Este análisis está definido por la formación de carbonatos de calcio, cuyos contenidos se obtienen de las curvas TGA-DTA. Los

cálculos para determinar esta fijación se mencionan en el anexo C. La ecuación para el análisis estequimétrico es la siguiente (4):



Considerando que la pasta cementante permanece constante en todos los sistemas estudiados y puesto que existe una relación molar de igualdad para cada compuesto en la reacción de carbonatación, es posible calcular la relación de masas antes y después de la carbonatación. Los resultados de este análisis se muestran en la **Tabla 24** y **Tabla 25**.

Tabla 24. Masas de CaCO₃, Ca(OH)₂, CO₂ y H₂O en 267 kg/m³ de pasta, antes de la carbonatación.

Pasta	Masa de CaCO ₃ kg	Masa de Ca(OH) ₂ kg	Masa de CO ₂ kg	Masa de H ₂ O kg
100 CP	8.3	6.1	3.6	1.5
95CP + 5C	8.6	6.3	3.8	1.5
90CP + 10C	10.4	7.7	4.6	1.9
85CP + 15C	9.4	6.9	4.1	1.7
60CP + 10C + 30CV	9.1	6.7	4.0	1.6
60CP + 10C + 30CVT	7.7	5.7	3.4	1.4
60CP + 15C + 25CVT	8.3	6.1	3.6	1.5

Tabla 25. Masas de CaCO₃, Ca(OH)₂, CO₂ y H₂O en 267 kg/m³ de pasta, después de la carbonatación.

Pasta	Masa de CaCO ₃ kg	Masa de Ca(OH) ₂ kg	Masa de CO ₂ kg	Masa de H ₂ O kg
100 CP	28.6	21.2	12.6	5.1
95CP + 5C	51.0	37.8	22.5	9.2
90CP + 10C	55.3	40.9	24.3	10.0
85CP + 15C	38.7	28.7	17.0	7.0
60CP + 10C + 30CV	18.2	13.4	8.0	3.3
60CP + 10C + 30CVT	30.2	22.3	13.3	5.4
60CP + 15C + 25CVT	38.7	28.7	17.0	7.0

La diferencia de contenido de las masas del dióxido de carbono antes y después de la carbonatación, se considera como el CO₂ fijado en la pasta cementante. La **Tabla 26** muestra el CO₂ fijado en las diferentes pastas en estudio.

Tabla 26. Fijación del CO₂ en 267 kg/m³ de pasta cementante.

Pasta	CO ₂ Fijado en la pasta, kg
100 CP	9.0
95CP + 5C	18.7
90CP + 10C	19.7
85CP + 15C	12.9
60CP + 10C + 30CV	4.0
60CP + 10C + 30CVT	9.9
60CP + 15C + 25CVT	13.4

Finalmente, la fijación de CO₂ en un bloque de concreto se calcula según la cantidad de pasta utilizada en dicho bloque. En **Tabla 27** se muestra la cantidad de CO₂ fijado en los bloques de concreto para cada una de las mezclas.

Tabla 27. CO₂ fijado para un bloque de concreto.

Pasta	CO ₂ Fijado por bloque de concreto , g
100 CP	66.9
95CP + 5C	140.8
90CP + 10C	147.0
85CP + 15C	96.8
60CP + 10C + 30CV	30.8
60CP + 10C + 30CVT	74.8
60CP + 15C + 25CVT	100.3

Nota: La pasta para un bloque de concreto, utilizada en nuestro estudio es alrededor de 2 kg.

Como se puede observar, un curado con CO₂ mejorara las propiedades de resistencia a la compresión y absorción de los bloques de concreto, además de fijar CO₂ en la matriz cementante, los valores varían en base al sistema binario y ternario teniendo como valor máximo el sistema con 90 CP + 10 C, alcanzando 147 g por bloque.

4.2.6. Características generales y análisis de costos.

Después de discutir y analizar cada una de las pruebas para los bloques de concreto elaborados, es necesario hacer un análisis final, basado en características generales y costos del material fabricado. En la **Figura 64** se muestran las características generales que deben cumplir los bloques de concreto de acuerdo con la norma, además, de los resultados de las mejores mezclas.

Los resultados en sistemas de referencia, binarios y ternarios (este último con el uso de ceniza volante tamizada), cumplen lo especificado en la norma. Gracias al uso de un curado a vapor, es posible obtener resultados favorables de la reacción puzolánica, ahorrando hasta en un 30% el consumo de cemento en el sistema cementante.

El curado con CO₂, puede utilizarse como un medio auxiliar para mejorar las propiedades de los bloques, disminuyendo el consumo de cemento, incrementando el uso de materiales cementantes alternativos y apoyando por consiguiente los procesos sustentables en la industria de la construcción.

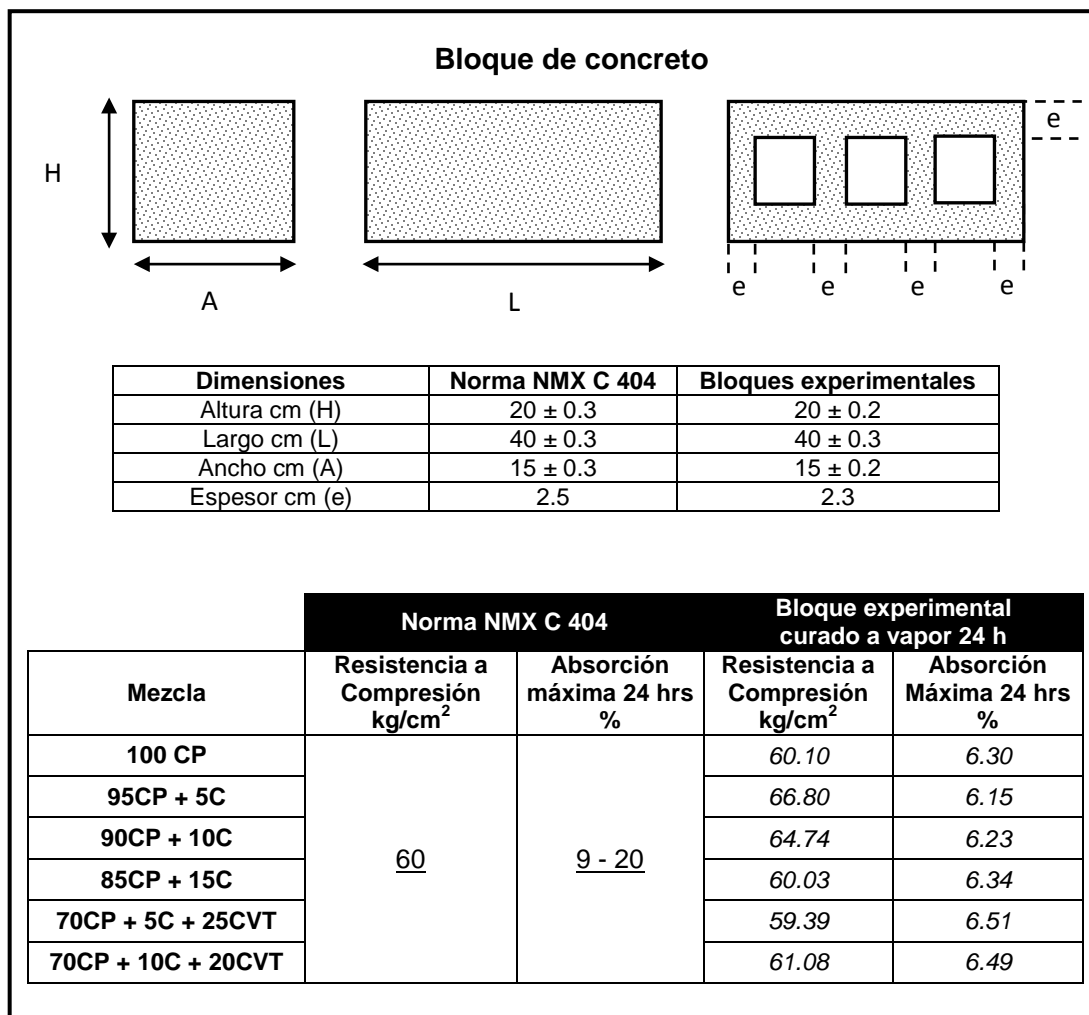


Figura 64. Especificaciones físicas de bloques de concreto estructurales y resultados de bloques de concreto experimentales.

Para todos los bloques de concreto, el consumo de arena es constante, así mismo considerando que todos serán curados a vapor por 24 h, en un estudio del análisis de costo sólo se considerarán como variables las proporciones de los cementantes utilizados en cada sistema.

La **Tabla 28** muestra el costo por tonelada de los cementantes en el área metropolitana de Monterrey. El costo de la ceniza volante incluye el flete de traslado, no así el producido como energía por tamizado, considerado despreciable, en este análisis.

Tabla 28. Costo de los cementantes empleados para fabricación de bloques de concreto en el área metropolitana de Monterrey.

Cementante	Costo, \$	
	Ton	kg
CP	1550	1.55
CV	500	0.50
C	1050	1.05

Nota: Moneda nacional

Una vez que se obtienen los precios de los materiales cementantes y considerando el análisis para los sistemas cementantes mencionados en la **Figura 67**, es posible determinar el costo aproximado de cada uno de ellos, esto con fines comparativos. En la **Tabla 29** se muestra el análisis de costos de cada uno de los sistemas de estudio.

Tabla 29. Comparación de los costos en sistemas cementantes.

Mezcla % en masa del cementante total	Sistema cementante kg/m ³			Sistema cementante \$			Costo total sistema cementante \$	Ganancia \$	Ahorro %
	CP	C	CVT	CP	C	CVT	CP + C + CVT		
100 CP	167.0	0	0	258.8	0	0	258.8	0	0
95 CP + 5 C	158.6	8.4	0	245.8	8.8	0	254.6	4.2	1.6
90 CP + 10 C	150.3	16.7	0	232.9	17.5	0	250.4	8.4	3.2
85 CP + 15 C	141.9	25.1	0	219.9	26.4	0	246.3	12.5	4.8
70 CP + 5 C + 25 CVT	116.9	8.4	41.7	181.2	8.8	20.8	210.8	48.0	18.5
70 CP + 10 C + 20 CVT	116.9	16.7	33.4	181.2	17.5	16.7	215.4	43.4	16.8

Como se puede observar, existe un beneficio económico hasta de 18.5 % para un sistema ternario y 4.8% para binario. El factor económico es muy importante para toda actividad, sin embargo, es trascendental considerar el uso de cementantes alternativos, desde el punto de vista ambiental. El cuidado del medio ambiente, el ahorro en materias primas y costos, además del mejoramiento de las condiciones de vida en la sociedad, es lo que conlleva a realizar cuantiosas investigaciones, con un enfoque innovador y sustentable.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Como resultado de la presente investigación se exponen las siguientes conclusiones:

1.- Los cementantes empleados en esta investigación tuvieron un desempeño favorable al emplearse como mortero para fabricar bloques de concreto. Considerando la eficiencia del equipo de vibro-compresión utilizado en el laboratorio, se produjeron bloques de concreto que cumplen la Norma NMX C 404 con una disminución hasta del 40% de cemento portland. Se sustituyó hasta un 15% de C por CP en el sistema binario, se mejoró la trabajabilidad de la mezcla y se mantiene la misma resistencia a la compresión de referencia. Así mismo, no se presenta una variación significativa en la absorción.

2.- Controlar el tamaño máximo de partícula de los cementantes empleados, permitió que el sistema cementante ternario con ceniza tamizada desarrollara resistencias mecánicas ligeramente mayores con respecto al sistema con ceniza sin tamizar. El control del tamaño de partícula de la CV se realizó mediante un tamizado por la malla 200, lo que permitió mejorar su actividad puzolánica e incrementar la resistencia a la compresión y disminuir ligeramente las absorciones que las mezclas producidas con ceniza volante integral. Lo anterior debido a que al disminuir el tamaño de partícula trae consigo un incremento en el área superficial, lo que propicia una mayor velocidad de reacción entre los silicatos y aluminatos de la ceniza volante con la cal y la portlandita producida en el proceso de hidratación del cemento portland.

3.- El curado a vapor es fundamental para acelerar la hidratación y la actividad puzolánica en la fabricación de piezas de mampostería.

4.- Mediante el uso de un curado a vapor se obtienen resultados de resistencia a la compresión superior a lo especificado en la norma NMX C 404. Las mezclas de binarias (CP + C) superan a la referencia con valores del orden de un 11%. En las mezclas ternarias, a medida que el consumo de cemento aumenta y la ceniza volante disminuye, se obtienen mejores resultados, además el uso de CVT mejora las resistencias de 5 a 8 kg/cm² en mezclas con las mismas dosificaciones. Las absorciones cumplen lo especificado, con valores por debajo del 8% sin variaciones significativas.

5.- El empleo de un curado con CO₂ en bloques de concreto, densifica la matriz cementante por la formación de carbonatos de calcio y como consecuencia se incrementa la resistencia a la compresión y disminuye la absorción de los bloques de concreto.

6.- Al carbonatar la mampostería durante un período de exposición de 24 y 48 horas en una atmósfera del 20% de CO₂, se observa una ganancia de resistencia a la compresión del 7 al 14% respectivamente con respecto al curado convencional en el sistema binario, así mismo el sistema de referencia (100% CP) presenta un comportamiento similar. En relación con la absorción, el efecto de la carbonatación disminuye en no más de 0.6% en ambos sistemas.

La carbonatación de sistemas ternarios, mejora ligeramente la resistencia a compresión con una ganancia entre 1 al 4%, además de disminuir las absorciones en valores alrededor de 0.1%. Sin embargo, en el sistema de referencia se observa un incremento del 7 y 35% al carbonatar 24 y 48 horas respectivamente, lo anterior es atribuible a la disponibilidad de hidróxido de calcio, producto de la hidratación del cemento portland.

7.- La inspección visual para valorar la lixiviación de los bloques confirma que éstos no presentaron anomalías en su superficie, resultado que indica que en las condiciones ambientales, no se presentan eflorescencias superficiales.

8.- Los análisis termogravimétricos permitieron cuantificar el hidróxido de calcio y el carbonato de calcio de los diferentes sistemas cementantes, con lo cual es posible determinar el comportamiento de fijación del CO₂ en el proceso de carbonatación. Así mismo, se comprueba el efecto de la formación de estos compuestos en las propiedades físico-mecánicas de los morteros.

9.- La fijación de CO₂ en las pastas analizadas osciló de entre 1 y 7% en masa, presentándose valores mayores en las pastas binarias. Esta cantidad representa una fijación de 4.0 y 19.7 kg de CO₂ por m³ de pasta en el mortero.

Con los resultados obtenidos en la presente investigación se demuestra la factibilidad para producir un material de construcción capaz de cumplir aspectos que apoyan la sustentabilidad; como son: la economía, el cuidado del medio ambiente y el cumplimiento de los estándares de calidad lo cual redundará en beneficio de la humanidad.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

El uso de diferentes cementantes alternativos en la fabricación de mampostería, es un medio factible, como se concluyó en esta investigación; por lo cual, se recomienda evaluar otros subproductos industriales como la escoria de fundición de alto horno, así como el yeso.

La ceniza volante, a pesar de ser un material de desecho de las plantas carboeléctricas, requiere un postratamiento para potencializar su actividad puzolánica y su uso en la industria de la construcción. Deberá estudiarse la activación mediante formas existentes (tratamientos térmicos, mecánicos, químicos) y analizar su eficiencia.

El uso del curado con CO_2 en elementos de mampostería, puede ser un medio viable para mejorar las características físicas y mecánicas de estos materiales, por lo cual, es conveniente evaluar las condiciones de concentración, temperatura y presión de CO_2 , otras condiciones de concentración y presión de CO_2 . Con el avance de la tecnología será posible mejorar los medios para captación de CO_2 y otros gases y, a su vez, estos puedan emplearse en otros procesos que apoyen la sustentabilidad en beneficio de la comunidad y del planeta.

Se recomienda la revisión del diseño de mezclas. Si el equipo a emplearse es de una eficiencia de vibrocompactación mayor (equipo industrial), esto permitirá optimizar el consumo de cemento, alcanzando resultados similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS

- 1.- Conde Cecilia, 2006. México y el cambio climático global. México. Dirección General de Divulgación de la Ciencia UNAM. Primera Edición.
- 2.- http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/mexico_cambio_climatico/Mexico_y_el_cambio_climatico_global.pdf.
- 3.- El proceso del cambio climático.
<http://www.formaselect.com/areas-tematicas/Medio-Ambiente/el-proceso-de-Cambio-Climatico.htm>.
- 4.- Cambio climático e historia.
<http://www.cambio-climatico.com/cambio-climatico-e-historia>
- 5.- Efecto invernadero, Calentamiento global y Cambio climático.
<http://www.cambioclimatico.org/contenido/tematica-efecto-invernadero-calentamiento-global-y-cambio-climatico>.
- 6.- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/items/3336.php.
- 7.- Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales. Cambio climático en México.
http://cambio_climatico.ine.gob.mx/pregfrecuentes.html#2.
- 8.- United Nations Frame Work Conventionon Climate Change
http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/items/6215.php.
- 9.- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- 10.- MacKenzie, J. 2001. Thinking long term: Confronting global climate change. World Resources Institute.
<http://www.wri.org/climate/longterm/index.html>.
- 11.- Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
<http://www.ipcc.ch/>.

- 12.- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2006). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. México. Editorial SEMARNAT. (1ª. ed.).
- 13.- Registro histórico de los principales países emisores. José Luis Arvizu Fernández <http://www2.ine.gov.mx/publicaciones/libros/437/arvizu.html>.
- 14.- U.S. Energy Information Administration. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8&cid=r1,&syid=2005&eyid=2009&unit=MMTCD>.
- 15.- Mehta P. K., "Global Concrete Industry Sustainability", Concrete International, 2009, pp. 45-50.
16. - Burak Uzal, Lutfullah Turanli, and P. Kumar Mehta. "High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications". ACI Materials Journal. September-October 2007 pp. 535-538.
- 17.- World Building Council for Sustainable Development, 2009, Cement Industry Energy and CO₂ Performance: Getting the Numbers Right, 43 pp. <http://www.wbcds.org/DocRoot/02fH0Bj3tZNV1RvmG2mb/CSIGNRRReportfinal.pdf>. (accessed Jan. 18, 2010).
- 18.- Hernández Hernández Tito Bonifacio, 2010. La función estratégica de la comunicación en el desarrollo sustentable en Xico, Veracruz. Tesis Doctoral de Ciencias Sociales. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. <http://www.eumed.net/tesis/2010/tbhh/Desarrollo%20Sostenible%20concepto.htm>.
- 19.- Sostenibilidad o sustentabilidad http://ols.uas.mx/PubliWeb/Articulos/Sostenibilidad_o_sustentabilidad.pdf.
- 20.- Flores Rodríguez Liliam, 2009. La vivienda en México y la población en condiciones de pobreza. México. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- 21.- Censo de población y vivienda e informacion de INEGI. http://www.inegi.gov.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/princi_result/cpv2010_principales_resultadosVI.pdf
- 22.- Kosmatka Steven H. y Paranesse William C, 2004. Diseño y control de mezclas de concreto. México. Portland Cement Asociation, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- 23.- ASTM C 618-89. Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- 24.- Malhotra V. M. and Mehta P. K., 1996. Poozolanic and Cementitious Materials. Advances in concrete technology. Canada. Volume I.

- 25.- Mehta P. K., Octubre 2000. Avances en la tecnología del concreto. Revista Construcción y Tecnología IMCYC.
- 26.- ACAA (2003). Fly Ash Facts for Highway Engineers. Aurora, USA, American Coal
- 27.- Malhotra, V. M. (2002). "High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete." ACI Concrete International 24(7): 1-5.
- 28.- Malhotra, V. M. (2002). "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology." ACI Concrete International 24(7): 22.
- 29.- Herrera González José Alejandro, 2009. Desarrollo de Sistemas Cementantes Ternarios para Producir Mampostería Vibrocomprimida. México. Tesis de Maestría. UANL.
- 30.- Arandigoyen M. y Álvarez J. "Proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación agua/conglomerante". *Materiales de Construcción*, 56(281):5-18. 2006.
- 31.- Cazalla O., Rodríguez-Navarro C., Sebastián E., Cultrone G., Torre M. "Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation". *Journal of the American Ceramic Society*, 83(5):1070-1076. 2000.
- 32.- Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E. "The Effects of Limestone Characteristics and Calcination Temperature to the Reactivity of the Quicklime". *Cement and Concrete Research*, 31:633-639. 2001.
- 33.- Moropoulou A., Cakmakb A., Labropoulosa K., Van Griekenc R., Torfsc K. "Accelerated Microstructural Evolution of a Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Phase in Pozzolanic Pastes Using Fine Siliceous Sources: Comparison with Historic Pozzolanic Mortars". *Cement and Concrete Research*, 34:1-6. 2004.
- 34.- Moropoulou A., Polikreti K., Bakolas A., Michailidis P. "Correlation of Physicochemical and Mechanical Properties of Historical Mortars and Classification by Multivariate Statistics". *Cement and Concrete Research*, 33:891-898. 2003.
- 35.- Delatte N. "Lessons from Roman Cement and Concrete". *J. Profl . Issues in Engrg. Educ. and Pract.*,: 127, 3:109-115. 2001.
- 36.- Cowper A. Lime and Lime Mortars. UK: Donhead Publishing LTD. 1927. Reprinted 2000.
37. - Hill N. Holmes S., Mather D., 1992. Lime and Other Alternative Cements. UK: Intermediate Technology Publications.
38. - Shi C. "Studies on Several Factors Affecting Hydration and Properties of Lime-Pozzolan Cements". *J. Mat. in Civ. Engr.*, 13(6):441-445. 2001.
- 39.- Holmes S., 2003. Wingate M. Building with Lime. UK: ITDG Publishing.

- 40.- Galván Ruiz M., Velázquez Castillo R, 2011. Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. México. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología UNAM.
- 41.- Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica. NSR-98: Normas colombianas de construcción sismo-resistente: Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998. Santa Fe de Bogotá AIS. 1997-1998. 4 Vol.
- 42.- Edificaciones de mampostería para vivienda. Fundación ICA A.C. Tercera edición 2003. México.
http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc002/.
- 43.- Mampostería antigua.
http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080095009/1080095009_02.pdf.
- 44.- Manual para elaboración de bloques de concreto utilizando vibrobloquera austera de tarimas. Gobierno del estado de Chiapas, México.
<http://cecytech.edu.mx/Pdf/manualblocks.pdf>.
- 45.- Revista Construcción y Tecnología. "Sustentabilidad: bloques de concreto muy sanos". IMCYC, 2008. México.
<http://www.imcyc.com/ct2008/oct08/sustentabilidad.htm>.
- 46.- Materiales y procedimientos de construcción. Mampostería.
<http://www.slideshare.net/wilfredrivera/mampostera>.
- 47.- Navas Carro Alejandro, 2007. Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto. San José, Costa Rica. Ingeniería 17 (2): 53-70, ISSN: 1409-2441.
http://www.latindex.ucr.ac.cr/ingenieria-17-2/03-navas_propiedades.pdf.
- 48.- Parrot, L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, 1987.
- 49.- Serrano Ixtepan D., Moreno E. I., "Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado". Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-2, 2006, pp. 37-45.
- 50.- Montaini, R. "Concretes forgotten enemy". Concrete Repair Digest. 330-333 (December 1995/January 1996).
- 51.- Carbon dioxide sequestration state art.
- 52.- Francois R. y Arliguie G. "Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environmentll", ACI SP-145.- American Concrete Institute, EUA,1994.
- 53.- N. Rafai, H. Hornain, G. Villain, V. Baroghel-Bouny, G. Platret, T. Chaussadent, "Comparison and validity of carbonation measurement methods (in French)". Rev. Fr. Génie Civ. 6 (2) (2002) 251-274.

- 54.- A. A. Rahman, F. P. Glasser, "Comparative studies of the carbonation of hydrated cements", *Adv. Cem. Res.* 2 (6) (1989) 49-54.
- 55.- G. W. Groves, A. Brough, I. G. Richardson, C. M. Dobson, "Progressive changes in the structure of hardened C_3S cement pastes due to carbonation", *J. Am. Ceram. Soc.* 74 (11) (1991) 2891-2896.
- 56.- Rivera Lozano, J. (2004). "La hidratación de la pasta de cemento con adiciones activas". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- 57.- Villain G., Thiery M. Platret G. "Measurement methods of carbonation profiles in concrete: termogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry". *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1182-1192.
- 58.- Klemm W. A. and Berger R. L. "Accelerated curing of cementitious systems by carbon dioxide". *Cement and Concrete Research*. Vol. 2, 1972, pp. 567-576.
- 59.- Fattuhi N. I. "Concrete carbonation as influenced by curing regime". *Cement and Concrete Research*. Vol. 18, 1988, pp. 426-430.
- 60.- Duran Atis Cengiz. "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash". *Construction and Building Materials*. Vol. 17, 2003, pp.147-152.
- 61.- Monkman S., Logan C., Shao Y., "Beneficial Use of Carbonation for Concrete", *International Concrete Research*, V. 235, 2006, pp.147-162.
- 62.- Arandigoyen M., Álvarez J. I. "Estructura porosa y proceso de carbonatación en pastas mixtas de cal con diferente porcentaje de cemento" *Materiales de Construcción*. Vol 56, 282. 2006, pp. 17-30.
- 63.- Shao, Y., Mirza, M.S., and Wu, X., "CO₂ Sequestration Using Calcium-Silicate Concrete", June 2006, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 776-784.
- 64.- Shi, C., and Wu, Y., "Studies on Some Factors Affecting CO₂ Curing of Lightweight Concrete Products", July 2008, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, Issue No. 8-9, pp. 1087-1092.
- 65.- Shao Y., Monkman S., Boyd A. J. "Recycling carbon dioxide into concrete a feasibility study". *Concrete Sustainability Conference*. 2010.
- 66.- Shi C., He F., Y., Wu Y. "Effect of preconditioning on CO₂ curing of lightweight concrete block mixtures". *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26, pp. 257-267.
- 67.- Castellote, M. and Andrade, C. (2008). "Modeling the Carbonation of Cementitious Matrixes by Means of the Unreacted-Core Model, UR-Core." *Cement and Concrete Research*, 38(12), 1374-1384.

- 68.- Shi C., Wang D., He F., Liu M. "Weathering properties of CO₂-Cured concrete blocks". Resources, Conservation and Recycles. 2012. Vol. 65, pp. 11-17
- 69.- Wei L., Naik T. R. and Golden D. M. "Construction materials made with coal combustion by-products". Cement Concrete and Aggregates. Vol. 16. No. 1. ASTM, June 1994, pp. 36-42.
- 70.- Naik T. R., Singh S. S., Kraus R. N., Ramme B. W., "Manufacture of Masonry Products Containing Large Amounts of Fly Ash", International Concrete Research, V. 199, 2001, pp. 163-184.
- 71.- Atici, U y Ersoy A. (2008). "Evaluation of destruction specific energy of fly ash and slag admixed concrete interlocking paving blocks". Revista Construction and Building Materials, 22, 1507-1514.
- 72.- Herrera González A. H., Valdez Tamez P. L., Duran Herrera A. "Producción de materiales de construcción basados en ceniza volante con hidróxido de calcio". Tesis Licenciatura. UANL. México. 2008.
- 73.- Lamb Bernal C. P. y Ramirez Cardona M. E. "Elaboración industrial de bloques de concreto empleando ceniza volante". Revista de Investigaciones Aplicadas. Universidad Pontificia Bolivariana. No.4, 2008, pp. 8-15.
- 74.- Shi C., Zou Q, "Use of CO₂ as an Accelerated Curing Agent for Concrete Blocks", Key Engineering Materials, 2008, Vol. 400 - 402. pp. 81-87.
- 75.- Shi C., Wu Y, "CO₂ Curing of Concrete Blocks", Concrete International, 2009, pp. 39-43.
- 76.- Malhotra, V.M., "Making concrete greener with fly ash", Concrete International, Vol. 21, 1999, pp. 61-66.
- 77.- Bhanumathidas N. and Kumar Mehta P. "Concrete mixtures made with ternary blended cements containing fly ash and rice husk ash". Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fyume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Volume I. USA, 2001.
- 78.- Cultrone G., Sebastian E. and Ortega Huertas M. "Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives : Mineralogical and textural changes". *Cement and Concrete Research*. Vo. 35, 2005, pp. 2278-2289.
- 79.- Borges P., Costa J., Milestone N., Lynsdale C., Streatfield R. "Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS". Cement and Concrete Research, Vol. 40, (2010) 284-292.
- 80.- Chang C-F., Chen J-W., "The experimental investigation of concrete carbonation depth". Cement and Concrete Research, Vol. 36, Issue 9, (2006) 1760-1767.

81.- Gaztañaga M. T., 1996. Influencia de la carbonatación en la microestructura de diferentes pastas de cemento hidratadas. Tesis.

82.- Parrott L. J., "Carbonation, moisture and empty pores", *Advances in Cement Research*, vol. 4, No.15 (1991/92) 111-118.

83.- ACI Committee 517, "Recommended Practice for Atmospheric Pressure Steam Curing of Concrete", (ACI 517-70) (Reaffirmed 1976) American Concrete Institute, Detroit, 1970, 20 pp.

84.- Kuenning, William H. y Carlson, C. C., "Effect of Variations in Curing and Drying on the Physical Properties of Concrete Masonry Units," *Development Department Bulletin D13*, Portland Cement Association, Skokie, 1956, 129 pages.

85.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1990. Curado Acelerado del Concreto a Presión Atmosférica. México. IMCYC, Editorial LIMUSA. Primera edición.

86.- Alamo Neidhart Raul, 1973. Muros de Bloques de Concreto. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

87.- John Roberts, Alan Tovey, Anton Fried, 2001. "Concrete Masonry Designer's handbook". New York, USA. Second Edition.

88.- Fernández Aguado, E. "Materiales y métodos utilizados en la fabricación y caracterización de cementos óseos de fosfatos de calcio". E.T.S. de Ingeniería Industrial de Barcelona. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la UPC. (1996).

89.- Giraldo Manuel Alejandro y Tobón Jorge Iván. "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación". *Revista de la Facultad de Minas*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Vol. 73. Marzo 2005, pp. 69-88.

90.- Manual del bloquero. Holcim APASCO. Junio 2005.

91.- Grant, William, 1959. Manufacture of Concrete Masonry Units. Chicago. Concrete Publishing Corporation.

92. Molina Bas Omar, 2008. La influencia de las cenizas volante como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón. Madrid. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Normativas.-

NMX-C-003-1996 "Industria de la construcción". Cal hidratada. Especificaciones y métodos de prueba.

NMX C-30-ONNCCE-2004 "Industria de la construcción-Agregados-Muestreo".

- NMX-C-036-2004. Resistencia a la compresión. Método de Prueba de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines.
- NMX-C-037-2005. Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines.
- NMX-C-038-2004. Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba”.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción–Agregados para Concreto Hidráulico–Especificaciones y Métodos de Prueba”.
- NOM-C-165-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Agregados – Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino – Método de Prueba”.
- NMX C-170-1997-ONNCCE “Industria de la Construcción–Agregados–Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para las Pruebas”.
- NMX-C-404-ONNCCE-2005. “Industria de la construcción”. Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural.
- NMX-C-414-ONNCCE-2005. “Industria de la construcción. Cementos Hidráulicos.- Especificaciones y métodos de prueba.
- ASTM C 114.- Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement-
- ASTM C 150-05. Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM-C-188-02. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- ASTM-C-207-04. Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes.
- ASTM-C-430-00. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve.
- ASTM-C-618-03. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM C-1084.- Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement-Concrete.

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS TABULADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN EN BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A UN CURADO CON VAPOR DE AGUA Y CO₂.

A). Resistencia a la compresión en bloques de concreto curados a vapor.

Tabla A.1 Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³						
Mezcla	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
<i>Referencia</i> <i>100% CP</i>	1	0	36200	600	60.3	60.1
	2	0	35900	600	59.8	
	3	0	36087	600	60.2	
<i>CP</i>	1	95CP + 5C	40219	600	67.0	66.8
	2	95CP + 5C	40081	600	66.8	
	3	95CP + 5C	39932	600	66.6	
<i>+</i>	1	90CP + 10C	39016	600	65.0	64.7
	2	90CP + 10C	38491	600	64.2	
	3	90CP + 10C	38982	600	65.0	
<i>C</i>	1	85CP + 15C	36206	600	60.3	60.0
	2	85CP + 15C	35491	600	59.2	
	3	85CP + 15C	36348	600	60.6	

Tabla A.2 Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C - CV, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³						
Mezcla	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
Referencia 100% CP	1	0	36200	600	60.3	60.1
	2	0	35900	600	59.8	
	3	0	36087	600	60.2	
CP + C + CV	1	35CP + 5C + 60CV	20555	600	34.3	34.6
	2	35CP + 5C + 60CV	20752	600	34.6	
	3	35CP + 5C + 60CV	20982	600	35.0	
	1	35CP + 10C + 55CV	21929	600	36.6	37.0
	2	35CP + 10C + 55CV	22380	600	37.3	
	3	35CP + 10C + 55CV	22221	600	37.0	
	1	35CP + 15C + 50CV	18918	600	31.5	31.4
	2	35CP + 15C + 50CV	18837	600	31.4	
	3	35CP + 15C + 50CV	18723	600	31.2	
	1	40CP + 5C + 55CV	21570	600	36.0	36.3
	2	40CP + 5C + 55CV	21930	600	36.6	
	3	40CP + 5C + 55CV	21752	600	36.3	
	1	40CP + 10C + 50CV	24014	600	40.0	39.8
	2	40CP + 10C + 50CV	23687	600	39.5	
	3	40CP + 10C + 50CV	23853	600	39.8	
	1	40CP + 15C + 45CV	20100	600	33.5	33.8
	2	40CP + 15C + 45CV	20430	600	34.1	
	3	40CP + 15C + 45CV	20793	600	34.7	
	1	50CP + 5C + 45CV	24255	600	40.4	41.1
	2	50CP + 5C + 45CV	24752	600	41.3	
	3	50CP + 5C + 45CV	24982	600	41.6	
	1	50CP + 10C + 40CV	25929	600	43.2	43.7
	2	50CP + 10C + 40CV	26580	600	44.3	
	3	50CP + 10C + 40CV	26221	600	43.7	
	1	60CP + 5C + 35CV	28018	600	46.7	46.4
	2	60CP + 5C + 35CV	27837	600	46.4	
	3	60CP + 5C + 35CV	27723	600	46.2	
	1	60CP + 10C + 30CV	29670	600	49.5	49.6
	2	60CP + 10C + 30CV	29430	600	49.1	
	3	60CP + 10C + 30CV	30122	600	50.2	
1	70CP + 5C + 25CV	30826	600	51.4	51.1	
2	70CP + 5C + 25CV	30525	600	50.9		
3	70CP + 5C + 25CV	30580	600	51.0		
1	70CP + 10C + 20CV	32928	600	54.9	54.8	
2	70CP + 10C + 20CV	32714	600	54.5		
3	70CP + 10C + 20CV	32966	600	54.9		
1	70CP + 15C + 15CV	34270	600	57.1	57.6	
2	70CP + 15C + 15CV	34556	600	57.6		
3	70CP + 15C + 15CV	34822	600	58.0		

Tabla A.3 Resistencia a la compresión de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C - CVT, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³						
Mezcla	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
Referencia 100% CP	1	0	36200	600	60.3	60.1
	2	0	35900	600	59.8	
	3	0	36087	600	60.2	
CP	1	50CP + 5C + 45CVT	28850	600	48.1	47.8
	2	50CP + 5C + 45CVT	28931	600	48.2	
	3	50CP + 5C + 45CVT	28330	600	47.2	
CP + C	1	50CP + 10C + 40CVT	30752	600	51.3	50.8
	2	50CP + 10C + 40CVT	30766	600	51.3	
	3	50CP + 10C + 40CVT	29982	600	50.0	
CP + C + CVT	1	60CP + 5C + 35CVT	32553	600	54.3	54.2
	2	60CP + 5C + 35CVT	32061	600	53.4	
	3	60CP + 5C + 35CVT	32986	600	55.0	
CP + C + CVT	1	60CP + 10C + 30CVT	33790	600	56.3	56.7
	2	60CP + 10C + 30CVT	33993	600	56.7	
	3	60CP + 10C + 30CVT	34243	600	57.1	
CP + C + CVT	1	60CP + 15C + 25CVT	34863	600	58.1	58.1
	2	60CP + 15C + 25CVT	34511	600	57.5	
	3	60CP + 15C + 25CVT	35178	600	58.6	
CP + C + CVT	1	70CP + 5C + 25CVT	35790	600	59.7	59.4
	2	70CP + 5C + 25CVT	35992	600	60.0	
	3	70CP + 5C + 25CVT	35127	600	58.6	
CP + C + CVT	1	70CP + 10C + 20CVT	36366	600	60.6	61.1
	2	70CP + 10C + 20CVT	36853	600	61.4	
	3	70CP + 10C + 20CVT	36724	600	61.2	

B). Absorción en bloques de concreto curados a vapor.

Tabla B.1 Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema binario CP – C, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³									
Mezcla	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Abs. (L/m ³)	Abs. (%)	Absorción Promedio (%)
Referencia 100 % CP	1	0	13263	13929	7801	13107	134.1	6.3	6.3
	2	0	13293	14005	7852	13172	135.4	6.3	
CP	1	95CP + 5C	13263	13929	7888	13119	134.1	6.2	6.2
	2	95CP + 5C	13293	14005	7974	13197	134.0	6.1	
CP + C	1	90CP + 10C	13421	14068	7911	13240	134.5	6.3	6.2
	2	90CP + 10C	13588	14114	7977	13289	134.4	6.2	
CP + C	1	85CP + 15C	13317	13942	7779	13109	135.2	6.4	6.3
	2	85CP + 15C	13565	14170	7927	13328	134.9	6.3	

Tabla B.2 Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C - CV, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³									
Mezcla	Unidad	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Abs. (L/m ³)	Abs. (%)	Absorción Promedio (%)
Referencia 100 % CP	1	0	13263	13929	7801	13107	134.1	6.3	6.3
	2	0	13293	14005	7852	13172	135.4	6.3	
CP + C + CV	1	35CP + 5C + 60CV	13273	14028	7719	13045	155.8	7.5	7.5
	2	35CP + 5C + 60CV	13322	14172	7790	13176	156.1	7.5	
	1	35CP + 10C + 55CV	13200	14043	7744	13071	154.3	7.4	7.4
	2	35CP + 10C + 55CV	13154	13998	7736	13029	154.7	7.4	
	1	35CP + 15C + 50CV	13118	13942	7649	12949	157.8	7.7	7.7
	2	35CP + 15C + 50CV	13095	13925	7637	12934	157.6	7.7	
	1	40CP + 5C + 55CV	13299	14082	7775	13105	154.9	7.5	7.5
	2	40CP + 5C + 55CV	13311	14122	7799	13143	154.8	7.5	
	1	40CP + 10C + 50CV	13133	13926	7756	12978	153.7	7.3	7.3
	2	40CP + 10C + 50CV	13254	14044	7822	13090	153.3	7.3	
	1	40CP + 15C + 45CV	13155	13950	7673	12966	156.8	7.6	7.6
	2	40CP + 15C + 45CV	13284	14021	7711	13031	156.9	7.6	
	1	50CP + 5C + 45CV	13288	14092	7842	13152	150.4	7.2	7.2
	2	50CP + 5C + 45CV	13253	13942	7761	13010	150.8	7.2	
	1	50CP + 10C + 40CV	13303	14108	7896	13187	148.3	7.0	7.0
	2	50CP + 10C + 40CV	13291	14052	7851	13131	148.5	7.0	
	1	60CP + 5C + 35CV	13412	14112	7969	13208	147.2	6.8	6.8
	2	60CP + 5C + 35CV	13294	13957	7891	13065	147.1	6.8	
	1	60CP + 10C + 30CV	13322	14028	7890	13136	145.3	6.8	6.8
	2	60CP + 10C + 30CV	13376	14077	7923	13183	145.3	6.8	
1	70CP + 5C + 25CV	13392	14112	8006	13227	144.9	6.7	6.7	
2	70CP + 5C + 25CV	13245	13957	7912	13080	145.1	6.7		
1	70CP + 10C + 20CV	13271	14028	7935	13156	143.1	6.6	6.6	
2	70CP + 10C + 20CV	13316	14077	7968	13200	143.6	6.6		
1	70CP + 15C + 15CV	13288	14022	7947	13157	142.4	6.6	6.6	
2	70CP + 15C + 15CV	13177	13983	7924	13120	142.4	6.6		

Tabla B.3 Absorción de bloques de concreto de referencia y sistema ternario CP – C - CVT, curados a vapor.

Curado 24 horas a 60 °C con H.R. 90-95% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³									
Mezcla	Unidad	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Abs. (L/m ³)	Abs. (%)	Absorción Promedio (%)
Referencia 100 % CP	1	0	13263	13929	7801	13107	134.1	6.3	6.3
	2	0	13293	14005	7852	13172	135.4	6.3	
CP + C + CVT	1	50CP + 5C + 45CVT	13308	14092	7922	13193	145.7	6.8	6.8
	2	50CP + 5C + 45CVT	13217	13942	7851	13056	145.5	6.8	
	1	50CP + 10C + 40CVT	13371	14108	7998	13220	145.3	6.7	6.7
	2	50CP + 10C + 40CVT	13290	14052	7960	13168	145.1	6.7	
	1	60CP + 5C + 35CVT	13366	14112	7985	13234	143.3	6.6	6.6
	2	60CP + 5C + 35CVT	13252	13957	7922	13088	144.0	6.6	
	1	60CP + 10C + 30CVT	13261	14028	7947	13160	142.7	6.6	6.6
	2	60CP + 10C + 30CVT	13429	14077	7971	13207	142.5	6.6	
	1	60CP + 15C + 25CVT	13158	13969	7870	13114	140.2	6.5	6.5
	2	60CP + 15C + 25CVT	13133	13922	7841	13070	140.1	6.5	
	1	70CP + 5C + 25CVT	13347	14112	7938	13248	139.9	6.5	6.5
	2	70CP + 5C + 25CVT	13253	13957	7846	13105	139.4	6.5	
	1	70CP + 10C + 20CVT	13299	14028	7852	13173	138.4	6.5	6.5
	2	70CP + 10C + 20CVT	13368	14077	7880	13219	138.5	6.5	

C). Resistencia a la compresión en bloques de concreto sometidos a carbonatación.

Tabla C.1 Resistencia a la compresión en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³							
Mezcla	Tiempo de curado	Espécimen	Sustitución (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
Referencia 100% CP	24 horas	1	0	38601	600	64.3	64.2
		2	0	36154	600	60.3	
		3	0	40867	600	68.1	
	48 horas	1	0	48049	600	80.1	81.0
		2	0	47084	600	78.5	
		3	0	50713	600	84.5	
CP + C	24 horas	1	95CP + 5C	42484	600	70.5	71.4
		2	95CP + 5C	43786	600	73.0	
		3	95CP + 5C	42371	600	70.6	
	48 horas	1	95CP + 5C	42694	600	77.2	75.5
		2	95CP + 5C	45507	600	75.9	
		3	95CP + 5C	44038	600	73.4	
	24 horas	1	90CP + 10C	40118	600	66.9	65.9
		2	90CP + 10C	38216	600	63.7	
		3	90CP + 10C	40352	600	67.3	
	48 horas	1	90CP + 10C	44695	600	74.5	73.1
		2	90CP + 10C	42727	600	71.2	
		3	90CP + 10C	44229	600	73.7	
	24 horas	1	85CP + 15C	39087	600	65.2	64.0
		2	85CP + 15C	37050	600	61.8	
		3	85CP + 15C	39006	600	65.0	
	48 horas	1	85CP + 15C	40220	600	67.0	68.5
		2	85CP + 15C	40628	600	67.7	
		3	85CP + 15C	42532	600	70.9	

Tabla C.2 Resistencia a la compresión en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CV, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³							
Mezcla	Tiempo de curado	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
Referencia a 100% CP	24 horas	1	0	38601	600	64.3	64.2
		2	0	36154	600	60.3	
		3	0	40867	600	68.1	
	48 horas	1	0	48049	600	80.1	81.0
		2	0	47084	600	78.5	
		3	0	50713	600	84.5	
CP + C + CV	24 horas	1	60CP + 5C + 35CV	28003	600	46.7	46.8
		2	60CP + 5C + 35CV	28152	600	46.9	
		3	60CP + 5C + 35CV	27555	600	45.9	
	48 horas	1	60CP + 5C + 35CV	28220	600	47.0	47.4
		2	60CP + 5C + 35CV	28647	600	47.8	
		3	60CP + 5C + 35CV	27332	600	45.6	
	24 horas	1	60CP + 10C + 30CV	29826	600	49.7	49.6
		2	60CP + 10C + 30CV	29918	600	49.9	
		3	60CP + 10C + 30CV	29541	600	49.2	
	48 horas	1	60CP + 10C + 30CV	30221	600	50.4	50.7
		2	60CP + 10C + 30CV	30946	600	51.6	
		3	60CP + 10C + 30CV	30104	600	50.2	
	24 horas	1	70CP + 5C + 25CV	30226	600	50.4	51.3
		2	70CP + 5C + 25CV	31005	600	51.7	
		3	70CP + 5C + 25CV	31080	600	51.8	
	48 horas	1	70CP + 5C + 25CV	31112	600	51.9	51.5
		2	70CP + 5C + 25CV	30992	600	51.7	
		3	70CP + 5C + 25CV	30562	600	50.9	
	24 horas	1	70CP + 10C + 20CV	32900	600	54.8	54.6
		2	70CP + 10C + 20CV	32552	600	54.3	
		3	70CP + 10C + 20CV	32777	600	54.6	
	48 horas	1	70CP + 10C + 20CV	32991	600	55.0	54.9
		2	70CP + 10C + 20CV	33003	600	55.0	
		3	70CP + 10C + 20CV	32735	600	54.6	
24 horas	1	70CP + 15C + 15CV	35214	600	58.7	58.5	
	2	70CP + 15C + 15CV	35014	600	58.4		
	3	70CP + 15C + 15CV	34988	600	58.3		
48 horas	1	70CP + 15C + 15CV	36022	600	60.0	60.0	
	2	70CP + 15C + 15CV	35837	600	59.7		
	3	70CP + 15C + 15CV	36210	600	60.4		

Tabla C.3 Resistencia a la compresión en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CVT, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³							
Mezcla	Tiempo de curado	Espécimen	Sustitución en masa (%)	Carga (kg)	Área Bruta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión Promedio (kg/cm ²)
Referencia 100% CP	24 horas	1	0	38601	600	64.3	64.2
		2	0	36154	600	60.3	
		3	0	40867	600	68.1	
	48 horas	1	0	48049	600	80.1	81.0
		2	0	47084	600	78.5	
		3	0	50713	600	84.5	
CP + C + CVT	24 horas	1	60CP + 5C + 35CVT	32720	600	54.5	54.4
		2	60CP + 5C + 35CVT	32983	600	55.0	
		3	60CP + 5C + 35CVT	32128	600	53.6	
	48 horas	1	60CP + 5C + 35CVT	33800	600	56.3	55.5
		2	60CP + 5C + 35CVT	33122	600	55.2	
		3	60CP + 5C + 35CVT	33001	600	55.0	
	24 horas	1	60CP + 10C + 30CVT	35535	600	59.2	57.5
		2	60CP + 10C + 30CVT	34539	600	57.6	
		3	60CP + 10C + 30CVT	33492	600	55.8	
	48 horas	1	60CP + 10C + 30CVT	36004	600	60.0	59.8
		2	60CP + 10C + 30CVT	35858	600	59.8	
		3	60CP + 10C + 30CVT	35761	600	59.6	
24 horas	1	60CP + 15C + 25CVT	36891	600	61.5	60.9	
	2	60CP + 15C + 25CVT	36572	600	61.0		
	3	60CP + 15C + 25CVT	36218	600	60.4		
48 horas	1	60CP + 15C + 25CVT	37011	600	61.7	61.7	
	2	60CP + 15C + 25CVT	37201	600	62.0		
	3	60CP + 15C + 25CVT	36889	600	61.5		

D). Absorción de bloques de concreto sometidos a carbonatación.

Tabla D.1 Absorción en bloques de referencia y sistema binario CP + C, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³								
Mezcla	Tiempo de curado	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Absorción (L/m ³)	Absorción (%)
Referencia 100% CP	24 horas	0	13681	14277	8093	13486	127.9	5.9
	48 horas	0	13392	13998	7946	13243	124.8	5.7
CP + C	24 horas	95CP + 5C	13424	14144	8110	13336	133.9	6.0
	48 horas	95CP + 5C	13391	14075	8012	13289	129.6	5.9
	24 horas	90CP + 10C	13498	14108	7984	13286	134.2	6.2
	48 horas	90CP + 10C	13494	14016	7998	13210	133.9	6.1
	24 horas	85CP + 15C	13235	13911	7816	13091	134.5	6.3
	48 horas	85CP + 15C	13576	14193	8005	13362	134.3	6.2

Nota: Los resultados mostrados es el promedio de dos bloques de concreto.

Tabla D.2 Absorción en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CV, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³								
Mezcla	Tiempo de curado	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Absorción (lts/m ³)	Absorción (%)
Referencia 100 % CP	24 horas	0	13681	14277	8093	13486	127.9	5.9
	48 horas	0	13392	13998	7946	13243	124.8	5.7
CP + C + CV	24 horas	60CP + 5C + 35CV	13407	14126	7985	13223	147.0	6.8
	48 horas	60CP + 5C + 35CV	13447	14192	8029	13286	147.0	6.8
	24 horas	60CP + 10C + 30CV	13398	14156	7966	13256	145.4	6.8
	48 horas	60CP + 10C + 30CV	13495	14198	7997	13298	145.1	6.8
	24 horas	70CP + 5C + 25CV	13361	14076	7984	13193	144.9	6.7
	48 horas	70CP + 5C + 25CV	13409	14029	7961	13150	144.9	6.7
	24 horas	70CP + 10C + 20CV	13303	13926	7873	13059	143.2	6.6
	48 horas	70CP + 10C + 20CV	13398	14014	7931	13143	143.2	6.6
	24 horas	70CP + 15C + 15CV	13402	14047	7968	13181	142.5	6.6
	48 horas	70CP + 15C + 15CV	13465	14088	7983	13222	141.9	6.6

Nota: Los resultados mostrados es el promedio de dos bloques de concreto.

Tabla D.3 Absorción en bloques de referencia y sistema ternario CP + C + CVT, curados con CO₂.

Curado con CO ₂ al 20% a 25 - 30 °C con H.R. 60-75% Rel. A/Cem 0.60 Consumo 167 kg/m ³								
Mezcla	Tiempo de curado	Sustitución en masa (%)	Plugar (g)	Pss (g)	Psum (g)	Pseco (g)	Absorción (lts/m ³)	Absorción (%)
Referencia 100 % CP	24 horas	0	13681	14277	8093	13486	127.9	5.9
	48 horas	0	13392	13998	7946	13243	124.8	5.7
CP + C + CVT	24 horas	60CP + 5C + 35CVT	13594	14091	7985	13223	142.2	6.6
	48 horas	60CP + 5C + 35CVT	13567	14120	7964	13255	140.5	6.5
	24 horas	60CP + 10C + 30CVT	13301	14042	7852	13186	138.3	6.5
	48 horas	60CP + 10C + 30CVT	13508	14090	7895	13235	138.0	6.5
	24 horas	60CP + 15C + 25CVT	13471	14133	7894	13280	136.7	6.4
	48 horas	60CP + 15C + 25CVT	13513	14058	7861	13212	136.5	6.4

Nota: Los resultados mostrados es el promedio de dos bloques de concreto.

ANEXO B
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE BLOQUES DE CONCRETO
EXPUESTOS AMBIENTALMENTE



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 1 100% CP

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 2 100% CP

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 1 90% CP + 10% C

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 2. 90% CP + 10% C

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 1 85% CP + 15% C

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 2. 85% CP + 15% C

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 1 50% CP + 10% C + 40% CV

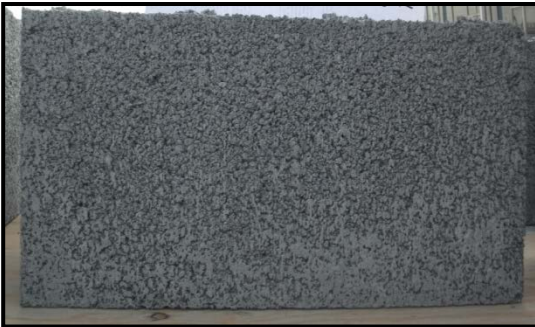
Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 2. 50% CP + 10% C + 40% CV

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 1. 60% CP + 10% C + 30CV

Nota: Imagen del mismo lado del bloque



3 de Enero del 2012



12 de Enero del 2012



1 de Febrero del 2012



21 de Febrero del 2012



26 de Marzo del 2012



30 de Abril del 2012



4 de Julio del 2012



26 de Septiembre del 2012

Bloque 2. 60% CP + 10% C + 30% CV

Nota: Imagen del mismo lado del bloque

ANEXO C

PROCEDIMIENTO PARA OBTENCIÓN DE Ca(OH)_2 , CaCO_3 Y FIJACION DE CO_2 MEDIANTE CURVAS TGA-DTA DE PASTAS CEMENTANTES.Pastas curadas a vapor

A). Determinación del contenido de hidróxido de calcio presente en las pastas cementantes.

A.1) Teniendo las curvas TGA-DTA de los diferentes sistemas cementantes, se determina el contenido de H_2O por la deshidratación de la Ca(OH)_2 (%Masa).

$$\% \text{H}_2\text{O}_{100\% \text{ CP}} = 4.4$$

$$\% \text{H}_2\text{O}_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 5.0$$

$$\% \text{H}_2\text{O}_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 5.7$$

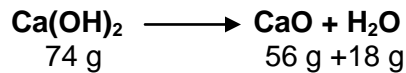
$$\% \text{H}_2\text{O}_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 6.4$$

$$\% \text{H}_2\text{O}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CV}} = 4.3$$

$$\% \text{H}_2\text{O}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CVT}} = 3.9$$

$$\% \text{H}_2\text{O}_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{ CVT}} = 4.9$$

A.2) Se calculan las masas molares presentes de la reacción de deshidratación (pico endotérmico entre 430 °C y 550 °C).



A.3) Utilizando las masas molares de los compuestos y el valor obtenido del contenido de H_2O , se determina el % CaO .

$$\% \text{CaO} = \frac{(\% \text{H}_2\text{O})(56)}{18}$$

$$\% \text{CaO}_{100\% \text{ CP}} = 13.7$$

$$\% \text{CaO}_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 15.5$$

$$\% \text{CaO}_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 17.7$$

$$\% \text{CaO}_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 20.0$$

$$\% \text{CaO}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CV}} = 13.4$$

$$\% \text{CaO}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CVT}} = 12.2$$

$$\% \text{CaO}_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{ CVT}} = 15.3$$

A.4) Con base a la "Ley de la conservación de las masas" y a los contenidos de % CaO y % H_2O se obtiene el % Ca(OH)_2 .

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = \% \text{CaO} + \% \text{H}_2\text{O}$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{100\% \text{ CP}} = 18.1$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 20.5$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 23.4$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 26.4$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{CV}} = 17.7$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{CVT}} = 16.1$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{CVT}} = 20.2$$

Tabla A. Resumen de contenidos de H₂O, CaO y Ca(OH)₂ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas a vapor.

Pasta	% H ₂ O	% CaO	% Ca(OH) ₂
100 CP	4.4	13.7	18.1
95 CP + 5 C	5.0	15.5	20.5
90 CP + 10 C	5.7	17.7	23.4
85 CP + 15 C	6.4	20.0	26.4
60 CP + 10 C + 30 CV	4.3	13.4	17.7
60 CP + 10 C + 30 CVT	3.9	12.2	16.1
60 CP + 15 C + 25 CVT	4.9	15.3	20.2

B) Determinación del contenido de carbonato de calcio presente en las pastas cementantes.

B.1) Teniendo las curvas TGA-DTA de los diferentes sistemas cementantes, se determina el contenido de CO₂ por la descomposición del CaCO₃ (%Masa).

$$\% \text{CO}_2_{100\% \text{ CP}} = 1.4$$

$$\% \text{CO}_2_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 1.4$$

$$\% \text{CO}_2_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 1.7$$

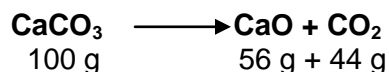
$$\% \text{CO}_2_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 1.5$$

$$\% \text{CO}_2_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{CV}} = 1.5$$

$$\% \text{CO}_2_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{CVT}} = 1.3$$

$$\% \text{CO}_2_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{CVT}} = 1.4$$

B.2) Se calculan las masas molares presentes de la reacción de descomposición (pico endotérmico entre 620 °C y 780 °C).



B.3) Utilizando las masas molares de los compuestos y el valor obtenido del contenido de CO₂, se determina el % CaO.

$$\% CaO = \frac{(\% CO_2)(56)}{44}$$

$$\%CaO_{100\% CP} = 1.8$$

$$\%CaO_{95\% CP + 5\% C} = 1.8$$

$$\%CaO_{90\% CP + 10\% C} = 2.2$$

$$\%CaO_{85\% CP + 15\% C} = 1.9$$

$$\%CaO_{60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 1.9$$

$$\%CaO_{60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 1.6$$

$$\%CaO_{60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 1.7$$

B.4) Con base a la “Ley de la conservación de las masas” y a los contenidos de % CaO y % CO₂ se obtiene el % CaCO₃.

$$\% CaCO_3 = \% CaO + \% CO_2$$

$$\%CaCO_3_{100\% CP} = 3.1$$

$$\%CaCO_3_{95\% CP + 5\% C} = 3.2$$

$$\%CaCO_3_{90\% CP + 10\% C} = 3.9$$

$$\%CaCO_3_{85\% CP + 15\% C} = 3.5$$

$$\% CaCO_3_{60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 3.4$$

$$\%CaCO_3_{60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 2.9$$

$$\%CaCO_3_{60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 3.1$$

Tabla B. Resumen de contenidos de CO₂, CaO y CaCO₃ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas a vapor.

Pasta	% CO ₂	% CaO	% CaCO ₃
100 CP	1.4	1.7	3.1
95 CP + 5 C	1.4	1.8	3.2
90 CP + 10 C	1.7	2.2	3.9
85 CP + 15 C	1.5	1.9	3.5
60 CP + 10 C + 30 CV	1.5	1.9	3.4
60 CP + 10 C + 30 CVT	1.3	1.6	2.9
60 CP + 15 C + 25 CVT	1.4	1.7	3.1

Pastas carbonatadas durante 24 horas.

C). Determinación del contenido de hidróxido de calcio presente en las pastas cementantes.

C.1) Teniendo las curvas TGA-DTA de los diferentes sistemas cementantes, se determina el contenido de H₂O por la deshidratación de la Ca(OH)₂ (%Masa).

$$\%H_2O_{100\% \text{ CP}} = 1.4$$

$$\%H_2O_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 0.9$$

$$\%H_2O_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 1.4$$

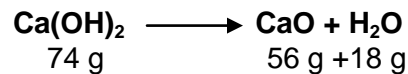
$$\%H_2O_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 2.3$$

$$\%H_2O_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CV}} = 2.1$$

$$\%H_2O_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CVT}} = 2.1$$

$$\%H_2O_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{ CVT}} = 2.3$$

C.2) Se calculan las masas molares presentes de la reacción de deshidratación (pico endotérmico entre 430 °C y 550 °C).



C.3) Utilizando las masas molares de los compuestos y el valor obtenido del contenido de H₂O, se determina el % CaO.

$$\% \text{ CaO} = \frac{(\% H_2O)(56)}{18}$$

$$\% \text{ CaO}_{100\% \text{ CP}} = 4.3$$

$$\% \text{ CaO}_{95\% \text{ CP} + 5\% \text{ C}} = 2.9$$

$$\% \text{ CaO}_{90\% \text{ CP} + 10\% \text{ C}} = 4.5$$

$$\% \text{ CaO}_{85\% \text{ CP} + 15\% \text{ C}} = 7.2$$

$$\% \text{ CaO}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CV}} = 6.4$$

$$\% \text{ CaO}_{60\% \text{ CP} + 10\% \text{ C} + 30\% \text{ CVT}} = 6.4$$

$$\% \text{ CaO}_{60\% \text{ CP} + 15\% \text{ C} + 25\% \text{ CVT}} = 7.2$$

C.4) Con base a la “Ley de la conservación de las masas” y a los contenidos de % CaO y %H₂O se obtiene el % Ca(OH)₂.

$$\% \text{ Ca(OH)}_2 = \% \text{ CaO} + \% \text{ H}_2\text{O}$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 100\% CP} = 5.7$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 95\% CP + 5\% C} = 3.8$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 90\% CP + 10\% C} = 5.9$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 85\% CP + 15\% C} = 9.5$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 8.5$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 8.5$$

$$\% \text{Ca(OH)}_2 \text{ 60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 9.5$$

Tabla C. Resumen de contenidos de H₂O, CaO y Ca(OH)₂ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas con CO₂ por 24 horas.

Pasta	% H ₂ O	% CaO	% Ca(OH) ₂
100 CP	1.4	4.3	5.7
95 CP + 5 C	0.9	2.9	3.8
90 CP + 10 C	1.4	4.5	5.9
85 CP + 15 C	2.3	7.2	9.5
60 CP + 10 C + 30 CV	2.1	6.4	8.5
60 CP + 10 C + 30 CVT	2.1	6.4	8.5
60 CP + 15 C + 25 CVT	2.3	7.2	9.5

D) Determinación del contenido de carbonato de calcio presente en las pastas cementantes.

D.1) Teniendo las curvas TGA-DTA de los diferentes sistemas cementantes, se determina el contenido de CO₂ por la descomposición del CaCO₃ (%Masa).

$$\% \text{CO}_2 \text{ 100\% CP} = 4.7$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ 95\% CP + 5\% C} = 8.4$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ 90\% CP + 10\% C} = 9.1$$

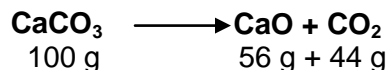
$$\% \text{CO}_2 \text{ 85\% CP + 15\% C} = 6.4$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ 60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 3.0$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ 60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 5.0$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ 60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 6.4$$

D.2) Se calculan las masas molares presentes de la reacción de descomposición (pico endotérmico entre 620 °C y 780 °C).



D.3) Utilizando las masas molares de los compuestos y el valor obtenido del contenido de CO₂, se determina el % CaO.

$$\% CaO = \frac{(\% CO_2)(56)}{44}$$

$$\%CaO_{100\% CP} = 6.0$$

$$\%CaO_{95\% CP + 5\% C} = 10.7$$

$$\%CaO_{90\% CP + 10\% C} = 11.6$$

$$\%CaO_{85\% CP + 15\% C} = 8.1$$

$$\%CaO_{60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 3.8$$

$$\%CaO_{60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 6.3$$

$$\%CaO_{60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 8.1$$

D.4) Con base a la “Ley de la conservación de las masas” y a los contenidos de % CaO y % CO₂ se obtiene el % CaCO₃.

$$\% CaCO_3 = \%CaO + \%CO_2$$

$$\%CaCO_3_{100\% CP} = 10.7$$

$$\%CaCO_3_{95\% CP + 5\% C} = 19.1$$

$$\%CaCO_3_{90\% CP + 10\% C} = 20.7$$

$$\%CaCO_3_{85\% CP + 15\% C} = 14.5$$

$$\% CaCO_3_{60\% CP + 10\% C + 30\%CV} = 6.8$$

$$\%CaCO_3_{60\% CP + 10\% C + 30\%CVT} = 11.3$$

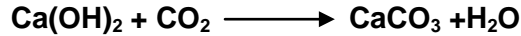
$$\%CaCO_3_{60\% CP + 15\% C + 25\%CVT} = 14.5$$

Tabla D. Resumen de contenidos de CO₂, CaO y CaCO₃ en pastas analizadas por TGA – DTA, curadas con CO₂ por 24 horas.

Pasta	% CO ₂	% CaO	% CaCO ₃
100 CP	4.7	6.0	10.7
95 CP + 5 C	8.4	10.7	19.1
90 CP + 10 C	9.1	11.6	20.7
85 CP + 15 C	6.4	8.1	14.5
60 CP + 10 C + 30 CV	3.0	3.8	6.8
60 CP + 10 C + 30 CVT	5.0	6.3	11.3
60 CP + 15 C + 25 CVT	6.4	8.1	14.5

Determinación de fijación de CO₂ en pastas.

E) Considerando la masa molar de los compuestos en el proceso de carbonatación y que la relación molar entre reaccionantes y productos es la misma, se tiene la siguiente información:



Compuesto	Masa molar g	Relación molar
Ca(OH) ₂	74	1 mol de Ca(OH) ₂ = 74 g
CO ₂	44	1 mol de CO ₂ = 44 g
CaCO ₃	100	1 mol de CaCO ₃ = 100 g
H ₂ O	18	1 mol de H ₂ O = 18 g

E.1) Teniendo el contenido de carbonatos de calcio de las curvas TGA-DTA (obtenidos en los puntos B y D), así como la cantidad de pasta utilizada en las mezclas para los bloques de concreto, se determina la cantidad de carbonatos de calcio en masa para un m³.

$$\text{Masa de carbonato de calcio (kg/m}^3\text{)} = \frac{(\% \text{ Carbonatos de curva TGA-DTA})(\text{Masa de la pasta } (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}))}{100 \%}$$

E.2) Utilizando relación molar y el valor obtenido de la masa de carbonato de calcio, mediante análisis estequiométrico, se obtiene la cantidad de moles en dicha masa de carbonato de calcio.

$$1 \text{ mol de CaCO}_3 \text{ ----- } 100 \text{ g}$$

$$X \text{ moles ----- masa de CaCO}_3 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

E.3) Conociendo que la relación molar entre los compuestos es de 1:1, a partir de los moles obtenidos en la masa de carbonato de calcio, se determina la masa de cada uno de los compuestos presentes en la reacción de carbonatación.

Ejemplo para CO₂.

$$X \text{ moles ----- } X \text{ masa de CO}_2 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$1 \text{ mol de CO}_2 \text{ ----- } 44 \text{ g}$$

Los resultados obtenidos de las masas de cada compuesto se muestran en la Tabla E.

Tabla E. Masas de CaCO₃, Ca(OH)₂, CO₂ y H₂O en pasta cementante.

Antes de carbonatación, para 267 kg/m ³ de pasta				
Pasta	Masa de CaCO ₃ kg	Masa de Ca(OH) ₂ kg	Masa de CO ₂ kg	Masa de H ₂ O kg
100 CP	8.3	6.1	3.6	1.5
95CP + 5C	8.6	6.3	3.8	1.5
90CP + 10C	10.4	7.7	4.6	1.9
85CP + 15C	9.4	6.9	4.1	1.7
60CP + 10C + 30CV	9.1	6.7	4.0	1.6
60CP + 10C + 30CVT	7.7	5.7	3.4	1.4
60CP + 15C + 25CVT	8.3	6.1	3.6	1.5

Después de carbonatación, para 267 kg/m ³ de pasta				
Pasta	Masa de CaCO ₃ kg	Masa de Ca(OH) ₂ kg	Masa de CO ₂ kg	Masa de H ₂ O kg
100 CP	28.6	21.2	12.6	5.1
95CP + 5C	51.0	37.8	22.5	9.2
90CP + 10C	55.3	40.9	24.3	10.0
85CP + 15C	38.7	28.7	17.0	7.0
60CP + 10C + 30CV	18.2	13.4	8.0	3.3
60CP + 10C + 30CVT	30.2	22.3	13.3	5.4
60CP + 15C + 25CVT	38.7	28.7	17.0	7.0

E.4) La fijación del CO₂ se obtiene de la diferencia de masas de CO₂ antes y después de la carbonatación, los resultados se muestran a continuación:

Tabla EE. Fijación de CO₂ en pasta cementante.

Para 267 kg/m ³ de pasta	
Pasta	CO ₂ Fijado kg
100 CP	9.0
95CP + 5C	18.7
90CP + 10C	19.7
85CP + 15C	12.9
60CP + 10C + 30CV	4.0
60CP + 10C + 30CVT	9.9
60CP + 15C + 25CVT	13.4

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Jonathan Alfonso Del Real Dávalos

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en
Materiales de Construcción

Tesis: Influencia del curado con CO₂ en mampostería fabricada con sistemas cementantes ternarios

Campo de estudio: Materiales de Construcción. Mampostería.

Biografía:

Nacido en Monterrey, Nuevo León, el 22 de abril de 1987, hijo de José T. Del Real Salazar y Sandra L. Dávalos Torres.

Educación:

Enero 2005- Diciembre 2009

Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León

Experiencia Profesional:

Enero – Junio 2009

Departamento de Geotecnia. Instituto de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.
Jefe Directo: Ing. Santiago Salazar Salinas

Enero 2010 – Diciembre 2012

Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, Instituto de Ingeniería Civil
Jefe Directo: Dr. José M. Mendoza Rangel

Contacto:

Correo electrónico: alfonsodelreal_ic@hotmail.com

alfonso10_@hotmail.com