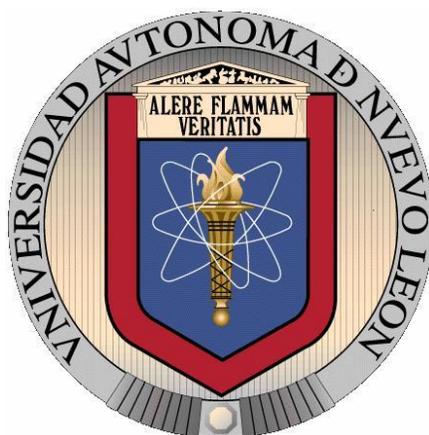


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DEL MUCÍLAGO DE NOPAL COMO REDUCTOR DE RETRACCIÓN EN
CONCRETO AUTO-CONSOLIDABLE**

POR:

RICARDO DE LEÓN CASTILLO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Materiales de Construcción**

ASESORES:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Dr. César Antonio Juárez Alvarado

JUNIO, 2012



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-185-2012

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

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

Estimado Ing. Vargas:

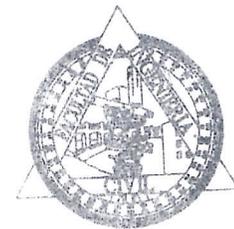
Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. Ricardo de León Castillo**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento 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 13 de junio del 2012.

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



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

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 y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Oficio: DTC-026/2012

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente.-

Por medio de la presente y en atención a la designación que me ha hecho como director de la tesis "EVALUACIÓN DEL MUCÍLAGO DE NOPAL COMO REDUCTOR DE RETRACCIÓN EN CONCRETO AUTO-CONSOLIDABLE", presentada por el Ing. Ricardo de León Castillo, como requisito preliminar para efectuar el examen de grado de **Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, hago de su conocimiento que he leído y evaluado la calidad de la citada tesis, habiendo indicado oportunamente mis comentarios, sugerencias y correcciones a dicho documento.

En virtud de que el alumno ha realizado las modificaciones necesarias, informo a Usted que, por mi parte, el documento de tesis es **APROBADO** para que el alumno **Ricardo de León Castillo** pueda realizar la presentación del examen de grado de Maestría en Ciencias.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
Alere Flammam Veritatis
Ciudad Universitaria, 12 de junio de 2012

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
Director de la Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente.-

Por medio de la presente y en atención a la designación que me ha hecho como codirector de la tesis **“EVALUACIÓN DEL MUCÍLAGO DE NOPAL COMO REDUCTOR DE RETRACCIÓN EN CONCRETO AUTO-CONSOLIDABLE”**, presentada por el Ing. Ricardo de León Castillo, como requisito preliminar para efectuar el examen de grado de **Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, hago de su conocimiento que he leído y evaluado la calidad de la citada tesis, habiendo indicado oportunamente mis comentarios, sugerencias y correcciones a dicho documento.

En virtud de que el alumno ha realizado las modificaciones necesarias, informo a Usted que, por mi parte, el documento de tesis es **APROBADO** para que el alumno **Ricardo de León Castillo** pueda realizar la presentación del examen de grado de Maestría en Ciencias.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
Alere Flammam Veritatis
Ciudad Universitaria, 12 de junio de 2012



DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Codirector de la Tesis



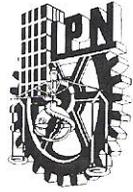
Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



SECRETARÍA
DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA



"90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Economía"

"50 Aniversario de la Escuela Superior de Enfermería y Obstetricia"
40 Aniversario de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas"

INFORMACIÓN PÚBLICA

FECHA: 08 de junio de 2012

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente

Por medio de la presente y en atención a la designación que me ha hecho como evaluador de la tesis "**EVALUACIÓN DEL MUCÍLAGO DE NOPAL COMO REDUCTOR DE RETRACCIÓN EN CONCRETO AUTO-CONSOLIDABLE**", presentada por el **Ing. Ricardo de León Castillo**, como requisito preliminar para efectuar el examen de grado de **Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, hago de su conocimiento que he leído y evaluado la calidad de la citada tesis, habiendo indicado oportunamente mis comentarios, sugerencias y correcciones a dicho documento.

En virtud de que el alumno ha realizado las modificaciones necesarias, informo a Usted que, por mi parte, el documento de tesis es **APROBADO** para que el alumno **Ricardo de León Castillo** pueda realizar la presentación del examen de grado de Maestría en Ciencias.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Atentamente

DR. PRISCILIANO FELIPE DE JESÚS CANO BARRITA
PROFESOR INVESTIGADOR

c.c.p.- Expediente y minutario

RPP/rrs*

Kamal H. Khayat, Ph.D., FACI
Vernon and Marlaee Jones Professor of Civil Engineering
Director
Center for Infrastructure Engineering Studies
224 Engineering Research Laboratory
Rolla, MO 65409

Tel: (573) 341-6623
Fax: (573) 341-6215
E-mail: khayatk@mst.edu

13 June 2012

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez
Head of Postgraduate Studies and Research
School of Civil Engineering
Universidad Autónoma de Nuevo León

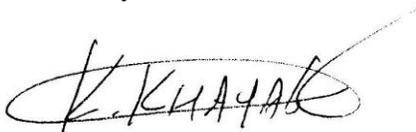
RE: Ricardo de-León-Castillo Thesis Approval

Through this letter and in response to my designation as a Reviewer of the thesis entitled "Evaluación del Mucilago de Nopal Como Reductor de la Retracción en Concreto Auto-Consolidable", presented by Mr. Ricardo de-León-Castillo, as a prerequisite to obtain the degree of the Master of Science Program with orientation on Construction Materials, I acknowledge that I have read and evaluated the thesis and have indicated my comments, suggestions and corrections to the document on time.

Considering that the student has made the necessary modifications, I feel that the thesis document can be **APPROVED** so that the student, **Ricardo de Leon Castillo**, can carry out his presentation to satisfy the requirements of the Master of Science degree from the Universidad Autónoma de Nuevo León.

Please do not hesitate to contact me if you need any further information. Please receive my best regards.

Sincerely,



AGRADECIMIENTOS

Los nombres de los principales colaboradores en la realización de este trabajo se encuentran en la portada del mismo, sin embargo, para que este se pudiera llevar a cabo, fue requerida la participación de un gran número de involucrados, en este apartado les expreso mi sincero agradecimiento.

Todo empieza y termina con el permiso del Señor Todopoderoso, gracias por darme esta oportunidad.

A mi familia, por la formación recibida, por su comprensión y paciencia, muy en especial a mi madre, de quien solo he recibido bendiciones y a ti Mayo, por creer en mí y brindarme tu apoyo. A mis abuelos, los mejores ejemplos a seguir que pude haber tenido y a mi tía Juanita, espero y notes que tu esfuerzo no ha sido en balde.

Al Dr. Alejandro Durán, por sus valiosos consejos técnicos, científicos y morales. Al Dr. Cesar A. Juárez como co-director de tesis y a los revisores externos de la misma; el Dr. Felipe de Jesús Cano y el Dr. Kamal Khayat.

A mis profesores, por su esfuerzo al transmitir sus conocimientos y experiencia.

Al personal de los laboratorios de Tecnología del Concreto y de Investigación de Materiales de Construcción del Instituto de Ingeniería Civil, FIC-UANL por su disposición y atenciones en el desarrollo de este proyecto, en especial a Iliana Garza y a Gumaro Tovar.

Al Dr. Charles Nmai y al Lic. Daniel Canizales de la empresa BASF por el suministro de los aditivos químicos empleados.

A los estudiantes Margarita Ley y Oscar Narváez quienes colaboraron en el proyecto en el verano de investigación del 2011.

Al Dr. Javier de la Rosa y a la Ing. Nubia Torres, por facilitarme el tensiómetro y capacitarme en el uso del mismo.

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada, al PAICYT por el apoyo a esta investigación y a la Subdirección de Estudios de Posgrado de la FIC-UANL a cargo del doctor Pedro Valdez por el apoyo brindado durante los últimos meses.

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron aun más gratificante mi estancia en esta institución; en especial a los M.C. Alejandro Herrera, Héctor Campos, Aldo Campos y Armando Escobar; a los ingenieros Jonathan Del Real, Eduardo Garza, Omar Y. Díaz, Noé Salas, Octavio Rivera, Mirna S. Guevara, Anayanci Campos, Cesar Aguilar y Rogelio Soto, y a los arquitectos Bárbara Ayub y Eric E. Sánchez.

DEDICATORIAS

A mi familia, el esfuerzo realizado durante mis estudios de maestría es en parte suyo.

A mi madre, Maricela Castillo, la palabra madre encierra todo por lo que te dedico este trabajo.

A mis queridos sobrinos, Deo, Chris, May y Dereck, espero ser tan buen ejemplo y guía para ustedes como los que yo he tenido.

CONTENIDO:

Agradecimientos	vii
Dedicatoria	viii
Contenido	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiv
Resumen	xviii

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	2
1.1 FUNDAMENTOS	2
1.1.1 El concreto	2
1.1.1.1 El concreto auto-consolidable	4
1.1.1.2 El concreto ligero	6
1.1.1.3 Concreto reforzado	9
1.1.2 Deterioro del concreto	9
1.1.2.1 Congelamiento – deshielo	10
1.1.2.2 Ataque de sulfatos	10
1.1.2.3 Reacciones álcali-agregado	11
1.1.3 Corrosión del acero de refuerzo	12
1.1.3.1 Iones cloruro	12
1.1.3.2 Carbonatación	14
1.1.3.3 Efecto de la presencia de agrietamientos en la corrosión	17
1.1.4 Retracción	19
1.1.4.1 Etapas de retracción	20
1.1.4.2 Tipos de retracción	23
1.1.4.3 Importancia estructural de las retracciones	31
1.1.4.4 Técnicas innovadoras de mitigación de la retracción	33
1.1.5 El nopal	34
1.1.5.1 El mucílago del nopal	37
1.2 ANTECEDENTES	39
1.2.1 Método de diseño	39
1.2.2 Características de trabajabilidad	39
1.2.3 Agregado ligero en el concreto	41
1.2.3.1 Concreto de peso ligero	41
1.2.3.2 Curado interno	42
1.2.4 Reductores de retracción	45
1.2.5 Mucílago de nopal	49
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	51
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	52
1.4.1 Objetivo general	52

Contenido

1.4.2	Objetivos específicos.	52
1.5	HIPÓTESIS.	53
CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.		55
2.1	Diseño de mezcla.	58
2.1.1	Caracterización de los agregados.	58
2.1.2	Compacidad máxima de los agregados.	60
2.1.3	Puntos de saturación	61
2.1.4	Métodos de prueba para el concreto fresco	62
2.1.4.1	Extensión del revenimiento	62
2.1.4.2	Caja L	63
2.1.4.3	Embudo V	64
2.1.4.4	Anillo J	65
2.1.4.5	Segregación estática	65
2.1.4.6	Contenido de aire	66
2.1.4.7	Peso volumétrico	66
2.3	Curado interno	67
2.4	Soluciones para saturación del agregado ligero	72
2.4.1	Agua potable	73
2.4.3	Aditivo reductor de la retracción (SRA)	74
2.4.2	Solución acuosa de mucilago de nopal.	74
2.4.2.1	Extracción del mucilago de nopal	74
2.4.4	Saturación de los agregados ligeros.	76
2.5	Dosificación resultante de las mezclas.	76
2.5.1	Concreto de peso normal	76
2.5.2	Concreto de peso ligero	77
2.6	Pruebas al concreto en estado endurecido.	78
2.6.1	Pruebas mecánicas	78
2.6.2	Cambios volumétricos.	79
2.6.3	Indicadores de durabilidad.	80
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.		84
3.1	Propiedades en estado fresco.	84
3.1.1	Concreto de peso normal.	84
3.1.2	Concreto de peso ligero.	85
3.2	Propiedades mecánicas	85
3.2.1	Resistencia a compresión	86
3.2.1.1	Concreto de peso normal.	86
3.2.1.2	Concreto de peso ligero.	87

Contenido

3.2.2	Modulo de elasticidad. -----	90
3.2.2.1	Concreto de peso normal.-----	91
3.2.2.2	Concreto de peso ligero.-----	92
3.2.3	Tensión por compresión diametral. -----	92
3.2.3.1	Concreto de peso normal.-----	92
3.2.3.2	Concreto de peso ligero.-----	95
3.3	Cambios volumétricos-----	97
3.3.1	Deformación autógena. -----	97
3.3.1.1	Concreto de peso normal -----	97
3.3.1.2	Concreto de peso ligero.-----	99
3.3.2	Retracción por secado.-----	100
3.3.2.1	Concreto de peso normal -----	100
3.3.2.2	Concreto de peso ligero -----	103
3.4	Indicadores de durabilidad -----	105
3.4.1	Prueba rápida de permeabilidad a los iones cloruro -----	105
3.4.1.1	Concreto de peso normal -----	105
3.4.1.2	Concreto de peso ligero -----	107
3.4.2	Carbonatación acelerada.-----	109
3.4.2.1	Concreto de peso normal -----	109
3.4.2.2	Concreto de peso ligero -----	111
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES -----		115
CAPÍTULO 5: RECOMENDACIONES -----		118
REFERENCIAS -----		120
ANEXOS-----		130

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación taxonómica del nopal	36
Tabla 2. Composición de 100 g de nopal fresco [De la Rosa y Santana 2001].....	37
Tabla 3. Composición del mucilago Opuntia ficus Indica (g/100g de muestra) [Sepúlveda et al, 2007].....	38
Tabla 4. Peso Molecular en mucílago de Opuntia spp. Según diferentes estudios. Citados por Sáenz et al. (2006).	38
Tabla 5. Características de trabajabilidad, métodos de prueba y valores recomendados [Hwang et al, 2006].	40
Tabla 6. Descripción de las 11 mezclas producidas.....	56
Tabla 7. Resumen de las propiedades físicas de los agregados empleados en la experimentación.....	59
Tabla 8. Resumen de parámetros objetivo.....	67
Tabla 9. Coeficientes para calcular la retracción química debió a la hidratación del cemento	69
Tabla 10. Resultados de la caracterización de las soluciones.	76
Tabla 11. Proporciones de las mezclas de peso normal.	77
Tabla 12. Proporciones de las mezclas de peso ligero.	78
Tabla 13. Propiedades en estado fresco de los SCC.....	84
Tabla 14. Propiedades en estado fresco de los SCLC.	85
Tabla 15. Resistencia a compresión promedio de los concretos de peso normal.....	86
Tabla 16. Ganancia o pérdida de resistencia a compresión de los SCC con respecto a la mezcla de referencia, R.....	87
Tabla 17. Resistencia a compresión promedio de los concretos de peso ligero.....	88
Tabla 18. Ganancia o pérdida de resistencia a compresión de los SCLC con respecto a la mezcla de referencia, L.....	88
Tabla 19. Modulo de elasticidad promedio de los concretos de peso normal.....	91
Tabla 20. Modulo de elasticidad promedio de los concretos de peso ligero.....	92
Tabla 21. Resistencia indirecta a tensión y variación de los ensayos de SCC.	93
Tabla 22. Resistencia indirecta a tensión promedio de los SCLC.....	95

Tabla 23. Tiempo que le toma al espécimen regresar a sus dimensiones originales, es decir; pasar de expansión a retracción. Se empleó el tramo entre 6 y 12 días, de la figura 73 y se considera que se mantendrá constante.	98
Tabla 24. Retracción por secado de los SCC de peso normal.....	101
Tabla 25. Retracción por secado de los SCLC.....	103
Tabla 26. Variación en la carga total pasada.	107
Tabla 27. Variación en la carga total pasada, en los SCLC.....	109
Tabla 28. Resultados promedio del ensaye colorimétrico con fenolftaleína en los SCC de peso normal.	109
Tabla 29. Reducción de la profundidad de carbonatación para los SCC de peso normal, con respecto a la referencia (R), a las los tiempos de exposición de 14 y 91 días.....	110
Tabla 30. Pendiente de las líneas de tendencia del ensaye colorimétrico con fenolftaleína para los SCC.....	111
Tabla 31. Resultados promedio del ensaye colorimétrico con fenolftaleína en los SCC.	112
Tabla 32. Reducción de la profundidad de carbonatación para los SCLC, con respecto a la referencia (L) para tiempos de exposición de 14 y 91 días.	112
Tabla 33. Pendiente de las líneas de tendencia del ensaye colorimétrico con fenolftaleína para los SCLC.....	113

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Monterrey en 1940 ¹	2
Figura 2. Monterrey en el 2005 ¹	2
Figura 3. Pirámide de los nichos, zona arqueológica, el Tajín, Veracruz, México. ²	3
Figura 4. Panteón de Agripa, Roma. ³	3
Figura 5. Pila de concreto con cimbra lista para el colado del cabezal. ⁴	3
Figura 6. Edificio de concreto en construcción. ⁵	3
Figura 7. Colado con SCC (a). ⁶	4
Figura 8. Colado de SCC (b). ⁷	4
Figura 9. Elemento prefabricado con SCC. ⁸	6
Figura 10. Elemento de la figura 9 colocado. ⁸	6
Figura 11. Colado de entrepiso con concreto ligero. ⁹	7
Figura 12. Tipos de agregados ligero usado en el logro de determinada resistencia mecánica. [Harding, 1995].....	8
Figura 13. Esquema del fenómeno electroquímico de la Corrosión por Cl- [Cobo, 2002].....	13
Figura 14. Proceso de Carbonatación del Concreto [Cobo, 2002].....	15
Figura 15. Influencia de la A/Cm en la velocidad de carbonatación [Cobo, 2002].....	16
Figura 16. Influencia del contenido en cemento en la profundidad de carbonatación [Cobo, 2002].....	16
Figura 17. Influencia de la HR en la profundidad de carbonatación [Cobo, 2002]	16
Figura 18. Retracción por secado a edad temprana en una losa de azotea. ¹⁰	18
Figura 19. Reparación de grietas por retracción en muro. ¹¹	18
Figura 20. Diagrama de etapas y tipos de retracción.	20
Figura 21. Fases de retracción a edad temprana [Mehta y Monteiro 1993]......	21
Figura 22. Acumulación de la retracción a edad temprana y a largo plazo, con varios ambientes de curado en el primer día. Viento = 2 m/s (45 mph), H.R. (seco) = 40%. H.R. (húmedo) = 100%.....	22
Figura 23. Tamaño típico de poros y sólidos en la pasta de cemento hidratada [Metha et al 2005].....	25
Figura 24. Los esfuerzos empujan el menisco del agua más abajo entre dos partículas de cemento debido a la transferencia de humedad y el desarrollo de la presión capilar. [Radocea 1992].....	26

Figuras

Figura 25. Esquema mostrando la relación entre la contracción química y autógena. [Kosmatka et al, 2004].....	28
Figura 26. Planta de nopal, nótese la derivación del tronco. ¹²	35
Figura 27. Plantío de nopal. ¹³	35
Figura 28. Configuración del espécimen para medir la tendencia al agrietamiento utilizado por Loser y Leeman [2009].	46
Figura 29. División en etapas del programa experimental.....	57
Figura 30. Distribución granulométrica del agregado grueso calizo, reconocido en la región como “gravilla”.	59
Figura 31. Distribucion granulometrica de los agregados finos, caliza y pumicita.....	59
Figura 32. Combinacion de agregados para alcanzar la maxima compacidad	60
Figura 33. Densidad de empaquetamiento y contenido de vacios para las combinaciones de agregado.....	60
Figura 34. Mezcladora para pasta y morteros.....	61
Figura 35. Cono Marsh y probeta.....	61
Figura 36. Determinación del contenido óptimo de aditivo superplastificante.....	62
Figura 37. Cono de Abrams y la máxima extensión del SCC.	63
Figura 38. Caja L típica. ¹⁴	64
Figura 39. Caja L empleada en esta investigación.....	64
Figura 40. Embudo V.....	64
Figura 41. Anillo J.	65
Figura 42. Ensayo de estabilidad estática GTM.....	66
Figura 43. Absorción continua de la arena de pumicita.	69
Figura 44. Desorción de la arena de pumicita.	70
Figura 45. Viscosímetro Prookfield DV II.....	72
Figura 46. Sistema completo del tensiómetro KSV Sigma 701.....	73
Figura 47. Posicionamiento del frasco empleado para la determinación.	73
Figura 48. Anillo empleado.	73
Figura 49. Resultado de tensión superficial para el agua potable	73
Figura 50. Cladodio de nopal tipo.....	74
Figura 51. Reducción del cladodio de nopal.....	74

Figuras

Figura 52. Hervido del nopal.....	75
Figura 53. Reposo de la solución obtenida.....	75
Figura 54. Muestras de las soluciones de mucilago para los análisis de viscosidad y tensión superficial.....	76
Figura 55. Reposo de los especímenes en laminas de plástico acanaladas.....	79
Figura 56. Espécimen y medidor de la deformación autógena.....	79
Figura 57. Equipo Proove'it para la PRPC de Germman Instruments.....	80
Figura 58. Montaje de las probetas para la PRPC.....	80
Figura 59. Cámara de carbonatación.....	81
Figura 60. R a 14 días de carbonatación acelerada.....	82
Figura 61. IC a 14 días de carbonatación acelerada.....	82
Figura 62. ICNA a 14 días de carbonatación acelerada.....	82
Figura 63. IC-MNA a 14 días de carbonatación acelerada.....	82
Figura 64. Resistencia a compresión de los SCC.....	87
Figura 65. Resistencia a compresión de los SCLC.....	89
Figura 66. Modulo de elasticidad de SCC.....	91
Figura 67. Modulo de elasticidad de los SCC.....	92
Figura 68. Tensión por compresión diametral SCC.....	93
Figura 69. Resistencia indirecta a tensión de los SCC, dentro de la barra se muestra la pendiente de la recta entre 28 y 91 días, de la figura 68.....	94
Figura 70. Resistencia indirecta a tensión de los SCLC.....	96
Figura 71. Resistencia indirecta a tensión de los SCLC, dentro de la barra se muestra la pendiente de la recta entre 28 y 91 días, de la figura 70.....	96
Figura 72. Deformación autógena en la fracción mortero del SCC, monitoreada durante 45 horas después del fraguado final.....	97
Figura 73. Deformación autógena en la fracción mortero del SCC.....	98
Figura 74. Deformación autógena en la fracción mortero del SCLC, durante las primeras horas después del fraguado final.....	99
Figura 75. Deformación autógena de la fracción mortero de los SCLC.....	100
Figura 76. Retracción por secado de los SCC de peso normal.....	102
Figura 77. Retracción por secado en los SCC, a los 3 meses de observación.....	102
Figura 78. Retracción por secado de los SCLC.....	104

Figuras

Figura 79. *Retracción por secado en los SCLC, a los 3 meses de observación.104*

Figura 80. *Expresión de la carga total pasada con respecto de la mezcla R.....106*

Figura 81. *Reducción de la carga pasada entre las edades de ensaye, 28 y 91 días, en los SCC.
.....106*

Figura 82. *Expresión de la carga total pasada con respecto de la mezcla L.108*

Figura 83. *Reducción de la carga pasada entre las edades de ensaye, 28 y 91 días, en los
SCLC.108*

Figura 84. *Profundidades de carbonatación para los SCC.110*

Figura 85. *Profundidades de carbonatación para los SCLC.....113*

Resumen

En la tecnología del concreto moderna, la estabilidad dimensional y las propiedades de transporte se han convertido en parámetros clave para la selección y la prescripción de este material, ya que para algunos ambientes de servicio o requerimientos de proyecto el comportamiento mecánico no es suficiente para garantizar la durabilidad de la estructura.

El suministro de un curado eficiente en la construcción con concreto es una etapa clave para complementar las acciones orientadas a incrementar la durabilidad, y las propiedades mecánicas, sin embargo en concretos de alto comportamiento como los concretos auto-consolidables, el curado convencional con agua puede no resultar eficiente debido al alto nivel de densificación de la matriz cementante logrado en estos concretos. El alto contenido de material cementante y la bajas relaciones agua/material cementante, con los que típicamente se producen estos concretos es un factor que incrementa el potencial de retracción y del consecuente agrietamiento, atribuible a que estos concretos pueden presentar mayor retracción a edad temprana (autógena). Los agrietamientos pueden facilitar el ingreso de agentes que deterioran tanto el concreto como el acero de refuerzo. Para contrarrestar esta problemática, el curado interno ha demostrado ser una tecnología viable, la cual recientemente ha sido mejorada mediante el uso de aditivos que modifican propiedades de la solución para el curado interno, como la tensión superficial y la viscosidad, con lo cual los efectos benéficos de esta tecnología se ven mejorados.

En este proyecto, se investigó una solución acuosa de mucilago de nopal como aditivo para mejorar el curado interno en concretos auto-consolidables de peso normal y ligeros. Se estudiaron dos modos de dosificación; como solución para el curado interno y como aditivo dosificado directamente en la mezcla. Se determinó una serie de propiedades para evaluar el efecto de la solución acuosa con mucilago de nopal, y estas fueron: la retracción autógena (ASTM C 1698), la retracción por secado (ASTM C 157) la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloro (ASTM C 1202) y la carbonatación acelerada. Adicionalmente se realizó la determinación de propiedades clave en estado fresco y estado endurecido.

Resumen

Desde un enfoque práctico, los resultados obtenidos ilustran que en los concretos auto-consolidables estudiados, la incorporación de la solución acuosa con mucilago de nopal, introducida al concreto como solución para el curado interno o como aditivo en la mezcla, no demerita las propiedades mecánicas e induce beneficios de marginales a significativos en la estabilidad volumétrica y en la impermeabilidad del concreto al reducir la retracción autógena, la permeabilidad a los iones cloro y la carbonatación.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 FUNDAMENTOS.

1.1.1 El concreto.

El estilo de vida plenamente sedentaria de la humanidad dio paso al desarrollo de la cultura tal como la concebimos hoy. Las religiones adoptaron las formas necesarias para el nuevo estilo de vida y se desarrollaron las ciudades, la arquitectura y la urbanística [García, 2005]. El constante crecimiento de las ciudades y de las necesidades de sus habitantes de infraestructura de calidad, ha dado paso a la evolución de la construcción, y por tanto, de los materiales empleados. Hoy en día, claramente se puede relacionar el progreso de una economía con la presencia de infraestructura de calidad [Foro económico mundial, 2012]. Las figuras 1 y 2 son ejemplo esa “evolución” de la infraestructura de una ciudad.

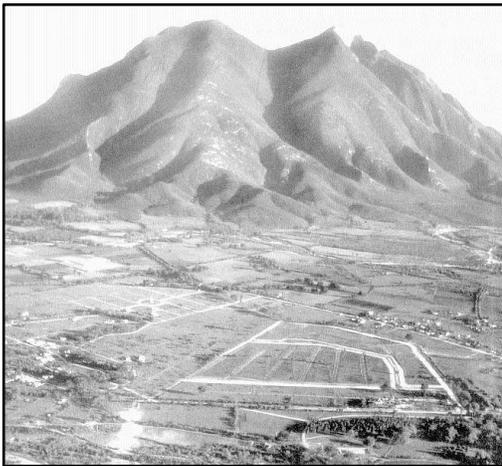


Figura 1. Monterrey en 1940¹



Figura 2. Monterrey en el 2005¹

¹<http://tonionblanes.blogspot.mx/2009/11/cerro-de-la-silla-ayer-y-hoy-monterrey.html>

Un primer paso en la edificación fue el uso de los materiales localmente disponibles, sin someterlos a otro tratamiento más que el ajuste geométrico. No obstante, el hombre se descubrió forzado a revolucionar el uso de los materiales con miras a que las construcciones logaran resistir en servicio el mayor tiempo posible bajo las condiciones ambiente que los rodeaba.



Figura 3. Pirámide de los nichos, zona arqueológica, el Tajín, Veracruz, México.²



Figura 4. Panteón de Agripa, Roma.³

²<http://hiddenunseen.blogspot.mx/2011/09/amazing-pyramids-in-world.html>

³http://faculty.evansville.edu/rl29/art105/img/rome_extpantheon.jpg

Resultado de esta evolución surgió el cemento, un material indispensable en la construcción actual, proveedor de la sociedad en lo referente a vivienda, edificios comerciales, escuelas, hospitales, carreteras y puentes. Lo anterior se basa que el más importante uso del cemento radica en la producción de concreto, que no es más que la mezcla del cemento con agregados y agua resultando en una masa semifluida que al endurecer simulará a la roca. El concreto se ha colocado como un material esencial y virtualmente irremplazable en el ámbito de la construcción [Cembureau A, 2012].



Figura 5. Pila de concreto con cimbra lista para el colado del cabezal.⁴



Figura 6. Edificio de concreto en construcción.⁵

⁴<http://www.alvaconstruction.com/Services/Cast-In-Place-Concrete.aspx>

⁵<http://www.concretehomebuilding.info/>

Al 2010 la producción mundial de cemento fue de 3300 millones de toneladas [Cembureau B] y en cuanto a concreto se estima que anualmente se producen 3800

millones de metros cúbicos [Cement Association of Canada, 2012] lo que supera por mucho al acero con 1414 millones de toneladas métricas (181.3 millones de metros cúbicos, considerando una densidad de 7.85 ton/m³) [World Coal Association, 2012].

En México predomina la construcción a base de concreto, el INEGI [2009] divide la actividad de construir en varias partes, a decir; edificación, agua, riego y saneamiento, electricidad y comunicaciones, transporte, petróleo y petroquímica y construcción especiales. Como sucede alrededor del mundo, en nuestro país la principal actividad de la construcción es la edificación.



Figura 7. Colado con SCC (a).⁶



Figura 8. Colado de SCC (b).⁷

⁶http://wn.com/self-consolidating_concrete

⁷<http://dconl.com/article/2007roadbuilding400>

El inevitable y necesario actuar de la tecnología en lo referente al concreto ha permitido la creación de concretos muy fluidos (trabajables), de segregación despreciable y que, dependiendo su composición, presentan excelentes propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Tal es el desempeño de este concreto que se ha clasificado como un tipo de concreto de alto comportamiento, se le reconoce como concreto auto-consolidable (SCC, por sus siglas en inglés).

1.1.1.1 El concreto auto-consolidable.

El SCC es una relativamente nueva clase de concreto de alto comportamiento diseñado para dispersarse por su propio peso y facilitar el llenado de secciones restringidas o estructuras congestionadas de refuerzo, sin la necesidad de consolidación

mecánica y sin sufrir una separación significativa de los materiales constituyentes [Hwang, Khayat y Bonneau, 2006].

Por lo tanto el SCC, también conocido como concreto auto-compactable, es un concreto que debe de cumplir con las siguientes características para considerarse como tal [Ouchi et al., 2003]:

- Capacidad para fluir por su propio peso dentro de cimbras de geometría complicada, llenándolas por completo de manera uniforme.
- Capacidad para pasar a través áreas congestionadas de refuerzo, rodeando el mismo refuerzo por efecto de su peso propio.
- Alta resistencia a la segregación.

El uso del *SCC* permite colar un concreto altamente fluido que desarrolla propiedades mecánicas sin la necesidad de vibración. Su uso conduce a incrementos en la productividad y a la comodidad tareas de colocación, así como a un comportamiento mejorado en estado endurecido. En lo referente a la productividad, el uso de *SCC* puede reducir el costo de la mano de obra, acelerar los tiempos de construcción y desarrollar mayor flexibilidad en las operaciones y programación de colado [Khayat y Daczko 2002]. El uso de un *SCC* de alta fluidez, pero que a la vez mantiene también una gran cohesividad, permite también mayor flexibilidad en la selección de los materiales localmente disponibles, como son; la arena, el agregado grueso, los materiales cementantes y los fillers [Yurugi et al., 1995].

En cuanto al ambiente laboral, el uso de *SCC* permite la reducción de la contaminación acústica en el sitio de trabajo, especialmente crítica en las aéreas urbanas, su uso permite entonces la programación de algunas actividades de construcción que de otra manera se realizarían en horarios especiales. La reducción de la contaminación acústica es también crítica en plantas de prefabricados, su uso en estos lugares permite la creación de un ambiente de trabajo más ameno y en algunos países ayuda a disminuir las primas de los seguros en las plantas de prefabricados. El uso de *SCC* resulta en un acabado de calidad superior, un aspecto crítico en aplicaciones arquitectónicas, en construcción de elementos prefabricados, y en elementos colados en el lugar. Esto reduce la necesidad de

reparaciones superficiales (maquillado) y la ausencia de vibración conduce a incrementar la vida útil de las cimbras. Todas estas ventajas conducen a economizar tiempo y recursos, tanto humanos como materiales [Khayat y Daczko 2002].



Figura 9. Elemento prefabricado con SCC. ⁸



Figura 10. Elemento de la figura 9 colocado. ⁸

⁸<http://www.aximconcrete.com/default.aspx?pageid=122>

Como se puede leer en la sección anterior el uso del SCC trae consigo una serie de ventajas, que de sacarles provecho resultarán en un ahorro considerable de tiempo y dinero, a pesar de ello todos los materiales presentan aspectos negativos o puntos débiles o que desalientan a su aplicación extensiva.

En comparación con el concreto normal (CN) Las principales desventajas que presenta el SCC derivan del elevado requerimiento de polvo y aditivos (en particular los superplastificante), por lo que el costo del material es alto [The Concrete Society and BRE, 2005]. Se ha reportado que en la mayoría de los casos, el costo se incrementa en un rango de 20% a 60% comparado con un CN de resistencia similar [Nehdi et al., 2004; Ozawa, 2001]. Sin embargo, en estructuras muy grandes, el costo por el uso de SCC se redujo debido a los ahorros en la mano de obra y el tiempo de construcción [Billberg, 1999], [citado por Liu. 2009].

1.1.1.2 El concreto ligero.

El concreto ligero estructural puede consistir solamente de agregado de ligero o una combinación de agregado ligero con agregado normal, debe tener una resistencia a compresión mínima a los 20 días de 17 MPa y su densidad debe estar entre 1120 y 1920

kg/m³. Al demostrar sus buenas propiedades mecánicas y de durabilidad, este tipo de concreto ha sido empleado principalmente por la reducción de la carga muerta que permiten los agregados ligeros [ACI 213R-03].

En aplicaciones estructurales, el peso propio de la estructura del concreto es importante porque representa una gran porción del total de la carga. La reducción del peso propio en el concreto ligero reducirá las cargas de gravedad y masas inerciales, resultando en elementos de cimentación de dimensiones reducidas, pues las cargas recibidas son menores. Así mismo, el uso de concreto ligero puede ser de interés en aplicaciones de adaptación - remodelación, donde por razones arquitectónicas, una columna de concreto requiere de una camisa. Comparándolo con otros métodos como el acero o encamisado de concreto normal, un concreto ligero es menos susceptible a requerir adaptaciones costosas en la cimentación [Kowalsky et al 1999].



Figura 11. Colado de entrepiso con concreto ligero.⁹

⁹<http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=605>

El uso de concreto con agregado ligero en una estructura se basa a menudo en los costos totales. El concreto ligero puede costar más por unidad de volumen que el concreto de peso normal, pero la estructura completa puede costar menos como resultado de la reducción de la carga muerta y por ende el costo reducido de la cimentación [ACI 213R-03].

Las desventajas que presenta este tipo de concreto son [Valdez et al]:

- Los agregados ligeros podrían ser más caros que la grava común, pero esta diferencia podrá ser compensada con un menor costo en el transporte e incluso puede influir en el tipo de cimentación favorablemente.
- Debido a que el modulo de elasticidad es bajo se pueden producir mayores deformaciones a las de un concreto convencional.
- La contracción por secado es mayor a la del concreto convencional y por lo tanto debe tenerse en consideración en el dimensionamiento de los elementos constructivos.
- La falta de experiencia en el uso del concreto ligero lo cual genera inconvenientes en su uso y elaboración.
- Debido a su gran absorción se presentan problemas de corrosión del acero, aunque este problema se reduce al aumentar el recubrimiento del acero.

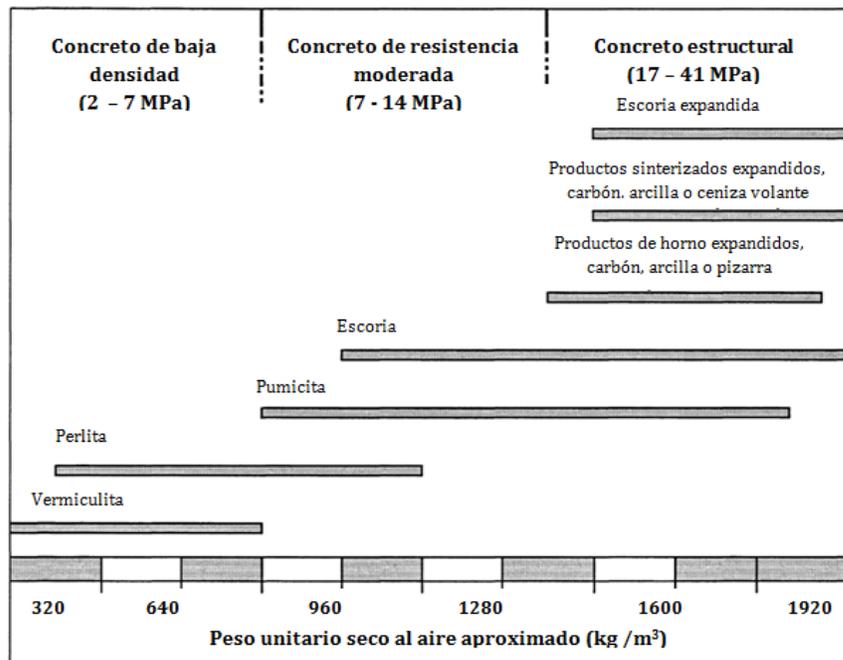


Figura 12. Tipos de agregados ligero usado en el logro de determinada resistencia mecánica. [Harding, 1995]

El concreto ligero es clasificado por su densidad y resistencia a la compresión. Estos parámetros son afectados principalmente por las propiedades del agregado elegido.

La figura 12 proporciona los tipos de agregado ligero empleados en el logro de cierta resistencia a compresión.

1.1.1.3 Concreto reforzado

A lo largo de la historia del concreto ha quedado manifiesta su versatilidad, debida en gran parte al surgimiento del concreto reforzado a principios del siglo XX. El concreto reforzado surge como un el sistema compuesto, basado en la inclusión de barras de acero que soportaran los esfuerzos de tensión. Como todas las nuevas tecnologías, los primeros acercamientos de los constructores de aquella época con el concreto reforzado se realizaron con cierta desconfianza [Simonnet C. 2009].

La unión acero–concreto en el concreto reforzado presenta una serie de ventajas; costo relativamente bajo, buena resistencia al clima y al fuego, buena resistencia a la compresión, amplio rango de aplicaciones, simplicidad en su fabricación y diseño, buena durabilidad, bajo costo de mantenimiento y consumo de energía reducido.

Al compararlo con el resto de los materiales de construcción disponibles, en la mayoría de las veces el concreto reforzado aparece como la opción adecuada. Factores como su comportamiento, costo y simplicidad de construcción lo hacen destacar sobre otras opciones. Pese a las muchas ventajas que acarrea su uso, al considerar la naturaleza compuesta del concreto reforzado y el origen industrializado de sus principales componentes, se han reconocido diversos ambientes de servicio en los que el inevitable deterioro se desarrolla con una rapidez mayor a la deseada.

1.1.2 Deterioro del concreto

En el concreto reforzado, las barras de acero y el cemento han sido sometidos a procesos que demandan enormes cantidades de energía para transformarlos, de su forma natural, a la habitual forma comercial. Durante su vida tratarán de volver a su forma original (más estable). El acero tratará de cambiar a las formas oxidadas del hierro, y algunas fases, producto de la hidratación del cemento, estarán disponibles para reaccionar bajo ciertas condiciones ambientales especiales. Es así, que al hablar de concreto reforzado tratamos con un material compuesto cuyos dos componentes principales son susceptibles a reaccionar con el medio ambiente circundante.

Frecuentemente el concreto es especificado solo en base a la resistencia a compresión, sin considerar las condiciones ambientales donde cumplirá su función estructural o sus condiciones de colocación. Como consecuencia, muchos concretos son parcial o totalmente incapaces de enfrentar su ambiente por un periodo de tiempo prolongado [Aïtcin, 2008].

La vida de servicio de una estructura depende de:

- la severidad de las condiciones ambientales entre los cuales la estructura tiene que cumplir su función estructural,
- la suficiencia del concreto usado para resistir estas condiciones ambientales
- los cuidados que se toman al momento de colocar y curar el concreto.

Al considerar la dificultad técnica y económica de modificar las condiciones ambientales locales para proteger el concreto de su ambiente natural, resultará mejor usar un concreto durable, adaptado a su ambiente y tomar precauciones en el colocado y curado con el fin de incrementar la vida de servicio de la estructura [Gjørsv 2000; Sakai and Banthia 2000, Sarja 2000] [Citado en Aïtcin, 2008].

Variadas son las formas que una estructura de concreto puede ser dañada por el ambiente que lo rodea. En los siguientes puntos se describen los principales.

1.1.2.1 Congelamiento - deshielo

Si se congela, el agua atrapada en el concreto puede crear una presión hacia afuera producto de la expansión. Al presentarse, este tipo de daño ocasionaría agrietamientos y botaduras. Como medio de prevención, se añaden inclusores de aire a la mezcla de concreto, con el propósito de que se formen burbujas microscópicas en la pasta de cemento y proporcionen espacio que soporte la expansión del agua congelada.

1.1.2.2 Ataque de sulfatos

El ataque de sulfatos en el concreto puede ocurrir cuando el suelo o el agua freática tienen un alto contenido de sulfatos y no se toman medidas para reducir este ataque, tales

como uso de baja relación agua-material cementante (A/Cm). El ataque de sulfatos es mayor en el concreto expuesto a ciclos de humectado-secado, tales como muros de cimentaciones y postes. El ataque de sulfato se presenta en una expansión al interior del concreto debido a la formación de compuestos por acción química o por cristalización de sales. A la fecha no existen métodos que permitan predecir la expansión generada por este efecto. Aunque se sabe que en condiciones severas, la expansión ha resultado mayor a 0.1% y el efecto perjudicial sobre el concreto puede causar agrietamiento y desintegración. [Kosmatka et al, 2004].

1.1.2.3 Reacciones álcali-agregado

Ciertos agregados reaccionan con los hidróxidos alcalinos en el concreto, causando expansión y agrietamiento durante un período de años. La reacción es mayor en aquellas partes de la estructura expuestas a humedad. El conocimiento de las características de los agregados locales es esencial. Hay dos tipos de agregados que reaccionan con los álcalis: silíceos y carbonatos. La expansión por la reacción álcali-agregado puede exceder 0.5% en el concreto y puede causar su falla y desintegración. Las técnicas de diseño estructural no pueden compensar los efectos de la expansión álcali-agregado, ni tampoco esta expansión se puede controlar con la colocación de juntas. En áreas donde se sepa que hay agregados reactivos, se deben tomar medidas especiales para la prevención de la ocurrencia de la reacción álcali-agregado [Kosmatka et al, 2004].

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

La hidratación del cemento da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los minerales silíceos de algunos agregados reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen [Segarra, 2005].

La reacción álcali-carbonato se da en concretos que tienen rocas carbonatadas como agregados. Hay dos clases de reacciones álcali-carbonato:

- En la primera, las rocas carbonatadas reaccionan con los álcalis presentes en los poros del concreto produciendo expansiones y agrietamientos nocivos (desdolomitización),
- En la segunda, las zonas periféricas de las partículas de agregado en contacto con la pasta de cemento, se modifican, desarrollándose bordes sobresalientes entre la partícula y la pasta que la rodea. Sin embargo, esta reacción no parece ser nociva para el concreto.

La desdolomitización, es la reacción del carbonato cálcico y magnésico con una solución alcalina dando como producto la brucita (hidróxido magnésico) y la regeneración de hidróxido alcalino. La desdolomitización produce un aumento de volumen, y la presión de cristalización de la calcita y la brucita es la que provoca la expansión y el consecuente agrietamiento [Deng y Tang 1992].

1.1.3 Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es un problema grave que hoy enfrentan los ingenieros civiles quienes tratan de mantener en pie una infraestructura en proceso de envejecimiento. Las principales causas de este fenómeno son el ataque de cloruros y la carbonatación. Estos dos mecanismos son inusuales en el sentido de que no atacan la integridad del concreto. En lugar de esto, el acero es atacado por especies químicas agresivas que pasan a través de los poros del concreto [Broomfield, 1991].

1.1.3.1 Iones cloruro

En este caso la corrosión es localizada, se caracteriza por la destrucción local de la capa pasiva debido a la acción de un agente agresivo. La causa más frecuente que induce este tipo de corrosión es el alcance de una concentración crítica de iones despasivantes, tales como los cloruros.

La presencia de cloruros en zonas no costeras se debe principalmente a que son añadidos al concreto como aditivos o en sales de deshielo usadas en estructuras viales. Los

iones cloruro (Cl^-) se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica en la cual se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero, figura 13.

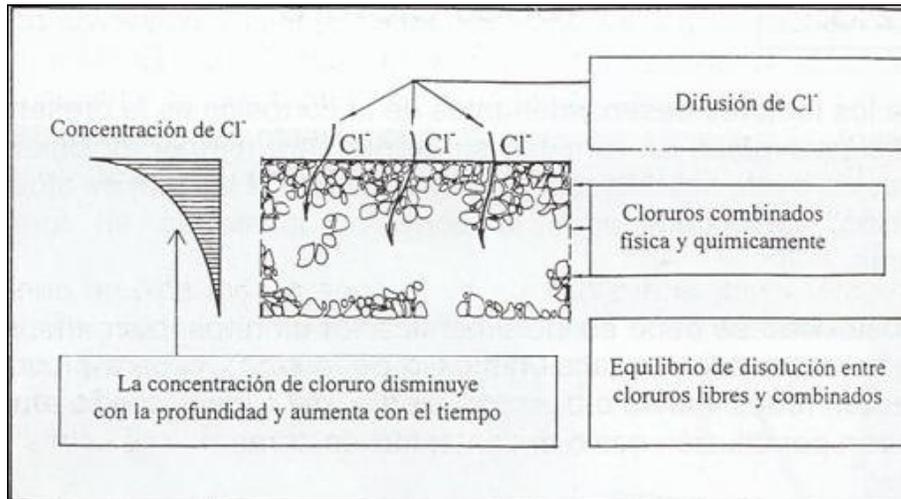


Figura 13. Esquema del fenómeno electroquímico de la Corrosión por Cl^- [Cobo, 2002]

La concentración de cloruros decrece desde la superficie hacia el interior del concreto. En ciclos de humectado-secado, al inicio del periodo de humectación, el agua con cloruros penetra en el concreto por succión capilar; durante el periodo de secado, el agua se evapora y los cloruros permanecen en el concreto. La incidencia cíclica de este proceso puede causar una elevada concentración de cloruros en la zona de secado.

Los iones cloruro disueltos en los poros pueden interactuar con las fases solidas del concreto quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del concreto puede encontrarse en dos estados:

- Enlazados a las fases solidas del concreto. Quedan inmovilizados, sin posibilidad de moverse hacia el interior del concreto.
- Disueltos en el agua que contiene los poros. Se desplazan por el interior del concreto mediante difusión u otros mecanismos.

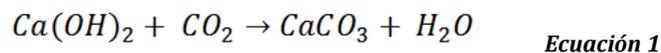
La cantidad total de cloruro que contiene el concreto será resultado de la suma de cloruros disueltos y enlazados. No obstante, Los iones de cloruro en forma libre son los únicos que representan un peligro para la corrosión del acero de refuerzo.

1.1.3.2 Carbonatación

Aquí, la corrosión es generalizada y se caracteriza por un ataque uniforme en toda la superficie del acero debido a un descenso de la alcalinidad en el concreto, hecho que produce la ruptura de la capa pasiva. La carbonatación del concreto es el fenómeno más frecuente.

La carbonatación es un tipo particular de reacción acida, de excepcional importancia en la durabilidad del concreto. Debido a los hidróxidos de calcio (Ca(OH)_2), de sodio (NaOH) y de potasio (KOH) disueltos en la solución acuosa de la red de poros del concreto, y en menor medida a los álcalis solubles de los agregados, se alcanza un pH de la disolución presente en los poros entre 12.5 y 13.5. Esta condición permite que el acero envuelto en el concreto se encuentre en el punto P dentro del diagrama de Pourbaix (protegido de la corrosión).

La presencia de una red porosa en el concreto permite la penetración del CO_2 del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO_2 con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico y de los compuestos hidratados del cemento, formándose carbonato cálcico. En términos simplificados, la reacción para la fase acuosa se puede describir:



Cuando el Ca(OH)_2 , el KOH y el NaOH presentes en los poros se carbonata, el pH empieza a decrecer y deja de ser un elemento protector del acero de refuerzo. Cuando el concreto ha sido completamente carbonatado, se puede registrar un pH menor de 9.

La figura 14 muestra un modelo simplificado del proceso de la carbonatación del concreto.

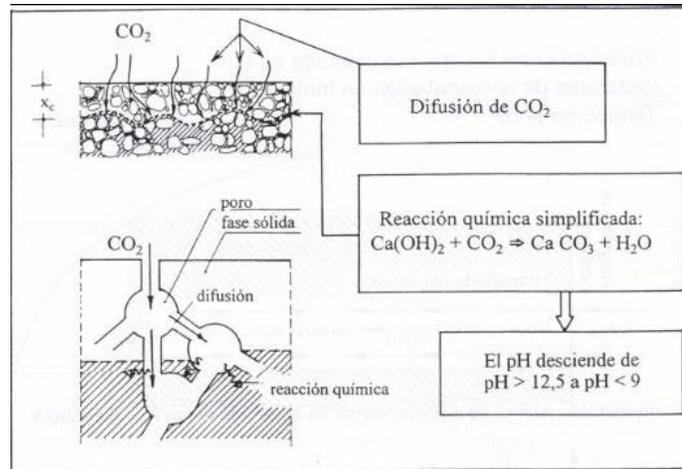


Figura 14. Proceso de Carbonatación del Concreto [Cobo, 2002]

De acuerdo a la siguiente ecuación, el avance del proceso de carbonatación se puede aproximar a la raíz cuadrada del tiempo.

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t}$$

Ecuación 2

Donde:

X_c = profundidad de la capa carbonatada (mm)

K_c = Constante de carbonatación (mm/año^{0.5})

t = Tiempo (años)

El desarrollo de la carbonatación depende de diversos factores, entre los que se pueden enumerar los siguientes [Cobo, 2002]:

- Contenido de CO_2 en el medio circundante,
- Permeabilidad del concreto,
- Cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento),
- Humedad relativa del ambiente
- Otros aspectos a considerar en la carbonatación del concreto son:
- Un aumento en la relación A/C_m favorece el proceso de carbonatación al aumentar la permeabilidad del concreto (Figura 16)

- Un aumento en la dosificación del cemento dificultaría el proceso (Figura 17).
- Humedades relativas (HR) entre el 50 y el 60% favorecen al máximo la reacción de carbonatación, pero a partir de estos valores se presenta un descenso (Figura 18). Aunque otros estudios la ubican entre 60 y 70% [Verbreck, 1958 y Wierig, 1984].

De igual manera, ambientes muy contaminados afectan la calidad del recubrimiento, causa directa para que se origine la corrosión por carbonatación. Cabe mencionar que la concentración de CO_2 en el ambiente urbano se estima en 0.03% [Neville y Brooks, 1993]

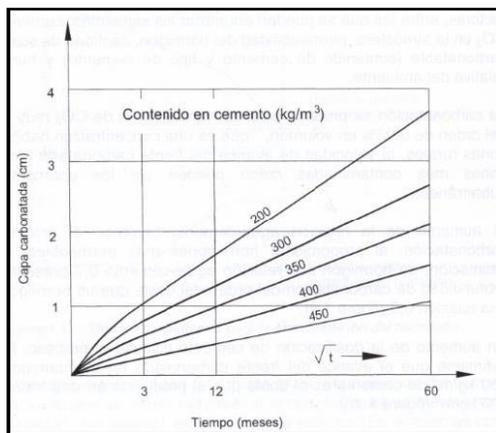


Figura 15. Influencia de la A/Cm en la velocidad de carbonatación [Cobo, 2002]

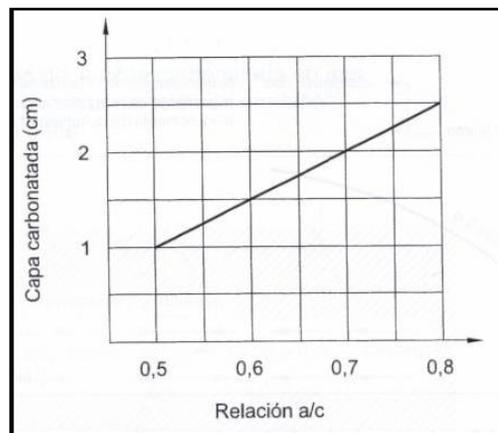


Figura 16. Influencia del contenido en cemento en la profundidad de carbonatación [Cobo, 2002]

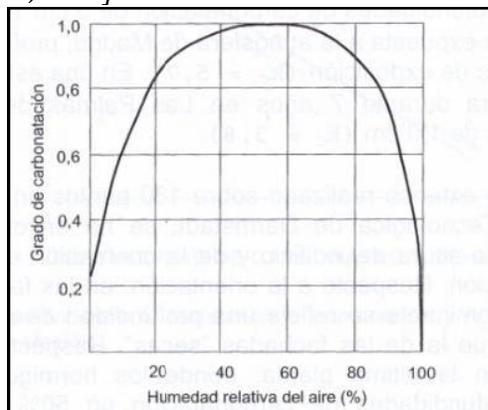


Figura 17. Influencia de la HR en la profundidad de carbonatación [Cobo, 2002]

El avance de la carbonatación dependerá también de la resistencia a compresión del concreto, obteniéndose menores profundidades de carbonatación para mayores valores de resistencia.

1.1.3.3 Efecto de la presencia de agrietamientos en la corrosión

Así como la Carbonatación y la presencia de iones cloruro en el concreto son factores capaces de originar el proceso de corrosión del acero de refuerzo, existen otros factores capaces de desencadenar este proceso entre ellos podemos citar: pares galvánicos, presencia de diferentes cementos en una misma estructura, empleo de cementos menos alcalinos que los Portland, presencia de adiciones activas (escorias y puzolanas), presencia de juntas de construcción y en general, de cualquier tipo de heterogeneidad que facilite la generación local del pH suficientemente ácido para romper la pasividad y desencadenar el fenómeno.

Otro factor que influye de manera importante en la corrosión son las grietas. El concreto debido a su fragilidad siempre contiene microgrietas, las cuales se combinan con las macrogrietas formando una red que facilita el mecanismo de transporte de agentes agresivos.

El CO₂ y los cloruros pueden penetrar hasta la superficie del acero a través de las grietas, con una velocidad varios órdenes de magnitud mayor, que si fuese a través del concreto no agrietado.

Las grietas pueden provocar efectos negativos sobre el acero, entre ellos podemos mencionar [Pérez, 2010]:

- Reducción de la distancia efectiva que atraviesan los cloruros, humedad y oxígeno hasta el acero.
- Formación de macropilas de corrosión en caso de que el acero se encuentre despasivado. Debido a que las grietas provocan una baja resistividad y un rápido transporte iónico entre los pares ánodo-cátodo, situados a larga distancia.
- Acumulación de sales. si el agua se evapora en la fisura, lo cual puede provocar una pila de corrosión por diferencias de concentración (corrosión por picaduras), dado que las zonas de acero despasivado situadas bajo las grietas ricas en cloruros se encontraran rodeadas de acero pasivo.

- Formación de pilas de diferencia de concentración de oxígeno. Si hay mayor disponibilidad de oxígeno en la grieta que en el concreto húmedo que la rodea, se produce una acción catódica del acero dentro de la grieta.
- Formación de una pila de diferencia de alcalinidad, si la alcalinidad del acero próximo a la fisura cambia localmente en comparación con el concreto que la rodea.

Por lo tanto, entre más anchas sean las aperturas de grietas más severos serán los efectos antes mencionados, también se entiende que la existencia de recubrimientos mayores es una medida efectiva en la reducción de los mismos.



Figura 18. Retracción por secado a edad temprana en una losa de azotea.¹⁰



Figura 19. Reparación de grietas por retracción en muro.¹¹

¹⁰http://opc.com.mx/boletines/grietas_plasticas.html

¹¹<http://www.xypexman.com/projects/proj-langley.html>

Las causas de agrietamiento pueden ser muy variadas y su detección no siempre es fácil; sin embargo, su conocimiento es importantísimo, a fin de ponerle remedio o aplicar una metodología apropiada. El agrietamiento puede deberse en su totalidad y casi exclusivamente a las siguientes causas [Cabrerizo]:

- Cambios volumétricos en el concreto: expansión/ retracción, variaciones de temperatura y ataque químico.
- Desconsideraciones de constructores/proyectistas: Curado deficiente, excesos de carga, errores de proyecto, errores de ejecución y asentamientos diferenciales.

De los cambios volumétricos en el concreto, la retracción es por mucho el efecto más problemático pues varias son sus causas. Las estrategias de mitigación en este caso parten de un conocimiento a fondo de las reacciones de hidratación, pérdida de humedad y

la consecuente generación de esfuerzos de tensión que pueden agrietar el concreto. Es así que en las siguientes secciones se discute acerca de las causas de retracción en sus diversas etapas.

1.1.4 Retracción

La retracción del concreto es una preocupación por su repercusión en la durabilidad del concreto. La vida útil de la estructura puede reducirse significativamente a causa de las grietas inducidas por este efecto. Comúnmente la retracción es atribuida a la desecación del concreto en periodos de tiempo largos, aunque estudios recientes se han concentrado en problemas a edad temprana o de secado en estado plástico [Holt, 2001].

La solución más común para reducir los cambios de volumen a edades tempranas es evitar el secado mediante el adecuado manejo del concreto durante las primeras horas posteriores al colocado. Es imperativo que el curado inicie inmediatamente después y por métodos adecuados. [Holt 2000]

Otro caso de retracción, es el cambio que ocurre cuando la no existe transferencia de humedad con el ambiente. Esta reducción del volumen es conocida como retracción autógena y se atribuye a cambios de volumen por reacciones químicas. La retracción autógena es usualmente un problema en concretos de alta resistencia o alto comportamiento ($f_c > 40$ MPa), cuando se maneja una relación A/Cm baja. En general, la retracción a edad temprana es una preocupación creciente, ya que puede ser responsable del agrietamiento cuando el concreto no ha ganado la resistencia suficiente para resistir los esfuerzos internos que la retracción provoca.

La retracción del concreto tiene lugar en dos diferentes periodos; a edad temprana y a edad posterior. Edad temprana se entiende como el primer día (primeras 24 h después del mezclado), cuando el concreto está fraguando e inicia su endurecimiento. Edad posterior o a largo plazo, se refiere a una edad mayor a las 24 horas. Durante la edad posterior, el concreto es desmoldado y se llevan a cabo las medidas de retracción. La retracción a edad posterior es típicamente la única parte identificada y reportada en la literatura, así como la única parte que se considera en el diseño estructural.

Dentro de cada una de estas etapas de retracción, hay varios tipos de cambio lineal, el cual puede ser medido físicamente en el espécimen, principalmente las retracciones por secado y autógena. Ambos tipos pueden ocurrir en cualquiera de las etapas de retracción. En adición a la retracción por secado y autógena, el concreto está sujeto a variaciones de volumen debidas a cambios térmicos y reacciones de carbonatación. Aunque estas dos últimas no son tan significativas

Los tipos de retracción se muestran en la figura 20 y serán descritos en las siguientes secciones.

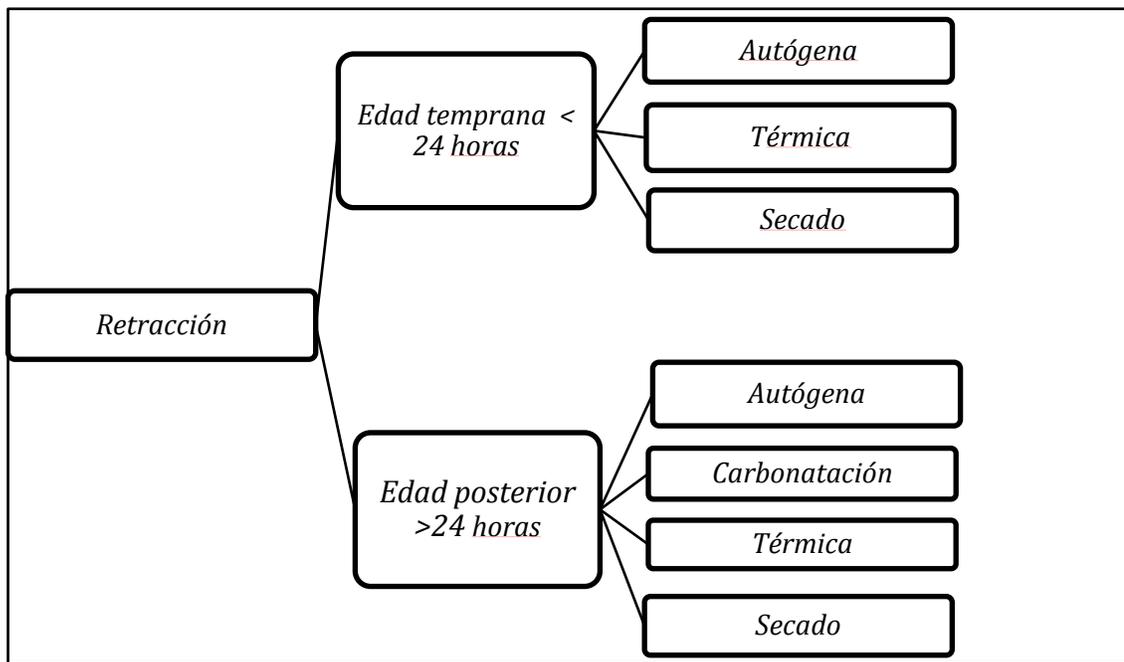


Figura 20. Diagrama de etapas y tipos de retracción.

1.1.4.1 Etapas de retracción

Retracción a edad temprana

La retracción a edad temprana se define como los cambios de volumen ocurridos inmediatamente después de colocar el concreto hasta 24 horas. Esto incluye el periodo de transición cuando el concreto está formando un esqueleto rígido, y finalmente el endurecimiento, cuando la cimbra puede ser removida. Para concretos de alta resistencia el periodo de rigidización o endurecimiento inicia cerca de las 12 horas después del

mezclado. Al comienzo de esta fase la tasa de retracción es mínima. La transición entre estas fases se ilustra en la figura 21.

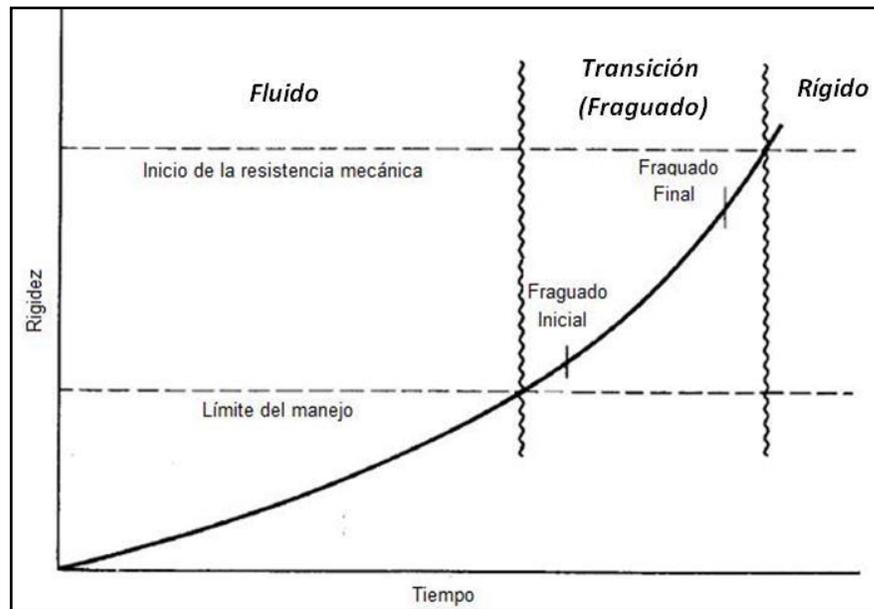


Figura 21. Fases de retracción a edad temprana [Mehta y Monteiro 1993].

La retracción del concreto es debida al movimiento o pérdida de agua. Cuando el agua se pierde por evaporación (retracción por secado) o reacciones internas (retracción autógena), se generan esfuerzos de tensión que originan el acercamiento entre partículas de cemento hidratadas, registrándose una reducción de volumen. A edad temprana la retracción es más crítica, ya que el concreto no ha ganado mucha resistencia. Incluso el más pequeño esfuerzo durante la edad temprana puede tener como resultado una gran retracción.

Retracción a largo plazo

La retracción a largo plazo ha sido medida en la práctica del concreto por muchos años. En general, se mide desde las 24 horas después del mezclado o al momento de desmoldar. Se mide en probetas prismáticas de dimensiones normalizadas registrando el cambio de longitud a través del tiempo, de acuerdo a normas como ASTM C157 o RILEM CPC 9.

La retracción por secado puede continuar durante muchos años, aunque en general se espera que aproximadamente el 80% de la retracción medida en laboratorio se produzca en aproximadamente 3 meses. La duración de la retracción depende del tamaño del elemento de concreto y de la forma, ya que controlan la tasa de pérdida de humedad. El tamaño y la forma del elemento se consideran como la relación volumen-superficie. Generalmente, una alta relación volumen-superficie dará lugar a una retracción más baja [Mindess & Young, 1981].

No existe correlación entre la retracción a edad temprana y a edad posterior. En situaciones como el curado inadecuado (secado rápido), la retracción del primer día puede exceder fácilmente las mediciones de la retracción a edad posterior. Esto se demuestra en la figura 22 para diversas condiciones ambientales durante el primer día [Holt, 2001]. La retracción a largo plazo debida al secado fue similar en todos los casos, aunque el primer día tuvo un cambio significativo en la "retracción total", lo que afecta el agrietamiento esperado.

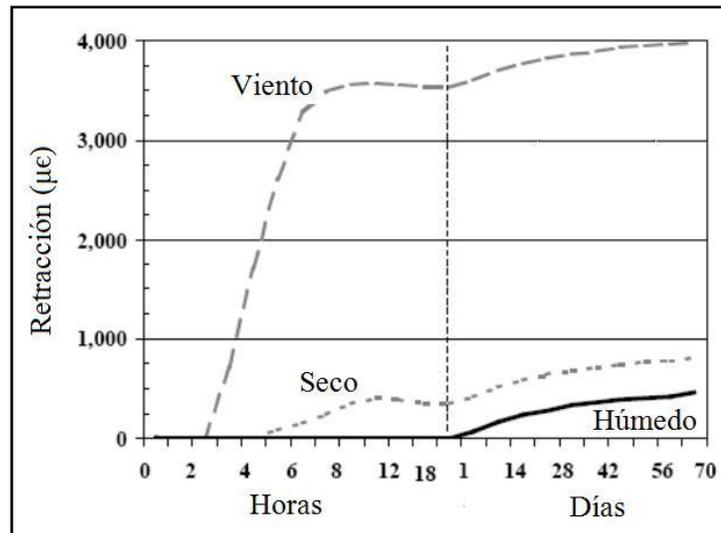


Figura 22. Acumulación de la retracción a edad temprana y a largo plazo, con varios ambientes de curado en el primer día. Viento = 2 m/s (45 mph), H.R. (seco) = 40%. H.R. (húmedo) = 100%

1.1.4.2 Tipos de retracción

El cambio volumétrico del concreto es un fenómeno inevitable, resultado del secado de del concreto expuesto al ambiente así como a las reacciones internas o autógenas. La retracción por lo general se evalúa durante periodos de tiempo largos, meses o incluso años, considerando nulos a los cambios tempranos en estado plástico. Las siguientes secciones presentan una breve descripción de los diferentes fenómenos de retracción presentes en el concreto.

Retracción/ expansión térmica

La dilatación térmica se refiere a los cambios de volumen que ocurren en el concreto cuando se encuentra sujeto a fluctuaciones de temperatura y puede ocurrir en ambos periodos: a edad temprana o posterior. La expansión térmica causa problemas cuando la tasa de temperatura cambia bruscamente o cuando existen gradientes considerables de temperatura en la sección transversal del concreto.

Durante la edad temprana del concreto, la temperatura cambia debido al proceso de hidratación. Como regla general, este calor temprano de hidratación esta entre 5 y 8 °C de temperatura adiabática por 45 kg de cemento [Kosmatka & Panarese 1988]. Generalmente, este incremento de temperatura ocurre entre las primeras 12 horas. La siguiente etapa es cuando el concreto se contrae como resultado del enfriamiento. Algo de la expansión térmica es elástica, considerando que el concreto regresara a sus dimensiones originales por el enfriamiento subsecuente. Pero algo de la porción no elástica resultara en una retracción temprana.

El gradiente de temperatura resultante causara deformaciones e incluso grietas. Durante la edad temprana, la diferencia de temperaturas dentro de un espécimen de concreto causa deformaciones térmicas dado que la superficie tendrá una temperatura diferente que el interior. El gradiente se desarrolla cuando no se puede alcanzar un equilibrio en la temperatura, entonces se generan esfuerzos y posibles agrietamientos. Esto es más riesgoso en estructuras de concreto masivo (> de 1 m de espesor).

En la edad posterior, la dilatación térmica es un resultado de las fluctuaciones de temperatura en el ambiente circundante. Una vez más, el concreto se puede agrietar si las

tasas de expansión o contracción son muy severas. Estos cambios son dependientes de la cantidad de agua libre en el concreto ya que, en un escenario de clima frío, el agua necesita expandirse durante la formación de hielo por congelación. La expansión térmica también puede ser un problema si el concreto está restringido de alguna manera, sin tener espacio para el cambio de volumen que se produzca, tal como podría ser el caso de una losa de espesor considerable, restringida y sin juntas.

La dilatación térmica a edad posterior es una medida de hasta qué punto el concreto tendrá un cambio de volumen reversible con las fluctuaciones de temperatura. Los valores típicos del coeficiente de dilatación térmica para concreto maduro son de 6 a 12 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$. [Mehta y Monteiro 1993].

Retracción por carbonatación

El mecanismo de carbonatación, comentado en la sección 1.1.2.1, da como resultado una ligera contracción. La cantidad de carbonatación depende de la densidad y calidad del concreto, de la edad del mismo y las condiciones ambientales del entorno.

Retracción por Secado

La retracción por secado se refiere a la reducción del volumen de concreto resultante de una pérdida de agua. Inicialmente, conforme las partículas de agregado más pesados se asientan el agua libre se escapa a la superficie de concreto como agua de sangrado. Esta agua de sangrado puede evaporarse de la superficie, provocando el ascenso de más agua del interior del concreto por succión capilar.

La situación más común que resulta de la retracción por secado a edad temprana es la aparición de grietas superficiales. [Mindess y Young 1981] También puede darse un problema de agrietamiento por la succión de agua que puede originar la cimbra o material sobre el que se desplanta la estructura de concreto.

Si la tasa de sangrado supera la velocidad de evaporación este exceso de agua actuará como una película de curado. En este caso no habrá contracción de secado a edad

temprana, ya que hay suficiente agua en la superficie que permite la evaporación sin extraer agua de los poros capilares.

Los mecanismos que causan la retracción por secado son dependientes del tamaño de los poros. En la figura 23 se ilustran los rangos de tamaño de los poros que se pueden encontrar en una pasta de cemento. También se proporcionan el tamaño de los productos de hidratación con fines comparativos. Se observa que los poros capilares pueden ser tan grandes como $1 \mu\text{m}$ o tan pequeños como $0,01 \mu\text{m}$ cuando la pasta tiene una microestructura muy densa. Los poros capilares son los espacios ocupados por el exceso de agua, que se reducen durante las reacciones de hidratación del cemento.

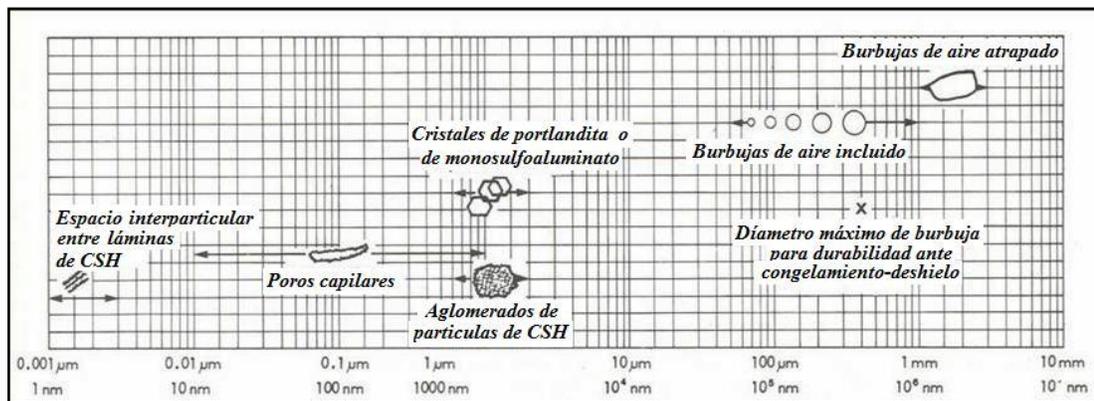


Figura 23. Tamaño típico de poros y sólidos en la pasta de cemento hidratada [Mehta et al 2005]

La microestructura de una pasta de cemento es la porción del concreto que no puede ser apreciada a simple vista ($<200 \mu\text{m}$) y se examina con el uso de microscopios. Con cantidades equivalentes de cemento en una mezcla de pasta, la microestructura se vuelve más densa conforme se baja la A/C. [Mehta y Monteiro 1993]. Esta mejora en la microestructura de la pasta de cemento conduce a una menor permeabilidad y en consecuencia a características de durabilidad mejoradas.

Cuando se trate con el secado del concreto, los poros más grandes son los primeros en perder su agua interna. La pérdida de agua interna provoca la retracción por secado. Powers expresó claramente [1968] cómo la superficie del agua está cambiando y cómo esto se relaciona con los espacios de los poros: "el líquido superficial se convierte en

numerosas superficies curvas (meniscos), que son cóncavas entre las partículas. Puesto que la presión del fluido en el lado convexo del menisco es menor que en el lado cóncavo, es decir, menor que la presión de la atmósfera, la diferencia constituye una fuerza motriz en adición al asentamiento de partículas hacia abajo. La curvatura de la superficie del agua está limitada por las dimensiones de los espacios intersticiales entre las partículas”.

Este fenómeno se muestra en la figura 24 por dos partículas de cemento en la superficie de una pasta sometidos a secado. [Radocea 1992] En este caso, la tasa de evaporación (W) es superior a la tasa de sangrado. Esto genera esfuerzos y causa la reducción del menisco con el consecuente aumento de la presión capilar.

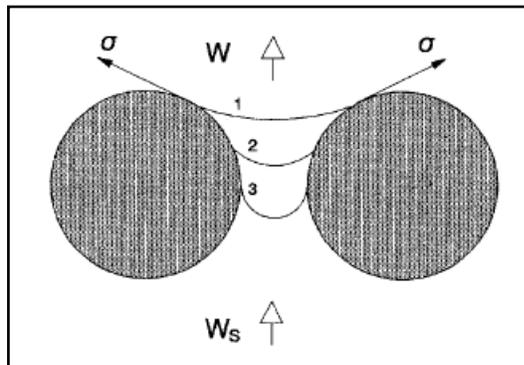


Figura 24. Los esfuerzos empujan el menisco del agua más abajo entre dos partículas de cemento debido a la transferencia de humedad y el desarrollo de la presión capilar. [Radocea 1992]

La cantidad de presión de succión que se genera en la pasta de cemento se debe a las fuerzas capilares. A su vez, la fuerza capilar es función del radio de curvatura del menisco, resultante entre el agua y el aire. Esta succión (s) viene dada por la ecuación de Laplace (Ecuación 3) [Janz 2000]:

$$s = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde;

s = presión de succión (Pa)

σ = tensión superficial de la interfaz agua-aire (~ 0.074 N/m), y

r = radio del menisco (m)

A medida que el diámetro de los capilares disminuye, la presión capilar (y por lo tanto la retracción) aumenta en consecuencia [Czernin, 1980]. La presión capilar debida a cambios de humedad puede ser del orden de 10 a 100 MPa [Scherer 1999].

Otra relación útil para la interpretación del efecto de los tamaños de poro está dada por la ecuación de Kelvin (Ecuación 4) [Janz 2000]. Aquí la humedad relativa existente dentro de un cuerpo está correlacionada con el tamaño del poro capilar. Se muestra que, conforme el tamaño de poro disminuye, la humedad relativa interna cae rápidamente, lo cual a su vez induce esfuerzo y retracción.

$$\ln \phi = - \frac{2\sigma M}{\rho R T r} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde;

ϕ = humedad relativa,

M = peso molecular del agua (18 kg/Kmol),

ρ = densidad del agua (998 kg/m³),

R= constante de los gases (8.214 J/(Kmol⁰K)),

r = radio del poro (m).

A edad posterior los valores lineales de retracción por secado son del orden de 500 a 1000 $\mu\epsilon$ (0,5 a 1 mm/m) durante un período largo, aunque en algunos casos puede exceder las 5000 $\mu\epsilon$ (5 mm/m) cuando existen condiciones de secado acelerado a edad temprana.

Retracción autógena

La retracción autógena de la pasta de cemento y concreto se define como el cambio de volumen macroscópico que ocurre sin transferencia de humedad al ambiente circundante. Es un resultado de la contracción química asociada con la hidratación de las partículas de cemento. [Japón 1999]

Una representación gráfica de la retracción que sufre un concreto debido a las reacciones de hidratación del cemento se muestra en figura 25 [Kosmatka et al 2004]. Este gráfico ilustra que la retracción autógena es una parte de la retracción química. Mientras que la retracción química es una reducción de volumen interno, la retracción autógena es un cambio de volumen externo. Por consiguiente, es posible medir la retracción autógena como un cambio lineal en una probeta de concreto.

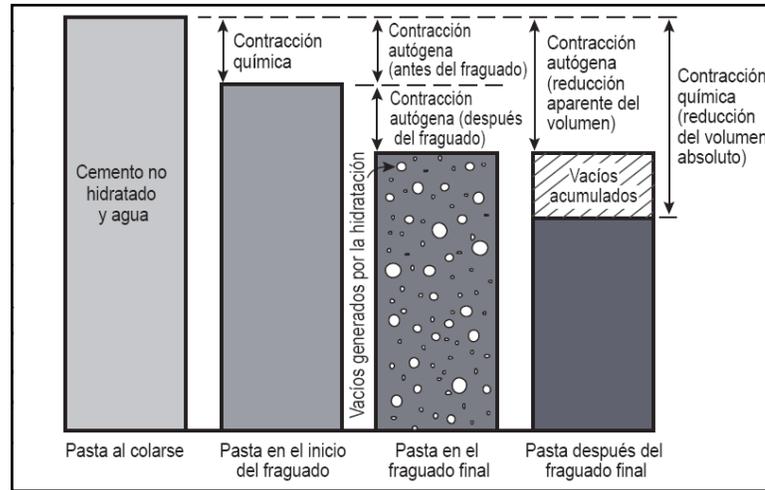


Figura 25. Esquema mostrando la relación entre la contracción química y autógena. [Kosmatka et al, 2004]

El desarrollo y uso frecuente de aditivos y adiciones modernos, como los superplastificantes y el humo de sílice, ha conducido a obtener concretos susceptibles a la retracción autógena. Hoy en día existe una demanda elevada de concreto estructural de alta resistencia y de alto desempeño. Esto lleva a ingenieros y diseñadores a especificar concreto con bajas relaciones A/Cm. A pesar de que la resistencia mecánica y muchos aspectos de durabilidad se han mejorado con estas especificaciones, el riesgo de retracción autógena es mayor.

El concreto convencional, donde las relaciones A/Cm son mayores a 0.42, la retracción autógena es por lo general indetectable. Esto es porque el concreto tiene suficiente agua para permitir la hidratación completa. En concretos expuestos (pisos, losas, etc.), la necesidad de agua necesaria puede ser cubierta por el agua de sangrado o por el agua de curado, ya que la alta permeabilidad de la pasta permite la transferencia del agua.

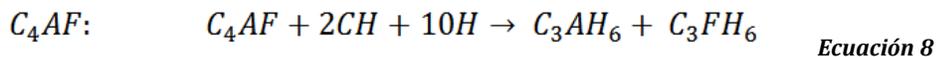
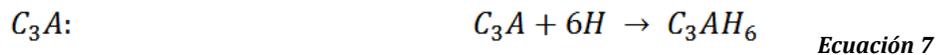
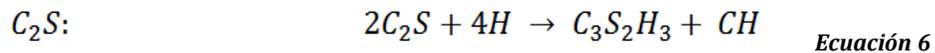
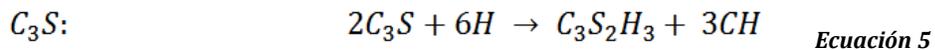
En algunos casos la retracción autógena puede eliminarse [Radocea 1992] o puede presentarse expansión en lugar de retracción [Whiting et al. 2000], debido a la absorción del agua de curado.

Esta expansión también compensaría la inevitable retracción química. Si el agua de curado no está disponible o la A/Cm es menor a 0.42 habrá riesgo de una retracción temprana potencialmente dañina. Se ha reportado que cuando la A/Cm se reduce [Tazawa & Miyazawa 1995b] el total de la retracción está compuesto mayormente de retracción autógena que de retracción por secado, esto significa que para una A/Cm baja, la retracción total es atribuida a la deformación autógena más que a la retracción por secado.

Retracción química

Como se ha descrito anteriormente, la retracción autógena se atribuye en su totalidad a la retracción química ocurrida durante las primeras horas después de la mezcla. La retracción química es resultado de las reacciones entre el cemento y el agua, mismas que conducen a una reducción de volumen.

El cemento es el ingrediente en el concreto que origina las reacciones químicas para el aglutinamiento de la masa del concreto. Las reacciones básicas de clinker de cemento son bien conocidas y comunmente se definen por las siguientes ecuaciones de las fases del clínker [Paulini 1992, Lea 1998]:



Puesto que la retracción química se basa únicamente en los cambios de volumen de productos iniciales y finales, es posible calcularla basándonos en los pesos moleculares. La ecuación general (ecuación 9) para la retracción química es la siguiente. Este cálculo tiene

una complicación; que sin hacer pruebas especializadas, es difícil saber el volumen exacto de los diversos componentes dentro del concreto.

$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{(V_{ci} + V_{wi})} \times 100$$

Ecuación 9

Donde;

CS = retracción química

V_{ci} = volumen del cemento antes del mezclado,

V_c = volumen del cemento hidratado,

V_{wi} = volumen del agua antes del mezclado,

V_w = volumen del agua después de la reacción,

V_{hy} = volumen de los productos de reacción.

Otra forma de ver las reacciones químicas es examinar matemáticamente los volúmenes de productos basados en el peso y la densidad. Como se puede observar en las ecuaciones 5 a 8, mostrando que cada uno de los cuatro compuestos de clinker de cemento requiere agua para reaccionar. Estos procesos son exotérmicos y dan como resultado una disminución del volumen de los productos de reacción.

La diferencia entre el volumen molecular de los productos base y productos de reacción es el volumen de la retracción, logrando establecer valores de retracción química para cada fase de cemento [Paulini 1992]. Estos valores se utilizan en la ecuación 10 para estimar la retracción química total, usando el porcentaje que cada fase ocupa en el clinker.

$$V_{CS_{TOTAL}} = 0.0532[C_3S] + 0.0400[C_2S] + 0.1113 [C_4AF] + 0.1785[C_3A] \quad \text{Ecuación 10}$$

La retracción química de la pasta de cemento no resulta afectada por la A/Cm. [Gangé et al. 1999]. La A/Cm y la fineza del cemento solo afectaran la tasa de retracción

química. La magnitud final de la retracción será cuando la hidratación alcance el 100% y estará influenciada únicamente por la composición química del cemento.

Se debe notar que en las ecuaciones 5 a 8 se dieron aproximaciones muy generales para las reacciones del clinker, no obstante son mucho más complejas. [Lea 1998, Taylor 1997].

Otro factor relacionado con la retracción química de la pasta de cemento es la cantidad de reacción que ha ocurrido, conocido como grado de hidratación. Se entiende que las reacciones químicas empiezan inmediatamente después del mezclado del cemento y el agua, pero la química actual del cemento puede variar la cantidad de la retracción química. La tasa de retracción química se verá afectada por la fineza del cemento. La hidratación de un cemento más fino procederá más rápido, mientras que la de un cemento grueso tenderá a presentar una tasa de hidratación menor. Esto se debe a la disponibilidad de agua para infiltrarse y reaccionar con los compuestos anhidros del cemento. La fineza del cemento no afectará la magnitud final de la retracción química.

Retracción total

La retracción total debería ser tomada como la suma de todos los cambios volumétricos individuales debidos a deformaciones por carbonatación, expansión térmica, por secado y autógenas. Puesto que la mayor parte de la expansión térmica es reversible a edades posteriores, es usual que no se incluya en la cantidad final de la retracción total.

Se entiende que la retracción autógena no puede ser evitada, pero en la mayoría de los casos se asume tan pequeña que se considera insignificante. En la actualidad, la proporción exacta de estos dos tipos de retracción, autógena y por secado, en la retracción total continúa sin conocerse en la mayoría de los casos, especialmente a edad temprana y en concretos de alta resistencia o alto comportamiento.

1.1.4.3 Importancia estructural de las retracciones

Al ser la retracción un acortamiento que se manifiesta sobre todo en los primeros días de vida del concreto, cuando las resistencias a compresión y a tensión son también pequeñas, cualquier obstáculo a esta contracción de la masa da lugar a tensiones que, si no

se contrarrestan (mediante pretensado por ejemplo) pueden conducir al agrietamiento del concreto con el consiguiente perjuicio, respecto al comportamiento resistente, funcional y a factores que afectan a la durabilidad de la estructura.

Pero aparte de este efecto tensional, que puede suponer en mayor o menor medida el agrietamiento del concreto, es preciso considerar los movimientos que por causa de esta deformación se producen en la estructura y que, lógicamente, serán tanto más importantes cuanto mayores sean las dimensiones de la misma. De forma breve, la retracción produce los siguientes efectos [Murcia, 1987]:

- Variación de desplazamientos en la estructura (axiales en principio), pero también de curvaturas y, por lo tanto, flechas (en piezas con acero de refuerzo muy asimétrico), que puede ser preciso considerar en estructuras de gran envergadura.
- Perdidas diferidas de pretensado (y en general, disminución de tensiones en el refuerzo), puesto que al retraerse el concreto, el acero también sufre deformación.
- Esfuerzos, siempre que existen coacciones hiperestáticas, ya sean estas coacciones en la propia estructura (por su disposición de elementos y apoyos) o en las secciones (normalmente, por la existencia de acero de refuerzo adherente, que no se retraen); en general, en estos casos de retracción restringida, los esfuerzos que aparecen son de tensión, lo que puede conducir al agrietamiento.

Para evitar estos efectos puede actuarse directamente sobre la causa, disminuyendo el valor de la retracción a base de regular los factores que influyen en ella (curado, manteniendo la humedad de saturación durante los primeros tiempos, o modificando la composición del material) o intervenir sobre los factores que influyen en dichos efectos perjudiciales, como son retrasar, mediante un adecuado proceso constructivo, el hiperestatismo estructural hasta que la retracción sea muy pequeña, o por el contrario, acelerar el proceso de la retracción, envejeciendo el concreto, mediante determinados procesos como el curado a vapor, para establecer cuanto antes el hiperestatismo a nivel sección o estructura [Murcia, 1987].

1.1.4.4 Técnicas innovadoras de mitigación de la retracción

Curado Interno (CI)

El CI proporciona agua adicional para mantener la pasta de cemento bajo condiciones de saturación mediante la distribución de reservorios de agua de curado a lo largo de la estructura tridimensional del concreto. Esos reservorios pueden ser proporcionados por agregados ligeros saturados, [Henkensiefken 2008, Geiker 2004] polímeros superabsorbentes (SAPs, siglas en inglés), [Geiker 2004, Jensen y Hansen 2002] fibras de madera saturadas, o por la saturación de agregados de concreto reutilizado triturado. [Kim y Bentz 2008]. Estos reservorios se vaciarán durante la hidratación del cemento, ya que el agua que contienen será absorbida por la pasta de cemento en hidratación, siempre y cuando los poros en la pasta de cemento sean sustancialmente más pequeños que los de los depósitos. Debido a que estos depósitos suelen contener radios de poro mucho más grandes, se crearán esfuerzos capilares más bajos y la retracción autógena puede ser eliminada efectivamente [Henkensiefken 2008, Geiker 2004] [Citado por Bentz y Weiss 2008].

Se han propuesto otras aplicaciones, algunas como ideas vagas, otras soportadas por investigaciones preliminares. Un ejemplo de estas sugerencias es la utilización de SAPs como micro reservas de sustancias químicas que pueden ser liberadas bajo condiciones específicas, como temperatura, cambios en la composición química de la solución de poro, o con el simple paso del tiempo, etc. [Jensen y Hansen, 2001]. Recientemente se ha demostrado el poder multifuncional de los SAPs como aditivo. El enfoque se dirigió a mejorar simultáneamente varias propiedades de Esfuerzo Deformación en Compósitos base Cemento (SHCC, siglas en inglés), usando varios aspectos de los SAPs. Las partículas de SAP actúan como micro-defectos que impulsan la formación de múltiples grietas cuando el SHCC es sujeto a cargas de tensión, incrementando su ductilidad. Al mismo tiempo actúa como un aditivo para incrementar la resistencia al congelamiento-deshielo y como agente de curado interno [Bruedern y Mechtcherine, 2010]. [Citado por Mechtcherine y Reinhardt, 2012].

Aditivos reductores de la retracción

Los aditivos reductores de la retracción (SRA, siglas en inglés) son generalmente compuestos químicos orgánicos que han sido empleados convencionalmente para reducir la retracción por secado. Los SRA reducen significativamente la tensión superficial de la solución de los poros, [Bentz et al 2001, Lura et al 2007] generalmente aumentan su viscosidad, [Bentz 2006] y modifican el perfil de secado para reducir las tasas de secado en materiales base cemento [Bentz et al 2001, Lura et al 2007]. La reducción de la tensión superficial debería reducir las tensiones capilares y reducir las tasas de absorción [Sant et al 2008 Weiss y Berke 2002], mientras que un aumento de la viscosidad reducirá las tasas de transporte, ya sea por difusión, absorción, o flujo bajo presión [Bentz et al 2008].

Con respecto a la tensión superficial se sabe que las moléculas de la superficie de un líquido experimentan fuerzas que las atraen hacia el seno del líquido. Estas fuerzas son las responsables de la tensión superficial de los líquidos ya que hacen que las moléculas tiendan a estar juntas. La tensión superficial se define como la fuerza ejercida sobre por superficie del líquido por una unidad de longitud [Kane y Sternheim, 2007].

La viscosidad es la propiedad por la cual ofrecen los fluidos resistencia al esfuerzo tangencial o cortante, o lo que es lo mismo, resistencia a deformarse. La libertad de los enlaces moleculares están asociado, con la temperatura y la presión, por lo que la viscosidad depende en gran medida de la temperatura y en menor medida de la presión [Garcia, 2006]. La facilidad o dificultad con que un líquido pasa a través de espacios estrechos depende de su viscosidad pero no de su tensión superficial [Aguilar y Senet, 2002]

1.1.5 El nopal.

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas, que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura. El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización [Villegas y de Gante, 1997; Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000; De la Rosa y Santana, 2001].



Figura 26. Planta de nopal, nótese la derivación del tronco.¹²



Figura 27. Plantío de nopal.¹³

¹²<http://plantas-medicinales.servidor-alicante.com/plantas/nopal>

¹³<http://www.degustar.com.mx/articulos/frutas-y-verduras-articulos/nopales/>

Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Sus ramas están formadas por cladodios de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. El cladodio fresco recibe el nombre de nopalito y el adulto de penca [Citado por Abraján Villaseñor 2008]. La clasificación taxonómica del nopal se presenta en la tabla 1 [Barrientos, 1983]:

Hasta ahora, el género *Opuntia* sólo existen 10 ó 12 especies utilizadas por el hombre. El cultivo y aprovechamiento del nopal se remonta a las antiguas civilizaciones mesoamericanas y su importancia en la vida social, económica y religiosa determinó las rutas migratorias de las tribus nómadas de Aridoamérica, los asentamientos humanos en el centro de México y formó parte del escudo de Tenochtitlán, símbolo que se conserva hasta nuestros días. El nopal utilizado en México tiene evidencias fechadas hace 7000 años en semillas, cáscaras de tuna y fibras de pencas de nopal fosilizadas, encontradas en excavaciones realizadas en Tehuacán, Puebla [Pimienta 1990].

La planta del nopal se distribuye en América, siendo México el país con mayor abundancia de especies por lo que se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie. A partir de la conquista, las mejores variedades fueron llevadas por los conquistadores a Sudamérica y al resto del mundo. Actualmente, las plantas del género *Opuntia* son nativas de varios ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorios de gran altura como los Andes del Perú, desde regiones tropicales de México

donde las temperaturas están siempre por encima de los 5 °C a áreas de Canadá que en el invierno llegan a -40 °C [Goldstein, 1991].

Tabla 1. Clasificación taxonómica del nopal

Reino	Vegetal
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Genero	Opuntia
	Nopalea
Subgéneros de Opuntia	5
Series	17
Especies	300
Especies de Nopalea	10

En México el nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas. Este país produce 874,000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha [IPN, 2006]. Además, el uso del mucílago de nopal en materiales basados en cemento puede tener un impacto social, proporcionando un valor agregado a la producción de esta planta y se mejoraría su rentabilidad. Debe mencionarse que no todas las especies de nopal se utilizan como alimento, de tal forma que se pueden utilizar para aplicaciones industriales aquellas que no sean aprovechadas para consumo humano o animal. [Ramírez-Arellanes, et al 2012]

El cultivo del nopal se puede limitar por tres razones [Abraján Villaseñor, 2008]:

- Abundancia de humedad,
- Carencia de nutrientes y

- Temperaturas bajas que llegan a quemar las yemas de crecimiento.

A pesar de esto, en México, se ubican en zonas ecológicas extensas donde con buenos resultados se puede establecer su cultivo y desarrollo de vegetación natural (nopaleras). La tabla 2 muestra la composición del nopal fresco. Los cladodios tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitas y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos.

Tabla 2. Composición de 100 g de nopal fresco [De la Rosa y Santana 2001].

Parámetro	Contenido
Porción comestible (g)	78.00
Energía (Kcal)	27.00
Proteínas (g)	1.70
Grasas (g)	0.30
Carbohidratos (g)	5.60
Calcio (mg)	93.00
Hierro (mg)	1.60
Tiamina (mg)	0.03
Riboflavina (mg)	0.06
Niacina (mg)	0.03
Ascórbico (mg)	8.00

1.1.5.1 El mucílago del nopal

Otro componente al que se ya se ha hecho mención por su importancia fisiológica es el mucílago. Este compuesto se presenta tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta, aunque en muy diversas proporciones. Estudios efectuados por Sáenz y Sepúlveda [1993] indican que el rendimiento en todos los casos es bajo: 0,5 % en la cáscara y 1,2 % en los cladodios.

El mucílago es un carbohidrato complejo. Entre los monómeros contenidos en la cadena se encuentran: L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-Xilosa y ácido galacturónico.

La proporción de estos monómeros en la molécula varía de acuerdo a diversos factores como: variedad, edad, condiciones ambientales y estructura empleada para la extracción (fruto, cáscara, cladodio), entre otros factores. La tabla 3 muestra la composición del mucílago de *Opuntia ficus indica* y la tabla 4 presenta el peso molecular, según distintas referencias.

Tabla 3. Composición del mucílago *Opuntia ficus Indica* (g/100g de muestra) [Sepúlveda et al, 2007].

Solvente	Humedad	Proteína	Cenizas	Nitrógeno	Calcio	Potasio
Etol	4.9±0.6	7.9±1.5	36.2±2.3	1.3±0.2	10.9±0.7	1.6±0.2
Isopropanol	5.5±1.1	6.1±0.7	39.1±2.4	1.0±0.1	12.7±1.6	2.0±0.3

El mucílago está presente como su sal de calcio en las células de mucílago del parénquima de la penca [Trachtenberg y Mayer, 1982]. Este mucílago constituye un hidrocoloide que podría integrar la oferta de una gran gama de agentes espesantes de amplio uso en la industria de alimentos y farmacéutica, además de que tiene una gran capacidad de absorción de agua. Su poder espesante aun esta bajo estudio [Cárdenas et al., 1997; Medina-Torres et al., 2000; Medina-Torres et al., 2003; Sepúlveda et al., 2003b; Cárdenas et al., 2008], con resultados interesantes, por lo que si se mejoran los rendimientos de extracción podría competir con gomas de gran uso como la goma garrofín, la **goma guar** u otros agentes espesantes. [Citado por Abraján Villaseñor, 2008]

Tabla 4. Peso Molecular en mucílago de *Opuntia spp.* Según diferentes estudios. Citados por Sáenz et al. (2006).

Autor	Peso molecular
Trachtenberg, 1981	4.3 x 10 ⁶
Trachtenberg, 1982	1.56 x 10 ⁶
Cárdenas, 1997	3 x 10 ⁶
Medina-Torres, 2000	2.3 x 10 ⁶
Majdoub, 2001 a	6.92 x 10 ⁶
Majdoub, 2001 a	2.25 x 10 ⁵
Majdoub, 2001 b	13.3 x 10 ⁶

1.2 ANTECEDENTES

Partiendo de las ventajas que trae consigo la utilización del SCC, para la recopilación de antecedentes se buscaron documentos que suministraran información sobre los valores recomendados para las características de auto-compactabilidad, métodos de diseño, experiencias con el curado interno, uso de aditivos reductores de la retracción y el empleo del mucilago de nopal en el concreto.

1.2.1 Método de diseño

Lograr el mayor grado de acomodo de los ingredientes en el concreto es una consideración importante al tratar de frenar el paso de agentes agresivos a través del concreto. Esta línea de pensamiento ha motivado a proponer [Hwang y Hung 2002, 2005] un método de diseño en el cual se trate de lograr el mayor grado de acomodo entre los ingredientes del concreto.

El máximo grado de acomodo puede garantizarse sin importar el número de ingredientes o la calidad de los mismos. Los filler a base de subproductos pueden ser empleados, investigando la proporción óptima de filler-arena para luego encontrar la proporción adecuada de (filler-arena)-(grava) [Hwang y Hung 2002].

El hecho de emplear agregados ligeros no modifica el procedimiento, tal como lo demuestran Hwang y Hung en el 2005. La combinación de agregados más compacta es aquella para la que se obtiene el mayor peso volumétrico seco suelto y el menor contenido de vacíos.

1.2.2 Características de trabajabilidad.

Las recomendaciones existentes para las características de trabajabilidad han sido compiladas por Hwang et al [2006]. La tabla 5 resume las principales características recomendadas en el diseño de SCC según diversos organismos internacionales, además; los autores presentan una recomendación para algunos de los parámetros incluidos.

Tabla 5. Características de trabajabilidad, métodos de prueba y valores recomendados [Hwang et al, 2006].

Característica de trabajabilidad	Método de prueba	Valores recomendados sugeridos en 1 a 6
Deformabilidad y tasa de flujo (habilidad de llenado, flujo no restringido)	<i>Extensibilidad del revenimiento</i>	1. Hwang, et al: 620 a 720 mm
		2. EFNARC: 650 a 800 mm
		3. JSCE: 600 a 700 mm
		4. PCI: ≥ 660 mm
		5. RILEM TC 174: N/A
		6. Swedish Concrete Association: 650 a 750 mm
	<i>T- 50</i>	2. 2 a 5 segundos
		4. 3 a 5 segundos
6. 3 a 7 segundos		
Habilidad de paso (habilidad de paso por aberturas estrechas, flujo confinado, flujo restringido, estabilidad dinámica)	<i>Embudo V *</i>	1. < 8 segundos
		2. 6 a 12 segundos
		4. 6 a 10 segundos
	<i>Caja L, h_1/h_2</i>	2. > 0.8
		4. > 0.75
		6. > 0.8
	<i>Caja U, B_h</i>	2. h_1/h_2 : 0 a 30 mm
		3. Rank 1 * (espaciamiento del refuerzo de 35 a 60 mm) Rank 2 ** (espaciamiento del refuerzo de 60 a 200 mm)
		4. Rank 1
	<i>Anillo J &</i>	2. < 10 mm
4. < 15 mm		
Habilidad de llenado (habilidad de llenado + habilidad de paso, + deformabilidad restringida)	<i>Llenado Vessel (caisson)</i>	1. $\geq 80\%$
		2. 90 a 100%
	<i>Caja L, h_1/h_2</i>	Lo mismo que para la habilidad de paso
	<i>Caja U, B_h</i>	Lo mismo que para la habilidad de paso
<i>Anillo J</i>	Lo mismo que para la habilidad de paso	
Estabilidad estática (resistencia a la segregación, sangrado y asentamiento)	<i>Asentamiento superficial</i>	1. $\leq 0.5\%$
	<i>Índice de estabilidad visual</i>	4. 0 o 1
	<i>Penetración</i>	5. ≤ 8 mm
		6. ≤ 8 mm
	<i>GTM estabilidad aparente</i>	2. $\leq 15\%$

* Abertura del embudo V de 65 x 75 mm.

+ Rank 1 se refiere a B_h de 305 mm a través de barras de 5 a 10 mm de diámetro con un espaciamiento de 35 mm.

** Rank 2 se refiere a B_h de 305 mm a través de barras de 3 a 12 mm de diámetro con un espaciamiento interno y externo de 35 a 45 mm.

◊ El valor se determina por la diferencia en la altura del concreto dentro y fuera del Anillo.

1.2.3 Agregado ligero en el concreto

En principio el uso de agregados ligeros en el concreto se justificaba únicamente por el logro de un peso unitario menor, tal como lo hicieron los romanos hace poco más de dos mil años. El curado interno es otra tecnología que recientemente alienta a su uso.

1.2.3.1 Concreto de peso ligero

La sustitución de agregados de peso normal por agregados de peso ligero sugiere la reducción de las propiedades mecánicas del concreto y el aumento en la capacidad de absorción, entonces, se requiere de una gran cantidad de pasta para lograr una trabajabilidad adecuada y una resistencia a compresión determinada Hwang y Hung [2005]. Por ejemplo, con el fin de obtener concreto auto-consolidable ligero (SCLC, siglas en inglés) de alta resistencia (HS-SCLC, siglas en inglés), Y.-W. Choi et al. [2006], evaluaron el comportamiento de las mezclas en estado fresco y las propiedades mecánicas en el estado endurecido, obteniendo resistencias a compresión a los 28 días mayores a los 40 MPa, gracias a un elevado consumo de cemento y a la presencia de adiciones reactivas.

No obstante se debe recordar que, en lo referente a los requisitos de durabilidad, se reconoce que al reducir la cantidad de agua y el contenido de cemento dentro de la mezcla se minimizan problemas de deterioro como los cambios volumétricos y sus consecuencias [Mehta PK 2001, Neville A 2000].

Una investigación más detallada es la que presentan Topçu y Uygunoğlu [2010], ellos estudiaron los efectos de diversos tipos de agregado ligero en las propiedades físicas y mecánicas: conductividad térmica, peso unitario, porosidad, capilaridad, resistencia a compresión y tensión, modulo de elasticidad y resistencia a la abrasión. Sus resultados muestran que el concreto con agregado ligero presenta propiedades físicas y mecánicas reducidas, excepto las propiedades térmicas cuando se comparan a las propiedades de un concreto convencional.

Enfocado a criterios de durabilidad, Her-Yung [2009] examinó el SCLC hecho con sedimentos dragados sinterizados, mediante penetración de cloruros, resistividad eléctrica, e inmersión en una solución de sulfito de sodio. Sus resultados indican que el SCLC hecho con sedimentos dragados tiene buenas características en el estado endurecido

y de durabilidad aunque no establece la comparación entre las propiedades de un SCC de composición similar con las investigadas en su estudio.

La reducción en las resistencias mecánicas demerita el hecho de que exista una mejor trabazón entre la pasta y el agregado. Lo y Cui [2004] demuestran la formación de una delgada capa de etringita de 5–10 μm en la zona intersticial del concreto de peso ligero, demostrando que el “efecto muro” (ausencia de trabazón mecánica pasta-agregado) no se presenta en la superficie de los agregados de peso ligero.

En estado fresco, el comportamiento de la mezcla se ve afectado por el hecho de la fracturación que sufre el agregado ligero durante el mezclado. La fracturación trae consigo una gran absorción de agua (cuando se emplean agregados ligeros en condición seca) y, por consiguiente una marcada pérdida de revenimiento [Mindess y Young, 1981]. Este fenómeno hace que el diseño de una mezcla de SCLC sea un reto. Aparte de la reducción de la densidad por la inclusión del agregado ligero, la investigación de Mindess y Young [1981], muestra una reducción de la conductividad térmica, concordando con los resultados de Topçu y Uygunoğlu [2010].

Uno de los aspectos negativos del concreto en general y que es más notorio en el concreto ligero, es la contracción por secado, Kayali y Haque [1999] tratan de disminuir este efecto con la inclusión de fibras metálicas y de polipropileno, encontrando que el concreto de peso normal se estabiliza después de 400 días, mientras que la contracción del concreto ligero no parecía estabilizarse después de un período similar de secado continuo.

1.2.3.2 Curado interno

El curado interno es especialmente benéfico en concretos con relaciones A/C bajas debido a la retracción química que acompaña a la hidratación del cemento portland y a la baja permeabilidad de la matriz cementante. Una pasta de cemento en hidratación puede consumir (cerca de 0.07 g de agua/g de cemento) de una fuente disponible [Geiker, 1983].

Para relaciones A/Cm elevadas, este requerimiento e agua es abastecido por una fuente externa de curado superficial. En concretos de baja relación A/Cm la permeabilidad se reduce rápidamente e impide el paso del agua desde el exterior, bajo esta declaración Bentz y Snyder [1999] proponen un procedimiento para determinar la cantidad de

agregado ligero para curado interno, para que el agua pueda estar distribuida de manera uniforme en la masa del concreto.

El curado interno Principalmente se direcciona a reducir la retracción a edad temprana y ha dado buenos resultados en el desempeño de semejante tarea. Geiker et al [2004] compararon la eficiencia de los agregados ligeros contra los polímeros súper absorbentes (SAPs, por sus siglas en inglés) en la reducción de la retracción autógena para morteros con relación A/Cm de 0.35 y 8% de humo de sílice. Sus resultados muestran que los SAPs son más eficientes que los agregados de peso ligero en la reducción de la retracción autógena, ya que se logra una mejor distribución de ellos en la microestructura tridimensional del mortero.

Pese a los buenos resultados que se obtienen con el uso de los SAPs en la reducción de la retracción autógena, la disponibilidad y el alto costo de estos materiales, hacen que esta opción sea poco viable. Además, la reducción en la retracción autógena que proporciona el empleo de agregado de peso ligero como medio de curado interno es lo suficientemente provechosa como para hacer extensivo su uso.

Un estudio que demuestra este hecho fue desarrollado por Duran-Herrera et al [2007] quienes estudiaron el comportamiento de la retracción a edad temprana y posterior para concreto curado internamente, en el cual usaron el remplazo de 20%, en masa, de arena ligera por arena de peso normal. Los resultados no solo demuestran la eficiencia del remplazo en cuanto a la retracción, sino también una reducción en la permeabilidad a los Cl⁻ y una afectación insignificante en la resistencia a compresión a la edad de 28 días.

Pese a que la eficiencia del curado interno puede variar según el método de saturación que se empleé, se reconoce que la saturación por 24 h del agregado ligero ofrece buenos resultados sin realizar procedimientos elaborados como la saturación al vacío. Este hecho quedo demostrado en la investigación de Kabay N. y Aköz F. [2011] quienes reportan una comparación de las propiedades mecánicas y de retracción por secado en concretos hechos con pumicita como medio de curado interno. Como variables en su investigación estudian tres diferentes métodos de saturación;

Saturación por una hora (media hora antes de la mezcla, por rociado y media después del mezclado donde absorberá agua de la mezcla para luego liberarla. En esta parte no se proporcionan detalles de la cantidad de agua empleada para este fin.

- Saturación por inmersión en agua durante 24 h previas al mezclado, y
- Saturación al vacío por 10 minutos.

El curado interno es un tema interesante para el quehacer investigador, mucha información ha surgido al respecto y con ella se han creado modelos que engloban la reducción de la retracción (y la consiguiente reducción de los agrietamientos por este efecto) con la reducción en el ingreso de agentes agresivos al acero de refuerzo.

Como ejemplo, se tiene el estudio de Cusson et al [2010], quienes gracias a la modelación realizada del tiempo de inicio de la corrosión, logran establecer los beneficios del concreto de alto comportamiento (HPC, siglas en inglés) con materiales cementantes suplementarios (SCM, siglas en inglés) y del HPC con SCM curado internamente. Estos beneficios se establecen en cuanto al incremento de la vida útil con relación al concreto normal y al ahorro en el costo total del ciclo de vida.

Como caso de estudio, toman tableros de puente y encuentran que se lograría extender 20 años la vida útil si se cambia de HPC con SCM a HPC con SCM curado internamente y hasta 40 años si se compara este último con el concreto normal. También se proporciona un indicador de la reducción total en el costo del ciclo de vida de los tableros. Al compararlos con los tableros hechos de concreto normal, los resultados muestran que se logra economizar 40% al usar HPC convencional y de 63% al emplear HPC curado internamente. Esto se debe a una mayor vida útil, y por consiguiente a que serán requeridas menos actividades de mantenimiento. No obstante, el costo unitario colocado del HPC curado internamente puede ser 4% mayor al del HPC curado convencionalmente, y a la vez, hasta 33% mayor que el costo del concreto normal.

El comportamiento mejorado de durabilidad, en cuanto a transporte de agentes agresivos, se puede explicar como una adición de efectos, uno es que la microestructura curada internamente tiene menos tendencia a la retracción a edad temprana [Cusson D. y Hoogeveen T. 2008], otra es que la microestructura se logra densificar más por la

presencia de una fuente disponible de agua que permite al cemento anhidro reaccionar [Bentz y Snyder 1999] y otra más es la desconexión (no percolación) que se origina en la zona de transición interfacial formada (ITZ, siglas en inglés) alrededor de las partículas de agregado ligero.

En los agregados de peso ligero la estructura de la zona de transición interfacial es más densa al compararla con la ITZ que se forma alrededor de los agregados de peso normal. Este efecto de densificación de la ITZ crea discontinuidades en el trayecto de especies iónicas agresivas como los Cl^- . Bentz [2009] determinó la reducción de la difusividad apoyándose en medidas de penetración del Cl^- combinadas con la modelación computarizada de la percolación de la ITZ y simulaciones de difusión aleatoria. Basado en mediciones de profundidad de penetración se estimó una reducción de 25%, en este caso el Reemplazo de arena ligera por arena de peso normal, en volumen, fue de 31%. Los resultados de la modelación indican que la reducción en el coeficiente de difusión se debió a una reducción significativa en el volumen de la ITZ percolada y a la hidratación mejorada a largo plazo del mortero curado internamente.

1.2.4 Reductores de retracción

La retracción es una preocupación creciente por la negativa particularidad del HPC de ser altamente susceptible a tal efecto y por los agrietamientos que puede sufrir en consecuencia. Estos agrietamientos a la vez son capaces de coadyuvar en el ingreso de los agentes agresivos al interior del concreto.

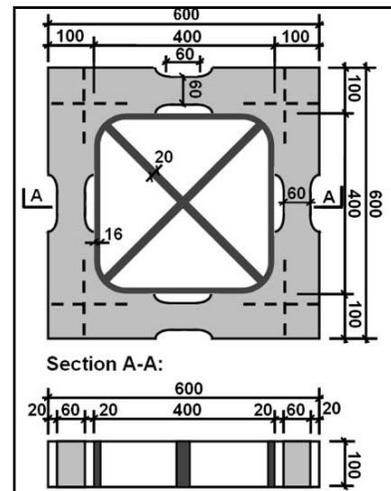
Un estudio que demuestra este hecho es el realizado por Torrijos et al [2010] quienes al someter probetas de concreto a mecanismos incitadores de agrietamiento como la retracción por secado y la reacción álcali-sílice (ASR, siglas en inglés) encontraron que en el caso de la retracción por secado la permeabilidad se incremento constantemente con la densidad de agrietamientos. En el caso de la ASR se encontraron diferencias en la prueba de penetración de agua correspondiendo a la orientación de los agrietamientos.

Para inducir los agrietamientos, las condiciones de secado se han dado por someter los especímenes a condiciones de baja humedad y a temperaturas de 150 o 500 °C, en el caso de la ASR el concreto se preparo con agregados altamente reactivos.

Específicamente en el tema de SCC, Loser y Leeman [2009] ponen en evidencia el mayor potencial de retracción que tiene el SCC sobre el concreto convencional. En su investigación fabricaron trece mezclas de SCC usando como variables; el volumen de pasta, el contenido de agua, el tipo de cemento, la distribución del tamaño de agregado y el contenido de SRA y comparándolas con tres mezclas de concreto convencional proucidos con un contenido de pasta constante pero con diferente relación A/Cm.

En este estudio la retracción se evaluó en prismas de 120 x 120 x 360 mm después de 24 h de vida del concreto bajo una carga de 10 MPa. El riesgo de agrietamiento en este estudio se evaluó en condiciones restringidas, mediante la elaboración de especímenes de concreto colados alrededor de un marco de acero, el cual fuerza la existencia de puntos de quiebre, el monitoreo se basó en realizar observaciones diarias hasta que se notara visualmente el quiebre ocasionado por el cambio de humedad en el almacenado a una misma temperatura de 20 °C, 2 días a 99% de HR, después 12 días a 70% HR, y el resto del tiempo a 35% de HR, hasta el quiebre. La figura 28 muestra la configuración del espécimen, las acotaciones se encuentran en milímetros.

Figura 28. Configuración del espécimen para medir la tendencia al agrietamiento utilizado por Loser y Leeman [2009].



Los resultados muestran que el agrietamiento depende principalmente de del volumen de la pasta, así es claro que el SCC mostró una retracción más grande que el concreto convencional. La adición de SRA fue la única medida que reducía la retracción del SCC a valores similares a los del concreto convencional. El agrietamiento por retracción restringida depende de la tasa de retracción, e las propiedades mecánicas y de la velocidad

de secado. Cuando el desarrollo de retracción es lento, el riesgo de agrietamiento del SCC puede ser menor al compararlo con el concreto convencional, aun cuando la retracción es mayor en el primero.

El conocimiento de los efectos que acarrea la presencia de agrietamientos causados por la retracción ha dado lugar a investigaciones que proponen ciertas sustancias como reductoras de este efecto (aditivos reductores de la retracción). Como se vio en la sección 1.1.4.2, se establece al reducir la tensión superficial de la solución localizada en los poros capilares se puede disminuir la presión de succión que genera la retracción [Weiss et al 2008; Sant et al 2006; Bentz et al 2001; Bentz 2005]

Bajo condiciones de secado, se observa que los SRA incrementan el volumen de poros que se vacían a una humedad relativa dada, modificando así el rango de humedad durante el cual los esfuerzos capilares determinan la respuesta de retracción. Weiss et al 2008; Sant et al 2007a;

Otra explicación a este fenómeno surgida del estudio de las deformaciones autógenas sobre materiales base cemento indican que la adición de una SRA puede resultar en un período de expansión que a su vez induce esfuerzos de compresión en el sistema [Weiss et al 2008; Sant et al 2007b]. Este período de expansión, que inicia poco después del fraguado ofrece un beneficio considerable en la mitigación de la retracción, incluso a una escala de tiempo más amplia [Weiss et al 2008; Sant et al 2007b y Cusson 2008]. El impacto de la expansión en la mitigación de la retracción autógena es considerable, ya que la expansión puede alcanzar hasta el 60% de la reducción en la retracción no controlada en condiciones herméticas [Weiss et al 2008; Sant et al 2006]. Esto indica que una gran parte de la reducción de la retracción autógena por el uso de SRA surge de la expansión.

La causa de la expansión no está claramente comprendida. Para estudiar las propiedades a edad temprana y describir el mecanismo de la expansión de pastas de OPC con y sin SRA; Sant et al [2011] proponen en su investigación una caracterización que incluya de deformación autógena, difracción de rayos X, el análisis de solución de poro, la termo-gravimetría y microscopía electrónica de barrido. La composición de la solución de poro indica que la presencia de SRA aumenta el nivel de portlandita en la solución, lo que

puede resultar en esfuerzos de cristalización más altos que inducen expansión. Esta observación se soporta en el cálculo de la deformación de los sistemas examinados.

Los beneficios del empleo de SRA no se limitan a la reducción de la retracción, otro efecto atribuido en pro de la durabilidad es la reducción de las tasas de transporte. Bentz et al [2009] demuestran cómo se logra reducir la penetración de Cl⁻ al emplear SRA en el concreto. La dosificación se realiza de tres formas diferentes; mezclado con el resto de los materiales al momento de fabricar el concreto, aplicado a la superficie del concreto endurecido como medio de curado, y por último, incorporado a la mezcla dentro de partículas de agregado ligero, caracterizadas por una alta absorción.

Los resultados demuestran una clara reducción en la profundidad de ingreso del Cl⁻ y además reporta que la forma más eficaz de maximizar este efecto es mediante el uso de agregados ligeros como medio de dosificación del SRA.

Este efecto se adjudica a la modificación de la viscosidad de la solución de poro. Este comportamiento obedece a la relación Stokes-Einstein que demuestra dependencia inversa entre los coeficientes de difusión y viscosidad de la solución

$$D_o = \frac{k_B T}{6\pi\eta_0 r} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde;

D_o es el coeficiente de difusión de un ion

K_B es la constante Boltzmann

T es la temperatura,

r es el radio de la partícula en difusión, y

η_0 es la viscosidad de la solución.

Entonces, la relación sugiere que la difusión puede reducirse al incrementar la viscosidad de la solución de poro. Las moléculas que interactúan con el agua para incrementar la viscosidad pueden actuar como una barrera física que reduce la tasa de difusión iónica.

1.2.5 Mucilago de nopal

El uso del nopal en aspectos relacionados con la construcción es ancestral, hoy en día ha sido retomado y sus usos son muy variados, así como sus investigaciones. Carmen Sáenz [2006] cita a varios investigadores que han utilizado el mucilago de nopal para diversos usos en la construcción, a saber en Perú, Ramsey, en 1999 estudió el uso de mucilago de cladodios de nopal para estabilizar bloques de adobe; aunque comparándolo con la cal, los resultados obtenidos no fueron los esperados. La metodología utilizada para preparar la goma de nopal como estabilizante, consiste en limpiar y remojar en agua los cladodios (1-1 en peso); las mejores condiciones de remojo fueron los 18 días a 20 °C (82-92 % HR) o entre 7 y 14 días entre 20 y 25 °C (77-88 % HR).

Del mismo modo, Cárdenas et al. [1998] efectuaron ensayos preliminares acerca del mucilago de nopal en pastas de hidróxido de calcio, indicando que su incorporación vuelve más manejable la textura de la cal, asimismo, ha señalado que desde hace muchos siglos en México se agrega el mucilago de nopal como un adhesivo orgánico a la cal para restaurar y proteger edificios históricos. En un estudio hecho por estos autores, se probó la adición de jugo de nopal (extraído de pencas hervidas) a la cal $[Ca(OH)_2]$ en proporciones diferentes (0,65, 1,95 por ciento). La resistencia de las pastas secas fue evaluada por una prueba penetración-ruptura con un texturómetro.

A medida que la cantidad de jugo de nopal aumentaba, se produjo una reducción drástica del estrés máximo y de la tasa de deformación, comparada con un testigo (sin jugo de nopal). En cambio, la cal control, mostró una estructura mecánica más homogénea. En la muestra con la dosis más baja de jugo de nopal (0,65 por ciento) se observó que el mucilago tenía un bajo efecto en la continuidad de la red, haciendo una fase más discontinua y a la red de $Ca(OH)_2$ más débil. Cuando la dosis de jugo de nopal aumentaba, las propiedades mecánicas también aumentaron debido a la formación de una red homogénea en la que el mucilago del nopal interpenetraba en la del hidróxido del calcio, sin modificación de la estructura, en comparación con el control.

Por su parte, Hernández y Serrano [2003], en un estudio sobre adición de mucilago de nopal liofilizado a morteros de construcción, observaron que la adición de 0.5 g de mucilago liofilizado de nopal mejoraba las características mecánicas de la mezcla, con una

mejor resistencia a la compresión que los respectivos controles sin mucilago de nopal. La mezcla de yeso, arena de sílice, y mucilago de nopal liofilizado mostro una resistencia a compresión de 151.8 kg/cm² a los 28 días, en contraste con el control que fue de 125.6 kg/cm².

Otras investigaciones sugieren que el mucilago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros, disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión [Chandra et al. 1998]. De manera paralela, Torres Acosta y Cano Barrita [2007], desarrollaron una investigación utilizando mucilago de nopal en pastas de cemento, mortero y concreto, encontraron que el utilizar soluciones al 1% disminuye la permeabilidad, no se encontró diferencia significativa en la resistencia a compresión.

Por su parte, en Israel, Rwashda [citado por Garti (1999)] ha estudiado la capacidad como agente emulsionante del mucílago de *Opuntia Ficus Indica*. El autor encontró que este mucilago:

- Reduce la tensión superficial e interfacial;
- Estabiliza emulsiones del tipo aceite-agua;
- No genera floculación a los sistemas en que se agrega.

Últimamente está siendo estudiado el uso de los cladodios para evitar la corrosión. En Marruecos, Hammouch et al. [2004] informan de que la utilización de un extracto acuoso obtenido de los cladodios demostró ser exitoso para evitar la corrosión del hierro. Por su parte Torres- Acosta et al. [2004] en estudios preliminares, encontraron que la adición de mucílago de cladodios al hormigón evitaba la corrosión de barras de acero inmersas en el mismo. Torres-Acosta et al. [2004] también analizaron la adición de mezclas de nopal y Aloe-vera en el hormigón, como un modo de aumentar las propiedades anticorrosivas al entrar en contacto con acero.

Recientemente Ramirez - Arellanes [2012] et al encontraron que el mucilago en concreto reduce la absorción capilar y también los coeficientes de difusión de cloruros en relaciones A/Cm de 0.3 y 0.45. La extracción del mucílago de nopal fue por medio de escaldado, molienda y maceración para finalmente filtrarlo y obtener la solución de mucílago de nopal. Se utilizó agua bidestilada para la preparación de la solución de

mucílago de nopal y las distintas mezclas de concreto y pastas de cemento. En cuanto al uso el mucilago en el concreto, las metodologías de extracción Torres-Acosta y Cano-Barrita [2007] demuestran como la obtención de soluciones acuosas de mucilago por hervido conservan por más tiempo su viscosidad que al hacerlo por escaldado-maceración.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Actualmente, uno de los retos que enfrenta la industria de la construcción es el generar tecnologías que permitan el incremento de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, es bien sabido que el deterioro de estas, se debe en gran medida a los cambios volumétricos en el concreto y al ingreso de sustancias que provocan corrosión del acero.

Los SCC son una innovación tecnológica que ofrece muchas ventajas en sector de la construcción con concreto. Debido a las bajas relaciones A/Cm con que se produce y a los elevados consumos de cemento que emplean, resultan susceptibles al fenómeno de la retracción en diferentes etapas de su vida, incrementando con ello, el potencial de agrietamiento. Al sumar las ventajas del SCC a la reducción del peso unitario, resultan incrementadas las aplicaciones y beneficios del ahora SCLC. Pero de igual forma se ven incrementados sus problemáticas, pues a la retracción inherente al SCC se le ha de añadir la mayor retracción por secado a edad posterior ocasionada por la gran capacidad de absorción de la mayoría de los agregados de peso ligero.

La retracción, ha logrado ser reducida mediante el curado interno. Otra tecnología que permite mitigar la retracción es la inclusión de aditivos reductores de retracción. Estos aditivos se caracterizan principalmente por poseer una viscosidad elevada y una tensión superficial baja con respecto al agua de mezcla, que al incorporarse al concreto pueden disminuir los agrietamientos (camino libre para agentes agresivos hacia el acero de refuerzo), y además; su uso ha resultado en la disminución de las tasas de transporte por difusión, absorción o flujo bajo presión.

Considerando, con respecto al agua de mezcla, a la tensión superficial baja y a la viscosidad elevada de los reductores de retracción, y el origen natural de sustancias que

poseen propiedades similares, este trabajo se propuso para estudiar el efecto del mucilago de nopal en la retracción y propiedades de transporte. Con esto se plantea explorar nuevas y potenciales aplicaciones del nopal, incrementando con ello el estado del conocimiento sobre el control de la estabilidad volumétrica del concreto.

Es así que se propone incorporar mucilago de nopal en solución acuosa a través de arena ligera incorporada en el concreto como sustitución de la arena de peso normal, comparándola con tecnologías novedosas que para este fin emplean SRAs y que han demostrado mayor efectividad que el curado interno convencional con agua.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1 Objetivo general.

Evaluar el comportamiento del mucilago de nopal en solución acuosa para la reducción de la retracción, comparando con tecnologías ya existentes empleadas para abatir este problema como lo es el curado interno y un aditivo reductor de retracción.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un SCC con extensibilidad objetivo de 660 ± 20 mm y caracterizar sus propiedades de auto-compactabilidad.
- Establecer proporciones optimizadas por consistencia y estabilidad para un SCLC con un peso unitario de 1800 ± 20 kg/m³, producido con una mezcla de agregados calizos y pumicíticos.
- Evaluar y comparar el efecto del mucilago de nopal en propiedades del concreto fresco y endurecido.
- Evaluar y comparar el efecto un aditivo reductor de retracción en propiedades del concreto fresco y endurecido.
- Evaluar y comparar el efecto en las propiedades mecánicas, elásticas e indicadores de durabilidad que genera la adición del mucilago de nopal, como agente de curado interno en solución acuosa e incorporado al concreto por medio de arena

pumicítica, con relación al curado interno con agua y con una solución acuosa con aditivo reductor de la retracción.

1.5 HIPÓTESIS.

El uso del mucilago de nopal en solución acuosa, utilizado como aditivo en la mezcla de concreto o como solución de curado interno, reduce la retracción autógena, la retracción por secado y las propiedades de transporte clave para la durabilidad de estructuras de concreto reforzado, de forma similar a como lo hace un reductor de retracción comercial.

CAPÍTULO 2:
PROCEDIMIENTO
EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en esta investigación, el programa experimental estuvo dirigido a conocer el efecto que tiene el mucilago de nopal en solución acuosa en el SCC, en cuanto a cambios volumétricos e indicadores de durabilidad y propiedades mecánicas.

Para este fin, el programa experimental contempla la caracterización de 11 mezclas para las cuales en la tabla 6. En esta tabla se describen las condiciones del agregado al momento de la mezcla y la forma en que se dosificó cada aditivo.

Previo al establecimiento de las proporciones definitivas de las mezclas de referencia se requirió realizar mezclas de prueba, hasta alcanzar las características de auto-compactabilidad deseadas, estableciendo como la propiedad objetivo a la extensibilidad en un rango de 660 ± 20 mm y un peso volumétrico aproximado de 1800 kg/m^3 . La figura 29 muestra la división del proceso experimental en 5 etapas; diseño de mezcla, obtención del concreto ligero auto-consolidable, soluciones para curado interno, curado de los especímenes y caracterización de especímenes.

Más adelante se describe de forma concisa cada una de las etapas, mencionando los las consideraciones de cada prueba particulares de cada una de ellas.

Tabla 6. Descripción de las 11 mezclas producidas.

Mezcla	Designación	Descripción de la Mezcla	Condición de los agregados al momento del mezclado				Forma de dosificación de las soluciones	
			Grava caliza	Arena caliza	Grava pumicítica	Arena pumicítica	SR	NA
1	R	Concreto de referencia con ac .	ambiente	ambiente	---	---	---	---
2	L	Concreto ligero con ap y ac combinados.	ambiente	ambiente	Saturada en agua	Saturado en agua	---	---
3	IC	Concreto con ac y CI .	ambiente	ambiente	---	Saturada en agua	---	---
4	ICNA	Concreto con ac y CI modificado con NA	ambiente	ambiente	---	Saturada en NA	---	En la arena pumicítica
5	IC-MNA	Concreto con ac , CI y con NA	ambiente	ambiente	---	Saturada en agua	---	En la mezcla
6	ICSR	Concreto con ac y CI modificado con SR	ambiente	ambiente	---	Saturada en SR	En la arena pumicítica	---
7	IC-MSR	Concreto con ac , CI y con SR	---	ambiente	---	Saturada en agua	En la mezcla	---
8	L-NA	Concreto ligero con ap saturados de NA	---	ambiente	Saturada en agua	Saturada en NA	---	En la arena pumicítica
9	L-MNA	Concreto ligero con ap y NA	---	ambiente	Saturada en agua	Saturada en agua	---	En la mezcla
10	L-SR	Concreto ligero con ap saturados de SR	---	ambiente	Saturada en agua	Saturada en SR	En la arena pumicítica	---
11	L-MSR	Concreto ligero con ap y SR	---	ambiente	Saturada en agua	Saturada en agua	En la mezcla	---

ac = agregados calizos
ap = agregados pumicíticos
CI = curado interno
NA = solución de mucilago de nopal
SR = solución de reductor de retracción

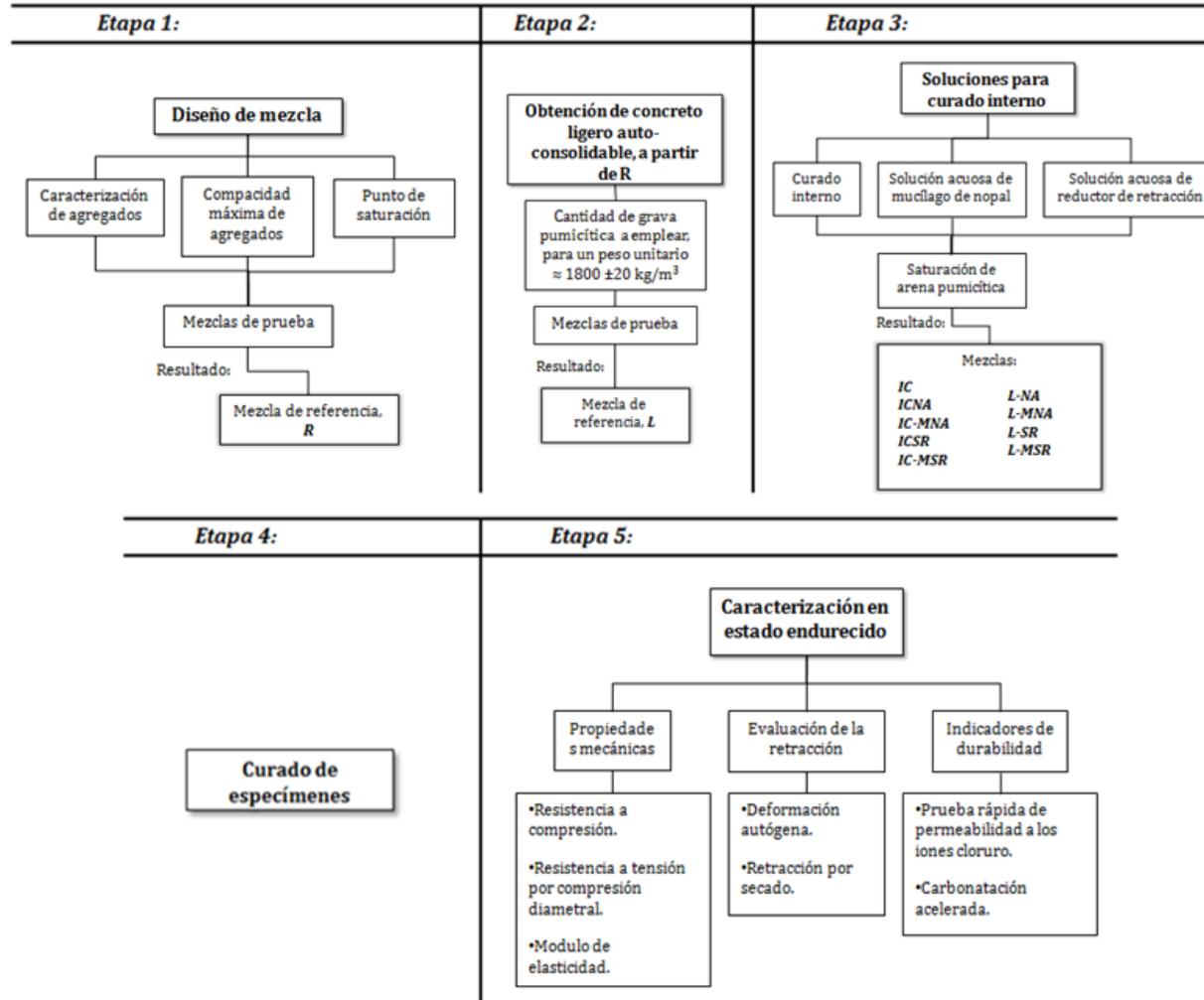


Figura 29. División en etapas del programa experimental.

2.1 Diseño de mezcla.

La primera etapa de esta experimentación consistió diseñar la mezcla de referencia, mezcla base para el programa experimental. El propósito fue establecer la combinación óptima de ingredientes para obtener las propiedades objetivo de auto-compactabilidad, lo que requirió conocer las características de los ingredientes. A continuación se describen las partes involucradas en esta etapa.

2.1.1 Caracterización de los agregados.

Dada la extensibilidad objetivo del SCC de referencia por producir y a las dimensiones de los especímenes contemplados en las pruebas de retracción por secado y carbonatación acelerada, se optó por emplear un agregado grueso calizo característico de la región, de tamaño máximo de 10 mm (3/8") y una arena No. 4, caliza también, con tamaño máximo de 5 mm.

Los agregados fueron caracterizados físicamente mediante la determinación de las siguientes propiedades:

Peso volumétrico seco suelto, PVSS - Determinado mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C29-09.

Masa específica y porcentaje de absorción de las arenas - Determinado mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C128-07. En el caso de la arena ligera, se realizaron modificaciones a este procedimiento; se redujo la masa de la muestra de prueba y se usó de una malla para evitar la flotación del agregado durante la saturación.

Masa específica y porcentaje de absorción del agregado grueso - Determinado mediante el procedimiento de la norma ASTM C127-07. En este caso también se redujo la masa de la muestra y se usó de una malla que impidiera la flotación de las partículas de agregado grueso ligero.

Distribución granulométrica - La granulometría se realizó de acuerdo a ASTM C136-06. En esta determinación también se utilizó una muestra de menor masa para el caso de la arena ligera.

Tabla 7. Resumen de las propiedades físicas de los agregados empleados en la experimentación.

Material	Absorción %	Masa específica g/cm ³	PVSS g/cm ³
Grava caliza	1.3	2699	1543
Arena caliza	2.3	2635	1617
Grava pumicita	31.8	850	484
Arena pumicita	43.7	1571	849

En la tabla 7 se presentan las propiedades físicas de los ingredientes empleados en la mezcla. Las figuras 30 y 31 muestran el resultado del análisis granulométrico de los agregados empleados. En el caso del agregado grueso ligero no se muestra una curva, ya que solo se empleó la fracción que pasa la malla 3/8" de y se retiene en la malla #4.

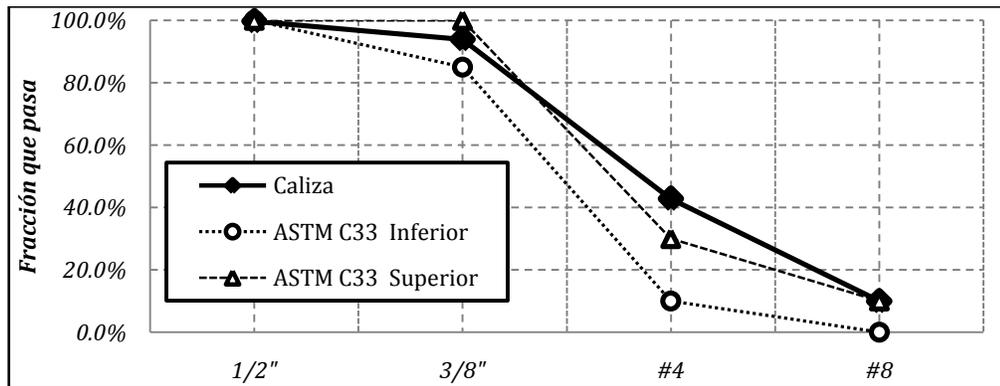


Figura 30. Distribución granulométrica del agregado grueso calizo, reconocido en la región como "gravilla".

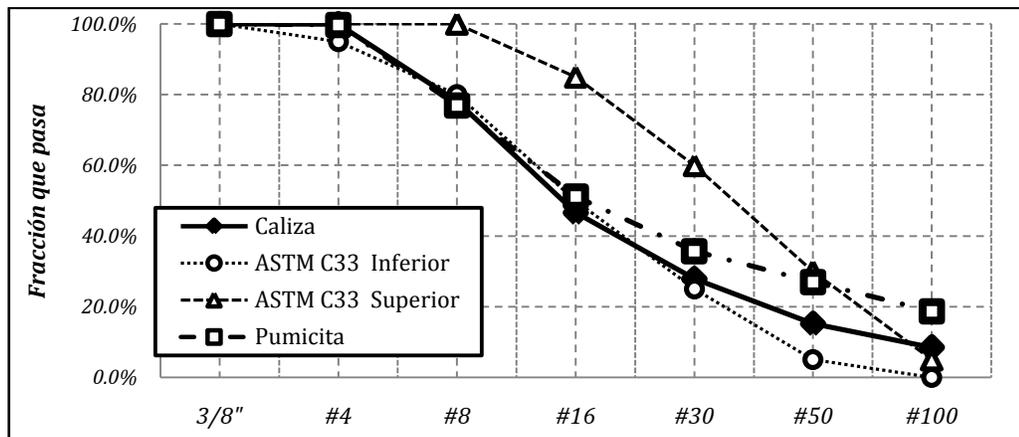


Figura 31. Distribución granulométrica de los agregados finos, caliza y pumicita.

2.1.2 Compacidad máxima de los agregados.

La participación de los agregados de peso normal en la mezcla ha sido seleccionada en base al criterio de compacidad máxima, la cual representa el máximo grado de acomodo para una mezcla de agregados. El procedimiento seguido fue el indicado por la norma ATSM C29-09. La figura 32 es la representación grafica de los resultados de esta etapa. Cada punto en la grafica es el resultado de 5 determinaciones. Con los resultados obtenidos se calculó la densidad de empaquetamiento (PD, siglas en ingles) y el contenido de vacios. La figura 33 muestra los resultados de esta prueba.

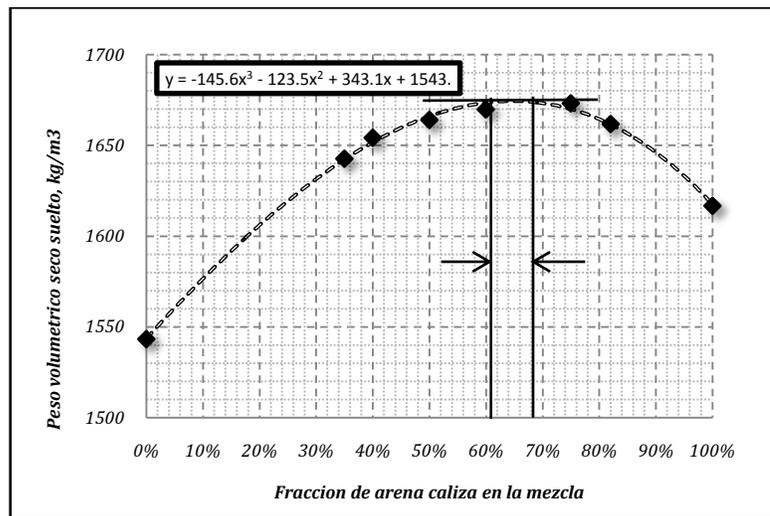


Figura 32. Combinación de agregados para alcanzar la máxima compacidad.

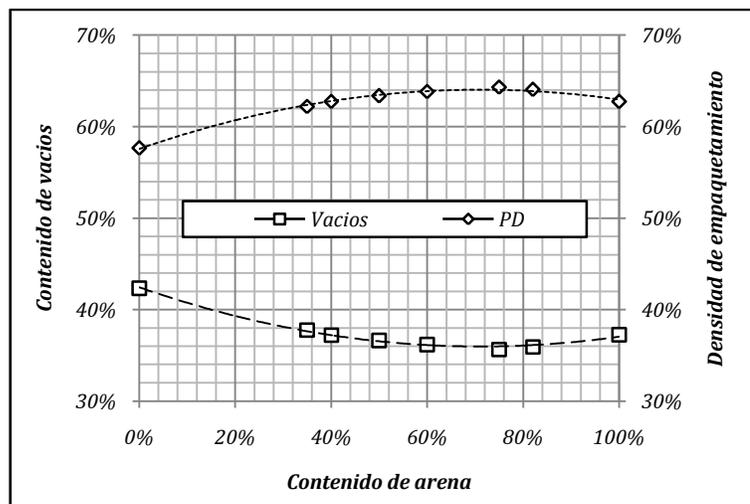


Figura 33. Densidad de empaquetamiento y contenido de vacios para las combinaciones de agregado.

2.1.3 Puntos de saturación

El objeto de realizar los puntos de saturación es simple; obtener la cantidad óptima de aditivo ya que sobredosificar aditivo traería consigo un desperdicio del mismo y al subdosificar no se explotaría su potencial. El punto de saturación del aditivo, se define como la dosificación óptima del aditivo, para la cual la pasta ya no presenta un aumento significativo en la fluidez. Este método ha sido propuesto por Gomes et al [2001] basándose en el tiempo de fluidez de la pasta a través de la abertura de 8 mm del cono Marsh. El aparato que se emplea en esta determinación se ilustra en la figura 35.

Cabe mencionar que en esta investigación se utilizó cemento portland ordinario clase resistente 40 (CPO 40), un tipo de cemento recomendado para la construcción de elementos estructurales de edificios de gran altura (columnas, trabes, cimentaciones, etc), elementos presforzados (trabes, columnas, viguetas), elementos postensados, aeropistas, etc. Este cemento cumple con las normas ASTM C 150-11 y NMX- C-414-ONNCCE-2004.

En estas pruebas, el volumen de pasta producido fue de 1.5 litros, siguiendo procedimiento de mezclado recomendado por la ASTM C 305-06. El mayor lapso de tiempo, transcurrido entre el fin del mezclado y el vaciado de la pasta en el cono Marsh, fue de 30 segundos. El tiempo se registró con ayuda de un cronómetro del inicio del flujo de la pasta la probeta, midiendo el tiempo cuando se llenaban los niveles de: 250 ml, 500 ml, 750 ml, y 1000 ml.



Figura 34. Mezcladora para pasta y morteros.



Figura 35. Cono Marsh y probeta.

Para determinar el contenido óptimo de superplastificante, se grafican las diferentes dosificaciones de aditivo. El tiempo en segundos, en el eje de las ordenadas,

contra la dosificación de aditivo en mililitros por kg de cementante total (mL/kgCm), en el eje de las abscisas.

El punto de saturación del aditivo superplastificante se determinó a partir de la curva obtenida para un volumen de pasta de 750 ml, trazando una recta en los puntos de la región III, figura 36. Con base en esto, el punto de saturación será el punto donde la curva se despega de la recta de tendencia del tramo III.

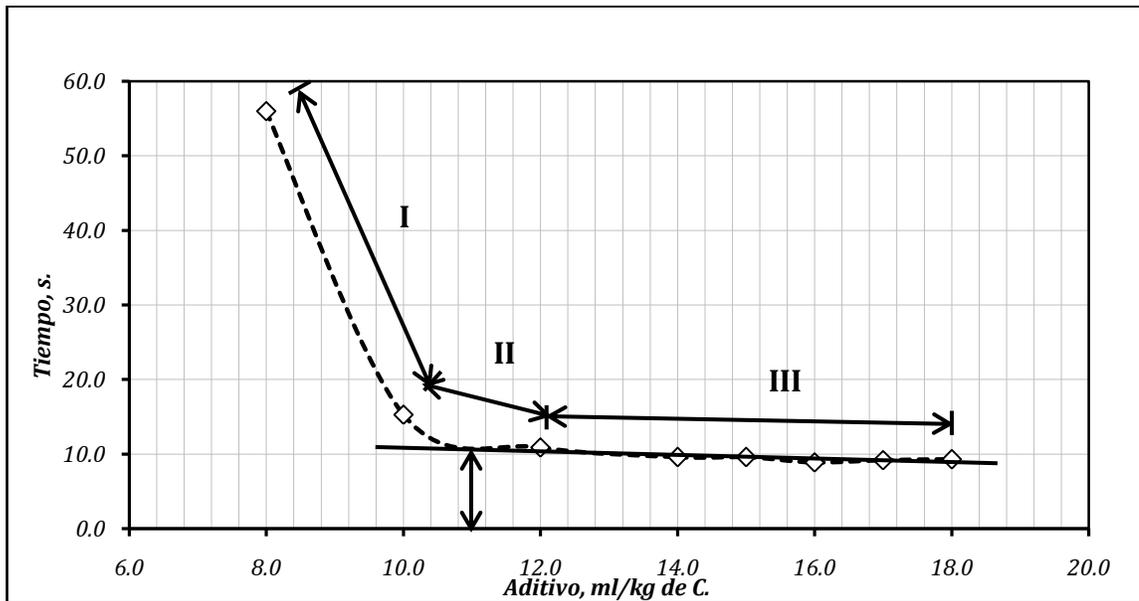


Figura 36. Determinación del contenido óptimo de aditivo superplastificante.

2.1.4 Métodos de prueba para el concreto fresco

A continuación se describen los diversos métodos de prueba que se utilizaron en la presente investigación para caracterizar las propiedades del SCC en estado fresco. Al final de esta sección se presenta un resumen de los valores objetivo para las pruebas empleadas en la caracterización, mismos que fueron seleccionados en base a los rangos reportados por Huang et al [2006].

2.1.4.1 Extensión del revenimiento

El ensayo de extensibilidad de flujo, referido en inglés como *slump flow*, es el método más simple y el más utilizado, debido a la sencillez del equipo que precisa, figura

37. Está procedimiento usa el cono de Abrams, probablemente el ensayo más empleado para la determinación de la consistencia del concreto fresco.



Figura 37. Cono de Abrams y la máxima extensión del SCC.

El cono se lleno en posición invertida, tras levantarlo se midió el diámetro de extensión final, figura 37. Adicionalmente, se determinó el tiempo que tarda la muestra desde el inicio del levantamiento hasta alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{500}). El procedimiento seguido en esta prueba fue el marcado por la ASTM C1611-09. El método evalúa los parámetros; auto-compactabilidad, deformabilidad, y la taza de flujo parámetros relacionados con la viscosidad de la matriz cementante.

2.1.4.2 Caja L

La caja en L, denominada en inglés como L-Box, es un aparato ampliamente utilizado para la caracterización del SCC. Consta de un depósito vertical que se conecta con un canal horizontal a través de una abertura en la que se colocan barras de acero para emular la obstrucción del refuerzo, figuras 38 y 39.

La prueba consiste en llenar el depósito y dejar fluir el concreto hacia el canal a través de las barras. Ya con la mezcla en reposo, se determinaron las alturas H1 y H2 que se alcanzan en ambos extremos de la parte horizontal. La razón $H2/H1$ se define como el coeficiente de bloqueo. La prueba permite cuantificar el bloqueo y estimar la fluidez del concreto tras pasar por los obstáculos. También permite evaluar cualitativamente la resistencia a la segregación mediante la observación visual.



Figura 38. Caja L típica.¹⁴

¹⁴<http://www.humboldtmg.com/c-3-p-183-id-3.html>



Figura 39. Caja L empleada en esta investigación

2.1.4.3 Embudo V

Este ensayo, conocido en inglés como V-funnel, fue desarrollado por Ozawa en la Universidad de Tokio. Estudios experimentales pusieron de manifiesto que al irse reduciendo la sección transversal de la salida del embudo, aumentaba el riesgo de bloqueo por el contacto entre los agregados gruesos, siendo un indicativo de necesidad de modificar la viscosidad.



Figura 40. Embudo V.

El embudo V, normalmente de acero, tiene forma de V con una apertura en el fondo, donde se coloca una compuerta de rápida apertura, para interferir lo menos posible en el momento de la descarga. La geometría de la sección transversal de descarga fue rectangular de 65 x 75 mm. La figura 40 muestra este aparato.

Capítulo 2: Procedimiento experimental

El ensayo consiste en llenar el embudo de forma continua y sin compactación con la muestra representativa de SCC. Seguidamente, se abre la compuerta y en ese instante se comienza a medir el tiempo que tarda el concreto en fluir a través de la apertura. La prueba tiene por tanto como objetivo evaluar la habilidad de fluir del concreto en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, evaluando la tendencia a la segregación y el bloqueo en la salida por la variación de la velocidad de flujo.

2.1.4.4 Anillo J

El anillo de barras, conocido como J-Ring en inglés, es un aparato que normalmente se utiliza en combinación con otras pruebas, como son el de extensión de flujo o embudo-V, con la finalidad de evaluar la capacidad de fluir entre barras de refuerzo. Para esta prueba se utilizó el cono de Abrams junto con el anillo J, figura 41. La norma ASTM C1621-09 describe el procedimiento seguido en esta parte.



Figura 41. Anillo J.

2.1.4.5 Segregación estática

Se empleó la prueba denominada ensayo GTM conocida en inglés como screen stability test. El aparato descrito por el procedimiento consiste en un tamiz de 315 mm de diámetro con abertura de 5 mm. En nuestras pruebas se utilizó un tamiz con abertura de 4.75 mm montado en un marco de 500 x 800 mm. Después del mezclado se colocaron aproximadamente 10 litros de concreto (en un recipiente plástico de 19 litros de capacidad) y se dejaron reposar por 15 minutos. Posteriormente, de la parte superior se extrajeron 4.8 kg, esta muestra fue dejada caer sobre la malla desde una altura de 50 cm y se dejó sobre esta por 2 minutos, después de los cuales se determinó la masa que atravesó.



Figura 42. Ensayo de estabilidad estática GTM.

La figura 42 muestra la malla sobre la que descansa la muestra de SCC y la charola que recoge la pasta desprendida. Considerando el peso relativo de la pasta respecto al de la muestra, se aceptan valores del 15% y menores, y se rechazan concretos con valores superiores al 30%.

2.1.4.6 Contenido de aire

La determinación del contenido de aire se ha realizado en base a los siguientes procedimientos estándar ASTM C231-09, para mezclas con agregados de peso normal usando un tipo de medidor tipo b y C173-10, para aquellas mezclas que contenían agregados de peso ligero.

2.1.4.7 Peso volumétrico

Con el propósito de evaluar el efecto inducido por la incorporación de los agregados de peso ligero la disminución del peso unitario de las mezclas producidas, esta propiedad se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C 138-09.

En resumen, los parámetros de auto-compactibilidad evaluados en la caracterización en estado fresco se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen de parámetros objetivo.

Característica de trabajabilidad	Método de prueba	Valores buscados
Deformabilidad y taza de flujo (Habilidad de llenado, flujo no restringido)	Extensibilidad del revenimiento	680 ± 20 mm
	T- 500	2 a 5 segundos
Habilidad de paso (habilidad de paso por aberturas estrechas, flujo confinado, flujo restringido, estabilidad dinámica)	Caja V (abertura 65 x 75 mm)	< a 8 segundos
	Caja L, h ₁ /h ₂	> 0.8
	Anillo J	< 15 mm
Habilidad de llenado (habilidad de llenado + habilidad de paso, + deformabilidad restringida)	Caja L, h ₁ /h ₂	> 0.8
	Anillo J	> 0.8
Estabilidad estática (resistencia a la segregación, sangrado y asentamiento)	GTM estabilidad aparente	≤ 15 %

2.3 Curado interno

Con el fin de estimar la cantidad de agua requerida para curado interno, se calculó según dos metodologías; el procedimiento desarrollado por Bentz y Snyder [1999], y también en base las recomendaciones de Jensen y Hansen [2001], fundamentadas en los estudios del señor T.C. Powers. El procedimiento recomendado por Bentz y Snyder [1999] se resume en la siguiente ecuación:

$$M_{AL} = \frac{C_f \times RQ \times \alpha_{max}}{S \times Abs_{AL}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde;

C_f = Contenido de cemento por metro cubico, kg/m³.

Capítulo 2: Procedimiento experimental

RQ = Retracción química del cemento, g de agua/g de cemento.

α_{max} = Máximo grado de hidratación esperado.

S = Grado de saturación del agregado de peso ligero, va de 0 a 1.

Abs_{AL} = Absorción de la arena ligera (AL), kg de agua/kg de AL seco.

El dividendo de la ecuación representa la cantidad de agua requerida para curado interno. La diferencia entre estas dos metodologías, es que la propuesta por Bentz y Snyder supone que la cantidad de agua requerida es igual para cualquier relación A/Cm, mientras que el esquema basado en los estudios de Powers establece criterios diferentes para relaciones a A/Cm mayores o menores 0.36, a partir de la cual solo es necesario incorporar el agua necesaria para emular una relación de 0.42, donde el fenómeno de auto-dsecación no representa problema alguno.

A continuación, la metodología propuesta por Bentz y Snyder:

- **Contenido de cemento** - 544.86 kg, de la mezcla de referencia.
- **Retracción química** - La retracción química se ha obtenido empleando los coeficientes proporcionados en Bentz et al [2005]. La tabla 9 muestra el cálculo de este factor. Considerando que la temperatura de curado es de 23 °C, se incrementa el valor de RQ calculado, 0.0005 por cada grado por debajo de 25 °C. Resulta entonces un valor de RQ de 0.0744.
- **Grado de hidratación esperado** - 1.
- **Grado de saturación** – En la figura 43 se observa que la saturación completa ($S=1$) de la pumicita empleada se obtiene después de los 14 días de inmersión en agua, resultando una absorción de 41%. A las 24 h, que fue el periodo de saturación de la pumicita a utilizar en las mezclas, alcanzó el 31.5%, que representa un $S=0.77$, a este valor se le representa como S_{24} , en la ecuación 14.

Tabla 9. Coeficientes para calcular la retracción química debió a la hidratación del cemento

Fase de cemento	Coef. g agua/g fase de cemento	Composición bogue del CPO 40:	Operación:
C ₃ S	0.0704	57	0.0704 x 0.57 = 0.04013
C ₂ S	0.0724	15	0.0724 x 0.15 = 0.01086
C ₃ A	0.171*	9	0.171 x 0.09 = 0.01539
C ₄ AF	0.117*	6	0.117 x 0.06 = 0.00702
	$\Sigma =$		0.0734

*Asumiendo la presencia de suficiente sulfato como para convertir todas las fases aluminato a etringita.

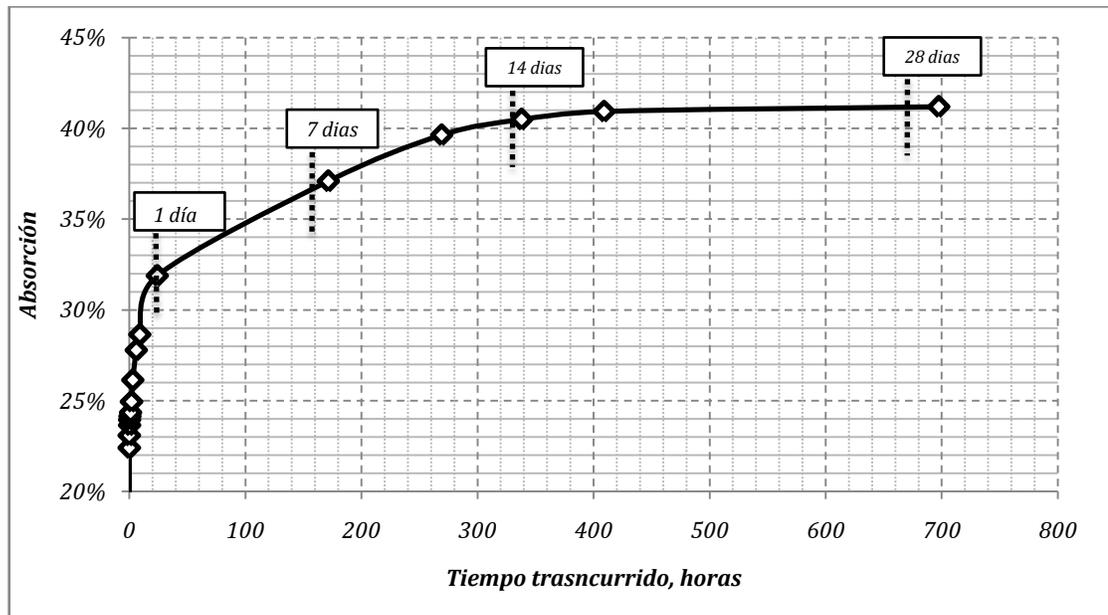


Figura 43. Absorción continua de la arena de pumicita.

- **Absorción de la arena ligera** - De la figura 44 se determinó la desorción de la pumicita, como la diferencia de contenido de humedad al cambiar del 100% a 92% de HR, resultando un valor de 0.3076 o 30.76%.

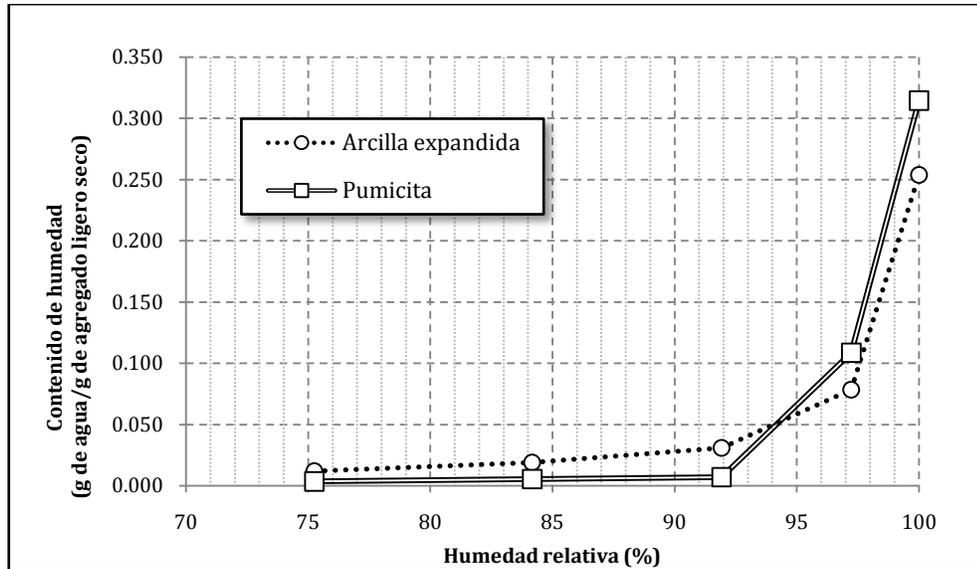


Figura 44. Desorción de la arena de pumicita.

Sustituyendo estos valores en la ecuación 12 resulta:

$$M_{AL} = \frac{C_f \times RQ \times \alpha_{max}}{S \times Abs_{AL}}$$

$$M_{AL} = \frac{544.86 \times 0.0744 \times 1}{0.77 \times 0.3076}$$

$$M_{AL} = 171.15 \text{ kg}$$

Las recomendaciones de Jensen y Hansen [2001] acerca de la cantidad de agua necesaria para evitar la auto-desección establecen que para el rango de relaciones A/Cm entre 0.36 y 0.42, la cantidad de agua que se debería incorporar para el curado estará dada por la ecuación 13:

$$\left(\frac{A}{Cm}\right)_e = 0.42 - \left(\frac{A}{Cm}\right)$$

Ecuación 13

Donde;

Capítulo 2: Procedimiento experimental

$(A/Cm)_e$ = relación agua / cemento en masa correspondiente al agua incorporada para curado interno.

(A/Cm) = relación agua / cemento en masa de la mezcla a producir.

En relación al agua que no permanece como agua libre cuando se mezcla el cemento con el agua, Powers propone que por cada g de cemento se requieren 0.23 g de agua para hidratarlo y que esta agua quedara químicamente ligada a los compuestos de hidratación, a esta agua también se le refiere como agua no evaporable. Sus resultados también proponen que adicionalmente, una cantidad de agua de 0.19 g de agua por g de cemento se queda físicamente adsorbida sobre la superficie de los productos de hidratación sólidos (sólidos en gel), esta agua físicamente ligada o agua gel no constituye parte del agua libre en una solución agua-cemento por tal motivo y basándonos en los resultados de Powers, podríamos decir que el agua libre solo estará disponible en mezclas con relaciones A/Cm superiores a 0.42. En esta investigación la relación A/Cm fue de 0.40

La relación A/Cm propuesta en esta investigación fue 0.4, con el fin de tener suficiente agua libre para hacer notoria la presencia de agua libre y por ende la retracción por secado, pero menor de 0.42 para que la retracción autógena se hiciera presente. La cantidad de agua requerida fue de:

$$\left(\frac{A}{Cm}\right)_e = 0.42 - (0.4) = \mathbf{0.02}$$

En base a esta ecuación, la cantidad de agua necesaria para curado interno resulta:

$$A_e = Cm(0.02) = 545 * 0.02 = \mathbf{10.9 l}$$

Para calcular La masa de agregado de peso ligero requerido para cubrir la demanda de agua calculada en el paso anterior, se utilizo la fórmula propuesta por Bentz y Snyder, Sustituyendo los parámetros referentes a la arena pumicítica en el divisor y en el dividendo, la cantidad de agua necesaria según Jensen y Hansen, resultando la ecuación 14:

$$M_{AL} = \frac{A_e}{S_{24} \times Abs_{AL}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$M_{AL} = \frac{10.9}{0.77 \times 0.3076}$$

$$M_{ArL} = 46.02 \text{ kg}$$

Dependiendo de la cantidad de arena ligera que se incorpore pueden afectarse las propiedades mecánicas y elásticas del concreto. En nuestra investigación 47 kg de pumicita representan una sustitución en volumen absoluto de 11%, con relación a la arena de peso normal, cantidad que resulta inferior a sustituciones del 20% que no han demeritado las propiedades del concreto anteriormente descritas (referencia). Por tal motivo en esta investigación se decidió trabajar con el 20% de sustitución en volumen.

2.4 Soluciones para saturación del agregado ligero

Para evaluar el efecto de la solución acuosa de mucilago de nopal se estudió también la solución acuosa de SRA y el agua, para las cuales ya se han reportado resultados sobre su efecto en los procesos de retracción. De cada solución preparada se obtuvo una muestra para determinar, a 23°C; la densidad, la viscosidad y la tensión superficial.

La densidad se midió en un picnómetro de 10 ml.

En el caso de la viscosidad, esta fue medida con un viscosímetro marca Brookfield, modelo DV II a 5 rpm con spin No. RV 1. El procedimiento empleado es el indicado por la norma ASTM D-2196. La figura 45 ilustra este dispositivo.



Figura 45. Viscosímetro Brookfield DV II.

Capítulo 2: Procedimiento experimental

La tensión superficial se midió en un tensiómetro marca KSV, modelo Sigma 701, empleando el método del anillo, el resultado es promedio de 10 determinaciones. Las figuras 47 a 49 muestran; el equipo completo, posición frasco-anillo, el anillo empleado en la determinación y la determinación de la tensión superficial para el agua potable.



Figura 46. Sistema completo del tensiómetro KSV Sigma 701



Figura 47. Posicionamiento del frasco-anillo empleado para la determinación.



Figura 48. Anillo empleado.

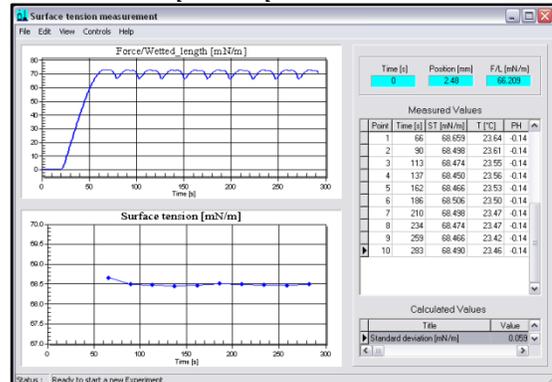


Figura 49. Resultado de tensión superficial para el agua potable

A continuación se exponen los particulares sobre cada una de las soluciones:

2.4.1 Agua potable

En las mezclas donde solo se emplea agua para saturar el agregado ligero se utilizó agua potable, tratando de apegarnos a lo que ocurriría en un escenario real. Una muestra de esta agua fue tomada para su caracterización.

2.4.3 Aditivo reductor de la retracción (SRA)

En función de la capacidad de absorción de la arena ligera, se investigó la proporción de aditivo-agua destilada que cumpliera con la dosificación recomendada por el fabricante del producto. Resultó que la proporción 1:1 se encontraba dentro del rango recomendado. A esta solución se le caracterizó de la forma mencionada al inicio de esta sección.

2.4.2 Solución acuosa de mucilago de nopal.

De los métodos para la extracción del mucilago que se encontraron en durante la consulta bibliográfica, resalta la extracción por hervido por que simplifica la obtención y prolonga el tiempo en el cual el producto mantiene sus propiedades. El procedimiento empleado se describe a continuación.

2.4.2.1 Extracción del mucilago de nopal

La extracción del mucilago de nopal se efecto en de la siguiente forma:

1. Obtención de cladodios recién cortados. La cosecha se lleva a cabo cuando los brotes alcanzan un peso aproximado de 150 – 200 g cada una o que midan de 20 a 25 cm de largo, figura 50.



Figura 50. Cladodio de nopal tipo.



Figura 51. Reducción del cladodio de nopal.

2. Reducción del cladodio a piezas no mayores de 1 cm de espesor, figura 51.

Capítulo 2: Procedimiento experimental

3. Hervido en agua destilada. El hervor se alcanzó a flama de intensidad media en una estufa de gas natural a una temperatura de 94 °C y se mantuvo por 5 min a flama baja, figura 52.
4. Se probaron tres relaciones agua/nopal, en masa; 1, 3.5, 5.5. Se optó por pasar de 1 a 3.5 ya a simple vista la relación de 1 mostraba una viscosidad alta.
5. Enfriamiento de las soluciones a 23 °C de temperatura, se encontró que 24 horas eran adecuadas para este fin, figura 53.
6. Pasadas las 24 horas, se caracterizaron las propiedades de interés de cada solución de nopal producida. Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 10.
7. Una vez seleccionada la solución a emplear, la saturación de los agregados con ella se realizó 24 horas después de producirla.



Figura 52. Hervido del nopal.



Figura 53. Reposo de la solución obtenida.

De los resultados expuestos en la tabla 10 y basados en la menor tensión superficial, se eligió la solución de mucilago 1:3.5.

La figura 54 muestra claramente la reducción de la tonalidad amarillo-verdosa característica de las soluciones al aumentar el contenido de agua. Los resultados de las pruebas de tensión superficial, viscosidad y densidad a 23°C se muestran a continuación, tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la caracterización de las soluciones.

Solución:	Agua potable	SRA-agua 1:1	Mucilago 1:1	Mucilago 1:3.5	Mucilago 1:5
Densidad, g/cm ³	0.9947	1.0129	0.9992	0.9986	0.9955
Viscosidad, cP	3.0	15.0	10.0	5.0	5.0
Tensión sup., mN/m	68.49	30.60	49.24	47.64	49.95



Figura 54. Muestras de las soluciones de mucilago para los análisis de viscosidad y tensión superficial.

2.4.4 Saturación de los agregados ligeros.

La saturación del agregado ligero con cualquiera de las soluciones se realizó por un periodo de 24 h. La cantidad de solución a emplear en la saturación se calculó a partir de la capacidad de absorción de la arena pumicítica a 24 h.

2.5 Dosificación resultante de las mezclas.

A continuación se muestra la dosificación de las mezclas producidas. En esta relación se presentan separadas en dos secciones; concreto de peso normal y concreto de peso ligero.

2.5.1 Concreto de peso normal

Tomando en cuenta que la fluidez y la estabilidad del concreto auto-compactable dependen de las propiedades y del contenido de pasta, la optimización de las proporciones del concreto se realizó incrementando el contenido de pasta en la mezcla. La cuantificación del mínimo contenido de vacíos permitió definir la cantidad de pasta necesaria para llenar tales espacios. Partiendo de la cantidad de vacíos se incrementó sucesivamente el contenido de pasta hasta obtener la extensividad objetivo.

Tabla 11. Proporciones de las mezclas de peso normal.

	Materiales secos por metro cubico de concreto, kg					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
CPO 40	544.25	544.25	544.25	544.25	544.25	544.25
Agua	212.55	212.55	212.55	186.98	212.55	186.98
Arena caliza	900.44	720.35	720.35	720.35	720.35	720.35
Grava caliza	600.29	600.29	600.29	600.29	600.29	600.29
Arena pumicita	---	83.14	83.14	83.14	83.14	83.14
Superplastificante	7.36	7.36	7.36	7.36	7.36	7.36
Adición SRA-agua	---	---	---	25.57	---	---
Adición Nopal-agua	---	---	---	---	---	25.57

Se revisó la capacidad de paso y la estabilidad estática mediante el embudo V y el ensaye de estabilidad GTM. Tanto la extensibilidad como la capacidad de paso y la estabilidad estática resultaron con valores que satisfacen los recomendados por la literatura. Los resultados también fueron satisfactorios en cuanto a los requisitos de la caja L y el anillo J. las proporciones resultantes en el proceso de optimización se reportan en la tabla 11 como proporciones definitivas.

2.5.2 Concreto de peso ligero

Una vez satisfechas las propiedades objetivo para el concreto auto-consolidable de peso normal, se establecieron las proporciones para el concreto de peso ligero sustituyendo todo el agregado grueso y parte del agregado fino por agregado pumicítico de peso ligero para lograr un peso volumétrico de $1800 \pm 20 \text{ kg/m}^3$, el cual se fijó en base al ACI 213 para que el concreto producido se considerara como concreto ligero.

Por la ligereza de la grava pumicítica fue necesario un ajuste al contenido del superplastificante para evitar la flotación del agregado ligero. La tabla 12 muestra las proporciones de las mezclas de concreto ligero.

Tabla 12. Proporciones de las mezclas de peso ligero.

Materiales en condición seca, kg por m³ de concreto					
	L	L-SR	L-MSR	L-NA	L-MNA
CPO 40	544.25	544.25	544.25	544.25	544.25
Agua	213.34	213.34	155.80	213.34	155.80
Arena caliza	495.24	495.24	495.24	495.24	495.24
Grava pumicita	202.88	202.88	202.88	202.88	202.88
Arena pumicita	187.07	187.07	187.07	187.07	187.07
Superplastificante	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
Adición SRA-agua	---	---	57.54	---	---
Adición Nopal-agua	---	---	---	---	57.54

2.6 Pruebas al concreto en estado endurecido.

A continuación se describen los detalles sobre los especímenes, sus condiciones de curado, y las pruebas contempladas para la caracterización en estado endurecido.

2.6.1 Pruebas mecánicas

En esta etapa de la caracterización se determinaron las propiedades mecánicas de; resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a tensión por compresión diametral. Los especímenes empleados fueron cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura.

El curado al que estuvieron sujetos fue un curado estándar, por 7 días, con temperatura y humedad relativa controladas; 23 ± 1.7 °C y 95%, respectivamente. Posteriormente, todos los especímenes fueron sometidos a condiciones de laboratorio, a una humedad relativa de $55 \pm 5\%$ y temperatura de 23 ± 1.7 °C.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal marca Tinius Olsen con capacidad de 200 toneladas. A continuación se hace referencia a los procedimientos para cada una de las pruebas contempladas en esta etapa.

Resistencia a compresión. La resistencia reportada es promedio de tres especímenes, ensayados conforme a la ASTM C39-05, a las edades de 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Modulo de elasticidad y Resistencia a tensión por compresión diametral. Se ensayaron dos especímenes por edad, a las edades de 28 y 91 días, siguiendo el procedimiento descrito por la ASTM C469 -10, en el caso del modulo de elasticidad y el de la ASTM C496-11, en el caso de la tensión por compresión diametral.

2.6.2 Cambios volumétricos.

En esta etapa se evaluaron los cambios volumétricos en los SCC a edad temprana atribuidos a la deformación autógena. A edad posterior, se reviso la retracción por secado.

Deformación autógena. Esta prueba se realizó de acuerdo a ASTM C1698-09. La fabricación de los especímenes se realizó con la fracción mortero del concreto ya que el diámetro de los moldes empleados no permite la utilización de concreto. La prueba se determino a una temperatura controlada de 23 °C. Figuras 55 y 56.



Figura 55. Reposo de los especímenes en laminas de plástico acanaladas



Figura 56. Espécimen y medidor de la deformación autógena.

Retracción por secado. Se utilizaron especímenes prismáticos de 75 x 75 x 285 mm, el monitoreo de las deformaciones siguió el procedimiento de la ASTM C157-08.

2.6.3 Indicadores de durabilidad.

Como se mencionó en los antecedentes, se sabe que la incorporación de sustancias que modifican la composición típica de la solución de poro trae consigo la modificación en las tasas de transporte de sustancias que pueden ingresar a través de la red de poros, ya sean moléculas o iones. Por lo cual esta etapa se propuso para revisar la movilidad de los iones Cl^- y moléculas de CO_2 , así como el efecto en la porosidad del concreto.

Las técnicas empleadas fueron: prueba rápida de permeabilidad a los iones cloruro (RCPT, siglas en ingles), carbonatación acelerada y porosimetría por intrusión de mercurio. Todos los especímenes se curaron de forma estándar por 7 días y después se mantuvieron en condiciones de laboratorio hasta la edad de ensaye. A continuación se describen los métodos empleados, la geometría de los especímenes y las edades de prueba.

Prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro - Para esta prueba se siguió el procedimiento descrito en la ASTM C1202-09 y se empleó un equipo de la marca Germann Instruments conocido como Proov'it, figuras 57 y 58.

El tipo de especímenes, de los que se extrajeron las muestras para esta prueba, fueron cilindros de 100 x 200 mm. Las edades de ensaye han sido 28 y 90 días.

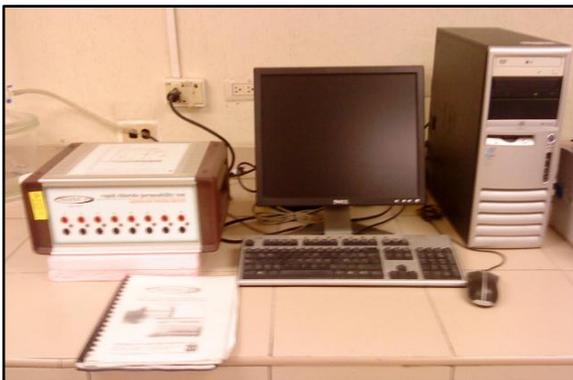


Figura 57. Equipo Proov'it para la PRPC de Germann Instruments



Figura 58. Montaje de las probetas para la PRPC.

Prueba de carbonatación acelerada - En esta prueba, los especímenes se colocaron en una cámara ambiental, acondicionada para mantener una concentración constante de CO₂. La temperatura se fijó en 30°C, la concentración de CO₂ en 4% y la humedad relativa rondando entre 65±5% [Verbreck, 1958; Wierig 1984; Cobo, 2002]. Los especímenes fueron barras prismáticas de 75 x 75 x 300 mm, tres por mezcla, y la cámara empleada es marca Fisher, modelo ISOTEMP 40369, figura 59. Antes de ingresar a la cámara, los especímenes estuvieron 7 días en curado estándar, luego 2 días al horno a 40°C más un día bajo condiciones de laboratorio



Figura 59. Cámara de carbonatación.

Para inducir la carbonatación, los especímenes permanecieron en la cámara, bajo condiciones de prueba, solo fueron extraídos a las edades de 7, 14, 28, 56 y 91 días para realizar un corte en fresco de 4 cm y por medio del rociado una solución de fenolftaleína al 1% , sobre la superficie del corte recién hecho, monitorear el avance de la carbonatación.

El corte en fresco se limpió con aire a presión. La solución de fenolftaleína al 1% en masa, diluida en alcohol etílico. Las figuras 60 a 63 muestran la prueba colorimétrica de las mezclas R, IC, ICNA e IC-MNA sometidas al proceso de carbonatación acelerada durante 14 días.



Figura 60. R a 14 días de carbonatación acelerada.

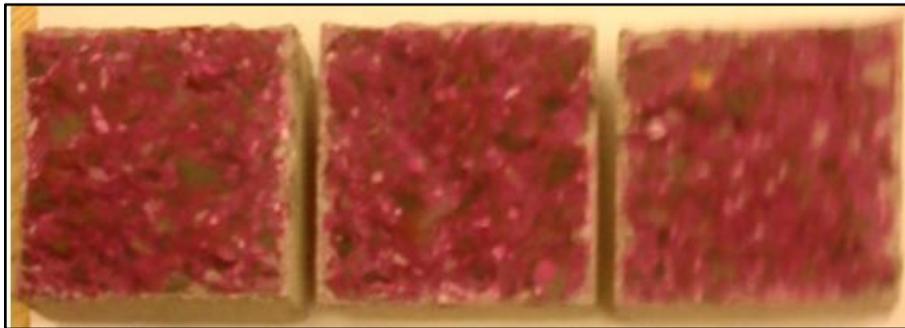


Figura 61. IC a 14 días de carbonatación acelerada.



Figura 62. ICNA a 14 días de carbonatación acelerada

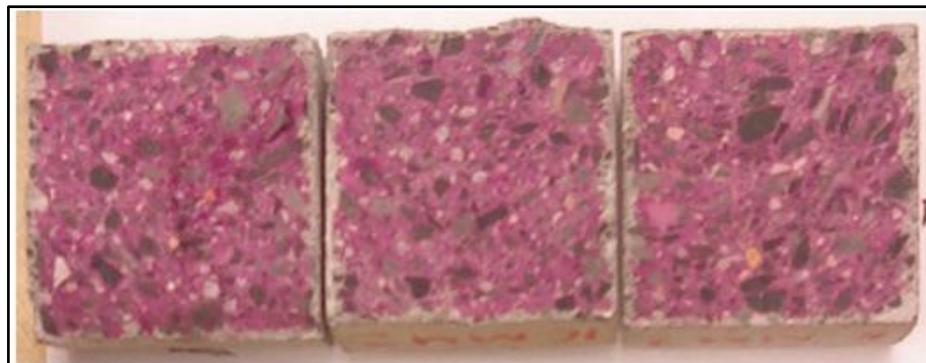


Figura 63. IC-MNA a 14 días de carbonatación acelerada

CAPÍTULO 3:
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1 Propiedades en estado fresco.

La propiedad objetivo para establecer las propiedades optimas fue la extensibilidad y se revisó que el resto de las propiedades quedaran dentro de rango, dada la gradación del agregado grueso y el contenido de cemento, no se tuvo problema en cumplir con los parámetros propuestos.

3.1.1 Concreto de peso normal.

La mezcla R obtuvo el valor más alto de peso volumétrico, tabla13, lo que resulta obvio al considerar el remplazo de arena caliza por arena pumicítica en el resto de las mezclas. La máxima reducción de peso unitario medido fue de la mezcla IC y fue de solo 4%. Esta reducción concuerda en el peso unitario calculado, dada la poca variación existente entre estos parámetros. La mayor densidad de las adiciones SR y NA, nos permiten atribuirles este efecto.

Tabla 13. Propiedades en estado fresco de los SCC.

	Mezcla					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICN	IC-MN
Peso unitario medido, kg/m³	2285	2198	2219	2207	2213	2230
Peso unitario calculado, kg/m³	2290	2216	2216	2216	2216	2216
Contenido de aire, %	2.5	3	2.5	2.5	2.5	2.0
Extensibilidad, mm	680	660	670	680	650	690
T500, s	2	2.3	2.6	2.5	2.8	2
Anillo J, mm	13	14	12	14	14	12
Embudo V, s	3.5	4.8	5.5	4.5	5.6	4.4
Caja L, H2/H1	0.85	0.87	0.88	0.86	0.85	0.90
Segregación estática, %	4.8	4.4	4.1	4.7	4.5	5.1

Comparando el modo de dosificación de las mezclas ICNA e IC-MNA y las mezclas ICSR e IC-MSR es evidente la separación mayor de los valores obtenidos en la mezcla IC

cuando se emplea la adición directa durante el mezclado. Consideramos el valor afectado más importante a la segregación estática.

3.1.2 Concreto de peso ligero.

La producción del SCLC se basó en fijar un peso unitario en fresco de 1800 ± 20 kg/m³ empleando el mismo contenido de cemento e investigando el contenido de aditivo necesario para obtener un SCLC del mismo rango de extensibilidad propuesto para el SCC.

Un efecto similar de aumento de peso unitario se observa al saturar la arena pumicítica con SR y NA, habrá que recordar que solo la arena pumicítica ha sido saturada de las soluciones, pues en esta etapa donde también se usó grava pumicítica, esta última fue saturada con agua potable.

Tabla 14. Propiedades en estado fresco de los SCLC.

	Mezcla				
	L	L-SR	L-SRM	L-NA	L-MNA
Peso unitario medido, kg/m³	1792	1804	1807	1791	1813
Peso unitario calculado, kg/m³	1815	1815	1815	1815	1815
Contenido de aire, %	3.0	3.5	3.0	3.5	3.5
Extensibilidad, mm	680	680	710	690	730
T500, s	2.8	3.1	2.9	3.2	2.8
Anillo J, mm	15	14	13	15	13
Embudo V, s	6.7	7.5	6.3	7.8	6.5
Caja L, H2/H1	0.80	0.80	0.81	0.78	0.83
Segregación estática, %	5.2	4.8	5.5	4.6	5.7

Aquí, la afectación por el modo de inclusión de SR y NA en la también resulta favorable al emplear la incorporación dentro de la arena pumicítica. Lo demuestra fácilmente la menor diferencia entre los parámetros de extensibilidad y segregación estática, donde las mezclas L-NA y L-SR son las más próximas en cada valor a lo obtenido por la mezcla L.

3.2 Propiedades mecánicas

3.2.1 Resistencia a compresión

3.2.1.1 Concreto de peso normal.

En general, la resistencia a compresión de los SCC sufrió poca variación al cambiar el aditivo incorporado y la forma de incorporación. Las resistencias obtenidas a 28 días estuvieron en el rango de 52.0 a 53.9 MPa y a 91 días entre 53.6 y 59.8 MPa, tabla 15.

Tabla 15. Resistencia a compresión promedio de los concretos de peso normal.

Edad de ensaye, días	Resistencia a compresión, MPa					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
3	43.4	43.1	37.5	40.2	44.7	41.4
7	48.5	46.8	39.9	43.1	49.4	45.3
14	50.1	51.7	46.8	49.5	50.3	49.0
28	53.9	55.3	52.8	55.9	52.0	53.1
56	56.9	57.7	56.2	59.2	53.2	54.9
91	57.8	59.2	56.7	59.8	53.6	55.2
	Variación, MPa					
3	5.4	3.9	2.2	3.5	2.8	1.1
7	0.5	1.1	4.1	3.6	2.1	3.5
14	2.5	1.6	2.4	1.9	3.3	1.6
28	1.9	0.5	1.1	1.9	4.5	1.8
56	5.6	3.0	0.6	0.3	3.2	1.9
91	4.5	3.1	4.5	4.7	13.0	2.8

La diferencia de resistencia, con respecto a la referencia, tabla 16, al usar SRA la resistencia fue menor 8% en el caso de la IC-MSR a los 3 días, la reducción a la misma edad, para la mezcla ICSR fue de 16 %. Pero en el caso de la IC-MSR la recuperación de resistencia fue de tal que a 28 y a 91 días superó a la referencia por 4% y 3% respectivamente, y aunque el desarrollo de resistencia para la mezcla ICSR fue similar, esta no superó a la referencia, manteniéndose abajo por 2% a los 28 y 91 días.

Se puede observar de la figura 64, que a las primeras edades la modificación de la resistencia es menor cuando se emplea NA.

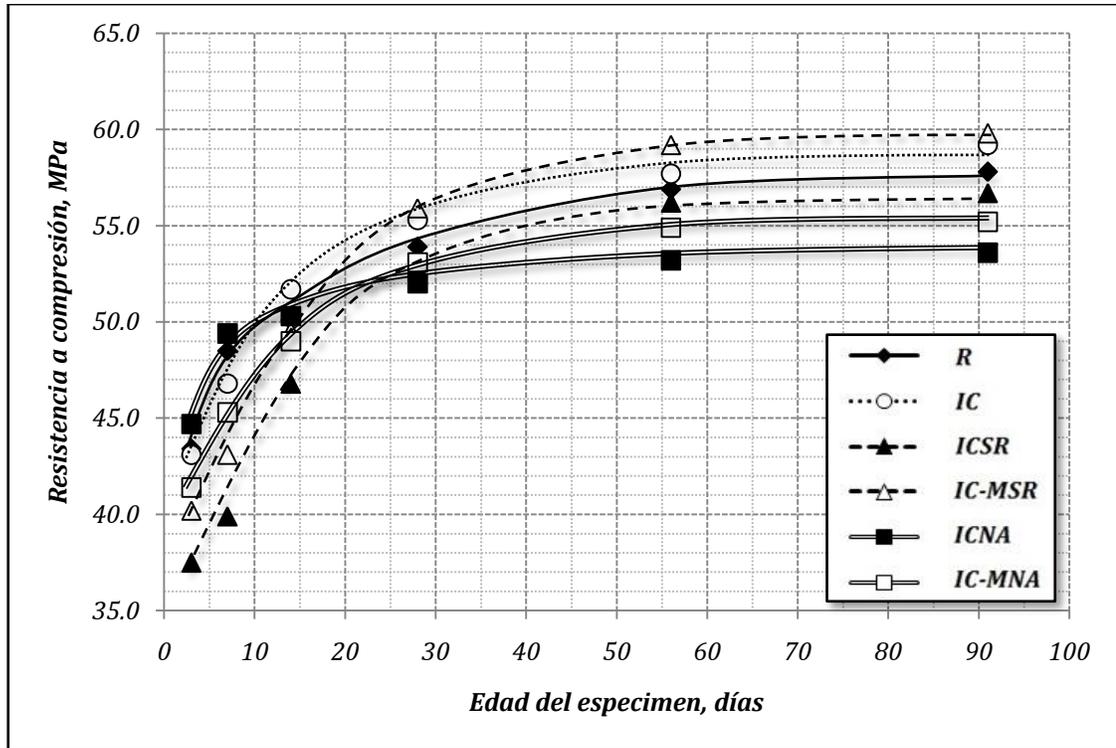


Figura 64. Resistencia a compresión de los SCC.

Tabla 16. Ganancia o pérdida de resistencia a compresión de los SCC con respecto a la mezcla de referencia, R.

Edad de ensaye, días	Ganancia o pérdida de resistencia a compresión.					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
3	0.0%	-0.7%	-13.6%	-7.4%	3.0%	-4.6%
28	0.0%	2.6%	-2.0%	3.7%	-3.5%	-1.5%
91	0.0%	2.4%	-1.9%	3.5%	-7.3%	-4.5%

Otro aspecto a considerar al tratarse de reducción de la resistencia a las primeras edades, es la presencia de una humedad mayor al interior del concreto en todas las mezclas de SCC excepto la mezcla R.

3.2.1.2 Concreto de peso ligero.

Como era de esperarse la reducción del peso volumétrico por la sustitución de la arena, condujo a resistencias menores. Si se considera la resistencia promedio obtenida 91 días en ambos tipos de concreto resulta 57 MPa para los SCC y 32 MPa para los SCLC,

resulta una reducción de 43% con respecto a los SCC. Cabe mencionar que los resultados concuerdan con lo reportado por Harding [1995] cuando se usa pumicita para aligerar el concreto.

Tabla 17. Resistencia a compresión promedio de los concretos de peso ligero.

Edad de ensaye, días	Resistencia a compresión, MPa				
	L	L-SR	L-MSR	L-NA	L-MNA
3	22.5	19.0	21.8	24.7	21.9
7	24.7	24.2	25.6	27.8	23.8
14	27.9	27.3	29.5	29.1	26.5
28	29.4	31.2	32.6	30.5	28.8
56	30.7	32.8	33.9	31.7	29.8
91	30.4	33.5	34.0	31.6	30.7
	Variación, MPa				
3	7.6	1.8	2.2	0.9	1.8
7	1.2	2.0	1.0	0.9	1.8
14	0.7	0.4	3.2	0.2	0.7
28	0.7	2.8	0.7	1.5	2.2
56	1.1	9.9	5.0	0.8	0.3
91	2.9	9.9	5.0	2.7	2.4

Comparando las curvas de tendencia obtenidas para el concreto de referencia en esta parte (mezcla L) con los concretos con SRA observamos, figura 65, que cuando el SRA se dosificó de manera convencional como ingrediente del concreto se obtuvieron ganancias significativas en la resistencia. Expresado en %, la ganancia de L-SR y L-MSR a la edad de 91 días con respecto a la mezcla de referencia fue de 9% y 11% respectivamente, tabla 18.

Tabla 18. Ganancia o pérdida de resistencia a compresión de los SCLC con respecto a la mezcla de referencia, L.

Edad de ensaye, días	Ganancia o pérdida de resistencia a compresión.				
	L	L-SR	L-MSR	L-NA	L-MNA
3	0.0%	-15.6%	-3.1%	9.8%	-2.7%
28	0.0%	6.1%	10.9%	3.7%	-2.0%
91	0.0%	10.2%	11.8%	3.9%	1.0%

Por otra parte, la solución acuosa de mucilago de nopal originó un incremento notorio en el caso de la mezcla L-NA a los tres días de 9% y a los 28 y 91 de 4%. No fue el mismo caso al momento de integrar el NA vía líquida directa al momento del mezclado, pues en este caso se registró un decremento de 3% a los 3 días, de 2% a los 28 y apenas y se logró rebasar por 1% a los 91 días.

Al comparar el resultado promedio de resistencia de los SCLC con SRA contra el resultado promedio de los SCLC con NA, resulta que la resistencia de los SCLC con SRA son mayores en un 7.7 %.

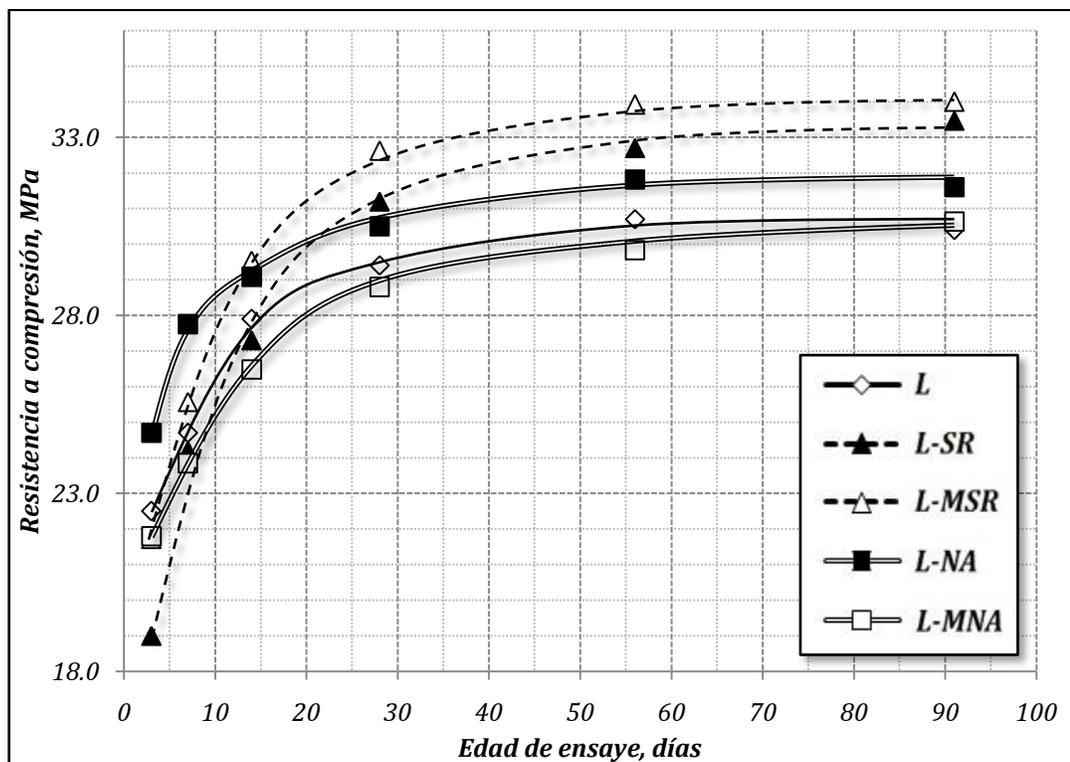


Figura 65. Resistencia a compresión de los SCLC.

En ambos casos (SCC y SCLC) la resistencia a compresión resultó incrementada en edades posteriores a 14 días cuando se emplea el SRA adicionado directamente a la mezcla, esto se debe a la reducción efectiva de la relación A/Cm, pues el SRA se consideró, con fines de diseño de mezcla como agua de reacción.

La reducción en la resistencia hasta los 14 días, con respecto a la referencia, se atribuye al tipo de interacción que tiene el SRA la hidratación del cemento ya que este aditivo está basado en óxido de etileno y monobutil éter y puede entorpecer los procesos de hidratación durante las primeras edades. Así como a la presencia de una mayor humedad en el interior del concreto en el caso de los SCC, y en el caso de los SCLC donde el contenido de agua es el mismo, le atribuimos la pérdida de resistencia a edades iniciales a la tasa de liberación de agua que proporciona el SR dada su mayor viscosidad, retendría por más tiempo la humedad que el NA y el agua potable.

La ganancia de resistencia a edades posteriores nos indica entonces que es posible que esta obstaculización se reduzca conforme la HR del interior decrece. Además en el caso del SRA del tipo empleado se sabe que el mecanismo bajo el cual actúa es por la creación de compuestos expansivos [Sant et al, 2010] que podrían densificar la matriz cementante haciéndola más resistente.

En el caso de la adición del NA que afecta negativamente, puede ser que la dosis de NA no fuera suficiente como para mejorar el comportamiento, como dice Cárdenas et al [1998], quien noto que al aumentar la dosis de jugo de nopal aumentaba, las propiedades mecánicas también aumentaron debido a la formación de una red homogénea en la que el mucílago del nopal interpenetraba en la del hidróxido del calcio, sin modificación de la estructura, en comparación con el control, cabe mencionar que este estudio se realizó en pastas de hidróxido del calcio.

3.2.2 Modulo de elasticidad.

La incorporación del aditivo SRA o del mucílago de nopal ya sea como agente de curado interno en solución acuosa o como aditivo en la masa del concreto no tuvo efectos en el modulo de elasticidad estático que refleje disminución a ganancia atribuible a la incorporación de estos aditivos.

Los resultados de modulo de elasticidad también ilustran que arena el volumen de 20% y de arena de peso normal que se sustituyo por el mismo volumen de arena ligera tuvo como efecto en general una ligera reducción en el caso de las mezclas de SCC.

Al comparar resultados entre las edades de 28 y 91 días, podemos observar que a los 91 días los módulos de elasticidad resultan en general con una ganancia entre 0.17 y 1.82 % para el SCC de peso normal y en el caso del SCLC resulta una afectación similar a la del caso de la resistencia a compresión; un aumento en el caso del IC-MSR y reducción en el caso de usar NA.

3.2.2.1 Concreto de peso normal.

Tabla 19. Modulo de elasticidad promedio de los concretos de peso normal.

Edad de ensaye, días	Modulo de elasticidad de los concretos de peso normal, GPa					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
28	35.14	35.34	35.78	35.77	35.20	35.42
91	37.88	37.03	37.21	37.62	36.92	36.99
Variación						
28	1.04	2.02	3.58	2.58	2.64	1.26
91	2.64	8.26	5.64	6.36	3.32	7.78

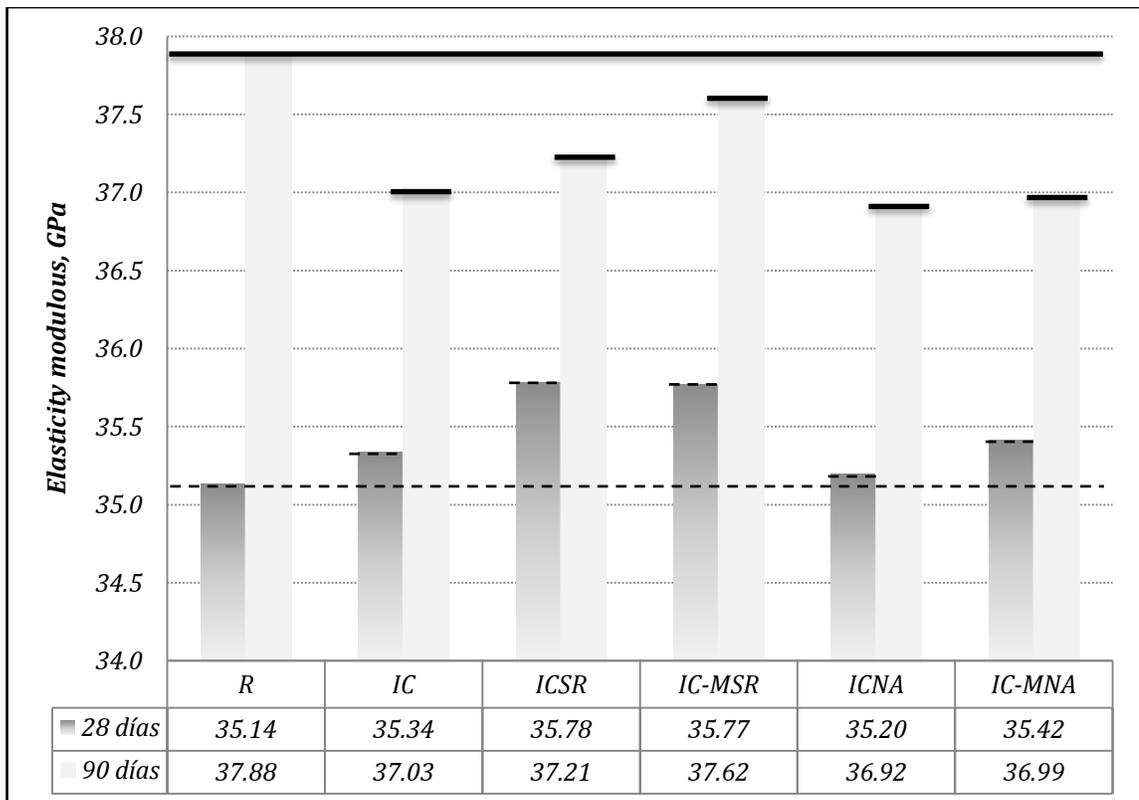


Figura 66. Modulo de elasticidad de SCC

3.2.2.2 Concreto de peso ligero.

Tabla 20. Modulo de elasticidad promedio de los concretos de peso ligero.

Edad de ensaye, días	Modulo de elasticidad de los concretos ligeros, GPa				
	L	L-SR	L-MSR	L-NA	L-MNA
28	14.62	14.11	14.97	14.10	14.45
91	15.87	16.55	17.28	15.66	15.91
Variación					
28	3.88	2.4	1.64	2.78	1.92
91	3.96	1.54	1.98	1.6	3.42

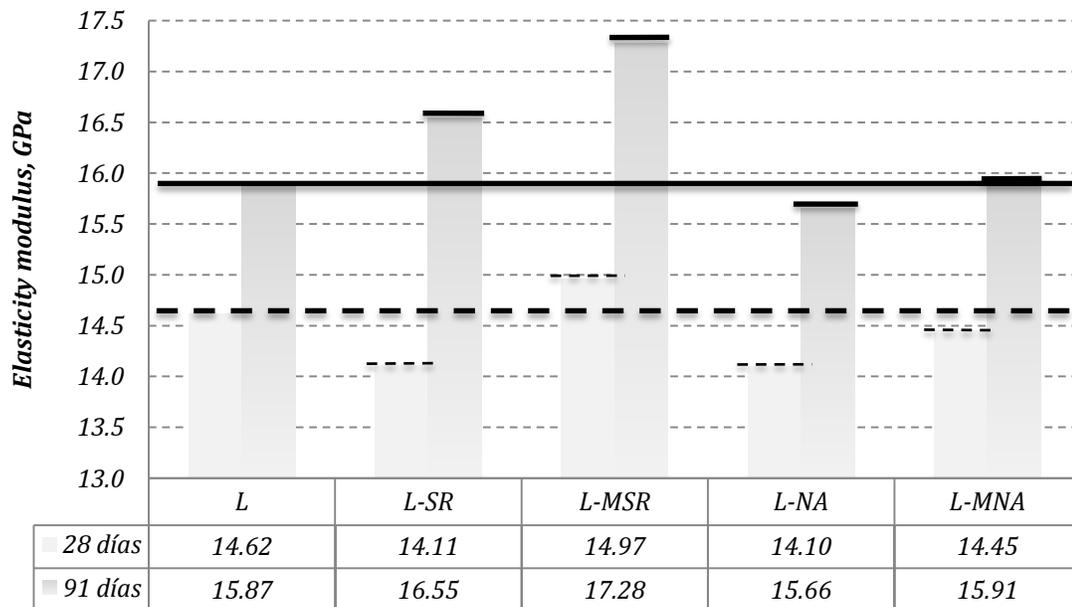


Figura 67. Modulo de elasticidad de los SCC.

3.2.3 Tensión por compresión diametral.

3.2.3.1 Concreto de peso normal.

En la figura 68 se observa que a la edad de 28 días, el mucilago de nopal arrojó resultados ligeramente superiores a la referencia, en promedio 0.73% para ambos modos de dosificación.

A los 91 días los SCC con mucilago de nopal presentaron incrementos mayores con relación a la referencia, los cuales resultaron de 5% para cuando el aditivo se utiliza como agente de curado interno y de 2% para cuando la solución acuosa de mucilago de nopal se utilizó como aditivo en la mezcla de concreto.

Tabla 21. Resistencia indirecta a tensión y variación de los ensayos de SCC.

Edad de ensaye, días	Resistencia indirecta a tensión, MPa					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
28	3.44	3.41	3.35	3.35	3.46	3.47
91	3.49	3.61	3.65	3.58	3.66	3.56
Variación, MPa						
28	0.457	0.019	0.015	0.114	0.221	0.096
91	0.022	0.562	1.242	0.241	0.400	0.095

Por otro lado el aditivo SRA presentó reducciones a la edad de 28 días, 3% para cuando el aditivo se utilizó por cualquier de los 2 modos de dosificación como agente de curado interno y como aditivo en la mezcla de concreto y a los 91 días de edad ambos modos presentaron incremento de 5% y 3% respectivamente, lo cual refleja un efecto significativamente más favorable del curado interno.

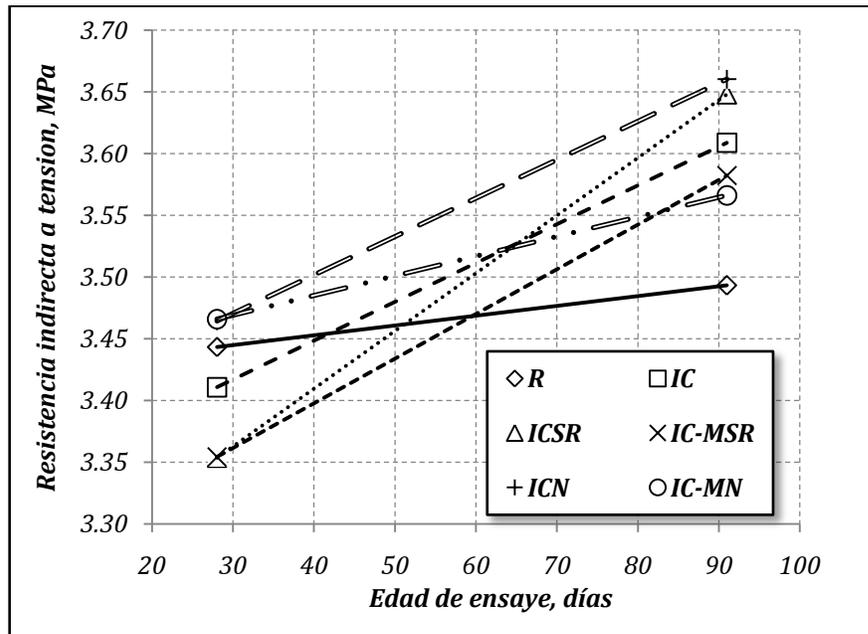


Figura 68. Tensión por compresión diametral SCC.

La figura 69 se presentan las tasas de incremento en la resistencia a la tensión por compresión diametral que presentaron los seis concretos estudiados en la serie SCC de peso normal todos los concretos producidos con curado interno ya sea convencional, con aditivo SRA o con mucilago de nopal y las producidas con el aditivo en la mezcla presentaron tasas mayores a la del concreto de referencia, siendo los de mayor ganancia los dosificados con aditivo SRA.

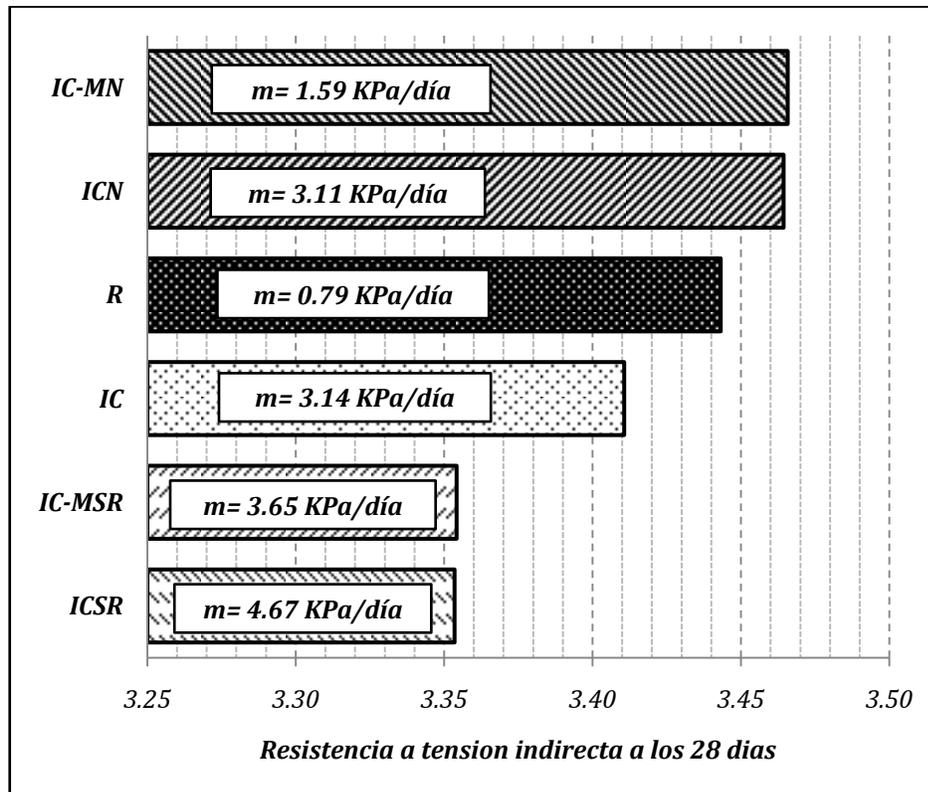


Figura 69. Resistencia indirecta a tensión de los SCC, dentro de la barra se muestra la pendiente de la recta entre 28 y 91 días, de la figura 68.

Con relación a la referencia, el mucilago de nopal presentó una tasa de tres veces mayor a la referencia cuando se utilizó como agente de curado interno y una vez mayor cuando se utilizó como aditivo en la mezcla de concreto y respectivamente presentó tasas del 57% y el 33% con relación a las obtenidas para el aditivo SRA.

El aditivo SRA arrojó tasas 3 y 2.5 veces superiores a las obtenidas para la referencia cuando se dosificó como agente para el curado interno y como aditivo en la mezcla respectivamente.

Por su parte el curado interno convencional presentó una tasa 2 veces superior a la de referencia.

3.2.3.2 Concreto de peso ligero.

La figura 70 muestra los siguientes resultados de tensión por compresión diametral de las SCC producidas con agregado ligero, por el peso volumétrico de estos concretos, los resultados se encuentran en un rango de valores inferior (1.91 - 3.02 Mpa) al rango en que se marcaron los resultados de los SCC de peso normal (3.35 - 3.65 Mpa) para el periodo de 28 a 91 días.

En ésta serie de concretos, los dosificados con SR y NA presentaron en todos los casos resistencias superiores a la referencia, siendo que los que presentaron mayor resistencia fueron los dosificados con mucilago de nopal.

El mucilago de nopal fue el que originó las mayores ganancias en resistencias, las cuales a la edad de 28 días fueron de 31% y 33 % para los concretos en los que el mucilago se dosificó en la masa de concreto o como agente para curado interno, respectivamente. A la edad de 91 días las ganancias fueron de 16% y 10% respectivamente.

Tabla 22. Resistencia indirecta a tensión promedio de los SCLC.

<i>Edad de ensaye, días</i>	<i>Resistencia indirecta a tensión, MPa</i>				
	<i>L</i>	<i>L-MSR</i>	<i>L-SR</i>	<i>L-MNA</i>	<i>L-NA</i>
<i>28</i>	<i>1.91</i>	<i>2.05</i>	<i>2.27</i>	<i>2.51</i>	<i>2.54</i>
<i>91</i>	<i>2.61</i>	<i>2.65</i>	<i>2.76</i>	<i>3.03</i>	<i>2.87</i>
<i>Variación</i>					
<i>28</i>	<i>0.298</i>	<i>0.437</i>	<i>0.178</i>	<i>0.468</i>	<i>0.421</i>
<i>91</i>	<i>0.186</i>	<i>0.351</i>	<i>0.208</i>	<i>0.133</i>	<i>0.179</i>

El aditivo SRA originó ganancias de 7% y 19 % para los concretos en los que el aditivo SRA se dosificó, en la masa de concreto ó como agente para curado interno respectivamente. A la edad de 91 días las ganancias fueron de 2% y 6 % respectivamente.

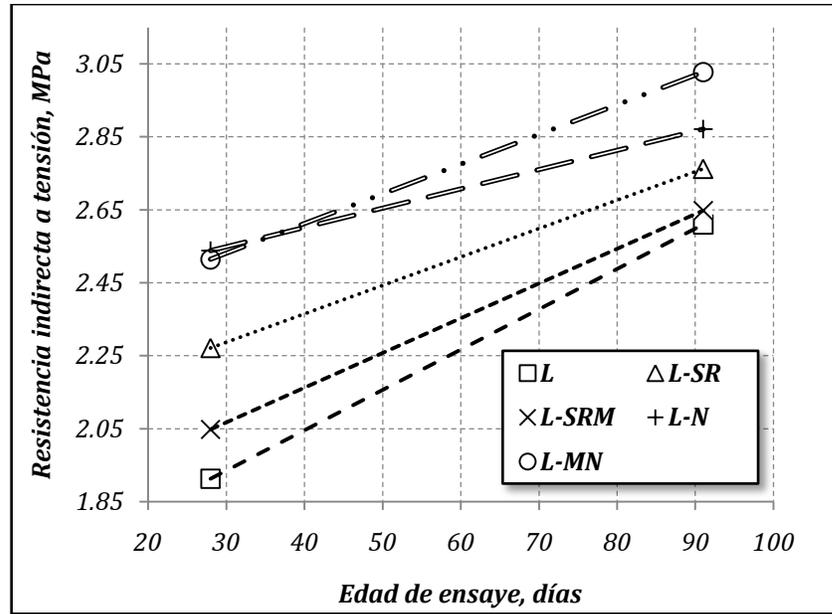


Figura 70. Resistencia indirecta a tensión de los SCLC.

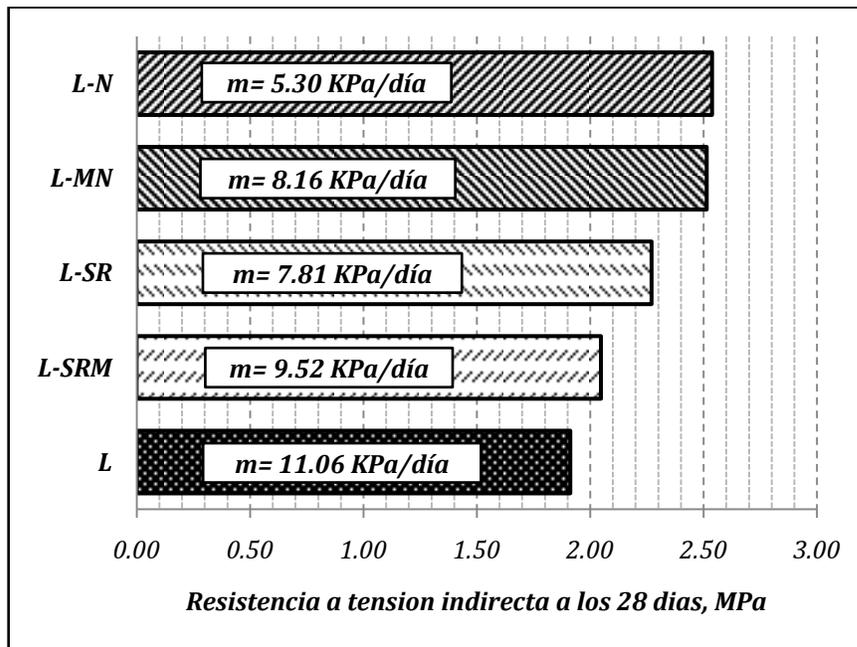


Figura 71. Resistencia indirecta a tensión de los SCLC, dentro de la barra se muestra la pendiente de la recta entre 28 y 91 días, de la figura 70.

3.3 Cambios volumétricos

3.3.1 Deformación autógena.

3.3.1.1 Concreto de peso normal

La figura 72 permite observar la expansión generada por la adición de SR a las primeras horas, lo que concuerda con lo explicado por Sant et al [2010].

La figura 73 muestra que la expansión generada es estable (a comparación de la ICNA) permitiendo la reducción de retracción a edades posteriores. Sorprende el comportamiento de la mezcla ICNA, que sigue la combinación de; una viscosidad elevada, una tensión superficial reducida y la interacción con productos de la reacción del de hidratación de la NA, con respecto al agua potable.

Esto permite que, a comparación de las mezclas con SR (con una viscosidad superior), la NA sea liberada con mayor facilidad e interactue [Cárdenas et al 1998, Chandra, 1997] para propiciar este efecto.

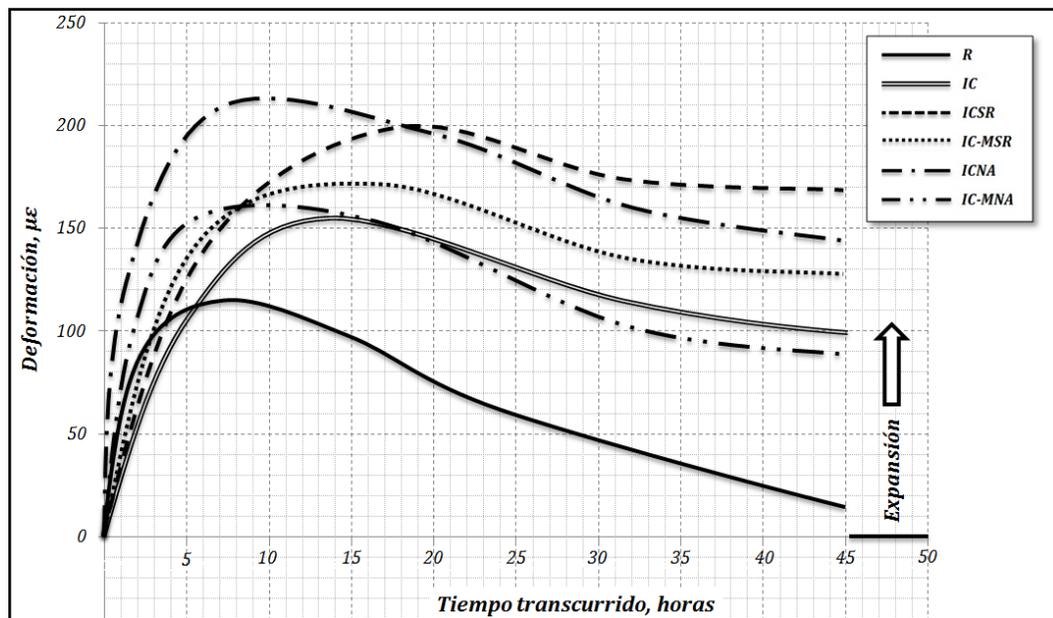


Figura 72. Deformación autógena en la fracción mortero del SCC, monitoreada durante 45 horas después del fraguado final.

Se debe considerar la generación de calor en todas las mezclas debido al elevado consumo de cemento y a la relativamente baja relación A/Cm como una participación en la expansión presente en todas las mezclas.

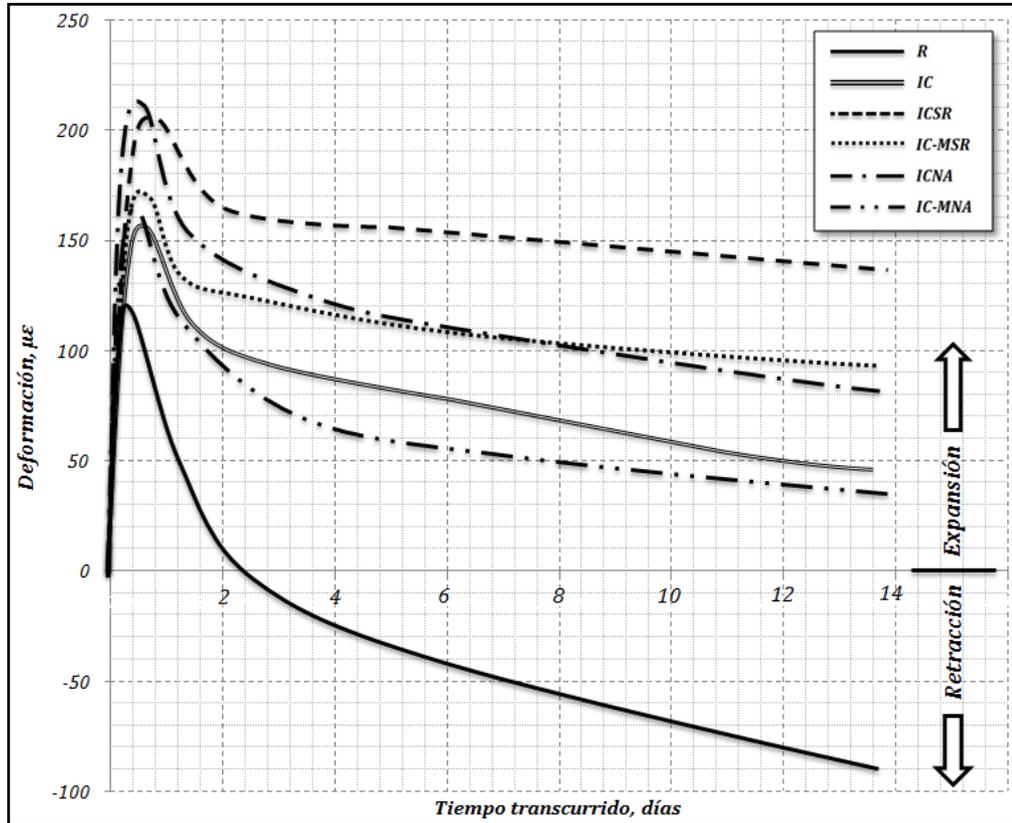


Figura 73. Deformación autógena en la fracción mortero del SCC.

Tabla 23. Tiempo que le toma al espécimen regresar a sus dimensiones originales, es decir; pasar de expansión a retracción. Se empleó el tramo entre 6 y 12 días, de la figura 73 y se considera que se mantendrá constante.

Mezcla	m_{6-12} , $\mu\epsilon/\text{día}$	Tiempo para deformación cero, días
R	---	2.1
IC	-4.7	22.9
ICSR	-2.5	68.8
IC-MSR	-1.8	64.9
ICNA	-4.0	34.0
IC-MNA	-2.8	26.1

El comportamiento del NA en cualquiera de formas estudiadas no es equiparable al comportamiento de la adición SR, pero comparado con la IC, la tabla 23 y la figura 73 nos permiten notar que la adición de NA actúa efectivamente como reductor de la retracción autógena, efecto atribuible a la baja tensión superficial y a la interacción del mucilago de nopal con el hidróxido de calcio [Chandra et al, 1997].

3.3.1.2 Concreto de peso ligero.

El análisis de la figura 74 permite diferenciar claramente el efecto expansivo del SRA que sobresale del resto de las mezclas. Comparando las mezclas L-SR y L-MSR se nota claramente que la liberación del SR por parte de la arena pumicítica es lenta, ya que se observa una pendiente menos marcada en el caso de la L-SR, la mezcla L-MSR tiene una pendiente más pronunciada y logra una expansión mayor.

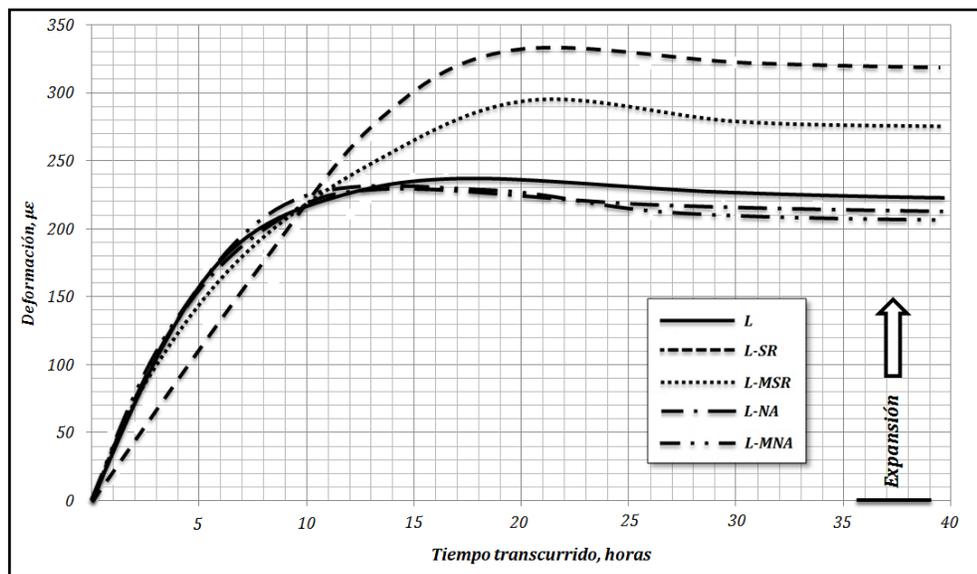


Figura 74. Deformación autógena en la fracción mortero del SCLC, durante las primeras horas después del fraguado final.

Aquí, las mezclas con mucilago de nopal sufren una ligera retracción que se estabiliza, según las figuras 74 y 75, esta ligera retracción se atribuye al incremento en la tasa de hidratación del cemento ocurrida entre las 18 y 30 horas, actividad relacionada a la reacción que retoma el C_3A según lo explica Neville [1996].

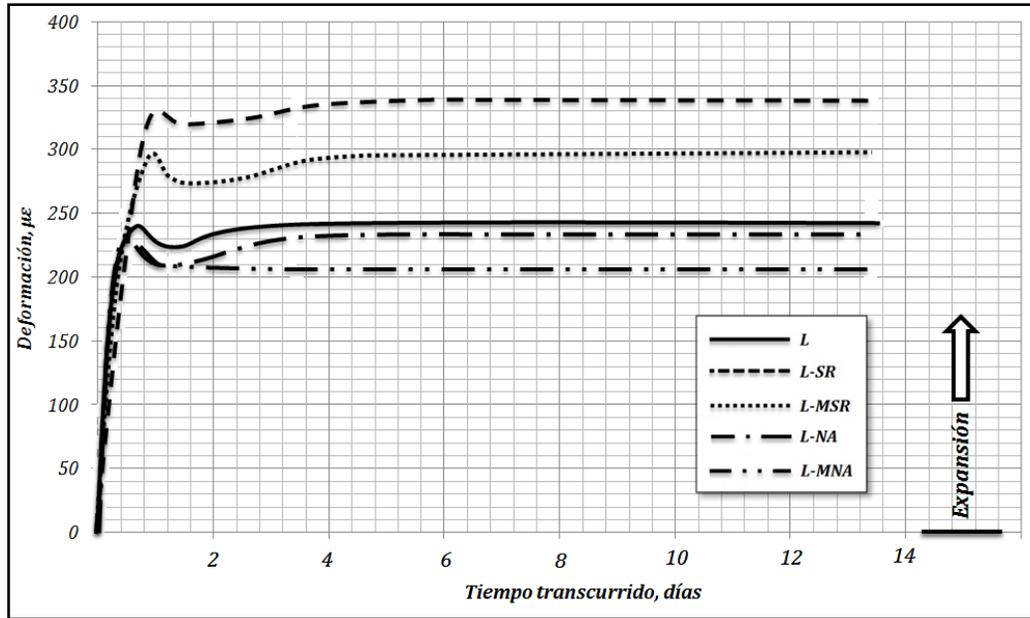


Figura 75. Deformación autógena de la fracción mortero de los SCLC.

En general, se sabe que bajo condiciones autógenas, la reducción en la tensión superficial de la solución de poro, ocasionada por la presencia de SRA, reduce el desarrollo de esfuerzos capilares y mantiene una mayor humedad relativa interna en sistemas cerrados que resulta en una reducción en la retracción [Weiss, et al 2008, Sant, et al 2006, bentz et al (2001), Bentz 2005].

Estudios de deformaciones autógenas sobre materiales cementantes indican que la adición de una SRA puede resultar en un período de expansión que a su vez induce esfuerzos de compresión en el sistema [Weiss, et al 2008, Sant, et al 2007]. Este período de expansión, que inicia poco después del fraguado ofrece un beneficio considerable en la mitigación de la retracción, incluso a edades posteriores avanzadas [Weiss, et al 2008, Cusson 2008].

3.3.2 Retracción por secado.

3.3.2.1 Concreto de peso normal

La tabla 24 muestra los resultados de 3 meses de medición del cambio de longitud de los especímenes y estos resultados se muestran graficados en la figura 76. La retracción máxima alcanzada, medida a los 3 meses se grafica en la figura 77.

Tabla 24. Retracción por secado de los SCC de peso normal.

Edad*, días	Mezclas de SCC					
	R	IC	ICSR	IC-MSR	ICNA	IC-MNA
8	-64	-91	-32	-37	-104	-125
11	-163	-147	-88	-77	-184	-211
14	-261	-237	-125	-117	-267	-251
21	-347	-352	-180	-177	-375	-387
28	-424	-417	-200	-205	-439	-445
35	-461	-469	-229	-251	-477	-469
42	-496	-509	-272	-288	-528	-507
49	-525	-539	-283	-304	-544	-539
56	-553	-554	-307	-331	-576	-565
63	-584	-583	-315	-339	-581	-587
70	-592	-611	-328	-355	-600	-604
77	-611	-629	-339	-365	-619	-624
84	-637	-640	-352	-376	-641	-661
91	-648	-656	-365	-394	-651	-661
98	-656	-669	-391	-425	-661	-672
105	-679	-700	-412	-448	-672	-680
112	-699	-718	-418	-456	-699	-704
119	-707	-725	-421	-459	-711	-706

*Edad del espécimen. La lectura inicial se tomo a los concluir los 7 días de curado

Los SCC de peso normal con NA y el concreto curado convencionalmente (IC) fueron los que presentaron las retracciones más altas. El desarrollo de la retracción por secado de estos concretos resultó prácticamente igual al de la mezcla R, lo cual nos indica que el NA no tiene efecto en esta propiedad. Estos cuatro concretos (R, IC, ICNA e IC-MNA) las retracciones por secado a los 3 meses de edad estuvieron entre los 706 y 725 $\mu\epsilon$.

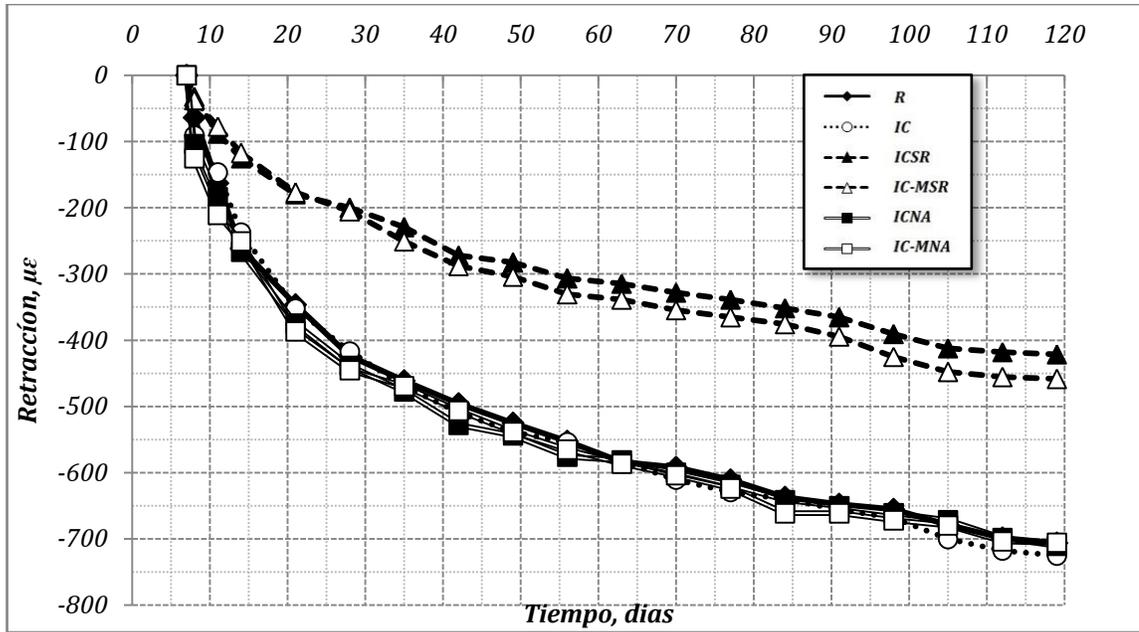


Figura 76. Retracción por secado de los SCC de peso normal.

Se observa de la figura 76, que las mezclas con SRA (ICSR e IC-MSR) redujeron significativamente la retracción por secado. Considerando una retracción promedio de las mezclas R, IC, ICNA e IC-MNA de 712 $\mu\epsilon$ la mezcla ICSR redujo la retracción por secado en 40%. Estos resultados reflejan el importante beneficio que se puede obtener al incorporar estos aditivos, así mismo se nota que el efecto es más eficiente cuando se usa al agregado ligero como medio de dosificación.

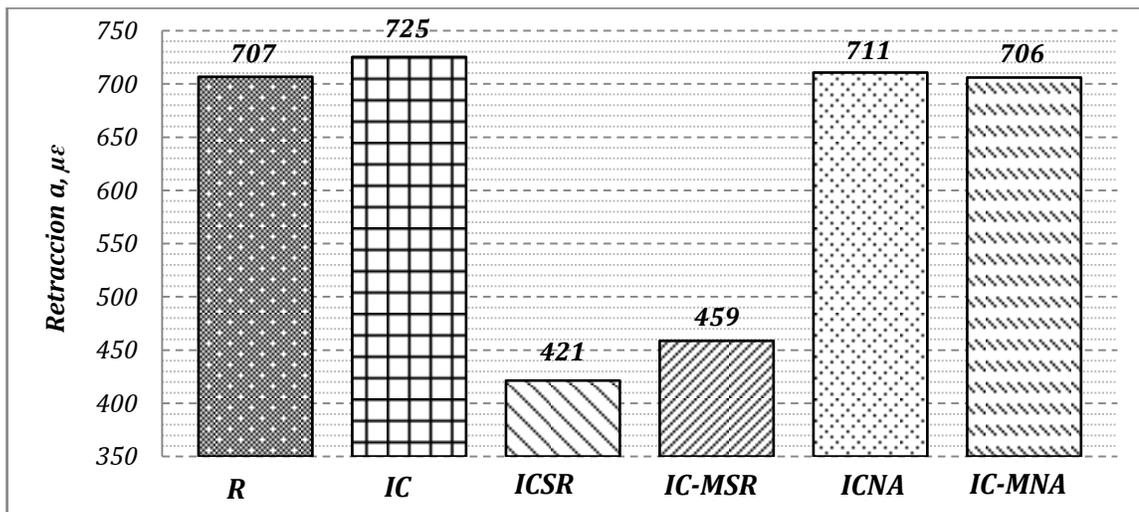


Figura 77. Retracción por secado en los SCC, a los 3 meses de observación.

3.3.2.2 Concreto de peso ligero

En el caso de los SCC ligeros, la figura 78 refleja comportamiento similar al presente en los de peso normal, pero la retracción de L es 41% mayor a R. Aquí las mezclas L-NA y L-MNA arrojaron retracciones máximas de 947 y 1023 $\mu\epsilon$ respectivamente.

Tabla 25. Retracción por secado de los SCLC.

Edad*, días	Mezclas de SCC				
	L	L-SR	L-MSR	L-NA	L-MNA
8	-21	-13	-11	-27	-51
11	-37	-21	-29	-75	-92
14	-77	-35	-43	-120	-125
21	-140	-59	-51	-176	-207
28	-200	-83	-96	-248	-283
35	-276	-96	-104	-309	-349
42	-337	-112	-125	-376	-423
49	-399	-131	-155	-424	-481
56	-477	-163	-184	-496	-546
63	-555	-179	-205	-568	-626
70	-661	-197	-229	-651	-712
77	-739	-226	-256	-701	-824
84	-829	-285	-315	-764	-867
91	-885	-312	-336	-823	-921
98	-916	-344	-385	-869	-959
105	-949	-355	-403	-912	-994
112	-984	-381	-408	-930	-1007
119	-997	-392	-421	-947	-1023

*Edad del espécimen. La lectura inicial se toma a los concluir los 7 días de curado

Si se comparan los grupos que presentan un comportamiento similar; el grupo SCC de peso normal, integrado por R, IC, ICNA e IC-MNA con un promedio de 712 $\mu\epsilon$ y el grupo SCC de peso ligero, integrado por las mezclas L, L-NA y L-MNA con un promedio de 989 $\mu\epsilon$, el incremento de la retracción promedio de este grupo con respecto al primero es de 39%.

En este caso la reducción de la retracción es mayor al emplear los SRA, la reducción de la retracción máxima con respecto a la mezcla L (referencia en este grupo de SCLC) es de 60 % en el caso de la L-SR y de 58% en la L-MSR. En general, la figura 79, permite

observar que la reducción de la retracción es mayor al emplear a la arena ligera como medio de dosificación, este hecho es apoyado en el desarrollo de la retracción de las mezclas L-NA y L-MNA, donde la LNA muestra una retracción ligeramente menor.

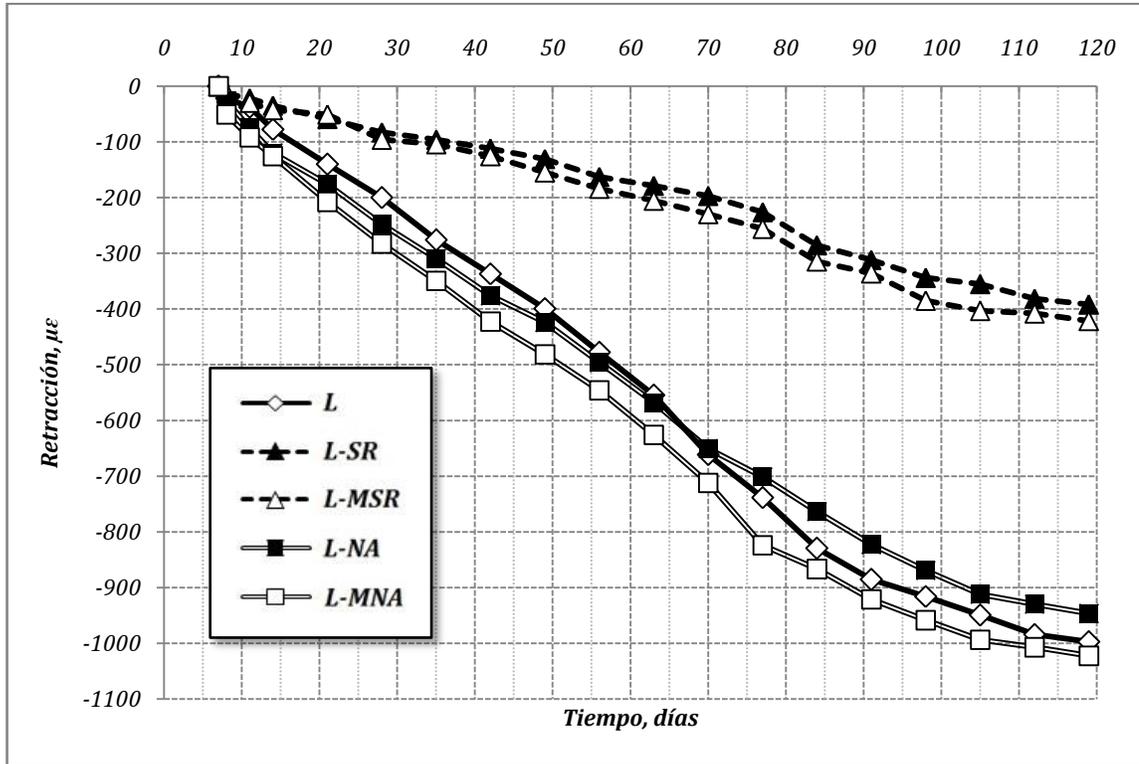


Figura 78. Retracción por secado de los SCLC.

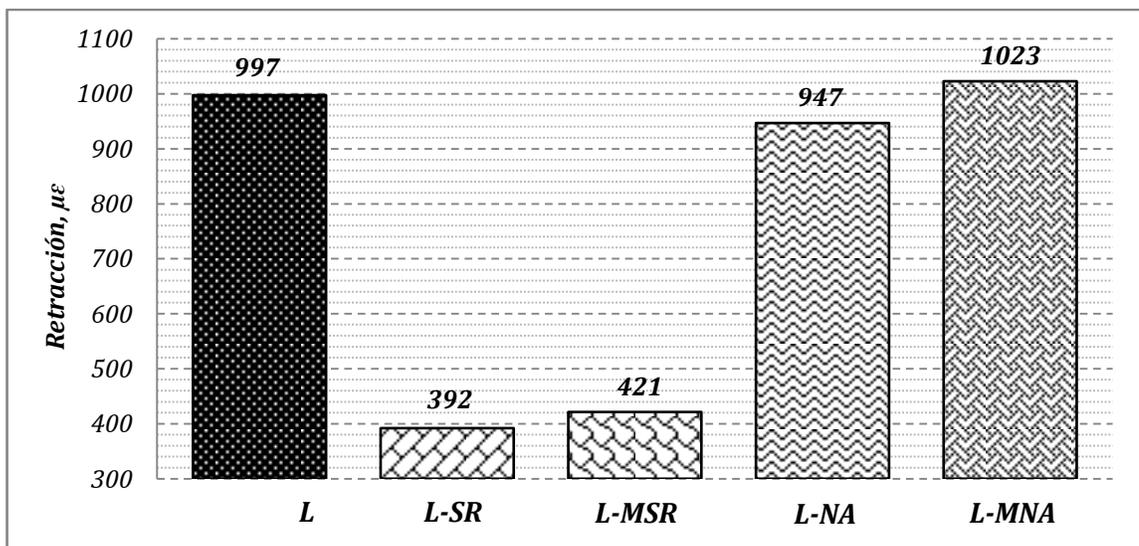


Figura 79. Retracción por secado en los SCLC, a los 3 meses de observación.

La reducción significativa de la retracción que presentan los SRA con respecto a incorporación de NA puede ser atribuidos a:

- El mantenimiento de tensión superficial, considerando el origen natural del NA y el origen sintético de los SRA.
- El mecanismo de interacción de los SRA y el NA durante la hidratación del cemento.

Habrá que recordar que las formas en que se puede reducir la retracción son: por reducir la tensión superficial de la solución de poros, modificar el rango de humedad en el cual la retracción es significativa, o crear compuestos que generen expansión a edades tempranas.

Bajo condiciones de secado, se observa que los SRA aumentan el volumen de poros que se vacían a una humedad relativa determinada, alterando así el rango de humedad en el cual las fuerzas capilares dictan la respuesta de retracción [Weiss, et al 2008, Sant, et al 2007]. También, el período de expansión, iniciado poco después del fraguado ofrece un beneficio considerable en la mitigación de la retracción, incluso a edades posteriores avanzadas [Weiss, et al 2008, Cusson 2008]. Los productos expansivos presentarán oposición a la reducción de volumen permitiendo así que la retracción se vea disminuida.

3.4 Indicadores de durabilidad

3.4.1 Prueba rápida de permeabilidad a los iones cloruro

3.4.1.1 Concreto de peso normal

Los resultados que se presentan en la figura 80 e ilustran la carga total pasada en la PRPC con respecto a la mezcla R, es decir, se considera al valor de carga como el 100% a la edad de 28 y 91 días. La figura 81 muestra la reducción de la carga entre los 28 y 91 días, conforme el concreto desarrolla su madurez.

La solución SR y NA originaron una reducción significativa en la permeabilidad a los iones cloro. El aditivo de mucilago de nopal en solución acuosa originó reducciones importantes a los 28 días, 13% para la serie IC-MNA y 19% para la serie ICNA, las cuales fueron proporcionalmente más importantes a la edad de 91 días; 52% para la serie IC-

Capítulo 3: Análisis y discusión de resultados

MNA y 59% para la serie ICNA, para éste aditivo (mucilago de nopal), los resultados a la edad de 91 días reflejan el beneficio de éste compuesto orgánico como agente densificador de la matriz cementante y como promotor del refinamiento de poros. La reducción fue mayor cuando la NA se dosifico como agente de curado interno, sin embargo.

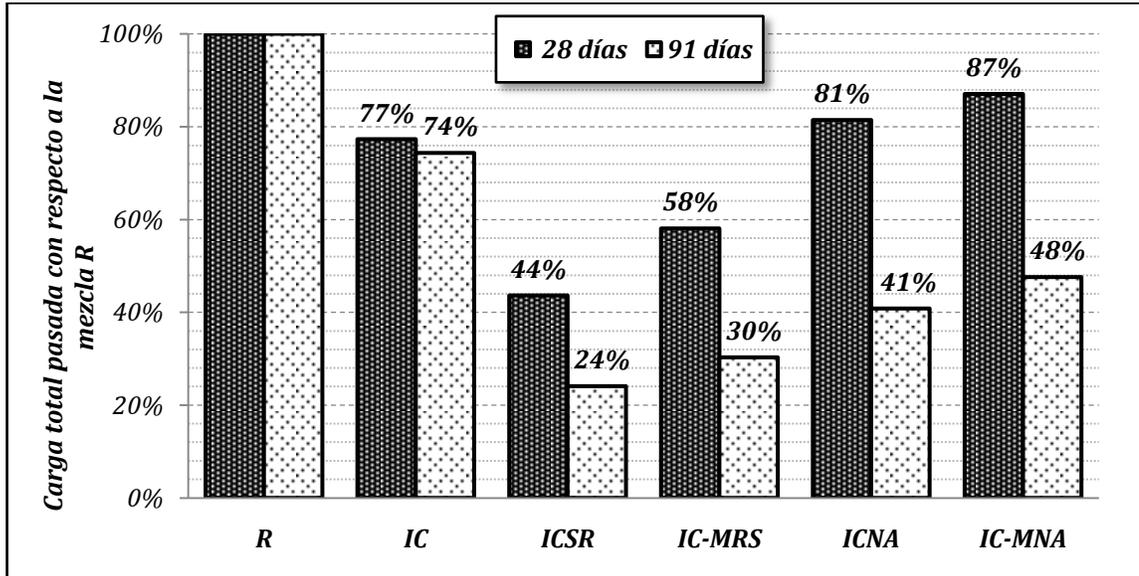


Figura 80. Expresión de la carga total pasada con respecto de la mezcla R.

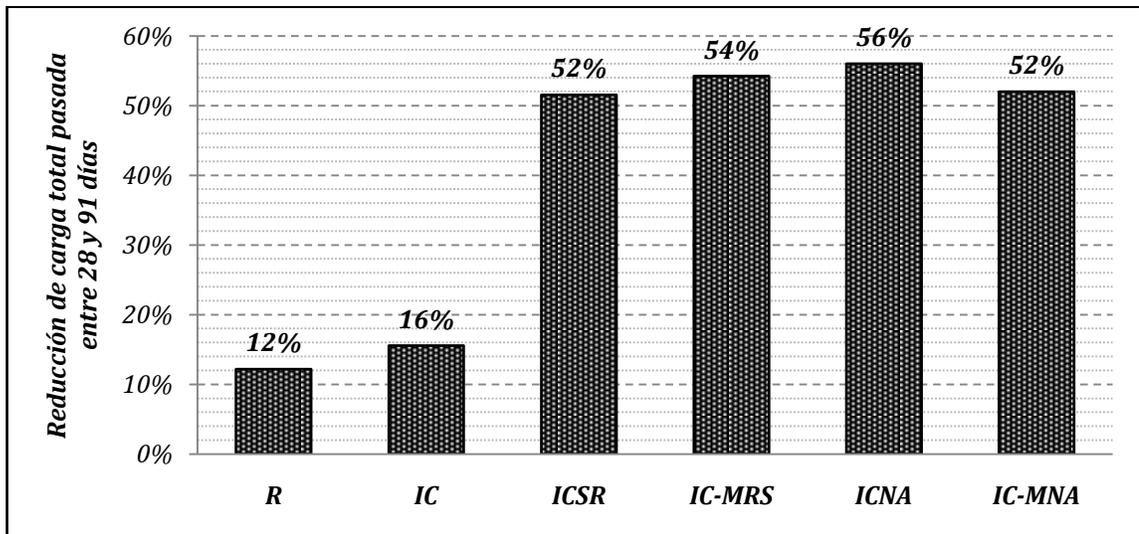


Figura 81. Reducción de la carga pasada entre las edades de ensaye, 28 y 91 días, en los SCC.

Tabla 26. Variación en la carga total pasada.

Mezcla	Variación, Coulomb	
	28 días	91 días
R	368	355
IC	127	300
ICSR	380	88
IC-MRS	12	64
ICNA	292	373
IC-MNA	1163	354

El aditivo SRA fue el que originó las mayores reducciones a ambas edades, siendo también más efectivo cuando se usa como agente de curado interno en solución acuosa, para esta serie las reducciones fueron de 70 % y 76 % a la edad de 91 días para las series IC-MSR y ICSR respectivamente.

La mayor reducción de carga pasada entre edades demuestra una modificación en la matriz cementante, efecto que es atribuible al refinamiento de los poros causado por la formación de los productos expansivos, en el caso del SR, y la formación de cristales de portlandita de menor tamaño en el caso de NA [Chandra, 1997].

3.4.1.2 Concreto de peso ligero

De las figuras 82 y 83, la tendencia en lo referente a la reducción es la misma en este caso, solo que aquí las reducciones no son tan marcadas como en el caso de los SCC, uno de los aspectos a los que se le adjudica este comportamiento es a la gran cantidad de agua libre que se encuentra dentro del concreto, lo cual diluye el efecto de las soluciones empleadas.

Otra justificación para este comportamiento es que, dada la cantidad de agua libre la porosidad de estas mezclas debe ser mayor lo cual impide que los productos expansivos obstruyan el transporte con la misma eficiencia en se observa en el SCC.

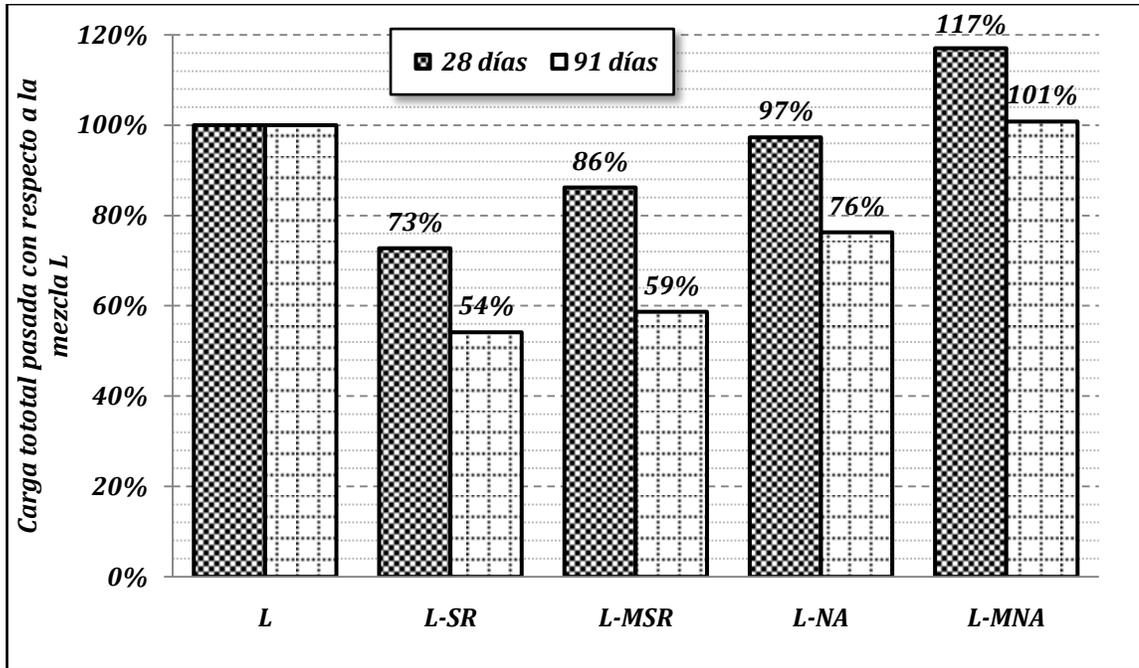


Figura 82. Expresión de la carga total pasada con respecto de la mezcla L.

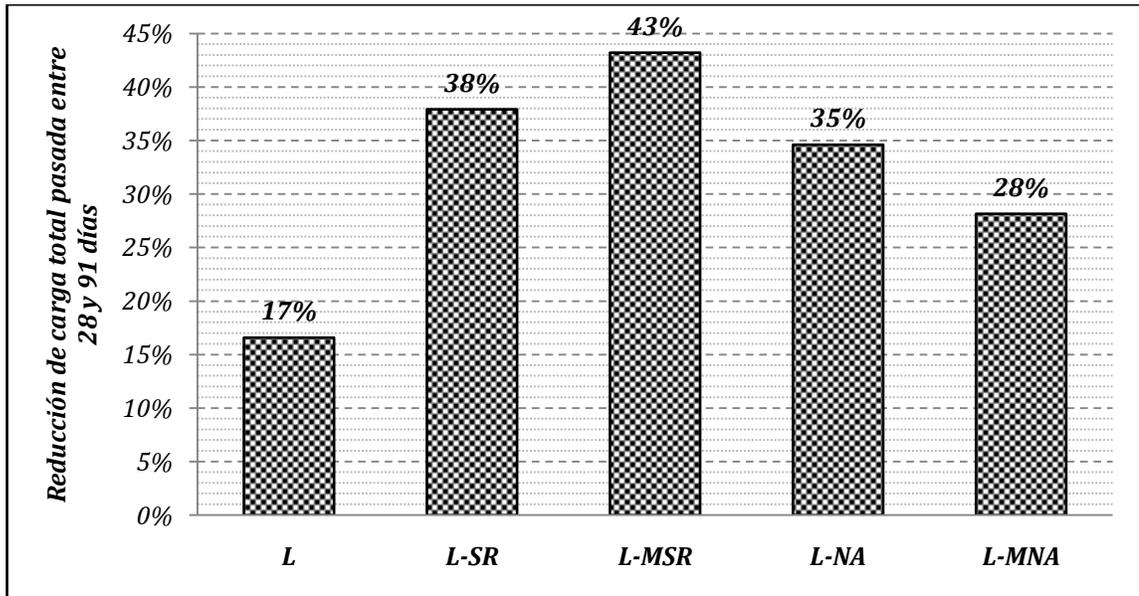


Figura 83. Reducción de la carga pasada entre las edades de ensaye, 28 y 91 días, en los SCLC.

Tabla 27. Variación en la carga total pasada, en los SCLC.

Mezcla	Variación, Coulomb	
	28 días	91 días
L	435	20
L-SR	62	208
L-MSR	450	308
L-NA	261	97
L-MNA	1246	378

3.4.2 Carbonatación acelerada.

3.4.2.1 Concreto de peso normal

En la tablas 28 y 29, y en la figura 84 se presentan los resultados de la carbonatación acelerada para todos los concretos de la serie SCC de peso normal. Las mediciones se realizaron 7, 14, 28, 56 y 91 días después de un periodo de preparación de 10 días (7 días de curado más 2 días al horno a 40°C más un día bajo condiciones de laboratorio). Las mediciones a 7 días se desestimaron por prácticamente nula carbonatación en las mezclas con SR.

Tabla 28. Resultados promedio del ensaye colorimétrico con fenolftaleína en los SCC de peso normal.

Mezcla	Profundidades de carbonatación para diferentes tiempos de exposición continua, mm.			
	14 días	28 días	56 días	91 días
R	3.43	4.20	5.85	7.01
IC	2.31	3.33	4.70	6.22
ICSR	1.21	2.58	3.34	5.21
IC-MSR	2.30	3.17	4.20	5.45
ICNA	2.60	3.00	4.84	6.29
IC-MNA	2.80	3.07	5.00	6.26
	Variación			
R	0.48	0.71	0.33	0.63
IC	0.37	0.04	0.96	0.45
ICSR	0.76	0.61	0.27	0.09
IC-MSR	0.28	0.69	0.13	0.42
ICNA	0.41	0.01	0.26	0.36
IC-MNA	0.12	0.82	0.27	0.66

En éstos resultados podemos observar que con relación a la mezcla R, el aditivo NA redujo la carbonatación del concreto, en 24% cuando se utilizó para el curado interno (mezcla ICNA) y 18% cuando se utilizó como aditivo en la mezcla (mezcla IC-MNA) esto para un periodo de carbonatación acelerada de 14 días.

Tabla 29. Reducción de la profundidad de carbonatación para los SCC de peso normal, con respecto a la referencia (R), a las los tiempos de exposición de 14 y 91 días.

Mezcla	Reducción de la profundidad de carbonatación con respecto a la referencia (R)	
	14	91
R	0%	0%
IC	33%	11%
ICSR	65%	26%
IC-MSR	33%	22%
ICNA	24%	10%
IC-MNA	18%	11%

El concreto con curado interno convencional (mezcla IC) presentó reducciones de 33 y 11 % a los 12 y 91 días respectivamente, prácticamente el mismo comportamiento que los concretos con aditivo NA.

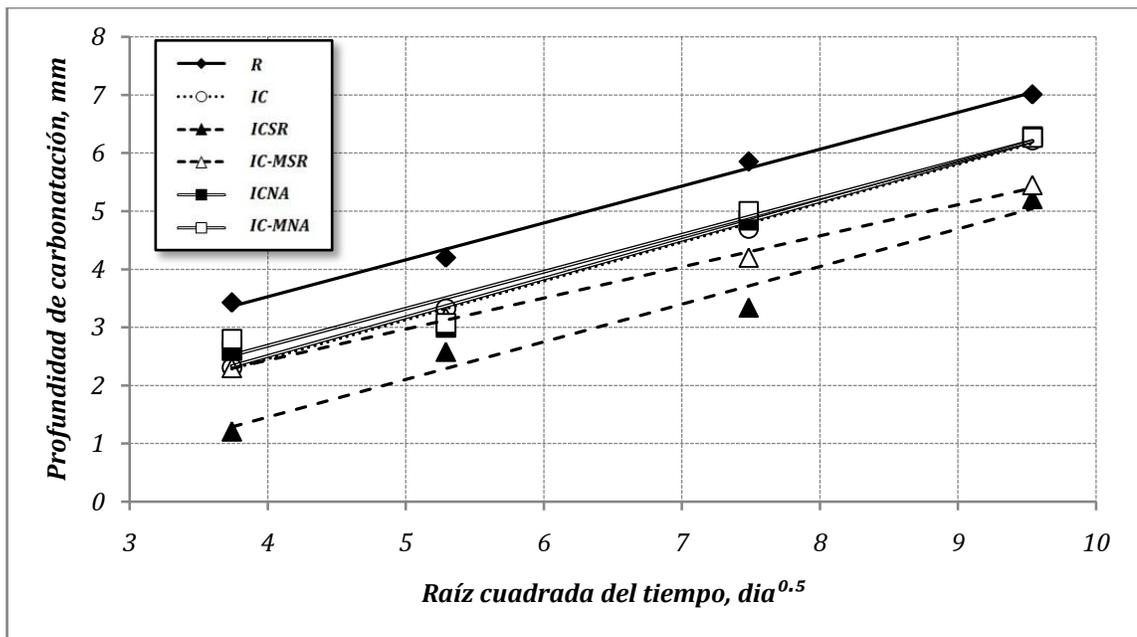


Figura 84. Profundidades de carbonatación para los SCC.

Tabla 30. Pendiente de las líneas de tendencia del ensaye colorimétrico con fenolftaleína para los SCC.

Mezcla	Pendiente, mm/día ^{0.5}	Coefficiente de correlación
R	0.634	0.995
IC	0.669	0.998
ICSR	0.647	0.969
IC-MSR	0.534	0.997
ICNA	0.665	0.975
IC-MNA	0.637	0.965

Las mayores reducciones de la carbonatación se obtuvieron para los concretos en los que se utilizó el aditivo SRA en solución para el curado interno (mezcla ICSR) y como aditivo en la mezcla (mezcla IC-MSR). Estos concretos presentaron reducciones del 65 y 33 % a la edad de 14 días, mismos que a los 91 días también resultaron los mayores, pero con reducciones menos significativas; 26 y 22 % respectivamente.

A los 14 días de carbonatación acelerada, las reducciones significativas de la carbonatación que se obtuvieron por el curado interno con SR (ICSR) representan el doble de las obtenidas para la mezcla con curado interno convencional con agua (IC) y 2.7 veces la reducción obtenida para la mezcla con curado interno con NA (ICNA), lo cual a los 91 días de carbonatación acelerada fue de 2.4 veces y de 2.6 veces, indicando en términos prácticos, el beneficio se mantiene de manera proporcional conforme avanza el frente de la carbonatación.

La reducción en la carbonatación puede adjudicarse a la densificación de la matriz cementante y por otra parte al beneficio obtenido a edad temprana por la mitigación de la retracción autógena.

3.4.2.2 Concreto de peso ligero

Los resultados mostrados en las tablas 29 y 30, y en la figura 85, permiten observar que, con relación a la mezcla L, el aditivo NA solo redujo la carbonatación del concreto para un periodo de carbonatación acelerada de 14 días, 6% cuando se utilizó para el curado

interno (L-NA) y 7% cuando se utilizó como aditivo en la mezcla (L-MNA). A 91 días la carbonatación fue incentivada 5 y 2 % respectivamente.

Las mayores reducciones de la carbonatación nuevamente se presentaron en los concretos en los que se utilizó el aditivo SRA en solución para el curado interno (mezcla ICSR) y como aditivo en la mezcla (mezcla IC-MSR). Estos concretos presentaron reducciones del 51 y 58 % a la edad de 14 días, mismos que a los 91 días también resultaron los mayores, pero con reducciones menos significativas del 17 y 21 % respectivamente.

Tabla 31. Resultados promedio del ensaye colorimétrico con fenolftaleína en los SCC.

Mezcla	Profundidades de carbonatación para diferentes tiempos de exposición continua, mm.			
	14 días	28 días	56 días	91 días
L	3.28	3.54	5.65	6.91
L-SR	1.60	2.52	4.62	5.75
L-MSR	1.38	2.55	3.98	5.47
L-NA	3.08	4.09	5.49	7.24
L-MNA	3.06	4.51	5.41	7.06
	Variación			
L	0.39	0.49	0.59	0.51
L-SR	0.31	0.39	0.69	0.88
L-MSR	0.69	0.70	0.60	0.52
L-NA	0.21	0.62	0.41	0.53
L-MNA	0.14	0.21	0.53	0.62

Tabla 32. Reducción de la profundidad de carbonatación para los SCLC, con respecto a la referencia (L) para tiempos de exposición de 14 y 91 días.

Mezcla	Reducción de la profundidad de carbonatación con respecto a la referencia (L)	
	14 días	91 días
L	0%	0%
L-SR	51%	17%
L-MSR	58%	21%
L-NA	6%	-5%
L-MNA	7%	-2%

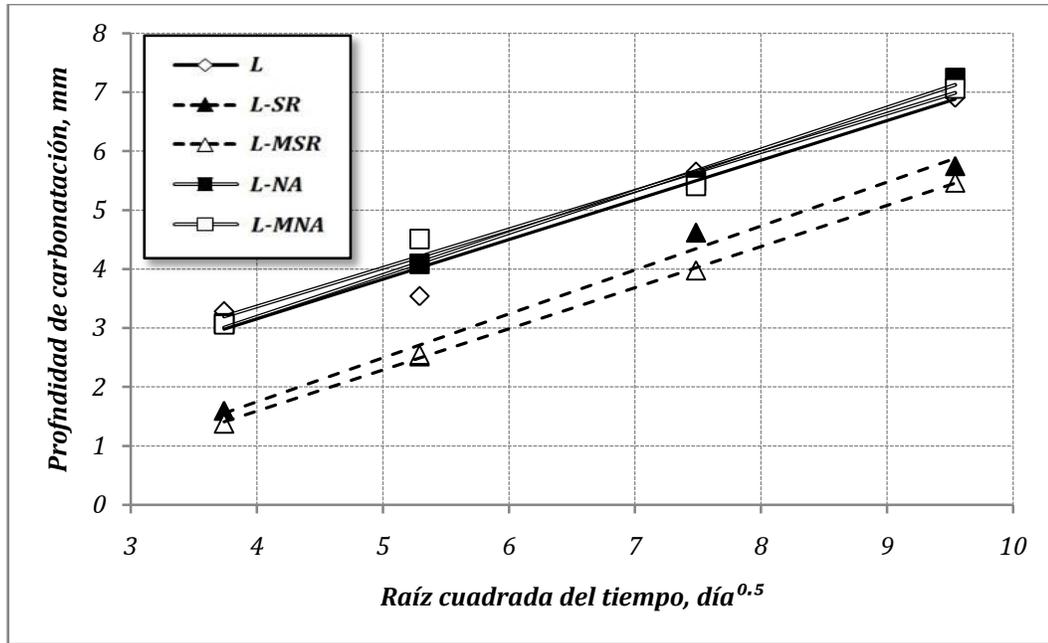


Figura 85. Profundidades de carbonatación para los SCLC.

Tabla 33. Pendiente de las líneas de tendencia del ensaye colorimétrico con fenolftaleína para los SCLC.

Mezcla	Pendiente, mm/día ^{0.5}	Coefficiente de correlación
L	0.672	0.961
L-SR	0.745	0.988
L-MSR	0.698	0.999
L-NA	0.710	0.994
L-MNA	0.654	0.980

Aquí el comportamiento observado durante prueba para medir la deformación autógena, donde, prácticamente se observaba pura expansión, carece de aporte en el detrimento de la carbonatación. El sistema de la prueba de deformación era cerrado, sin intercambio de humedad con el exterior, a diferencia de los especímenes empleados en la prueba de carbonatación. Se puede decir que el intercambio del agua excedente dentro del SCLC permite la creación de una porosidad conectada, superior en magnitud a la presente en los SCC.

CAPÍTULO 4:

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

Para las constantes y las variables estudiadas en el presente proyecto experimental, los resultados obtenidos para los concretos auto-consolidables de peso normal (SCC) y ligeros (SCLC), permiten establecer las siguientes conclusiones:

1. En el concreto fresco, la solución de mucilago de nopal añadido directamente a la mezcla, provoca incrementos en la deformabilidad, en la tasa de flujo y en la habilidad para fluir del SCC y el SCLC, sin afectar perjudicialmente la estabilidad estática.
2. Comparado con la mezcla R, a la edad de 91 días y para los SCC, la solución NA disminuyó la resistencia a compresión en 7.3% cuando se dosificó a través de los poros de la arena pumicítica y en 4.5% cuando se añadió directo a la mezcla del concreto, el modulo de elasticidad también resulto disminuido en 2.5% y 2.3% respectivamente y la tensión por compresión diametral aumentó en 4.9% y 2.0% respectivamente.
3. Comparado con la mezcla L, a la edad de 91 días y para los SCLC, la solución NA aumento marginalmente la resistencia a la compresión, 3.9% al dosificarse mediante la arena pumicítica y en 1% cuando se añadió de forma directa la mezcla de concreto, el modulo de elasticidad resultó prácticamente igual, con una reducción de 1.3% y un aumento de 0.3% respectivamente y la tensión por compresión diametral aumento de forma significativa, 10.0% y 16.1% respectivamente.
4. Para los SCC, a los 14 días de monitoreo de la retracción autógena, la adición de NA a través de la arena pumicítica fue más efectiva que el curado interno convencional con agua al presentar una expansión 74% mayor.
5. Con relación a la mezcla R, a los 14 días de monitoreo de la retracción autógena, la solución NA incorporada directamente la mezcla redujo la retracción de manera significativa ($127 \mu\epsilon$), manteniendo al mortero en expansión. Con relación al curado interno convencional con agua la expansión fue 26% menor.

Capítulo 4: Conclusiones

6. Para los concretos SCC y SCLC, con respecto a la mezcla R, ambos modos de dosificación de la solución NA no originaron modificación notoria en la retracción por secado.
7. Comparando contra las mezclas R e IC, se observó que la solución NA redujo la permeabilidad a los iones cloruro y la carbonatación acelerada, siendo la dosificación mediante los poros de la arena pumicítica el método más efectivo.
8. En los SCLC, en lo referente a la permeabilidad a los iones cloruro, la solución NA dosificada de forma directa a la mezcla mantuvo prácticamente la misma permeabilidad que la mezcla L, pero dosificado como solución de curado interno condujo a reducciones del 24% a la edad de 91 días.
9. En los SCLC, el NA no tuvo efecto aparente en la carbonatación acelerada.
10. En ambos tipos de concreto, SCC y SCLC, la solución SR mejoró notoriamente el comportamiento con relación a la estabilidad volumétrica y a las propiedades del transporte.
11. Desde un punto de vista práctico, los resultados obtenidos muestran que, para SCC y SCLC, la incorporación de la solución NA no demerita las propiedades mecánicas e induce beneficios al reducir la retracción autógena, la permeabilidad a los iones cloro y la carbonatación.

CAPÍTULO 5:

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5: RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se desprenden de las observaciones realizadas durante la ejecución de los trabajos experimentales y la redacción del escrito final producto de esta investigación:

1. Incluir mayores concentraciones de mucilago de nopal a la empleada en esa investigación en concretos convencionales.
2. Evaluar el efecto del mucilago de nopal en la corrosión del acero embebido en concreto.
3. Evaluar el efecto del tiempo en la viscosidad y la tensión superficial de las soluciones acuosas de mucilago de nopal.
4. Analizar la solución de poro del concreto al que se ha incorporado mucilago de nopal, con el fin de estudiar su interacción.
5. Disminuir el peso molecular del mucilago de nopal y estudiar su comportamiento en el concreto.
6. Investigar el efecto de las pectinas de nopal en las propiedades mecánicas, de transporte y estabilidad volumétrica del concreto.
7. Realizar pruebas de deformación autógena con algún método que permita monitorear las deformaciones iniciando inmediatamente después del colar el espécimen.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Abraján Villaseñor M.A., 2008. “Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible” Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. Valencia España.

ACI Committee 213, 2003, “Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-87),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 27 pp.

Aitcin P.C., 2008. “Modern concrete technology binders for durable and sustainable concrete”. Editorial Taylor Francis, New York, USA, 403 pp.

Aguilar J. y Senet F. 1986. “Cuestiones de física”. Reimpresión de la primera edición editorial Reverte, Barcelona, España. 87 pp.

Barrientos, P.F. 1983. “Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiáridas de México en recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México”. Centro de genética, Chapingo, Mexico. 133-143 pp.

Bentz D.P. 2005. “Curing with shrinkage-reducing admixtures: beyond drying shrinkage reduction, *Concrete International* 27(10) 51–60 pp.

Bentz, D.P. 2006. “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Drying, Autogenous Shrinkage, and Freezable Water Content of Cement Pastes at Early Ages,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (3), 423-429 pp.

Bentz D. P. 2009 “Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars Cement and Concrete Composites”, Volume 31, 285-289 pp.

Bentz D.P., Peltz M.A., Snyder K.A., and Davis J.M. 2009. “VERDiCT: Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology,” *Concrete International*. 31-36 pp.

Bentz D.P. and Weiss W.J. 2008. “REACT: Reducing Early-Age Cracking Today *Concrete Plant International*. Maryland, USA.

Bentz D.P., Geiker M.R. and Hansen, K.K. 2001. “Shrinkage-Reducing Admixtures and Early Age Desiccation in Cement Pastes and Mortars,” *Cement and Concrete Research*, 31 (7), 1075-1085 pp.

Bentz D. P., and Snyder K. A., 1999. “Protected Paste Volume in Concrete—Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate,” *Cement and Concrete Research*, V. 29, , 1863-1867 pp.

Referencias

Billberg P. 1999. "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.

Broomfield J. P. 1997. "Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation, and repair", London: E & FN SPON, New York, USA.

Bruedern A.E. y Mechtcherine V. 2010. "Multifunctional use of SAP in Strain Hardening Cement-based Composites" In Jensen OM, Hasholt MT, Laustsen (eds) Proceedings of International RILEM conference on Use of Superabsorbent Polymers and other new Additives in Concrete, 15-18 Agosto 2010 (Technical university of Denmark, Lyngby, Denmark), 11-22 pp.

Cabrerizo Torrico F. 2010. "Grietas en el concreto". Journal Boliviano de Ciencias Vol. 7. Num 10. Universidad del Valle, Bolivia. 18-20 pp.

Cardenas A., Argüelles W.M. y Goycoolea F.M. 1998. "On the posible rol of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar perfomance in the protection of histotical buildings". J. Profess. Assoc. Cactus Develop. 3. 64-71 pp.

Cárdenas A., Higuera-Ciapara I. y Goycoolea F. 1997. "Rheology and agreggation of cactus (*Opuntia ficusindica*) mucilage in solution". J. Profess. Assoc. Cactus Develop. 2: 152-159 pp.

Cardenas A., Goycoolea F.M. y Rinauto M. 2008. "On the gelling behaviour of nopal (*Opuntia ficus-indica*) low methoxyl pectin". Carbohydrate Polymers, 73. 212-222 pp.

Cembureau A, 2012

<http://www.cembureau.eu/cembureau-biodiversity-position-paper>

Cembureau B, 2012

<http://www.cembureau.eu/sites/default/files/Worldproduction2010.pdf>

Cement association of Canada, 2012

<http://www.cement.ca/en/Manufacturing/History-of-Cement.html>

Chandra S., Eklund L., Villarreal R. R. 1998. "Use of Cactus in Mortars and Concrete". *Cement and Concrete Research*, vol. 28, nº 1. 41-51 pp.

Cobo Escamilla, A. 2002. "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación". Fundación Escuela de la Edificación.

Coordinación General de comunicación social y divulgación, comunicado de prensa, IPN, 2006

Cusson D., 2008. "Effect of blended cements on efficiency of internal curing of HPC", ACISP 256, Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences, Michigan USA, 105–120 pp.

Referencias

Cusson D. y Hoogeveen T. 2008. "Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking" *Canada Cement and Concrete Research* 38. 757-765 pp.

Cusson D., Lounis Z., Daigle L. 2010. "Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks". *Cement & Concrete Composites* 32. 339-350 pp.

Czernin, W., 1980. "Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers", 2nd Edition, Foreign Publication Inc., New York, USA.

De la Rosa, J.P. y Santana D. 2001. "El nopal, usos, manejo agronómico y costes de producción en México". CONAZA-UACH-CIESTAAM. *Texcoco*, 23-35 pp.

Deng M. Y Tang M. 1992. "Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks" *Cement and Concrete Research* 23,. 1397 - 1408 pp.

Duran-Herrera A., Aitcin P.C., and Petrov N. 2007 "Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b concrete" *Materials Journal* Vol. 104. 48-52 pp.

Garcia Seror A. 2005. "Ensayos sobre el Hombre. Arqueología antropología y religión" ediciones AACHE, Guadalajara, México.

Garcia, 2006, "Hidráulica, practicas", editorial de la UPV, Valencia España.

Garti, N. 1999. "Hydrocolloids as emulsifying agents for oil in-water emulsions". *Journal of Dispersion Science and Technology*, 20. 327-355 pp.

Gjørsv OE 2000 "Controlled service life of concrete structures and environmental consciousness", in OE Gjørsv and K Sakai (eds) *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*, London: E & FN SPON. 1-13 pp.

Granados Sánchez D. y Castañeda Pérez A.D. 2000. "El Nopal. Historia, Fisiología, Genética e Importancia Frutícola". Editorial Trillas. México.

Gangé R., Aouad I., Shen J. and Poulin C. 1999 "Development of a New Experimental Technique for the Study of the Autogenous Shrinkage of Cement Paste," *Materials and Structures*, Vol. 32, , 635 - 642 pp.

Geiker M., Bentz D. P., and Jensen O. M. 2004 "Mitigating Autogenous Shrinkage by Internal Curing High-Performance Structural Lightweight Concrete", *American Concrete Institute Special Publication 218*, John P. Ries and Thomas A. Holm, eds., 143-148 pp.

Geiker M. 1983. "Studies of Portland Cement Hydration: Measurement of Chemical Shrinkage and a Systematic Evaluation of Hydration Curves by Means of the Dispersion Model," PhD thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark,.

Goldstein, G. y Nobel, P.S. 1991. "Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*". *Plant Physiology*, 97. 954-961 pp.

Referencias

Gomes P.C.C., Gettu R., Agullo L., Bernad C. 2001. "Experimental optimization of high strength self compacting concrete". In: Ozawa K, Ouchi M (eds) Proceedings of Second International Symposium on SCC, Kochi. 377- 386 pp.

Harding M. 1995. "Structural Lightweight Aggregate Concrete", Concrete Construction.

Henkensiefken R., Nantung T., y Weiss, J., 2008. "Reducing Restrained Shrinkage Cracking in Concrete: Examining the Behavior of Self-Curing Concrete Made using Different Volumes of Saturated Lightweight Aggregates" in Proceedings of Concrete Bridge Conference, USA.

Hernández J.B. y Serrano G.R. 2003. "Uso del nopal en la industria de la construcción". In: Memorias. IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas, México. 286-289 pp.

Holt, E., "Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete", tesis doctoral, University of Washington, Seattle, 2001, 209 p.

Holt, E., "Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete", VTT Building and Transport TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND, Finland, 2001, 197 pp.

Hwang S.D., Khayat K. H. and Bonneau O. "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications" ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 2, March-April 2006, 121-129 pp.

Hwang C.L., Hung M.F. 2005 "Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete", Construction and Building Materials, Taiwan 619-626 pp.

Hwang CL, Hung MF. 2002 "Comparison of ACI Mixture Design Algorithm to HPC Densified Mixture Design Algorithm in the anti-corrosion and durability design". J Chim Corros Eng. 16(4). 281-296 pp.

Hwang S.D., Khayat K. H. and Bonneau O. 2006. "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications" ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 2. 121-129 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía

<http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=23824>

Janz, M., 2000. "Moisture Transport and Fixation in Porous Materials at High Moisture Levels", Doctoral Dissertation, Report TVBM-1018, Lund Institute of Technology, Lund, Suecia. 33 p.

Japan Concrete Institute, Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete "Committee Report," Autogenous Shrinkage of Concrete, edited by Eiichi.

Jensen O.M., Hansen P.F. 2001. "Water entrained Cement-Based materials. I. Principles and theoretical background. Cement and concrete research". Vol 31. 647-654 pp.

Referencias

Jensen, O.M., and Hansen, P.F., 2002. "Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations," *Cement and Concrete Research*, 32 (6), 973-978.

Kabay N. y Aköz F. 2011. "Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate", *Cement & Concrete Composites* 34, 503-507 Turkey

Kane J.W. y Sternheim M.M., 2007. "Física" 2a edición editorial Reverte Jhon Wiley and sons New York, USA.

Khayat K.H. and Daczko J.A., 2002. "The holistic approach to self-consolidating concrete" First North American Conference on the design and use of self-consolidating concrete, Illinois, USA, Ed. Shah S.P. Daczko y J.A. Lingscheit J.N. 9-13 pp.

Kim H., and Bentz D.P. 2008 "Internal Curing with Crushed Returned Concrete Aggregates," to be published in NRMCA Technology Forum: Focus on Sustainable Development.

Kosmatka S. H., Kerkhoff B., Panarese W. C.; y Tanesi J. 2004. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

Kosmatka S. and Panarese W. 1988. "Design and Control of Concrete Mixtures", 13a edición, Portland Cement Association, Skokie, 205 pp.

Kowalsky M.J., Priestley M.J.N. and Seible F. 1999 "Shear and Flexural Behavior of Lightweight Concrete Bridge Columns in Seismic Regions," *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 1. 136-148 pp.

Lea. 1998 "Chemistry of Cement and Concrete", 4a Edición por Peter C. Hewlett y Arnold, Great Britain.

Liu M. 2009 "Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete" University College, London, England.

Loser R. y Leemann A. 2009. "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete" *Materials and Structures* 42. 71-82 pp.

Lura P., Pease B., Mazzotta G., Rajabipour F., y Weiss J. 2007. "Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Development of Plastic Shrinkage Cracks," *ACI Materials Journal*, 104 (2), 187-194.

Majdoub H., Roudesli S., Picton L., Le Cerf D., Muller G. y Grisel M. 2001a. "Prickly pear nopal pectin from *Opuntia ficus-indica* physico-chemical study in dilute and semidilute solutions". *Carbohydrate Polymers*, 46. 69-79 pp.

Majdoub H., Roudesli S. y Deratani A. 2001b. "Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior". *Polymer International*, 50: 552-560.

Referencias

Mechtcherine V., Reinhardt H.W. (eds) 2012. "Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction", State of the art Report Prepared by Technical Committee 225 – SAP. ISBN 978-94-007-2732-8.

Medina-Torres L. Brito-de la Fuente E., Torrestiana- Sanchez B. y Katthain R. 2000. "Rheological properties of the mucilage gum (Opuntia Picus-indica)". Food Hydrocolloids, 14. 417-424 pp.

Medina-Torres L. Brito-de la Fuente E., Torrestiana- Sanchez B. y Alonso S. 2003. "Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (Opuntia ficus indica) and carrageenans". Carbohydrate Polymers, 52. 143-150 pp.

Mehta P.K. and Monteiro J.M. 1993. "Concrete: Structure, Properties and Materials", 2a edición, Prentice Hall, Inc..

Metha P.K., and Monteiro J.M. 2005. "Concrete". McGraw-Hill, New York, USA.

Mindess, S. and Young, J.F., 2007 "Concrete", Prentice-Hall. Montreal, Canada,

Murcia Vela J. 1987. "Estructuras de concreto armado y pretensado; Fundamentos para el análisis". Consejo superior para investigaciones científicas. Madrid, España.

Nehdi M.L., Pardhan M., Koshowski S. 2004. "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements". Cement and Concrete Research 34(11). 2103-2112 pp.

Neville A., Brooks J.J., 1993. "Concrete Technology", Longman Group, UK.

Neville, A. 1996" Properties of concrete", 4a edición, Wiley, capítulo 1.

Ouchi M., Nakamura S., Osterburg T., Hallberg S. and Lwin M. 2003. "Applications of Self Compacting Concrete in Japan, Europe, and United States". Department of Transportation Federal Highway Administration, ISHPC.

Ozawa K. 2001. "Utilization of new concrete technology in construction project - Future prospects of self-compacting concrete". In: The 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Ozawa K, Ouchi M, editors, 57-62 pp.

Paulini, P. 1992. "A Weighing Method for Cement Hydration," 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, India. 248 - 254 pp.

Pérez Méndez, L.R. 2010. "Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión" Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de ingeniería civil: construcción, España.

Pimienta, E. 1990. "El nopal tunero". Universidad de Guadalajara, México.

Powers T.C., 1968. "Properties of Fresh Concrete", John Wiley and Sons, Inc.

Radocea A. 1992 "A Study on the Mechanisms of Plastic Shrinkage of Cement-Based Materials", doctoral dissertation, CTH Göteborg, Suecia, 125 p.

Referencias

Ramírez-Arellanes S., Cano-Barrita P., Julián-Caballero F., y Gómez-Yañez C. 2012. "Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural" *Materiales de Construcción* [Online]

Ramsey J. E. 1999. "Evaluación del comportamiento del adobe estabilizado con cal y goma de tuna". Tesis para optar al Título de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria. Lima, Peru.

Sakai K. and Banthia N. 2000 "Integrated design of concrete structures and technology development" in O.E. GjØrv and K. Sakai (eds) *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*, Abingdon: E & FN SPON. 14-26 pp.

Sáenz C. et al. 2006. "Utilización agroindustrial del nopal". *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO*.

Sáen, C. y Sepúlveda, E. 1993. "Alternativas de industrialización de la tuna" (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*, 18. 29-32 pp.

Sant G., Eberhardt A., Bentz D., and Weiss W.J., 2008 "The Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures (SRAs) on Moisture Absorption in Cementitious Materials at Early Ages," submitted to *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*.

Sant G., Lothenbach B., Juilland P., Le Saout G., Weiss W.J., Scrivener K. 2011. "The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures" *Cement and Concrete Research* 41. 218–229 pp.

Sant G., Rajabipour F., Lura P. Weiss W.J., 2006 "Examining time-zero and early age expansion in pastes containing shrinkage reducing admixtures (SRAs)", 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM, Quebec City, Canada.

Sant G., Rajabipour F., Lura P., Weiss W.J., 2007 "Examining residual stress development in cementitious materials experiencing an early-age expansion", 9th CANMETACI Int. Conf. – T.C. Holland Symposium, Warsaw, Poland.

Sarja A. 2000. "Integrated life cycle designs of concrete structures" in OE GjØrv and K Sakai (eds) *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*, Abingdon: E & FN SPON. 27-40 pp.

Scherer G.W., 1999. "Structure and Properties of Gels," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29. 1149 - 1157 pp.

Segarra Foradada J, 2005. "Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón (tesis de maestría) Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcción España.

Sepúlveda E., Sáenz C., y Gómez C. 2003. "Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de nopal: efecto del tratamiento térmico". In. *Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Zacatecas, México. 269-272 pp.

Referencias

Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E. y Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68. 534-545 pp.

Simonnet C. 2009. "Hormigón, historia de un material", Editorial Nerea. 61-62 pp.

Tazawa E. and Miyazawa S., 1995b "Experimental Study on Mechanisms of Autogenous Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 8. 1633 – 1638 pp.

Taylor H.F.W. 1997. "Cement Chemistry", 2nd Edition, Thomas Telford, New York, 459 pp.

The Concrete Society, BRE. 2005. "Technical report No.62 self-compacting concrete: a review". Day R.T.U, Holton I.X., editors, Camberley, UK, Concrete Society, Surrey GU17 9AB, UK.

Torres-Acosta, A. A.; Cano-Barrita, P. F. de J.: "Las bondades del nopal", *Construcción y Tecnología*, n.º. 233 (2007), 44-49 pp.

Torres Acosta A.A., Martínez M. y Celis C. 2004. "Cement based mortar improvement from nopal and *Aloe vera* additions". 4º Foro de Investigación UDEM: Universidad de Monterrey, Nuevo León, México.

Torrijos M. C., Giaccio G. y Zerbino R. 2010, "Internal cracking and transport properties in damaged concretes". *Materials and Structures* 43. 109–121 pp.

Trachtenberg S. y Mayer A.M. 1981. "Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage" .*Phytochemistry*, 20. 2665-2668 pp.

Trachtenberg S. y Mayer A.M. 1982. "Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus-indica*". *Botany*, 50. 549-557 pp.

Valdez Guzmán L.F, Suárez Alcívar G.E. y Proaño Cadena G. "hormigones livianos" escuela superior politécnica del litoral (ESPOL) Guayaquil, Ecuador. p 3 2010

Verbreck G., 1958 "Carbonation of hydrated Portland cement", *PCA Bulletin*, Chicago, n. 87.

Villegas C. y De Gante M. 1997. "Los Nopales (*Opuntia* spp.) recursos y símbolos tradicionales en México". In. *Memorias. VII Congreso Nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 271-273 pp.

Whiting D. A., Detwiler R.J. and Lagergren E.S., 2000. "Cracking Tendency and Drying Shrinkage of Silica Fume Concrete for Bridge Deck Applications" *ACI Materials Journal*, Vol. 9, No. 1. 71 - 77 pp.

Wierig H., 1984 "Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure", *Proc. RILEM Seminar*, Hannover, , 3. 176-186 pp.

Referencias

Weiss W.J., Lura P., Rajabipour F., Sant G. 2008. "Performance of shrinkage reducing admixtures at different humidities and at early ages", ACI Materials Journal 105 (5) 478-486 pp.

Weiss W. J., and Berke N.S. 2002 "Admixtures for Reduction of Shrinkage and Cracking," Early Age Cracking In Cementitious Systems – RILEM State of the Art Report TC-EAS, ed. A. Bentur, Chapter 7.5.

World coal association, 2012

<http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/coal-steel-statistics/>

Yurugi M., Sakai G., and Sakata N., 1995 "Viscosity Agent and Mineral Admixtures for Highly Fluidized Concrete Proceedings, Concrete Under Severe Conditions, Environment and Loadings", Sapporo Japan, Ed Sakai K., Banthia N. and GjØrv O.E., Vol. 2, pp. 995 - 1004

ANEXOS

ANEXOS

En esta sección se incluyen las normas ASTM C157, C1202, y C1698.



Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 157/C 157M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the length changes that are produced by causes other than externally applied forces and temperature changes in hardened hydraulic-cement mortar and concrete specimens made in the laboratory and exposed to controlled conditions of temperature and moisture.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. An exception is with regard to sieve sizes and nominal size of aggregate, in which the SI values are the standard as stated in Specification E 11. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 143/C 143M Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
- C 192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.68 on Volume Change.

Current edition approved Oct. 1, 2008. Published November 2008. Originally approved in 1940. Last previous edition approved in 2006 as C 157/C 157M – 06.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Pastes and Mortars of Plastic Consistency

- C 490 Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
- C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes
- C 596 Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement
- C 1347 Practice for Preparation and Dissolution of Uranium Materials for Analysis
- E 11 Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes
- E 337 Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The terms used in this test method are defined in Terminology C 125.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *length change, n*—an increase or decrease in the length of a test specimen that has been caused to change by any factor other than externally applied forces and temperature changes.

4. Significance and Use

4.1 Measurement of length change permits assessment of the potential for volumetric expansion or contraction of mortar or concrete due to various causes other than applied force or temperature change. This test method is particularly useful for comparative evaluation of this potential in different hydraulic-cement mortar or concrete mixtures.

4.2 This test method provides useful information for experimental purposes or for products that require testing under nonstandard mixing, placing, handling, or curing conditions, such as high product workability or different demolding times. Standard conditions are described in 5.4.1.

4.3 If conditions for mixing, curing, sampling, and storage other than specified in this test method are required, they shall be reported but are not to be considered as standard conditions

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

of this test method. Nonstandard conditions and the reasons for departure from standard conditions shall be reported clearly and prominently with comparator values.

5. Apparatus

5.1 *Molds and Length Comparator*—The molds for casting test specimens and the length comparator for measuring length change shall conform to the requirements of Practice C 490.

5.2 *Tamper*—The tamper shall be made of a nonabsorptive, nonabrasive material such as medium-hard rubber or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392 °F [200 °C], and shall have a cross section of ½ by 1.0 in. [13 by 25 mm] and a convenient length of about 6 in. [150 mm]. The tamping face of the tamper shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

5.3 *Tamping Rod*—The tamping rod shall be a straight steel rod ⅜ in. [10 mm] in diameter and not less than 10 in. [250 mm] in length, having at least the tamping end rounded to a hemispherical tip of the same diameter.

5.4 *Drying Room and Controls*—A drying room with suitable racks shall be provided when storing specimens in air. The racks shall be designed for free circulation of air around specimens, except for necessary supports, and shall be so situated with respect to the nearest wall or other obstruction that air circulation is not restricted in the intervening space. The supports shall be horizontal and shall consist of two nonabsorptive members not deeper than 1 in. [25 mm] and having a bearing area of not more than ¼ in. [6 mm] in width. Conditioned air shall be circulated into and out of the room in a uniform manner so that the specified rate of evaporation is attained adjacent to all specimens.

5.4.1 The air in the room shall be maintained at a temperature of 73 ± 3 °F [23 ± 2 °C] and a relative humidity of 50 ± 4 %. The air movement past all specimens shall be such that the rate of evaporation is 77 ± 30-mL/24 h from an atmometer or 13 ± 5-mL/24 h from a 400-mL Griffin low-form beaker filled to ¾ in. [20 mm] from the top. The temperature and relative humidity of the air in the room shall be measured with either a sling or Assmann psychrometer at least twice each working day. The psychrometer shall comply with Test Method E 337, except that thermometers having an overall length of 10 in. [250 mm] and marked in subdivisions of 0.5 °F [0.25 °C] are permitted. The room shall be equipped with a means of measuring and recording wet- and dry-bulb temperatures continuously. Correction factors as indicated by the sling or Assmann psychrometer shall be applied to the recorded data. The rate of evaporation within the room shall be determined daily by the use of the atmometer or by the loss of mass of water from a 400-mL Griffin low-form beaker filled initially to ¾ in. [20 mm] from the top.

5.5 *Atmometer*—The atmometer shall be constructed as shown in Fig. 1.

5.5.1 *Mounting*—Fig. 2 shows a suggested arrangement for operating the atmometer. Punch a central hole ½ in. [13 mm] in diameter in a filter paper, place it on the atmometer, and

secure it in place while dry, by turning the torque handle only, until it just starts to slip. Mount the atmometer on a stand with the filter paper in a horizontal position. Mount a 100-mL glass graduate so that the 100-mL mark is from 1 to 3 in. [25 to 75 mm] below the level of the filter paper. Stopper the graduate so that entrance is provided for two short glass tubes not extending to the water level and one long tube extending to the bottom of the graduate. Connect the glass tubing leading from the bottom of the graduate to the inlet of the atmometer by means of clear plastic tubing.

5.5.2 *Operation*—Use clear plastic tubing to connect a squeeze bottle containing distilled or deionized water to one of the short glass tubes into the graduate. Force water into the graduate until it is about half full and then close the remaining glass tube into the graduate. Continue to force water through the graduate into the atmometer until the filter paper is saturated and there are no air bubbles in the system. Open the glass tube into the graduate and release pressure on the squeeze bottle gradually to avoid trapping air in the tube leading to the atmometer. Adjust the level of water in the graduate to approximately the 100-mL mark. If the atmometer is to be used under variable temperature conditions, disconnect the squeeze bottle after filling the graduate to avoid the possibility of additional water being forced into the graduate. Permit evaporation of water from the filter paper for 1 h before recording the time and initial reading of the graduate. It is not permitted to omit the waiting period during subsequent use of the atmometer provided the filter paper does not become dry. Change the filter paper whenever it shows signs of contamination but not less frequently than once every two weeks.

5.6 *Filter Paper*—The filter paper to be used with the atmometer shall be white with a smooth surface texture. It shall be 6 in. [152 mm] in diameter and 0.050 ± 0.003 in. [1.27 ± 0.08 mm] thick and shall have a cotton fiber content of not less than 75 weight %. The density shall be between 0.400 and 0.425 g/cm³. The Mullen bursting strength shall not be less than 50 psi [345 kPa].

NOTE 1—E and D filter paper No. 625³ has been found suitable.

5.7 *Apparatus for Demolding Specimens*—It is useful to construct an apparatus for demolding specimens molded in double molds as detailed in Fig. 3 or to a different design that serves the same purpose. When this device is to be used, the center side plate of the double mold must be appropriately drilled and tapped to receive the 8-32 by ⅝ in. [4.5-0.74 IMC by 16 mm] machine screw of the demolding thumbscrew. Fig. 4 shows the details of a suitable apparatus for demolding specimens molded in single molds.

³ The sole source of supply of the apparatus known to the committee at this time is Ahlstrom Filtration Co., Mt. Holly Springs, PA 17065. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee,¹ which you may attend.

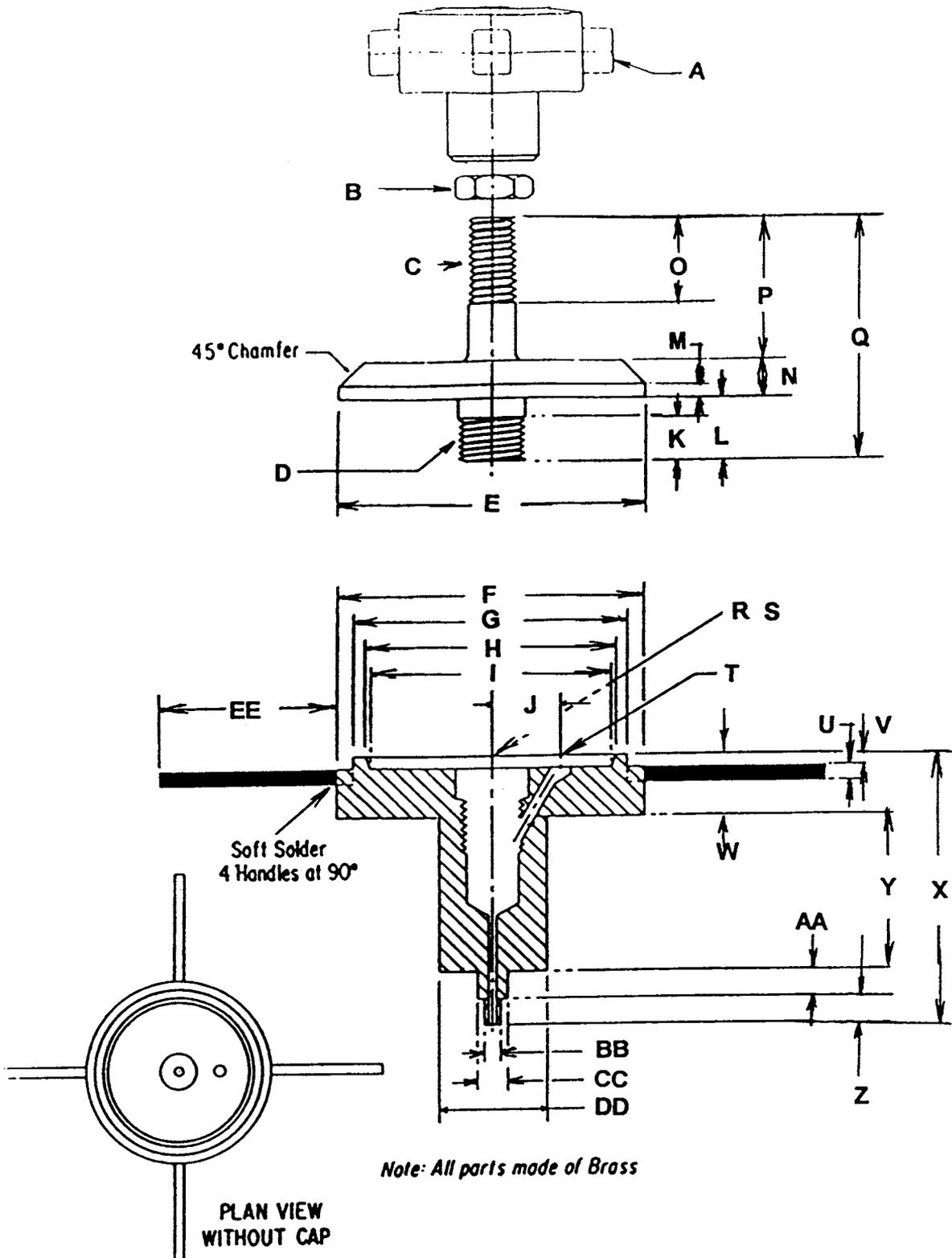


FIG. 1 Atmometer

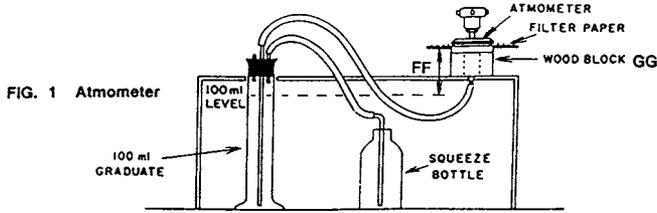
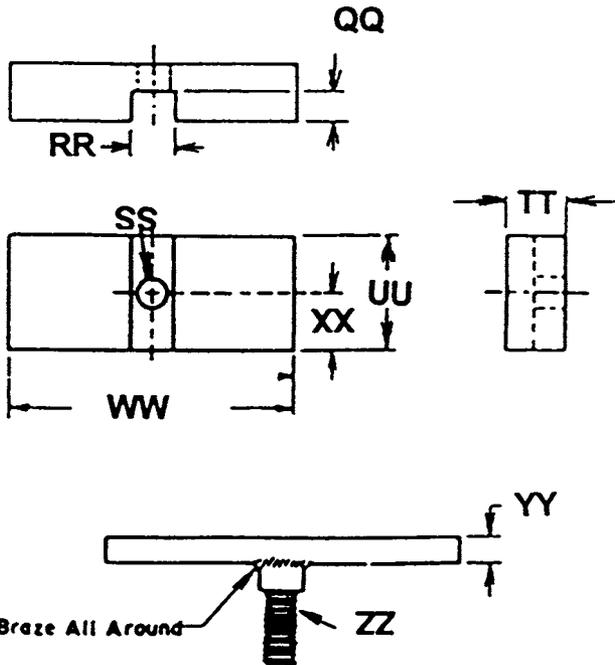


FIG. 2 Atmometer Assembly

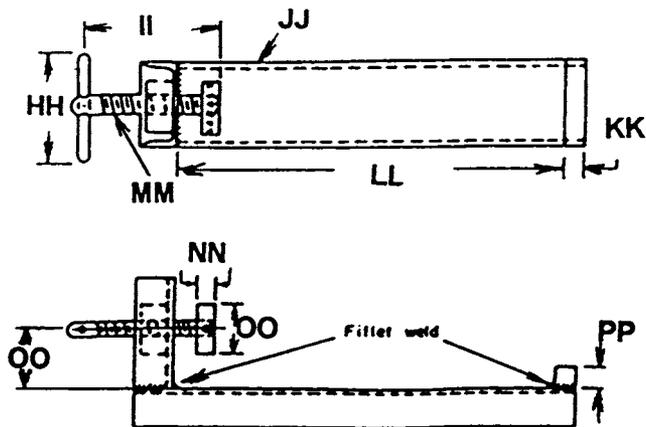
ASTM C 157 FIGURES

Figure Dimensions	SI Units	Inch-Pound Units
A	Adjustable torque handle 1.4–1.7 Nm	Adjustable torque handle 12–15 in.lb
B	Jam nut 10–15 IMC	Jam nut 3/8-in.–16 NC
C	10-mm diameter 1.5 IMC Thd.	3/8-in. dia–16 NC Thd.
D	12-mm diameter 1.5 IMC Thd.	1/2-in. dia–20 NC Thd.
E	64-mm diameter	2.50-in. diameter
F	64-mm diameter	2.50-in. diameter
G	57-mm diameter	2.25-in. diameter
H	52-mm diameter	2.06-in. diameter
I	51-mm diameter	2.00-in. diameter
J	14 mm	0.56 in.
K	8 mm	0.31 in.
L	13 mm	0.50 in.
M	3 mm	0.125 in.
N	8 mm	0.31 in.
O	19 mm	0.75 in.
P	32 mm	1.25 in.
Q	53 mm	2.06 in.
R	1.5-mm drill through 11.5-mm C' drill 32-mm deep tap 12-mm 1.5-mm IMF Thd	1/16-in. drill through 29/64-in. C' drill 1 1/4-in. deep tap 1/2-in.–20 Thd
S	19 mm deep 16 mm C' bore 6 mm deep	3/4-in. deep 5/8-in. C' bore 1/4 in. deep
T	5-mm drill 3-mm deep C' drill at 60° as shown through to center tapped hole	3/16-in. drill 1/8-in. deep C' drill at 60° as shown through to center tapped hole
U	3 mm	0.12 in. diameter
V	2 mm	0.09 in.
W	10 mm	0.40 in.
X	60 mm	2.36 in.
Y	35 mm	1.37 in.
Z	6 mm	0.25 in.
AA	6 mm	0.25 in.
BB	4 mm	0.15 in.
CC	6 mm	0.25 in.
DD	23 mm	0.87 in.
EE	38 mm	1.50 in.
FF	25 to 75 mm	1 to 3 in.
GG	35 mm high	1.37 in. high
HH	100 mm	4 in.
II	130 mm	5 in.
JJ	8 cm–6.1 kg/m channel	3 in.–4.1 lb/ft channel
KK	20 mm	3/4 in.
LL	330 mm	13 in.
MM	14–2.0 IMC Thd.	1/2 in.–12 Thd.
NN	20 mm	3/4 in.
OO	50 mm	2 in.
PP	20 mm	3/4 in.
QQ	60 mm	1/4 in.
RR	10 mm	3/8 in.
SS	Drill Cl. hole for 4.5–0.75 IMC machine screw	Drill Cl. hole for 8–32 in. machine screw
TT	13 mm	1/2 in.
UU	25 mm	1 in.
VV	30 mm	1-3/16 in.
WW	60 mm	2-3/8 in.
XX	12.5 mm	1/2 in.
YY	6-mm diameter steel rod	1/4-in. diameter steel rod
ZZ	4.5–0.75 IMC × 16-mm machine screw	8–32 × 5/8-in. machine screw



Instructions for Use—Remove the end and the outer side plates leaving the base, center side plate, and gage stud holders in place. Engage the machine screw in the drilled and tapped end of the center side plate. Turn the thumbscrew to loosen the bars.

FIG. 3 Device for Detaching 1-in. [25-mm] Square by 11 1/4-in. [285-mm] Bars from Center Side Plate of Double Molds



NOTE—Dimensions shown are appropriate for one design of mold for 3-in. [75-mm] square specimens. Change dimensions as required for other molds.

FIG. 4 Device for Demolding Specimens from Single Molds

6. Sampling

6.1 Take samples according to the applicable provisions of Practice C 192/C 192M from batches of hydraulic-cement mortar or concrete made in the laboratory (Note 2).

NOTE 2—When collecting samples in nonstandard conditions, such as field concrete, it is suggested that Practice C 172 be followed. Field cast specimens can show up to twice as much drying shrinkage as laboratory cast specimens from the same materials and proportions.

7. Test Specimens

7.1 *Mortar*—The test specimen for mortar shall be a prism of 1-in. [25-mm] square cross-section and approximately 11¼ in. [285 mm] in length. Three specimens shall be prepared for each test condition.

7.2 *Concrete*—The test specimen for concrete, in which all of the aggregate passes a 2-in. [50-mm] sieve, shall be a prism of 4-in. [100-mm] square cross-section and approximately 11¼ in. [285 mm] long. However, a prism of 3-in. [75-mm] square cross-section shall be used if all of the aggregate passes a 1-in. sieve [25.0-mm]. Three specimens shall be prepared for each test condition. Since length change is capable of being influenced by the size of the specimen, specimens to be compared shall have the same dimensions, and any specification limit based upon this method shall be applied to a specified size of specimen.

8. Procedure for Mixing Mortars and Concrete

8.1 If the mortar or concrete to be tested is made in accordance with requirements other than those given in one of the following paragraphs, samples shall be taken and specimens molded as described in the sections on sampling and on molding specimens.

8.2 Bring all materials to a temperature between 65 and 75 °F [18 and 24 °C] before using to make mortar or concrete. Proportion solid materials by mass (that is, not by volume). It is permissible to batch water and liquid admixtures either by mass or by volume. For calculation of batch quantities, assume aggregates to be saturated and surface-dry; if they are not in this condition at the time of use, apply appropriate corrections, as necessary, to batch quantities to compensate for absorption or free moisture.

8.3 *Mortar*—Mix mortar in a mechanical mixer as described in Practice C 305. The clearances between paddle and bowl specified in Practice C 305 are suitable only for mortars made with fine aggregates that are finer than the 2.36 mm (No. 8) sieve. Mortars made with aggregates containing particles coarser than this sieve require special clearances or a different type of paddle to permit the mixer to operate freely and to avoid damage to the paddle and bowl. The sequence of mixing shall be in accordance with the applicable provisions of Practice C 305. Determine the flow of the mortar in accordance with the applicable provisions of Test Method C 1437, and use sufficient mixing water to produce a flow of $110 \pm 5\%$.

8.4 *Concrete*—Mix concrete in a suitable laboratory mixer in accordance with the applicable provisions of Practice C 192/C 192M. Determine the slump of the concrete using Test Method C 143/C 143M, and use sufficient mixing water to produce a slump of $3.5 \pm \frac{1}{2}$ in. [90 ± 15 mm].

9. Procedure for Molding Specimens

9.1 *Mortar Specimens*—Place the mortar in the mold in two approximately equal layers. Compact each layer with the tamper. Work the mortar into the corners, around the gage studs, and along the surfaces of the mold with the tamper until a homogeneous specimen is obtained. After the top layer has been compacted, strike off the mortar flush with the top of the mold, and smooth the surface with a few strokes of a trowel.

Immediately after completion of molding, loosen the device by holding the gage studs in position at each end of the mold in order to prevent any restraint of the gage studs during initial shrinkage of the specimen.

9.2 *Concrete Specimens*—Place the concrete in the mold in two approximately equal layers in accordance with the general instructions for placing concrete in specimens given in Practice C 192/C 192M. Consolidate each layer by rodding, except use external vibration if the slump is less than 3 in. [75 mm] in accordance with the instructions for consolidation of flexure test specimens given in Practice C 192/C 192M. The same method of consolidation is to be used for all specimens to be compared. In addition, as the top layer is being placed, work the concrete thoroughly around each gage stud with the fingers. The top layer shall slightly overfill the mold. After consolidation is complete, strike off the excess material with a straight-edge. Immediately after completion of molding, loosen the device by holding the gage studs in position at each end of the mold in order to prevent any restraint of the gage studs before the test specimens are demolded.

10. Procedure for Curing of Specimens

10.1 Cure the test specimens in the molds in a moist cabinet or room in accordance with Specification C 511. Protect specimens from dripping water.

10.2 Remove specimens from the molds at an age of $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ h after the addition of water to the cement during the mixing operation. In order to avoid damage during removal from the molds, it is not permitted, especially in the case of certain slow-hardening cements, to allow specimens to remain in the molds for more than 24 h. When this is found necessary the moist curing schedule shall be extended, but all specimens that are to be directly compared with each other shall be subjected to the same conditions of moist-curing and shall have their initial comparator reading made within $\pm \frac{1}{2}$ h of the same age. It is permitted to use the demolding device to remove specimens without striking or jarring and with particular care not to exert pressure directly against the gage studs. The gage stud holder shall remain attached to the stud during this operation. Marks placed on the specimens for identification or positioning are only to be made by graphite applied either by a soft pencil or as a liquid that deposits essentially graphite without binder or made with waterproof indelible ink. Upon removal of the specimens from the molds, place them in lime-saturated water maintained at 73 ± 1 °F [23 ± 0.5 °C] for a minimum of 15 min in the case of 1-in. [25-mm] square cross-section specimens, and for a minimum of 30 min in the case of 3-in. [75-mm] or 4-in. [100-mm] square cross section specimens before being measured for length. This is to minimize variation in length due to variation in temperature. At an age of $24 \pm \frac{1}{2}$ h after the addition of water to the cement during the mixing operation, remove the specimens from water storage one at a time, wipe with a damp cloth, and immediately take the initial comparator reading.

10.3 After the initial comparator reading, store the specimens in lime-saturated water at 73 ± 3 °F [23 ± 2 °C] until they have reached an age of 28 days, including the period in the molds. At the end of the curing period, take a second comparator reading after the specimens have been brought to a

more closely controlled temperature as was done prior to the earlier reading and in the manner described above.

NOTE 3—To determine the drying shrinkage of concrete subjected to elevated temperature curing in the laboratory, a modification of the previous method is necessary. Where concrete is cured with elevated (non-autoclave) temperatures, the curing cycle for this test method shall be that to be used for the project structural members. The elevated temperature curing cycle consists of pre-steam, steam cure, and post-steam periods. To avoid measuring thermal volume change, after the molds are stripped, cool drying-shrinkage specimens at laboratory temperature until they reach equilibrium (approximately 6 h for 4 by 4 by 11-in. [100 by 100 by 280-mm] bars). Then place them in lime-saturated water prior to the initial reading (see 10.2).

11. Procedure for Storage of Specimens

11.1 After measurement at the end of the curing period, store the specimens as described in either of the following:

11.1.1 *Water Storage*—Immerse the specimens in lime-saturated water storage in accordance with Specification C 511. Take comparator readings of each specimen when it has reached an age, including the curing period of 8, 16, 32, and 64 weeks. Make these readings immediately after the specimens have been subjected to storage in water at 73 ± 1 °F [23 ± 0.5 °C] for at least 15 min in the case of 1-in. [25-mm] specimens or 30 min in the case of 3-in. [75-mm] or 4-in. [100-mm] specimens.

11.1.2 *Air Storage*—Store the specimens in the drying room, so that the specimens have a clearance of at least 1 in. or 25 mm on all sides. Take comparator readings of each specimen after periods of air storage after curing of 4, 7, 14, and 28 days, and after 8, 16, 32, and 64 weeks. Preferably, take these readings in a room maintained at a relative humidity of 50 ± 4 % while the specimens are at a temperature of 73 ± 3 °F [23 ± 2 °C].

12. Procedure for Calculating Length Change

12.1 *Comparator Reading*—Read the comparator dial with the test specimen in the comparator; then read the comparator dial with the reference bar in the comparator. Calculate the difference between the two readings as described in Practice C 490.

12.2 *Length Change*—Calculate the length change of any specimen at any age after the initial comparator reading as follows:

$$\Delta L_x = \frac{CRD - \text{initial } CRD}{G} \times 100 \quad (1)$$

where:

- ΔL_x = length change of specimen at any age, %,
- CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at any age, and
- G = the gage length (10 in. [250 mm]) (see Note 4).

NOTE 4—In Practice C 490, the comparator dial gage specified for use with 10-in. gage length specimens shall be graduated in fractions of an inch; the comparator dial gage specified for use with 250-mm gage length specimens shall be graduated in fractions of a millimetre.

13. Report

13.1 Report the following information:

- 13.1.1 Identification as mortar or concrete specimens, number of specimens for each condition, and date molded,
- 13.1.2 Source and identification of each material employed,
- 13.1.3 Type, maximum size, moisture condition, and grading of the aggregate,
- 13.1.4 Size of specimens,
- 13.1.5 Mortar or concrete mixture data at time of mixing, including flow or slump and temperature of mixture,
- 13.1.6 Description of consolidation of concrete, specifying whether rodding or external vibration was used,
- 13.1.7 Conditions and periods of moist curing prior and subsequent to removal of molds, if different from those specified,
- 13.1.8 Description of storage condition, including temperature and humidity, either by indicating whether the water or air storage was followed or by giving the details of any procedure not conforming to either of these conditions,
- 13.1.9 Total elapsed time of storage and total age of specimen, or total elapsed time of curing and storage if the same condition was used for both,
- 13.1.10 Length change data, reported as percent increase or decrease in linear dimension to the nearest 0.001 % of the gage length based on the initial measurement made at the time of removal from the molds, and
- 13.1.11 Any other pertinent information.

14. Precision and Bias

14.1 *Precision:*

14.1.1 When this test method was used for the purpose of determining drying shrinkage of mortar as affected by the choice of portland cement used in making it, the precision was found to be as reported in Test Method C 596.

14.1.1.1 The following single-laboratory, multiple-operator precision applies to concrete specimens measured at 180 days.

14.1.1.2 For specimens stored in water, the standard deviation (1s) among specimens is 0.0045 %. When three replicate specimens are tested, the maximum range among them is not expected to exceed 0.0266 % in 95 % of the sets tested. When a test result represents the mean of three specimens, the 1s is 0.0026 %. The difference between two such means is not expected to exceed 0.0074 % in 95 % of such duplicate tests performed.

14.1.1.3 For specimens stored in air, the standard deviation (1s) among specimens is 0.0084 %. When three replicate specimens are tested, the maximum range among them is not expected to exceed 0.0496 % in 95 % of the sets tested. When a test result represents the mean of 3 specimens, the 1s is 0.0048 %. The difference between two such means is not expected to exceed 0.0137 % in 95 % of such duplicate tests performed.

NOTE 5—These precision values were calculated from data taken on specimens described on p. 47 of STP 205,⁴ representing 193 concrete mixtures; two specimens made from each of three batches made on separate days, one of each two specimens stored in water, the other stored at nominal 50 % relative humidity.

⁴ Mather, Bryant, "The Partial Replacement of Portland Cement in Concrete," *Cement and Concrete, ASTM STP 205*, ASTM, 1958.

14.2 *Bias*—No statement on bias is being made since there is no accepted reference material suitable for determining the bias of these procedures.

15. Keywords

15.1 length change; mortar concrete

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 157/C 157M – 06, that may impact the use of this test method. (Approved October 1, 2008)

(I) Revised Footnote 3.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration¹

This standard is issued under the fixed designation C1202; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the electrical conductance of concrete to provide a rapid indication of its resistance to the penetration of chloride ions. This test method is applicable to types of concrete where correlations have been established between this test procedure and long-term chloride ponding procedures such as those described in AASHTO T 259. Examples of such correlations are discussed in Refs 1-5.²

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard, except where SI units are given first followed by inch-pound units in parentheses. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C31/C31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C42/C42M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
- C192/C192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.66 on Concrete's Resistance to Fluid Penetration.

Current edition approved Feb. 1, 2010. Published March 2010. Originally approved in 1991. Last previous edition approved in 2009 as C1202 – 09. DOI: 10.1520/C1202-10.

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

2.2 AASHTO Standard:

T 259 Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration⁴

3. Summary of Test Method

3.1 This test method consists of monitoring the amount of electrical current passed through 2-in. (51-mm) thick slices of 4-in. (102-mm) nominal diameter cores or cylinders during a 6-h period. A potential difference of 60 V dc is maintained across the ends of the specimen, one of which is immersed in a sodium chloride solution, the other in a sodium hydroxide solution. The total charge passed, in coulombs, has been found to be related to the resistance of the specimen to chloride ion penetration.

4. Significance and Use

4.1 This test method covers the laboratory evaluation of the electrical conductance of concrete samples to provide a rapid indication of their resistance to chloride ion penetration. In most cases the electrical conductance results have shown good correlation with chloride ponding tests, such as AASHTO T 259, on companion slabs cast from the same concrete mixtures (Refs 1-5).

4.2 This test method is suitable for evaluation of materials and material proportions for design purposes and research and development.

4.3 Sample age has significant effects on the test results, depending on the type of concrete and the curing procedure. Most concretes, if properly cured, become progressively and significantly less permeable with time.

4.4 This test method was developed originally for evaluations of alternative materials, but in practice its use has evolved to applications such as quality control and acceptance testing.

⁴ Methods of Sampling and Testing, 1986, American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., NW, Washington, DC 20001.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

In such cases it is imperative that the curing procedures and the age at time of testing be clearly specified.

4.5 **Table 1** provides a qualitative relationship between the results of this test and the chloride ion penetrability of concrete.

4.6 Numerical results of this test (total charge passed, in coulombs) can be used as a basis for determining the acceptability of a concrete mixture. Factors such as the ingredient materials used and method and duration of curing of test specimens affect results of this test. (See **Note 1**)

NOTE 1—When using this test for determining acceptability of concrete mixtures, statistically-based criteria and test age for prequalification, or for acceptance based on jobsite samples, should be stated in project specifications. Acceptance criteria for this test should consider the sources of variability affecting the results and ensure balanced risk between supplier and purchaser. The anticipated exposure conditions and time before a structure will be put into service should be considered. One approach to establishing criteria is discussed in Ref 6.

4.7 Care should be taken in interpreting results of this test when it is used on surface-treated concretes, for example, concretes treated with penetrating sealers. The results from this test on some such concretes indicate low resistance to chloride ion penetration, while 90-day chloride ponding tests on companion slabs show a higher resistance.

4.8 The details of the test method apply to 4-in. (102-mm) nominal diameter specimens. This includes specimens with actual diameters ranging from 3.75 in. (95 mm) to 4.0 in. (102 mm). Other specimen diameters may be tested with appropriate changes in the applied voltage cell design (see 7.5 and Fig. 1).

4.8.1 For specimen diameters other than 3.75 in. (95 mm), the test result value for total charge passed must be adjusted following the procedure in 11.2. For specimens with diameters less than 3.75 in. (95 mm), particular care must be taken in coating and mounting the specimens to ensure that the conductive solutions are able to contact the entire end areas during the test.

5. Interferences

5.1 This test method can produce misleading results when calcium nitrite has been admixed into a concrete. The results from this test on some such concretes indicate higher coulomb values, that is, lower resistance to chloride ion penetration, than from tests on identical concrete mixtures (controls) without calcium nitrite. However, long-term chloride ponding tests indicate the concretes with calcium nitrite were at least as resistant to chloride ion penetration as the control mixtures.

NOTE 2—Other admixtures might affect results of this test similarly. Long term ponding tests are recommended if an admixture effect is suspected.

5.2 Since the test results are a function of the electrical resistance of the specimen, the presence of reinforcing steel or

other embedded electrically conductive materials may have a significant effect. The test is not valid for specimens containing reinforcing steel positioned longitudinally, that is, providing a continuous electrical path between the two ends of the specimen.

6. Apparatus

6.1 *Vacuum Saturation Apparatus* (see Fig. 2 for example):

6.1.1 *Separatory Funnel*, or other sealable, bottom-draining container with a minimum capacity of 500 mL.

6.1.2 *Beaker (1000 mL or larger) or other container*—Capable of holding concrete specimen(s) and water and of fitting into vacuum desiccator (see 6.1.3).

6.1.3 *Vacuum Desiccator*—250-mm (9.8-in.) inside diameter or larger. Desiccator must allow two hose connections through a rubber stopper and sleeve or through a rubber stopper only. Each connection must be equipped with a stopcock.

6.1.4 *Vacuum Pump or Aspirator*—Capable of maintaining a pressure of less than 50 mm Hg (6650 Pa) in desiccator.

NOTE 3—Since vacuum will be drawn over water, a vacuum pump should be protected with a water trap, or pump oil should be changed after each operation.

6.1.5 *Vacuum Gage or Manometer*—Accurate to ± 5 mm Hg (± 665 Pa) over range 0–100 mm Hg (0–13300 Pa) pressure.

6.2 *Coating Apparatus and Materials:*

6.2.1 *Coating*—Rapid setting, electrically nonconductive, capable of sealing side surface of concrete cores.

6.2.2 *Balance or Scale, Paper Cups, Wooden Spatulas, and Disposable Brushes*—For mixing and applying coating.

6.3 *Specimen Sizing Equipment* (not required if samples are cast to final specimen size).

6.3.1 *Movable Bed Water-Cooled Diamond Saw or Silicon Carbide Saw.*

7. Reagents, Materials, and Test Cell

7.1 *Specimen-Cell Sealant*—Capable of sealing concrete to poly (methyl methacrylate), for example, Plexiglas, against water and dilute sodium hydroxide and sodium chloride solutions at temperatures up to 200 °F (90 °C); examples include RTV silicone rubbers, silicone rubber caulking, other synthetic rubber sealants, silicone greases, and rubber gaskets.

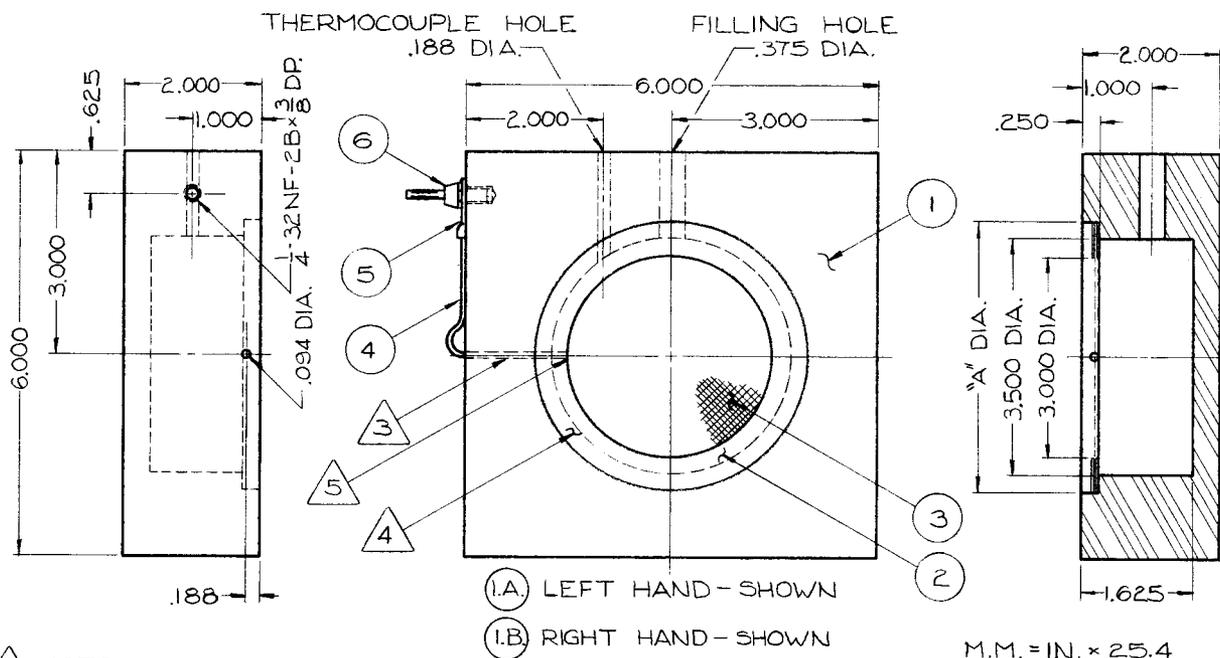
7.2 *Sodium Chloride Solution*—3.0 % by mass (reagent grade) in distilled water.

7.3 *Sodium Hydroxide Solution*—0.3 N (reagent grade) in distilled water.

7.3.1 **Warning**—Before using NaOH, review: (1) the safety precautions for using NaOH; (2) first aid for burns; and (3) the emergency response to spills, as described in the manufacturer’s Material Safety Data Sheet or other reliable safety literature. NaOH can cause very severe burns and injury to unprotected skin and eyes. Suitable personal protective equipment should always be used. These should include full-face shields, rubber aprons, and gloves impervious to NaOH. Gloves should be checked periodically for pin holes.

TABLE 1 Chloride Ion Penetrability Based on Charge Passed (1)

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100–1,000	Very Low
<100	Negligible



△ NOTES:

- 1.) DIAMETER "A" SHOULD BE $\frac{1}{8}$ " LARGER THAN OUTSIDE DIA. OF SPECIMEN.
- 2.) NOT TO SCALE.
- 3.) SEAL WIRE IN HOLE WITH SILICONE RUBBER CAULK.
- 4.) SCREEN SOLDERED BETWEEN SHIMS.
- 5.) SOLDER WIRE TO BRASS SHIM.
- 6.) POLYMETHYLMETHACRYLATE, e.g., PLEXIGLAS.

6	2	BANANA PLUG	$\frac{1}{4}$ " MALE, INSULATED
5	2	TERMINAL	12-10- $\frac{1}{4}$
4	2	WIRE, COPPER	#14, SOLID NYLCLAD
3	2	SCREEN, BRASS	#20 MESH, "A" DIA.
2	4	SHIM, BRASS	0.02 THK.
I.B.	1	CELL BLOCK END	PMMA SHEET △
I.A.	1		
ITEM	QTY.	NOMENCLATURE	SPECIFICATION

FIG. 1 Applied Voltage Cell (construction drawing)

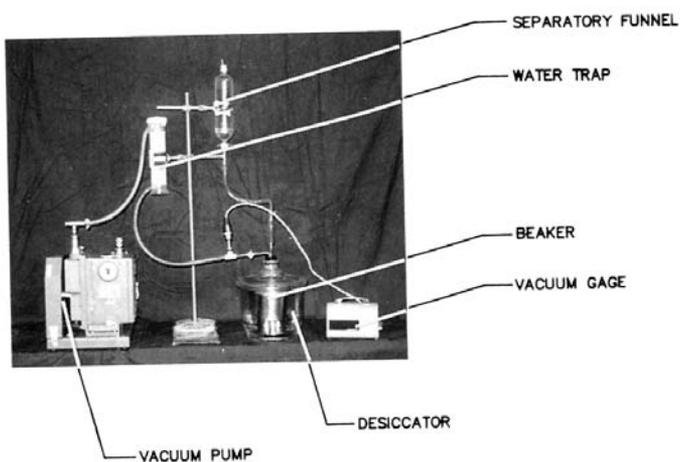


FIG. 2 Vacuum Saturation Apparatus

7.4 Filter Papers—No. 2, 90-mm (3.5-in.) diameter (not required if rubber gasket is used for sealant (see 7.1) or if sealant can be applied without overflowing from shim onto mesh).

7.5 Applied Voltage Cell (see Fig. 1 and Fig. 3)—Two

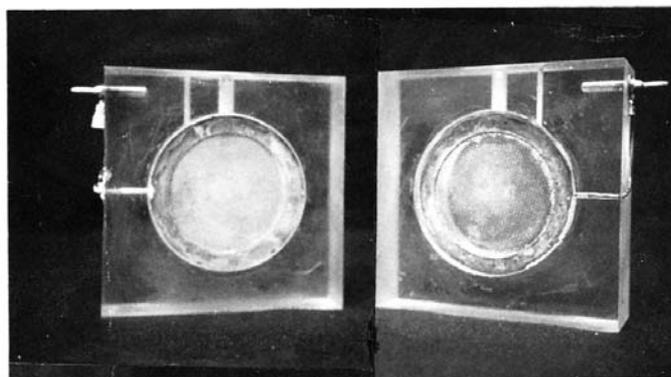


FIG. 3 Applied Voltage Cell-Face View

symmetric poly (methyl methacrylate) chambers, each containing electrically conductive mesh and external connectors. One design in common use is shown in Fig. 1 and Fig. 3. However, other designs are acceptable, provided that overall dimensions (including dimensions of the fluid reservoir) are the same as shown in Fig. 1 and width of the screen and shims are as shown.

7.6 *Temperature Measuring Device (optional)*—30 to 250 °F (0 to 120 °C) range.

7.7 *Voltage Application and Data Readout Apparatus*—Capable of holding 60 ± 0.1 V dc across applied voltage cell over entire range of currents and of displaying voltage accurate to ± 0.1 V and current to ± 1 mA. Apparatus listed in 7.7.1-7.7.5 is a possible system meeting this requirement.

7.7.1 *Voltmeter*—Digital (DVM), 3 digit, minimum 0–99.9 V range, rated accuracy ± 0.1 %.

7.7.2 *Voltmeter*—Digital (DVM), $4\frac{1}{2}$ digit, 0–200 mV range, rated accuracy ± 0.1 %.

7.7.3 *Shunt Resistor*—100 mV, 10A rating, tolerance ± 0.1 %. Alternatively, a 0.01Ω resistor, tolerance ± 0.1 %, may be used, but care must be taken to establish very low resistance connections.

7.7.4 *Constant Voltage Power Supply*—0–80 V dc, 0–2 A, capable of holding voltage constant at 60 ± 0.1 V over entire range of currents.

7.7.5 *Cable*—Two conductor, No. 14 (1.6 mm), insulated, 600 V.

8. Test Specimens

8.1 Sample preparation and selection depends on the purpose of the test. For evaluation of materials or their proportions, samples may be (a) cores from test slabs or from large diameter cylinders or (b) 4-in. (102-mm) diameter cast cylinders. For evaluation of structures, samples may be (a) cores from the structure or (b) 4-in. (102-mm) diameter cylinders cast and cured at the field site. Coring shall be done with a drilling rig equipped with a 4-in. (102-mm) diameter diamond-dressed core bit. Select and core samples following procedures in Test Method C42/C42M. Cylinders cast in the laboratory shall be prepared following procedures in Practice C192/C192M. When cylinders are cast in the field to evaluate a structure, care must be taken that the cylinders receive the same treatment as the structure, for example, similar degree of consolidation, curing, and temperature history during curing.

NOTE 4—The maximum allowable aggregate size has not been established for this test. Users have indicated that test repeatability is satisfactory on specimens from the same concrete batch for aggregates up to 25.0 mm (1 in.) nominal maximum size.

8.2 When results of this test method are used for evaluation of materials or mixture proportions based on cast specimens for purposes of quality control, mixture submittals, or acceptance of concrete, prepare 4-in (102-mm) diameter cylindrical specimens in accordance with Practice C192/C192M for concrete mixtures prepared in the laboratory or Practice C31/C31M from samples of fresh concrete obtained in the field. Unless otherwise specified, moist cure specimens in accordance with 8.2.1 for concrete mixtures containing only portland cement and in accordance with 8.2.2 for concrete mixtures containing

supplementary cementitious materials. Use the same method and duration of curing test specimens when comparing two or more mixtures. The accelerated moist curing procedure in 8.2.3 is permitted as an alternative to the extended moist curing procedure for concrete mixtures containing supplementary cementitious materials (See Note 6).

8.2.1 *Moist Curing*—Cure test specimens for at least 28 days in accordance with Practice C192/C192M or in accordance with the standard curing procedure of Practice C31/C31M for specimens prepared in the field.

8.2.2 *Extended Moist Curing*—Cure test specimens for at least 56 days in accordance with Practice C192/C192M for specimens prepared in the laboratory or in accordance with the standard curing procedure of Practice C31/C31M for specimens prepared in the field.

8.2.3 *Accelerated Moist Curing*—Provide 7 days of moist curing in accordance with Practice C192/C192M for specimens prepared in the laboratory or in accordance with the standard curing procedure of Practice C31/C31M for specimens prepared in the field. After 7 days of moist curing, immerse the specimens for 21 days in lime-saturated water at 38.0 ± 2.0 °C (100 ± 3 °F).

NOTE 5—The 56-day moist curing period is to allow for some supplementary cementitious materials to develop potential properties because of their slower rate of hydration. Concrete containing supplementary cementitious materials may continue to show reductions in results of this test beyond 56 days, and in some cases, it may be appropriate to test at later ages, such as 3 months.

NOTE 6—The accelerated moist curing procedure has been found useful in providing an earlier indication of potential property development with slower hydrating supplementary cementitious materials (7). Because the two different curing methods may not provide the same results, the specifier of the test may require a correlation between results for extended moist cured and accelerated moist cured specimens and establish appropriate acceptance criteria when the accelerated moist curing procedure is used or permitted. Comparisons between results of moist cured specimens and field performance of concrete are documented in (8).

8.3 Transport the cores or field-cured cylinders to the laboratory in sealed (tied) plastic bags. If specimens must be shipped, they should be packed so as to be properly protected from freezing and from damage in transit or storage.

8.4 Using the water-cooled diamond saw or silicon carbide saw, cut a $2 \pm \frac{1}{8}$ in. (51 ± 3 mm) slice from the top of the core or cylinder, with the cut parallel to the top of the core. This slice will be the test specimen. Use a belt sander to remove any burrs on the end of the specimen.

8.5 Special processing is necessary for core samples where the surface has been modified, for example, by texturing or by applying curing compounds, sealers, or other surface treatments, and where the intent of the test is not to include the effect of the modifications. In those cases, the modified portion of the core shall be removed and the adjacent $2 \pm \frac{1}{8}$ in. (51 ± 3 mm) slice shall be used for the test.

9. Conditioning

9.1 Vigorously boil a litre or more of tapwater in a large sealable container. Remove container from heat, cap tightly, and allow water to cool to ambient temperature.

9.2 Allow specimen prepared in Section 8 to surface dry in air for at least 1 h. Prepare approximately $\frac{1}{2}$ oz (10 g) of rapid

setting coating and brush onto the side surface of specimen. Place the sample on a suitable support while coating to ensure complete coating of sides. Allow coating to cure according to the manufacturer's instructions.

9.3 The coating should be allowed to cure until it is no longer sticky to the touch. Fill any apparent holes in the coating and allow additional curing time, as necessary. Place specimen in beaker or other container (see 6.1.2), then place container in vacuum desiccator. Alternatively, place specimen directly in vacuum desiccator. Both end faces of specimen must be exposed. Seal desiccator and start vacuum pump or aspirator. Pressure should decrease to less than 50 mm Hg (6650 Pa) within a few minutes. Maintain vacuum for 3 h.

9.4 Fill separatory funnel or other container (see 6.1.1) with the de-aerated water prepared in 9.1. With vacuum pump still running, open water stopcock and drain sufficient water into beaker or container to cover specimen (do not allow air to enter desiccator through this stopcock).

9.5 Close water stopcock and allow vacuum pump to run for one additional hour.

9.6 Close vacuum line stopcock, then turn off pump. (Change pump oil if a water trap is not being used.) Turn vacuum line stopcock to allow air to re-enter desiccator.

9.7 Soak specimen under water (the water used in steps 9.4-9.6) in the beaker for 18 ± 2 h.

10. Procedure

10.1 Remove specimen from water, blot off excess water, and transfer specimen to a sealed can or other container which will maintain the specimen in 95 % or higher relative humidity.

10.2 Specimen mounting (all sealants other than rubber gaskets; use 10.2.2 or 10.2.3, as appropriate):

10.2.1 If using two-part specimen-cell sealant, prepare approximately 0.7 to 1.4 oz (20 to 40 g).

10.2.2 *Low Viscosity Specimen-Cell Sealant*—If filter paper is necessary, center filter paper over one screen of the applied voltage cell. Trowel sealant over brass shims adjacent to applied voltage cell body. Carefully remove filter paper. Press specimen onto screen; remove or smooth excess sealant which has flowed out of specimen-cell boundary.

10.2.3 *High Viscosity Specimen-Cell Sealant*—Set specimen onto screen. Apply sealant around specimen-cell boundary.

10.2.4 Cover exposed face of specimen with an impermeable material such as rubber or plastic sheeting. Place rubber stopper in cell filling hole to restrict moisture movement. Allow sealant to cure per manufacturer's instructions.

10.2.5 Repeat steps 10.2.2 (or 10.2.3) and 10.2.4 on second half of cell. (Specimen in applied voltage cell now appears as shown in Fig. 4.)

10.3 Specimen mounting (rubber gasket alternative): Place a 4-in. outside diameter by 3-in. inside diameter by 1/4-in. (100 mm outside diameter by 75 mm inside diameter by 6 mm) circular vulcanized rubber gasket in each half of the test cell. Insert sample and clamp the two halves of the test cell together to seal.

10.4 Fill the side of the cell containing the top surface of the specimen with 3.0 % NaCl solution. (That side of the cell will be connected to the negative terminal of the power supply in



FIG. 4 Specimen Ready for Test

10.5.) Fill the other side of the cell (which will be connected to the positive terminal of the power supply) with 0.3 N NaOH solution.

10.5 Attach lead wires to cell banana posts. Make electrical connections to voltage application and data readout apparatus as appropriate; for example, for system listed in 7.7.1-7.7.5, connect as shown in Fig. 5. Turn power supply on, set to 60.0 ± 0.1 V, and record initial current reading. Temperatures of the specimen, applied voltage cell, and solutions shall be 68 to 77 °F (20 to 25 °C) at the time the test is initiated, that is, when the power supply is turned on.

10.6 During the test, the air temperature around the specimens shall be maintained in the range of 68 to 77 °F (20 to 25 °C).

10.7 Read and record current at least every 30 min. If a voltmeter is being used in combination with a shunt resistor for the current reading (see Fig. 5), use appropriate scale factors to convert voltage reading to amperes. Each half of the test cell must remain filled with the appropriate solution for the entire period of the test.

NOTE 7—During the test, the temperature of the solutions should not be allowed to exceed 190 °F (90 °C) in order to avoid damage to the cell and to avoid boiling off the solutions. Although it is not a requirement of the method, the temperature of the solutions can be monitored with thermocouples installed through the 1/8-in. (3-mm) venthole in the top of the cell. High temperatures occur only for highly penetrable concretes. If a test of a 2-in. (51-mm) thick specimen is terminated because of high temperatures, this should be noted in the report, along with the time of

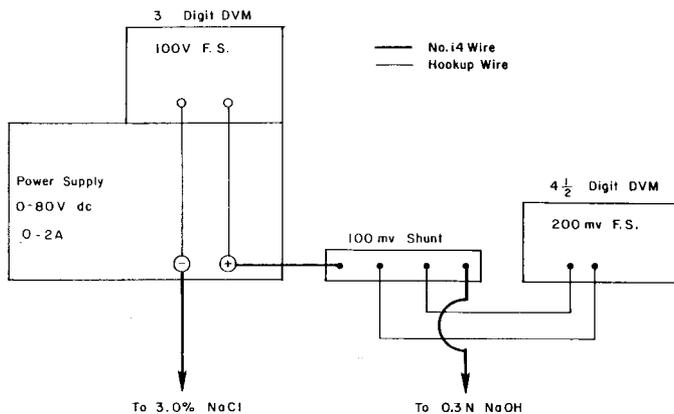


FIG. 5 Electrical Block Diagram (example)

termination, and the concrete rated as having very high chloride ion penetrability (see 12.1.9).

10.8 Terminate test after 6 h, except as discussed in Note 7.

10.9 Remove specimen. Rinse cell thoroughly in tapwater; strip out and discard residual sealant.

11. Calculation and Interpretation of Results

11.1 Plot current (in amperes) versus time (in seconds). Draw a smooth curve through the data, and integrate the area underneath the curve in order to obtain the ampere-seconds, or coulombs, of charge passed during the 6-h test period. (See Note 8) Alternatively, use automatic data processing equipment to perform the integration during or after the test and to display the coulomb value. The total charge passed is a measure of the electrical conductance of the concrete during the period of the test.

NOTE 8—*Sample Calculation*—If the current is recorded at 30 min intervals, the following formula, based on the trapezoidal rule, can be used with an electronic calculator to perform the integration:

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

where:

Q = charge passed (coulombs),

I_o = current (amperes) immediately after voltage is applied, and

I_t = current (amperes) at t min after voltage is applied.

11.2 If the specimen diameter is other than 3.75 in. (95 mm), the value for total charge passed established in 11.1 must be adjusted. The adjustment is made by multiplying the value established in 11.1 by the ratio of the cross-sectional areas of the standard and the actual specimens. That is:

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{3.75}{x} \right)^2 \quad (2)$$

where:

Q_s = charge passed (coulombs) through a 3.75-in. (95-mm) diameter specimen,

Q_x = charge passed (coulombs) through x in. diameter specimen, and

x = diameter (in.) of the nonstandard specimen.

11.3 Use Table 1 to evaluate the test results. These values were developed from data on slices of cores taken from laboratory slabs prepared from various types of concretes.

11.3.1 Factors which are known to affect chloride ion penetration include: water-cement ratio, the presence of polymeric admixtures, sample age, air-void system, aggregate type, degree of consolidation, and type of curing.

12. Report

12.1 Report the following, if known:

12.1.1 Source of core or cylinder, in terms of the particular location the core or cylinder represents,

12.1.2 Identification number of core or cylinder and specimen,

12.1.3 Location of specimen within core or cylinder,

12.1.4 Type of concrete, including binder type, water-cement ratio, and other relevant data supplied with samples,

12.1.5 Description of specimen, including presence and location of reinforcing steel, presence and thickness of overlay, and presence and thickness of surface treatment,

12.1.6 Curing history of specimen; indicate moist curing, extended moist curing, or accelerated moist curing as defined in this test method, as applicable,

12.1.7 Unusual specimen preparation, for example, removal of surface treatment,

12.1.8 Test results, reported as the total charge passed over the test period (adjusted per 11.2), and

12.1.9 The qualitative chloride ion penetrability equivalent to the calculated charge passed (from Table 1).

13. Precision and Bias⁵

13.1 *Precision:*

13.1.1 *Single-Operator Precision*—The single operator coefficient of variation of a single test result has been found to be 12.3 % (Note 9). Therefore the results of two properly conducted tests by the same operator on concrete samples from the same batch and of the same diameter should not differ by more than 42 % (Note 9).

13.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory coefficient of variation of a single test result has been found to be 18.0 % (Note 9). Therefore results of two properly conducted tests in different laboratories on the same material should not differ by more than 51 % (Note 9). The average of three test results in two different laboratories should not differ by more than 42 % (Note 10).

NOTE 9—These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C670. The precision statements are based on the variations in tests on three different concretes, each tested in triplicate in eleven laboratories. All specimens had the same actual diameters, but lengths varied within the range $2 \pm \frac{1}{8}$ in. (51 ± 3 mm).

NOTE 10—Although the test method does not require the reporting of more than one test result, testing of replicate specimens is usually desirable. The precision statement for the averages of three results is given since laboratories frequently will run this number of specimens. When averages of three results are established in each laboratory, the multilaboratory coefficient of variation, s_{ML} is calculated as:

$$s_{ML} = \sqrt{\frac{s_{WL}^2}{3} + s_{BL}^2} \quad (3)$$

where:

s_{WL}^2 = within-laboratory variance and

s_{BL}^2 = between-laboratory variance.

The percentage cited represents the (d2s %) limit based on the value for the multilaboratory coefficient of variation.

13.2 *Bias*—The procedure of this test method for measuring the resistance of concrete to chloride ion penetration has no bias because the value of this resistance can be defined only in terms of a test method.

14. Keywords

14.1 chloride content; corrosion; deicing chemicals; resistance-chloride penetration

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:C09-1004.

REFERENCES

- (1) Whiting, D., “Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete,” *Final Report No. FHWA/RD-81/119*, Federal Highway Administration, August 1981, NTIS No. PB 82140724.
- (2) Whiting, D., “Permeability of Selected Concretes,” *Permeability of Concrete*, SP-108, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1988, pp. 195–222.
- (3) Whiting, D., and Dziedzic, W., “Resistance to Chloride Infiltration of Superplasticized Concrete as Compared with Currently Used Concrete Overlay Systems,” *Final Report No. FHWA/OH-89/009*, Construction Technology Laboratories, May 1989.
- (4) Berke, N. S., Pfeifer, D. W., and Weil, T. G., “Protection Against Chloride-Induced Corrosion,” *Concrete International*, Vol. 10, No. 12, December 1988, pp. 45–55.
- (5) Ozyildirim, C., and Halstead, W. J., “Use of Admixtures to Attain Low Permeability Concretes,” *Final Report No. FHWA/VA-88-R11*, Virginia Transportation Research Council, February 1988, NTIS No. PB 88201264.
- (6) Obla, K.H. and Lobo, C.L., “Acceptance Criteria for Durability Tests,” *ACI Concrete International*, Vol. 29, No. 5, May 2007, pp. 43-48.
- (7) Ozyildirim C., Effects of Temperature on the Development of Low Permeability in Concretes, VTRC R98-14, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 1998.
- (8) Bouzoubaa, N., Bilodeau, A., Vasanthy, S., Fournier, B., and Golden, D., Development of Ternary Blends for High-Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 19-29, 2004.

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C1202 – 09, that may impact the use of this test method. (Approved February 1, 2010)

- (I) Revised Sections **4**, **8**, and **12**.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C1202 – 08, that may impact the use of this test method. (Approved May 1, 2009)

- (I) Revised **4.4**.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C1202 – 07, that may impact the use of this test method. (Approved December 15, 2008)

- (I) Revised **4.4**.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).



Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar¹

This standard is issued under the fixed designation C1698; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method measures the bulk strain of a sealed cement paste or mortar specimen, including those containing admixtures, various supplementary cementitious materials (SCM), and other fine materials, at constant temperature and not subjected to external forces, from the time of final setting until a specified age. This strain is known as *autogenous strain*. Autogenous strain is most significant in concrete with low water-cementitious materials ratio (w/cm) (See **Note 1**).

NOTE 1—A low water-cementitious materials ratio (w/cm) can be considered to be a water to cement ratio of 0.40 or lower for this test.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C157/C157M Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
- C191 Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- C192/C192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C219 Terminology Relating to Hydraulic Cement

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.68 on Volume Change.

Current edition approved Oct. 1, 2009. Published November 2009. DOI: 10.1520/C1698-09.

² Section on Safety Precautions, Manual of Aggregate and Concrete Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- C305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
- C403/C403M Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance
- C1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements
- 2.2 API Specification⁴
- RP 10B-2/ISO 10426-2 Recommended Practice for Testing Well Cements

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of terms used in this test method, refer to Terminologies C125 and C219.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *autogenous strain, n*—the bulk strain of a sealed specimen of a cementitious mixture, not subjected to external forces and under constant temperature, measured from the time of final setting until a specified age; negative strain corresponds to shrinkage and positive strain corresponds to expansion.

4. Summary of Test Method

4.1 A specimen of freshly mixed paste or mortar is prepared using a corrugated mold that offers little resistance to length change of the specimen. The mold is sealed to prevent moisture loss and the specimen is stored at constant temperature. Starting at the time of final setting, the length of the specimen is measured using a dilatometer. The change in length is recorded at regular time intervals until the designated age. The change in length and original length of the specimen are used to compute the autogenous strain.

5. Significance and Use

5.1 Autogenous strain is the self-created bulk strain of cement paste, mortar, or concrete during hardening at constant temperature. In conventional concrete, autogenous shrinkage strain is generally negligible, but in concrete with low water-cementitious materials ratio (w/cm) or with silica fume it may be considerable (**1**).⁵ Restraint of the autogenous strain by

⁴ Available from American Petroleum Institute (API), 1220 L. St., NW, Washington, DC 20005-4070, <http://www.api.org>.

⁵ The boldface numbers in parentheses refer to a list of references at the end of this standard.

aggregates or adjoining structural members may result in formation of micro and macro cracks that impair strength, durability and aesthetics. Cracks may also be a problem with regard to hygienic cleaning of surfaces.

5.2 An accurate measurement of the autogenous strain of cementitious mixtures with low w/cm is important for evaluating the risk of early-age cracking of concrete structures. Measurements of autogenous strain have been carried out using either volumetric or linear methods. Both methods may show evidence of significant artifacts (1); therefore, results of the two methods may disagree considerably if not carried out properly.

5.3 A sealed, flexible corrugated mold system (2) combines the advantages of linear and volumetric measurement of autogenous strain, while avoiding most of their disadvantages. The mold effectively prevents moisture loss and minimizes restraint to volume change during hardening. Moreover, results obtained with the corrugated mold system agree with those from the volumetric method, once some artifacts, in particular water absorption through the membrane used to contain the test specimen, have been eliminated in the latter (3,4). The corrugated mold system is easier to use and shows better repeatability than the volumetric technique (3,4). Measurements with the corrugated mold system are in good agreement with unrestrained length change measurements obtained using Test Method C157/C157M with sealed specimens (5); however, Test Method C157/C157M does not allow measurement of the shrinkage occurring before 24 h (5).

5.4 This test method can be used to evaluate the effects of cementitious materials, admixtures, and mixture proportions on autogenous shrinkage strain of paste or mortar specimens.

5.5 The autogenous shrinkage strain of mortar specimens will be less than that of paste specimens for the same w/cm . The autogenous shrinkage strain of concrete will be less than that of mortar for the same w/cm . The nominal maximum aggregate size for mortar used in this test method is 4.75 mm.

6. Apparatus

6.1 The apparatus to measure autogenous strain is composed of a corrugated mold with two end plugs, a dilatometer bench, a length measuring gauge, and a reference bar (see Fig. 1).

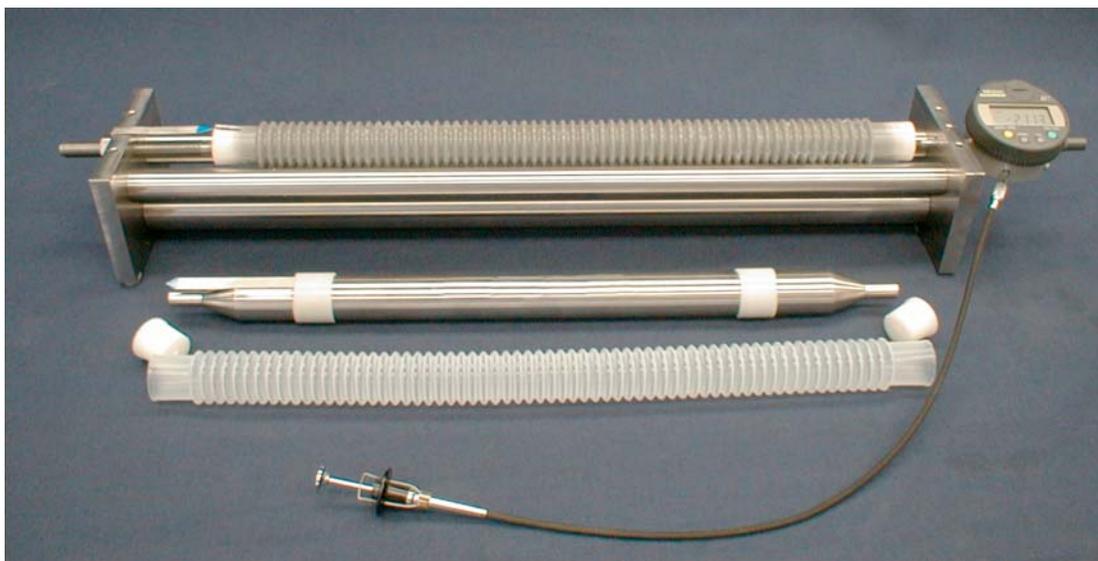
6.2 *Molds*—The molds consist of corrugated plastic tubes, having a length of 420 ± 5 mm and an outer diameter of 29 ± 0.5 mm (see Note 2). The plastic tubes are made of 0.5 ± 0.2 -mm thick low-density polyethylene (PE) and have triangular-shaped corrugations in order to minimize restraint in the longitudinal direction (see Fig. 2). The distance between corrugations is 5.8 ± 0.2 mm. The mold is tightly closed with two tapered end plugs having a length of 19 ± 0.5 mm. The diameter of the plastic end plugs tapers from 21 ± 0.1 mm to 22.4 ± 0.1 mm (see Fig. 3).

NOTE 2—The small diameter of the molds limits the temperature differences that may arise during hydration of the cementitious materials. Typical maximum temperature increase in the center of the test specimen, due to heat of hydration of cement paste or mortar has been determined to be 2 °C. The maximum longitudinal restraint stress exerted by the molds has been determined to be 0.001 MPa (6).

6.3 *Dilatometer Bench*—The dilatometer bench consists of three stainless steel rods with a diameter of 20 ± 1.0 mm and two stainless steel end plates. Technical drawings of a suitable dilatometer bench are shown in Fig. 4. During measurement, the test specimen is positioned horizontally and is supported longitudinally by the two upper rods.

6.4 *Length Measuring Gauge*—A gauge measures length changes at one end of the specimen. The measuring range of the gauge shall be at least 10 mm and the resolution shall be at least 0.0025 mm, corresponding to a resolution of about 6 $\mu\text{m}/\text{m}$ for the calculated strain.

6.5 *Reference Bar*—Measurements in the dilatometer are performed relative to the length of the reference bar. The bar is made of Invar with a length of 425 ± 0.5 mm and a diameter

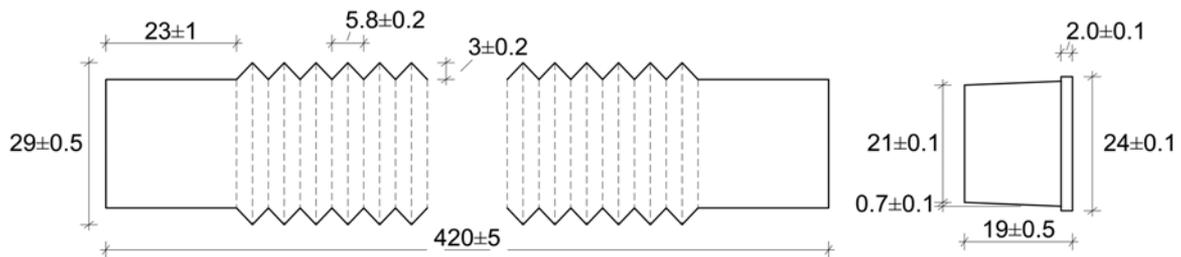


NOTE—In the foreground a corrugated PE-mold with two specially shaped end plugs and a 425 mm reference bar. In the background the dilatometer bench with a test specimen placed for length measurement. To the right a digital length gauge with remote control.

FIG. 1 A Suitable Dilatometer Bench with Accessories



FIG. 2 Corrugated Polyethylene Mold



NOTE—Plastic Tube Wall Thickness 0.5 ± 0.2 mm.

FIG. 3 Outer Dimensions (mm) of Corrugated Low-Density Polyethylene Mold and End Plug

of 20 ± 1.0 , tapering to 10 ± 1.0 mm at both ends as shown in Fig. 5. The actual length of the reference bar shall be marked permanently on the bar to the nearest 0.01 mm. Two plastic rings with an external diameter 30 ± 0.5 mm are mounted on the reference bar, as shown in Fig. 1.

6.6 *Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume* shall conform to the requirements of Specification C1005.

6.7 *Support Tube* used to support the corrugated mold during specimen fabrication. The support tube has a length of 400 ± 5 mm and an inside diameter of 32 ± 1 mm (see Fig. 6). The tube is attached to a base that can be fixed to a vibrating table.

6.8 *Vibrating Table* as described in Practice C192/C192M.

6.9 *Tamping Rod* for consolidation of the paste or mortar. It shall be made of a rigid, non-absorptive material that does not react with the cementitious mixture. The length of the rod shall be at least 500 mm and the diameter shall be 6 ± 1 mm. The ends may be flat or hemispherical.

7. Procedure

7.1 *Number of Specimens*—Three replicate specimens shall be tested for each cement paste or mortar (see Note 3).

7.1.1 *Mixing*—Mix cement pastes and mortars according to Practice C305. Record the time when the cementitious materials are added to the water.

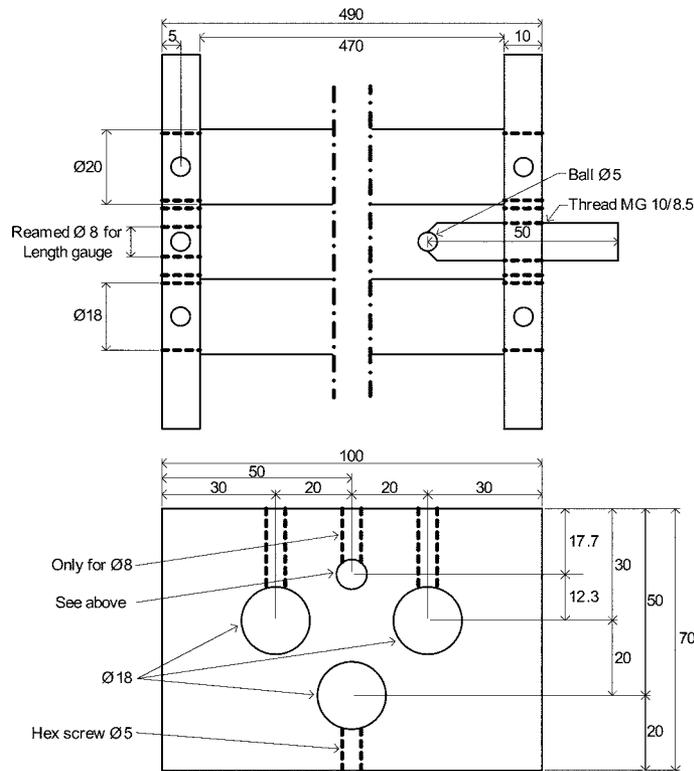
7.1.2 *Mixing Apparatus*

7.1.2.1 *Mortar Preparation*—The mixer shall comply with the sequence in Practice C305.

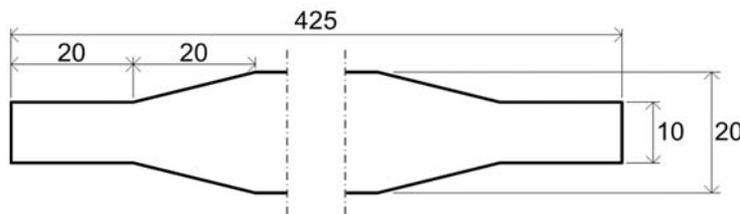
7.1.2.2 *Paste Preparation*—A high shear blender,⁶ or similar variable speed blender capable of maintaining a no-load speed of at least 15 000 r/min, with optional cooling device. A hand-held household mixer capable of mixing paste at not less than 400 r/min or other mixers for paste or mortar preparation are also permitted.

NOTE 3—About 185 mL of cement paste or mortar are needed to fill each corrugated mold. For a paste with a water-cement ratio of 0.4, this

⁶ Mixing devices described in API Specification RP 10B-2/ISO 10426-2.



NOTE—All dimensions are in mm (tolerance $\pm 0.5\%$).
FIG. 4 Technical Drawing of the Dilatometer Bench Shown in Fig. 1
 Top: Plan View. Bottom: Elevation View of End Plate

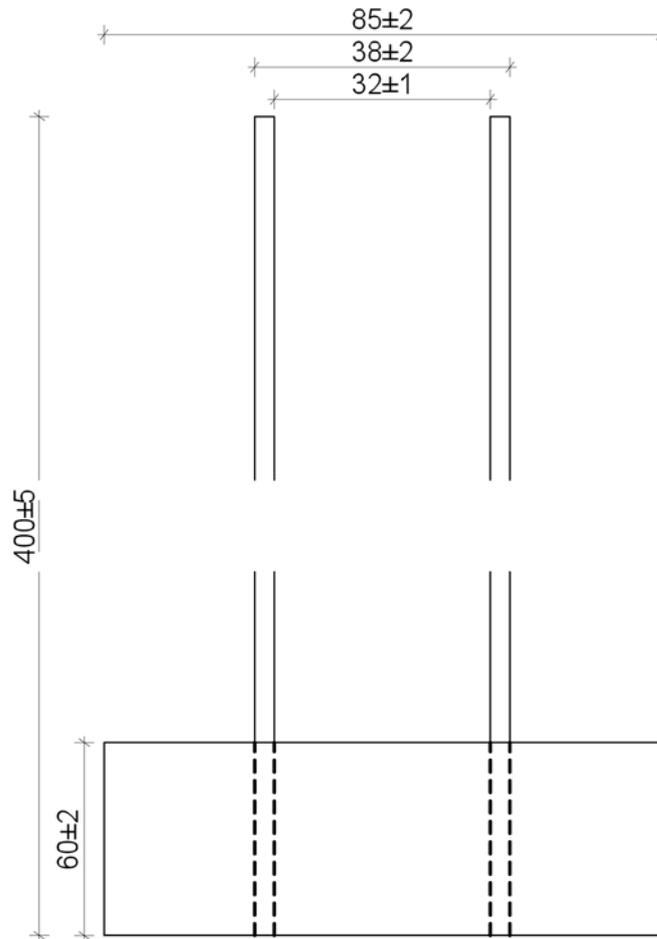


NOTE—All dimensions are in mm and tolerances given in the text.
FIG. 5 Technical Drawing of the Reference Bar Shown in Fig. 1

corresponds to approximately 360 g of paste.

7.2 Filling and Closing of Molds—Clamp the mounting base of the support tube to a vibrating table. Measure the lengths of the plugs to be used for each specimen. Place a plug into one end of the mold, and position the mold, with the closed end down, inside the support tube. If the cementitious mixture is pourable, slowly pour the mixture into the corrugated mold with the vibrating table turned on (see Fig. 7). For a semi-fluid mixture, fill the mold in four equal layers and compact each layer 5 times with the tamping rod before each subsequent layer is cast. The rod shall just penetrate the underlying layer. For a stiff mixture, hand prepare rolled sections of the cementitious mixture, drop them into the mold, and consolidate

with the tamping rod. To ensure that the cast specimens have approximately the same length, do not stretch or compress the corrugated mold during filling. For fluid mixtures, the corrugated mold shall be held only by the support tube during casting. For semi-fluid and stiff mixtures, manually maintain the initial length of the mold during compaction. Fill the mold to approximately 15 mm below the top end of the mold to allow room for the top end plug. Before mounting the top end plug, gently compress the corrugated mold to bring the cement paste or mortar in contact with the end plug. Mount the end plug during relief of the compression of the corrugated mold. Use a screwing motion of the end plug to ease the mounting operation. Immediately after casting, carefully wipe the surface



NOTE—All dimensions are in mm. The base of the support tube allows clamping to a vibration table.
FIG. 6 Suitable Dimensions of the Support Tube That is Used During Filling of the Corrugated Molds

of the corrugated mold with a dry cloth to remove any cement paste, mortar, or water.

7.3 Measuring Room—To minimize the influence of temperature variations, both the specimens and the dilatometer shall be kept in a thermostatically controlled room or cabinet at all times during the test. Maintain the surrounding air temperature at 23.0 ± 1.0 °C, unless otherwise specified (see **Note 4**). Do not store specimens in a water bath due to possible water transport through the corrugated molds.

NOTE 4—The measurement can be performed at any temperature specified by the user, provided that the temperature in the measuring room or cabinet is maintained constant during the test with a tolerance of ± 1.0 °C.

7.4 Specimen Storage—After filling and sealing the molds, store the specimens horizontally on a smooth surface, to avoid any restraint to length change. Support specimens along their entire length to avoid damage and to ensure they remain straight (see **Note 5**). Maintain a separation of at least 30 mm between specimens during the first day of measurement to allow dispersion of their heats of hydration.

NOTE 5—Corrugated plastic sheets as shown in **Fig. 8** or other suitable materials can be used to support the molded specimens.

7.5 Time of First Measurement—Start length measurements at the time of final setting. Determine times of setting using Test Method **C191** for paste or Test Method **C403/C403M** for mortar on specimens made with the same mixture used to mold the autogenous shrinkage specimens and cured at the same temperature as for the autogenous strain measurement. Protect the specimens used for determination of setting times from moisture loss during the measurement.

7.6 Length Measurement—Insert the reference bar in the dilatometer bench and bring the measuring gauge in contact with the end of the bar. Reset the measuring gauge so that it reads zero with the reference bar in position (see **Note 6**). Remove the reference bar and insert a specimen in the dilatometer bench. Measure the length of the specimen with the gauge (see **Note 6**). Remove the specimen and measure the length of the next specimen.

NOTE 6—A number of digital length measurement devices have the option of changing the sign of the length measurements. Ensure that the sign for the gauge reading is positive for elongation of the specimen (see Eq 1).

During handling of the specimens, support them at all times with both hands and use care to avoid damage. In particular at



NOTE—An empty corrugated mold, closed at one end with an end plug, is inserted into the support tube and positioned vertically on a vibrating table. The fresh mixture is slowly poured into the corrugated mold during vibration, until the mold is filled.

FIG. 7 How to Fill the Corrugated Molds

early age the specimens must be supported along their entire length while they are moved to and from the dilatometer bench (Note 7).

NOTE 7—This can be done by moving the specimen together with a corrugated support rack and rolling the specimen into the frame gently onto the dilatometer bench.

To ensure optimal measuring accuracy, place the reference bar and the specimens in the same orientation during each measurement. Draw a line mark with permanent ink on one end of the corrugated mold after the first measurement to indicate both the upside and the measuring gauge position (see Figs. 8 and 9).

7.7 *Frequency and Duration of Measurements*—Frequency and duration of measurements depends on the cementitious mixture and on the scope of the measurements. The specifier of tests shall indicate the frequency of measurements and the duration of testing (see Note 8). In the absence of other specified ages, measure specimen length at the time of final setting and ages of 1, 3, 7, 14, and 28 d from the time of initial mixing of cementitious materials and water. For longer test durations, protect the molds from moisture loss.

NOTE 8—More frequent measurements may be performed at intervals of one to three hours during the first day, twice a day during the first week, once a day after the first week. Typical duration of the measurements varies from one week to several months. For long term measurements, the corrugated molds may be further protected from moisture loss by storing them in sealed tubes between the measurements.

7.8 *Monitoring Mass Change*—Measure specimen mass using a balance with a resolution of at least 0.01 g. Measure the mass of each specimen after the first autogenous strain measurement has been taken at the time of final setting. Measure the mass of each specimen again after each autogenous strain

measurement has been performed. Support the specimens along their length while they are moved to the balance and during mass measurement (Note 9).

NOTE 9—This can be done by measuring the mass of the specimen together with a corrugated support rack (see Fig. 8). Ensure that each specimen is weighed with the same support rack during each mass measurement. The measurement of mass loss indicates if drying shrinkage may be occurring, in addition to autogenous shrinkage.

8. Interferences

8.1 *Bleeding*—Bleeding is expected to influence the measured autogenous strain because reabsorption of bleed water after setting may cause expansion. Bleeding has, however, been shown to have minimal influence on the results of the test (see Note 10). For mixtures prone to bleeding, use an apparatus to slowly rotate the filled molds in a horizontal position at a speed of 1 to 3 r/min until final setting has occurred.

NOTE 10—Bleeding should not be a problem in cement pastes or mortars made with values of w/cm lower than about 0.4.

8.2 *Entrapped Air*—Before setting, entrapped air inside the corrugated molds as a consequence of less than perfect filling will influence the deformation of the specimens. However, the effect of entrapped air is negligible after setting, when a solid skeleton has developed in the cement paste or mortar.

9. Calculations

9.1 *Time*—The time t is defined as the time elapsed from the first addition of the cementitious materials to the water during mixing.

9.2 *Length*—The length of the paste or mortar specimen at time t is calculated with the following formula:

$$L(t) = L_{ref} + R(t) - 2 \cdot L_{plug} \quad (1)$$

where:

- L_{ref} = length of reference bar, mm
- $R(t)$ = reading of length gauge with specimen in the dilatometer, mm, and
- L_{plug} = average length of end plugs, mm.

9.3 *Autogenous Strain*—The autogenous strain of the specimen at time t , expressed as $\mu m/m$, is calculated with the following formula:

$$\epsilon_{autogenous} = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} \cdot 10^6 = \frac{R(t) - R(t_{fs})}{L(t_{fs})} \cdot 10^6 \mu m/m \quad (2)$$

where:

- t_{fs} = time of final setting, when the first length measurement is performed, min.

9.4 *Mass Change*—The mass change of the specimen is calculated as the difference between the mass of the specimen M_s measured at the conclusion of the test and the mass at the time of final setting:

$$\Delta M = M_s(t_e) - M_s(t_{fs}) \quad (3)$$



NOTE—Note pen marks on the ends of the tubes to ensure proper positioning of specimens in the dilatometer bench during length measurements.
FIG. 8 Corrugated Plastic Sheets for Supporting the Specimens During the Test



NOTE—Notice the mark with permanent ink at one end of the specimen showing the upside and measuring gauge position during measurements.
FIG. 9 Placement of Specimen in the Dilatometer Bench for Length Measurement

where:

- t_e = time of last mass measurement, min,
- $M_s(t_e)$ = mass when last mass measurement is made (at the conclusion of the test), g, and
- $M_s(t_{fs})$ = mass at time of final setting when first mass measurement is made, g.

It is assumed that all the mass change of the specimen is due to exchange of moisture between the cementitious system and the external environment. The exchange of moisture results in an error in the autogenous strain measurement for cement pastes of about 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ per gram of mass change and for

mortars of about 80 $\mu\text{m}/\text{m}$ per gram of mass change (7). If the calculated error in the autogenous measurement on this basis exceeds 5 % of the total autogenous strain, the test is considered invalid.

10. Report

10.1 Report the following for each mixture tested:

10.1.1 The mixture proportions in kg/m^3 of water, cement (and other cementitious materials), and aggregates; admixtures in L/m^3 ; and water-cementitious materials ratio (w/cm) to the nearest 0.01.

10.1.2 Measuring room temperature.

10.1.3 Time of first addition of the cementitious materials to water and duration of mixing if different from the mixing time in Practice C305.

10.1.4 Indicate if specimens were rotated before final setting and report the speed of rotation. Also indicate the test method used to determine the time of final setting.

10.1.5 For each length measurement: the time of measurement, gauge reading of each measured specimen at each measuring age, time elapsed from first addition of the cementitious materials to water during mixing, and the autogenous strain value calculated with Eq 1 and 2.

10.1.6 Mass of each specimen at final setting and at end of test. Change of mass (in g) calculated with Eq 3.

11. Precision and Bias

11.1 *Precision*—Preliminary information on repeatability of this test method was derived from single-operator testing in

two different laboratories. The standard deviation appears to be constant and is used as the measure of repeatability. For replicate specimens of paste with values of w/cm between 0.35 and 0.37, the pooled value of the single operator standard deviation was found to be 110 $\mu\text{m/m}$. For mortar specimens with values of w/cm between 0.30 and 0.43, the pooled value of the single operator standard deviation was found to be 28 $\mu\text{m/m}$ (see Note 11).

NOTE 11—A full analysis of precision, as derived from an interlaboratory program, is expected to be completed by 2013.

11.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias of this procedure, no statement on bias is made.

12. Keywords

12.1 autogenous strain; cement paste; length change; mortar

REFERENCES

- (1) Jensen, O.M., Hansen, P.F., Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective, Cem. Con. Res. 31 (12) (2001) 1859-1865.
- (2) Jensen, O.M., Hansen, P.F., A Dilatometer for Measuring Autogenous Deformation in Hardening Portland Cement Paste, Mater. Struct. 28 (181) (1995) 406-409.
- (3) Lura, P., Jensen, O.M., Measuring Techniques for Autogenous Strain of Cement Paste, Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2925 (2005) (Skokie, IL), 26 pp.
- (4) Lura, P., Jensen, O.M., Measuring Techniques for Autogenous Strain of Cement Paste, Mater. Struct. 40 (4) (2007) 431-440.
- (5) Sant, G., Lura, P., Weiss, W.J., Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Interpretation and Reconciliation of Testing Protocols and Results, Transportation Research Record 1979 (2006) 21-29.
- (6) Jensen, O.M., Dilatometer - Calibration and Testing, PhD Thesis, Building Materials Laboratory, The Technical University of Denmark, Technical report 261/92, 1992
- (7) Verbeck, G.J. and Helmuth, R.H., Structure and Physical Properties of Cement Paste, Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, 1968 (Tokyo), Part III, pp. 1-32.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).