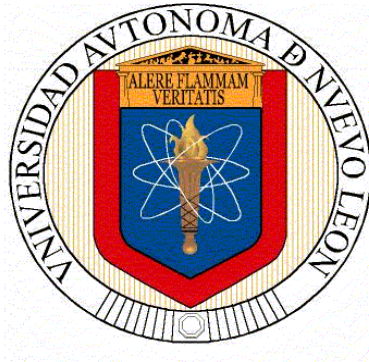


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“FIBRA DE AGAVE LECHUGUILLA COMO AGENTE DE CURADO INTERNO Y
ADITIVO REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN PARA DISMINUIR LA
CONTRACCIÓN AUTÓGENA EN CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO”**

Por

JORGE LUIS HERRERA DE CASAS

Como requisito parcial para obtener el grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

NOVIEMBRE 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Fibra de Agave Lechuguilla como Agente de Curado Interno y Aditivo Reductor de la Contracción para Disminuir la Contracción Autógena en Concreto de Alto Comportamiento

Por

Jorge Luis Herrera de Casas

Director de tesis:

Dr. Alejandro Duran Herrera
Universidad Autónoma de Nuevo León

Co-director de tesis:

Dr. Ismael Flores Vivian
Universidad Autónoma de Nuevo León

Como requisito parcial para obtener el grado de
Maestría en Ciencias con orientación en Materiales
de Construcción.

Noviembre 2018



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil, UANL
Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la tesis con título "Fibra de Agave Lechuguilla como Agente de Curado Interno y Aditivo Reductor de la Contracción para Disminuir la Contracción Autógena en Concreto de Alto Comportamiento", que presenta el ING. JORGE LUIS HERRERA DE CASAS, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

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

Atentamente,
"Alere Flammam Veritatis"
Cd. Universitaria, 12 de octubre de 2018

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
Asesor





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Fibra de Agave Lechuguilla como Agente de Curado Interno y Aditivo Reductor de la Contracción para Disminuir la Contracción Autógena en Concreto de Alto Comportamiento"**, que presenta el **ING. JORGE LUIS HERRERA DE CASAS**, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

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

Atentamente
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 12 de octubre de 2018.

Ismael Flores Vivian
Dr. Ismael Flores Vivian

Coordinador del Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción
Evaluador



"Educación de clase mundial,
un compromiso social"

Código: FOR-SEP-01; Revisión: 01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA I
Programa de Ingeniería Civil
Laboratorio de Resistencia de Materiales y Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

P R E S E N T E:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **“Fibra de Agave Lechuguilla como Agente de Curado Interno y Aditivo Reductor de la Contracción para Disminuir la Contracción Autógena en Concreto de Alto Comportamiento”**, que presenta el **ING. JORGE LUIS HERRERA DE CASAS**, como requisito parcial para obtener el grado de **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictaminó que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el martes 4 de diciembre de 2018.

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

Atentamente

Dr. Jose Antonio Rodríguez Rodríguez
Encargado del Laboratorio y Docente Investigador.

c.c.p. Archivo.

Av. Ramón López Velarde No. 801, C.P. 98060 Zacatecas, Zac. Tel. 01 (492)92-5-66-90, Ext. 4157.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido culminar una etapa tan importante en mi vida.

A mis padres Rodrigo Herrera González y Dolores Armida De Casas Caldera, por siempre apoyarme y motivarme a seguir creciendo a través de sus consejos y enseñanzas. Gracias por confiar en mí y enseñarme a nunca rendirme sin importar la dificultad de los obstáculos. A mis hermanos Víctor, Daniel, Jesús y Sandra por su apoyo incondicional, saben que siempre podrán contar conmigo.

A mis asesores, Dr. Alejandro Durán Herrera y Dr. Ismael Flores Vivian por sus enseñanzas y valioso tiempo brindado para que este proyecto se pudiera realizar. Sus conocimientos y consejos fueron piezas claves en la realización de esta investigación.

Al Ing. Rogelio Dávila Pompermayer por su tiempo, enseñanzas y valiosos consejos que me permitieron formarme y tener un mejor criterio para realizar el proyecto.

Al Dr. Javier Rodrigo González López por brindar su apoyo y asesoría en esta investigación.

Al Dr. José Antonio Rodríguez por brindar el apoyo y la orientación necesaria para poder ingresar al programa académico.

A mi novia Adriana Guadalupe González Capetillo por siempre confiar en mi y brindarme su apoyo incondicional. Gracias por alentarme para conseguir mis objetivos.

A la familia González Capetillo por su apoyo incondicional y sabios consejos, gracias por ser una parte importante en la culminación de esta etapa.

A mis amigos y compañeros de generación: José Abelardo Valdez, Gregorio Castruita, Guadalupe Martínez, y Aldrhyn Esquivel por ser parte importante de la formación académica y por brindar su apoyo durante la etapa experimental. De igual manera a Ismael Hernández Narváez por brindar su amistad y apoyo incondicional.

A Luciano Rodríguez Vázquez, José Manuel Verduzco Juárez, Regina Baptista Ramírez y Alexis Eduardo Citalán López, por su apoyo incansable en la etapa experimental de la investigación durante su estancia en el Verano de Investigación Científica.

Al cuerpo académico y administrativo del Instituto de Ingeniería Civil, así como al personal del departamento de Tecnología del Concreto por las innumerables ocasiones que me apoyaron con su ayuda y cooperación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A Cementos Moctezuma por su generoso donativo de cemento para esta investigación.

Al Ing. Filiberto Marín, asesor técnico de la marca Euco, por el donativo de los aditivos superfluidificante y reductor de la contracción.

A toda aquella persona que directa o indirectamente contribuyó en el desarrollo del proyecto, muchas gracias a todos.

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional, por siempre creer en mí y motivarme a perseguir mis sueños, gracias por darme la vida y sacrificarse día con día para sacar adelante a la familia, a ustedes, muchas gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1 CONCRETO.....	5
3.2 CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO.....	6
3.3 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	13
3.4 CONTRACCIONES EN EL CONCRETO.....	16
3.4.1 Efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido.....	16
3.4.2 Contracción química.....	17
3.4.3 Contracción autógena.....	19
3.4.4 Contracción por secado.....	22
3.4.5 Contracción plástica.....	24
3.4.6 Contracción térmica.....	25
3.4.7 Contracción por carbonatación.....	27
3.5 CURADO DEL CONCRETO.....	28
3.5.1 Significado e influencia dentro del concreto.....	28
3.5.2 Tipos de Curado.....	29
3.5.3 Curado interno.....	30
3.6 ADITIVOS.....	33
3.6.1 Definición.....	33
3.6.2 Aditivo reductor de la contracción (SRA).....	34
3.7 FIBRAS.....	35
3.7.1 Generalidades.....	35
3.7.2 Fibras Naturales.....	37
3.7.2.1 Propiedades.....	37
3.7.2.2 Composición.....	38
3.7.2.3 Materiales cementantes reforzados con fibras naturales.....	39
3.7.2.4 Durabilidad de elementos de concreto reforzados con fibras naturales.....	41
3.7.3 Fibra de Agave Lechuguilla.....	43
3.7.3.1 Descripción y Ubicación.....	43
3.7.3.2 Obtención de la fibra.....	44
3.7.3.3 Aprovechamiento.....	45
CAPÍTULO 4. ANTECEDENTES.....	47
4.1 CURADO INTERNO EN EL CONCRETO.....	47
4.2 FIBRAS NATURALES COMO AGENTES DE CURADO INTERNO.....	49
4.3 ADITIVO REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN (SRA) EN CAC.....	51
CAPÍTULO 5. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	53
5.1 JUSTIFICACIÓN.....	53
5.2 HIPÓTESIS.....	53
5.3 OBJETIVOS.....	54
5.3.1 Objetivo General.....	54
5.3.2 Objetivos Específicos.....	54

CAPÍTULO 6. MATERIALES	56
6.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES.....	56
6.1.1 Cemento portland	56
6.1.2 Agregados	56
6.1.2.1 Agregado grueso	56
6.1.2.2 Agregado fino.....	56
6.1.3 Aditivo superfluidificante.....	58
6.1.4 Aditivo reductor de la contracción (SRA)	58
6.1.5 Fibra de Agave Lechuguilla Torrey	59
CAPÍTULO 7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	60
7.1 MATRIZ DE EXPERIMENTOS	60
7.2 PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DE REFERENCIA	61
7.3 MÉTODOS DE PRUEBA	65
7.3.1 Caracterización de los materiales	65
7.3.1.1 Cementante	65
7.3.1.1.1 Densidad	65
7.3.1.1.2 Composición química.....	65
7.3.1.2 Agregados.....	66
7.3.1.2.1 Caracterización de los agregados	66
7.3.1.2.2 Análisis granulométrico	66
7.3.1.2.3 Contenido de humedad.....	66
7.3.1.3 Fibra.....	67
7.3.1.3.1 Densidad	67
7.3.1.3.2 Absorción	68
7.3.1.4 Aditivos	68
7.3.1.4.1 Densidad	68
7.3.1.4.2 Contenido de solidos.....	68
7.3.2 Preparación de la fibra	69
7.3.2.1 Procedimiento de corte	69
7.3.2.2 Saturación y lavado de la fibra.....	69
7.3.2.2.1 Saturación	69
7.3.2.2.2 Lavado.....	70
7.3.3 Mezclado del CAC.....	71
7.3.4 Pruebas en estado fresco	72
7.3.4.1 Extensibilidad, T ₅₀ e Índice de estabilidad visual.....	72
7.3.4.2 Anillo J	74
7.3.4.3 Columna de segregación.....	74
7.3.4.4 Contenido de aire atrapado	75
7.3.4.5 Peso unitario	75
7.3.4.6 Temperatura	75
7.3.4.7 Tiempos de fraguado.....	76
7.3.5 Pruebas en estado endurecido	77
7.3.5.1 Resistencia a la compresión.....	77
7.3.5.2 Módulo de elasticidad estático.....	77
7.3.6 Contracciones.....	78
7.3.6.1 Contracción por secado.....	78
7.3.6.2 Contracción autógena.....	79

7.3.7	Indicadores de durabilidad	79
7.3.7.1	Resistividad eléctrica superficial.....	79
7.3.7.2	Migración de iones cloruro.....	81
CAPÍTULO 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		83
8.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	83
8.1.1	Cementante	83
8.1.1.1	Densidad.....	83
8.1.1.2	Composición química	83
8.1.2	Agregados	83
8.1.2.1	Propiedades físicas	83
8.1.2.2	Granulometría	84
8.1.3	Aditivos	87
8.1.3.1	Densidad y contenido de sólidos	87
8.1.4	Fibra	87
8.1.4.1	Densidad y absorción	87
8.1.4.2	Morfología de la fibra	88
8.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	90
8.2.1	Clasificación del CAC de referencia.....	90
8.2.2	Pruebas en estado fresco	91
8.2.2.1	Caracterización de las mezclas de CAC.....	91
8.2.2.2	Tiempos de fraguado.....	98
8.2.3	Pruebas en estado endurecido	101
8.2.3.1	Resistencia a la compresión.....	101
8.2.3.2	Módulo de elasticidad estático.....	106
8.2.4	Contracciones en el CAC	108
8.2.4.1	Contracción por secado.....	108
8.2.4.2	Contracción autógena.....	113
8.2.5	Indicadores de durabilidad	116
8.2.5.1	Resistividad eléctrica	116
8.2.5.2	Difusión del ion cloruro	120
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		123
9.1	CONCLUSIONES	123
9.1.1	Propiedades en estado fresco.....	123
9.1.2	Pruebas en estado endurecido	124
9.1.3	Contracciones en el CAC	124
9.1.4	Indicadores de durabilidad	125
9.1.5	Difusión del ion cloruro.....	126
9.2	RECOMENDACIONES	127
TRABAJO FUTURO		128
BIBLIOGRAFÍA		129
ANEXOS		143
A.1	PRUEBAS EN ESTADO FRESCO.....	143
A.2	PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO	158
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO		166

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CRITERIOS Y LIMITES HABITUALES EN UN CAU CON TMA DE 20 MM.....	10
TABLA 2. MATERIALES PARA CURADO INTERNO EN EL CONCRETO [52]	32
TABLA 3. COMPOSICIÓN DE FIBRAS NATURALES [65]	39
TABLA 4. PROPIEDADES DE FIBRAS NATURALES.....	40
TABLA 5. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE CAC.....	60
TABLA 6. PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DE REFERENCIA	61
TABLA 7. SERIES EVALUADAS EN LA EXPERIMENTACIÓN	64
TABLA 8. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO PARA LA FABRICACIÓN DEL CAC.....	71
TABLA 9. ÍNDICE DE ESTABILIDAD VISUAL [134][135]	73
TABLA 10. EVALUACIÓN DEL BLOQUEO [136].....	74
TABLA 11. DIFUSIÓN DEL ION CLORURO [148].....	80
TABLA 12. DENSIDAD DEL CEMENTANTE.....	83
TABLA 13. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND.....	83
TABLA 14. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS	84
TABLA 15. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	85
TABLA 16. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO	86
TABLA 17. PROPIEDADES DE LOS ADITIVOS	87
TABLA 18. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LA FIBRA DE AGAVE LECHUGUILLA	87
TABLA 19. REPETIBILIDAD DE LA MEZCLA DE REFERENCIA	90
TABLA 20. CLASIFICACIÓN DEL CAC DE REFERENCIA.....	91
TABLA 21. PRUEBAS EN ESTADO FRESCO PRIMERA PARTE.	93
TABLA 22. PRUEBAS EN ESTADO FRESCO SEGUNDA PARTE	95
TABLA 23. TIEMPOS DE FRAGUADO DE TODAS LAS SERIES.....	100
TABLA 24. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	105
TABLA 25. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO	107
TABLA 26 CONTRACCIÓN POR SECADO	112
TABLA 27 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	119
TABLA 28. DIFUSIÓN DEL ION CLORURO EN TODAS LAS SERIES	122

Lista de figuras

FIG. 1. ELEMENTO PREFABRICADO CON CAU [13]	8
FIG. 2. ELEMENTO CON ACABADO DEFINIDO ELABORADO CON CAU [13].....	9
FIG. 3. PUENTE CONFEDERACIÓN EN CANADÁ [14]	12
FIG. 4. ANÁLISIS DEL GRADO DE HIDRATACIÓN (A) DE UNA PASTA DE CEMENTO PORTLAND EXPUESTA A UN SISTEMA CERRADO SEGÚN POWERS ET AL [18]	14
FIG. 5. ANÁLISIS DEL GRADO DE HIDRATACIÓN (A) DE UNA PASTA DE CEMENTO PORTLAND EXPUESTA A UN SISTEMA ABIERTO SEGÚN POWERS ET AL [18]	15
FIG. 6. ETAPAS DE RIGIDIZACIÓN DEL CONCRETO [21].....	16
FIG. 7. ESQUEMA DE CONTRACCIONES QUÍMICA Y AUTÓGENA EN UNA MEZCLA CEMENTANTE [28].....	19
FIG. 8. AGRIETAMIENTO PROVOCADO DEBIDO A CONTRACCIÓN POR SECADO [36]	23
FIG. 9. AGRIETAMIENTO POR CONTRACCIÓN TÉRMICA EN PAVIMENTO DE CONCRETO [43]...26	
FIG. 10. EFECTO DEL CURADO EN EL CONCRETO [5]	28
FIG. 11. DIFERENCIAS ENTRE EL CURADO INTERNO Y CURADO EXTERNO [48]	30
FIG. 12. FIBRAS UTILIZADAS EN EL CONCRETO [5]	35
FIG. 13. ENERGÍA NECESARIA PARA PRODUCIR ALGUNAS FIBRAS NATURALES (MJ/T) [65] ..38	
FIG. 14. AGAVE LECHUGUILLA DEL SEMIDESIERTO DE ZACATECAS [88]	43
FIG. 15. OBTENCIÓN DE LA FIBRA LECHUGUILLA: A) TALLADO MANUAL, B) MEDIOS MECÁNICOS [90].....	44
FIG. 16. MUESTRA DE AGREGADO GRUESO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN.....	57
FIG. 17. MUESTRA DE AGREGADO FINO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN	57
FIG. 18. ADITIVO PLASTOL PRECAST PLUS.	58
FIG. 19. FIBRA DE AGAVE LECHUGUILLA ADQUIRIDA DIRECTAMENTE DE LA IXTLERA	59
FIG. 20. ANALIZADOR DE ED-XRF PANALYTICAL EPSILON 3-XL	65
FIG. 21. DETERMINACIÓN DEL PVSS DE LA ARENA	66
FIG. 22. CORTE DE LA FIBRA.....	69
FIG. 23 LAVADO DE LA FIBRA: A) FIBRA SIN LAVAR, B) FIBRA LAVADA.....	70
FIG. 24. EXTENSIBILIDAD.....	72
FIG. 25. COLUMNA DE SEGREGACIÓN.....	74
FIG. 26. CONTENIDO DE AIRE ATRAPADO POR MEDIO DEL MÉTODO DE PRESIÓN.	75
FIG. 27. TIEMPOS DE FRAGUADO	76
FIG. 28. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.	77

FIG. 29. CONTRACCIÓN POR SECADO.....	78
FIG. 30. CONTRACCIÓN AUTÓGENA.....	79
FIG. 31. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SUPERFICIAL DE ACUERDO CON LOS 4 PUNTOS DE WEBBER [148].....	80
FIG. 32. CONFIGURACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE LOS IONES CLORURO [149].....	82
FIG. 33. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO.....	85
FIG. 34. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO	86
FIG. 35 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA FIBRA.....	88
FIG. 36 ESTRUCTURA EXTERNA DE LA FIBRA	89
FIG. 37 FIBRA EN CONTACTO CON AGUA: A) FIBRA SIN LAVAR, B) FIBRA LAVADA.....	97
FIG. 38 FIBRA EN CONTACTO CON EL AGUA: A) FIBRA SIN LAVAR, B) FIBRA LAVADA	97
FIG. 39 TIEMPOS DE FRAGUADO	99
FIG. 40 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS SERIES A, B Y C	102
FIG. 41 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS SERIES A Y D.....	103
FIG. 42 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA SERIE A Y E.....	104
FIG. 43 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.....	106
FIG. 44 CONTRACCIÓN POR SECADO DE LAS SERIES A Y C.....	109
FIG. 45 CONTRACCIONES POR SECADO DE LAS SERIES A Y D	110
FIG. 46 CONTRACCIONES POR SECADO DE LAS SERIES A Y E	111
FIG. 47 CONTRACCIÓN AUTÓGENA DE LAS SERIES A Y C.....	113
FIG. 48 CONTRACCIÓN AUTÓGENA DE LAS MEZCLAS A Y D.....	114
FIG. 49 CONTRACCIÓN AUTÓGENA DE LAS MEZCLAS A Y	115
FIG. 50 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS SERIES A Y C	116
FIG. 51 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS SERIES A Y D	117
FIG. 52 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MEZCLAS A Y E.	118
FIG. 53 DIFUSIÓN DEL ION CLORURO.....	120

Capítulo 1. Introducción

El concreto de alto comportamiento (CAC) ha permitido el desarrollo de estructuras con una mayor durabilidad y calidad que la lograda mediante la implementación de concreto convencional. Este concreto ha tomado gran popularidad dentro de la industria de los prefabricados debido a su gran versatilidad ya que permite brindar soluciones eficientes. Dentro de la clasificación de CAC existe el denominado concreto autocompactable. Este concreto cuenta con una alta viscosidad y fluidez; además, es resistente a la segregación y capaz de fluir por su propio peso, lo que le permite elaborar especímenes con una gran variedad de formas y texturas logrando así estructuras de excelente calidad. Sin embargo, su presencia en la industria de los premezclados ha tenido un avance lento debido a la existencia de varios factores que pueden afectar las características principales que lo destacan entre los concretos convencionales.

Usualmente el concreto autocompactable se elabora utilizando cantidades altas de cementante, lo que en conjunto con otros factores como la cantidad de agua puede generar contracciones dentro de la matriz que se traducen en agrietamientos y afectan la durabilidad de los elementos. Existen tecnologías que ayudan a disminuir las contracciones dentro del concreto, sin embargo, suelen tener un costo elevado. Tal es el caso del aditivo reductor de la contracción (SRA, por sus siglas en inglés); este aditivo permite reducir las contracciones que se pueden presentar durante los primeros días después del mezclado (contracción autógena) y durante el secado (contracción por secado).

Otra opción es la implementación de agentes de curado interno durante la elaboración; estos permiten proporcionar una cantidad extra de agua que no afecta la relación agua/cementante y reduce la contracción autógena. El agua proporcionada evita la generación de esfuerzos internos que se pueden presentar dentro de las microporosidades de la matriz cementante. Al reducir las contracciones y por ende el agrietamiento, la durabilidad de las estructuras aumenta. Diferentes agentes de curado interno han sido utilizados, no obstante, en los últimos años ha aumentado el interés de implementar materiales sostenibles dentro de la industria de la construcción. Buscando proporcionar un mayor entendimiento a la industria de la construcción y manteniendo un enfoque sustentable y de bajo costo, el presente trabajo evaluó la efectividad de la combinación de fibra de Agave lechuguilla como agente de curado interno y SRA para disminuir la contracción autógena en CAC.

Las variables de estudio fueron delimitadas a la dosificación de fibra de agave lechuguilla respecto al volumen de concreto, dosificación de SRA respecto al contenido de cementante y la combinación de ambas tecnologías (considerando constante 1% de fibra de agave lechuguilla respecto al volumen de concreto y variando la cantidad de SRA respecto al contenido de cementante). Las mezclas fueron evaluadas mediante pruebas en estado fresco (extensibilidad, anillo J, columna de segregación, contenido de aire, peso unitario, temperatura y tiempos de fraguado), pruebas en estado endurecido (resistencia a la compresión y módulo de elasticidad), indicadores de durabilidad (resistividad eléctrica y difusión del ion cloruro) y pruebas para determinar las contracciones en la matriz cementante (contracción por secado y contracción autógena).

Capítulo 2. Planteamiento del problema

En los últimos años el CAC ha sido de gran importancia en el desarrollo de construcciones más durables, ya que usualmente estos concretos son diseñados con relaciones agua/cemento bajas ($a/c < 0.42$), utilizando aditivos superfluidificantes y altos contenidos de finos como parámetros importantes. Los elementos construidos con CAC son altamente densos y presentan problemas de estabilidad volumétrica; estos problemas son causados por contracciones que se pueden presentar en estado fresco y en estado endurecido. Las contracciones en el concreto causan agrietamiento, que comienza a desarrollarse a edades tempranas cuando el concreto aún no ha desarrollado capacidad para resistir esfuerzos. Las grietas permiten que los agentes externos (agua, cloruros, sulfatos, dióxido de carbono, etc.) ingresen en el concreto disminuyendo la vida útil de las estructuras. La formación de grietas representa un aumento en los costos de mantenimiento. Además, la funcionalidad y estética de las estructuras también se ven afectadas.

En las estructuras que involucran CAC, el agua de curado externa no es eficiente porque muy rápidamente deja de penetrar en el concreto [1]. La humedad que ingresa externamente solo puede penetrar aproximadamente 50 mm (2 in) dentro del concreto. Un curado adecuado de las estructuras de concreto es importante para asegurar que cumplan los requisitos provistos de rendimiento y durabilidad [2]. Como el agua necesaria para un buen curado no puede ingresar externamente debido a la densidad de los CAC, es importante brindar una alternativa para solucionar la reducción en la humedad relativa interna a edades tempranas.

Usualmente la reducción en la humedad dentro del concreto se da a través de la contracción por secado y la contracción autógena [3]. La principal causa de contracciones en el CAC es la contracción autógena. Sin embargo, el concreto también es propenso a sufrir contracciones plásticas. Una opción para reducir la contracción autógena en el CAC es a través de una técnica denominada curado interno, esta implica la incorporación de un agente para proveer humedad adicional y evitar la pérdida de humedad relativa interna en la pasta cementante a edades tempranas [1]. Las principales propiedades que se consideran en un material para ser utilizado como agente de curado interno son la capacidad de absorción y desorción; sin embargo, su influencia en otras propiedades tales como la resistencia a la compresión, la trabajabilidad de la mezcla, la durabilidad, entre otras debe ser estudiada.

Diferentes agentes de curado interno se han utilizado a través de los años, los más destacados son el agregado ligero, los polímeros súper absorbentes y en los más recientes años se han investigado las fibras naturales. La utilización de materiales renovables y subproductos industriales es una tendencia que está tomando fuerza en la industria de la construcción, esto con el fin de utilizar materiales sostenibles como las fibras naturales que son de fácil disponibilidad y tienen bajo costo. Otra opción es la incorporación en el mezclado de aditivo reductor de la contracción (SRA, por sus siglas en inglés), el cual disminuye la tensión superficial de la solución de poro reduciendo los esfuerzos en las microporosidades y por consecuencia las contracciones autógena y por secado. Dentro de esta investigación se plantea evaluar la combinación de SRA y la fibra de agave de lechuguilla como agente de curado interno para disminuir la contracción autógena, mejorando la estabilidad volumétrica de los CAC, con un enfoque de bajo costo.

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1 Concreto

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, gracias a su versatilidad para moldearse en una gran variedad de colores, formas y texturas dependiendo del uso al que este destinado, sin embargo, el concreto de cemento portland ha sido utilizado desde 1850. La materia prima necesaria para elaborar concreto es de fácil obtención tiene un precio por lo general económico, principalmente los agregados y el agua. En la zona norte de México los agregados principalmente utilizados para la elaboración del concreto son del tipo calizo (obtenidos de la trituración de roca obtenida de cerros) y silíceos. Sin embargo, en algunas partes del país también se suele utilizar agregado de rio dependiendo de la disponibilidad de la materia prima y las características que se quieran desarrollar en el concreto. El concreto básicamente está conformado por cemento, agua, agregado fino, agregado grueso y aditivos.

Algunas de las definiciones del denominado concreto se mencionan a continuación:

- ◆ ACI 318S-08 “Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y, con o sin aditivos” [4].
- ◆ PCA: “El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón) creando una masa similar a la roca” [5].

3.2 Concreto de alto comportamiento

La demanda de construcciones más resistentes y durables tuvo como consecuencia el desarrollo del CAC que es conocido por su alta trabajabilidad, alta densidad, alta resistencia, baja permeabilidad, alta resistencia a los ataques de agentes externos y una gran durabilidad [6]. En 1986 en la Universidad de Tokio (Japón) el Dr. Hajime Okamura introdujo el concepto de concreto autocompactable, entre sus principales características se encontraba el aumento en la durabilidad y la consolidación por peso propio sin la necesidad de vibrado. En 1988 se creó el primer prototipo que incluía una mezcla de materiales convencionales, una mayor cantidad de cementantes, mayor cantidad de aditivos superfluidificantes y un tamaño máximo de agregado de 19 mm; fue denominado concreto de alto comportamiento (CAC).

Pierre C. A. (1989) definió el CAC como un concreto de alta durabilidad, resaltando que no solo es de alta resistencia, ya que debido a la baja relación a/cm utilizada, la durabilidad se ve beneficiada. Un CAC es aquel que cumple requerimientos de uniformidad y especificaciones especiales de desempeño que no siempre pueden alcanzarse utilizando prácticas de mezclado, materiales, colocación y curado tradicional [7]. Frecuentemente ha sido utilizado en estructuras de gran importancia y esta tendencia va en aumento. Lo que caracteriza el CAC es contar con características especiales que llevan a mejorar el desempeño del concreto dentro de un ambiente determinado donde será colocado. La selección de la materia prima para la elaboración de los CAC es un punto clave debido a que una mala selección de materiales puede afectar las características de la mezcla.

Algunos de los parámetros más relevantes para diseñar un CAC son: tipo de cementante (cemento portland y/o puzolanas), relación a/cm , dosificación de aditivos (superfluidificantes, inhibidores de la corrosión, reductores de la retracción. etc.), compatibilidad cemento-aditivo, selección de agregado. Usualmente la matriz cementante resultante del diseño de este tipo de concreto es muy densa, lo que permite que los elementos elaborados con la mezcla tengan una durabilidad mayor que los elaborados con concreto convencional (relación $a/c > 0.42$).

La demanda de construcciones más resistentes y durables tuvo como consecuencia el desarrollo del CAC que es conocido por su alta trabajabilidad, alta densidad, alta resistencia, baja permeabilidad, alta resistencia a los ataques de agentes externos y una gran durabilidad [8]. Bajas relaciones agua/cementante (a/cm) con grandes cantidades de polvos son necesarias para lograr una baja permeabilidad y difusión en los CAC [9]. Sin embargo, este tipo de concreto presenta problemas de inestabilidad volumétrica, causados por secado, reacciones químicas y cambios de temperatura [8].

Como los CAC se elaboran con relación a/cm relativamente baja, son propensos a la auto-desecación, que resulta en contracción autógena, la contribución de la contracción autógena a la contracción total del CAC es mayor que la contribución de la contracción por secado [9] [10]. Los CAC cuentan con relaciones a/c o a/mc menores a 0.42, además, utilizan aditivos para tener una trabajabilidad adecuada y lograr concretos durables con periodos de vida útil de alrededor de 100 años [11][12]. Sin embargo, se debe prestar especial atención durante los primeros días después del colado, curando de manera adecuada y minimizando los cambios volumétricos para poder lograr el mayor desempeño.

Dentro de los CAC existen los denominados concretos autocompactables (CAU) que se caracterizan por la capacidad de fluir en estado fresco por su propio peso. Otra característica de este tipo de concretos es la resistencia a la segregación y la capacidad de colocación a través del armado de estructuras que demandan una gran cantidad de acero de refuerzo. Además, se pueden elaborar elementos con gran variedad de formas y texturas gracias a su alta fluidez y viscosidad. La elaboración de elementos prefabricados es la principal industria que utiliza este tipo de concreto (Fig. 1), pero en el sector del concreto premezclado no ha ganado tanta popularidad debido a la cantidad de variables que pueden intervenir en la calidad del concreto, ya sea durante su elaboración, transporte y/o colocación.



Fig. 1. Elemento prefabricado con CAU [13]

La construcción con CAU otorga ventajas que se pueden apreciar a simple vista en la Fig. 2, algunas de ellas son [13]:

- ◆ Mejor acabado y uniformidad.
- ◆ Facilidad de colocación
- ◆ Secciones estructurales esbeltas
- ◆ Reducción de la mano de obra.
- ◆ Incremento en la seguridad en el área de trabajo.



Fig. 2. Elemento con acabado definido elaborado con CAU [13]

En contraste, algunas de las desventajas que se pueden tener al utilizar este material son:

- ◆ Variabilidad en las propiedades debido a cambios durante el transporte
- ◆ Colocación y/o colado
- ◆ Mayor costo debido al uso de aditivos
- ◆ Retardo en tiempos de fraguado debido a la incorporación de aditivos
- ◆ Mayor control de calidad

El CAU suele especificarse en función de las propiedades en estado fresco y no en función de la resistencia a la compresión; esto debido a las cantidades elevadas de material cementante y/o puzolanas y a la baja relación a/c o a/cm que se utiliza en la producción que por lo general asegura que la resistencia a la compresión sea cubierta sin problemas. Para que un concreto sea considerado como CAU, este debe cumplir tres criterios principales; de paso, de llenado y de segregación [13].

La Tabla 1 nos muestra algunas de las diferentes pruebas que evalúan los criterios de segregación, capacidad de paso y capacidad de llenado en un CAU, según recomendaciones de EFNARC [13], además, se incluyen algunos límites establecidos para la elaboración de un CAC con TMA de 20 mm.

Tabla 1. Criterios y límites habituales en un CAU con TMA de 20 mm

Criterio	Prueba	Límites habituales	
		Mínimo	Máximo
Capacidad de llenado	Extensibilidad	650 mm	800 mm
	Extensibilidad T_{50}	2 segundos	5 segundos
	Embudo V	6 segundos	12 segundos
	Orimet	0 segundos	5 segundos
Capacidad de paso	Caja L	0.8 (h_2/h_1)	1.0 (h_2/h_1)
	Anillo J	0 mm	10 mm
	Caja U	0 (h_2/h_1) mm	30 (h_2/h_1) mm
	Caja de relleno	90 %	100%
Resistencia a la segregación	Ensayo GTM	0%	15%
	Embudo V a $T_{5 \text{ min}}$	0 segundos	5 segundos

Al colocar estos concretos se debe limitar la caída a alturas de 5 m y para la descarga de manera horizontal no se debe rebasar los 10 m para evitar problemas con los equipos y pérdidas en la consistencia del concreto. Gracias a las características de viscosidad de estos concretos se evitan esfuerzos internos en la masa de concreto cuando esta se deforma.

El CAU también puede ser clasificado según su flujo de revenimiento, que mide la fluidez de un concreto recién mezclado y sin confinamiento. Según la norma europea para especificación, producción y uso de concreto autocompactable proporcionada por la EFNARC [13]; el CAU puede entrar en las siguientes clasificaciones:

- ◆ SF1 (550 – 650 mm):
 - Estructuras de concreto sin acero de refuerzo o con una ligera cantidad, coladas desde la parte superior con un desplazamiento libre del punto de descarga del CAU (ej. losas de viviendas)
 - Colado a través de sistemas de inyección por bombas (ej. revestimiento de túneles)
 - Secciones pequeñas que evitan el flujo horizontal prolongado (ej. pilas y cimentaciones profundas)

- ◆ SF2 (660 – 750 mm):
 - Apropiado para el uso cotidiano (ej. muros y columnas)

- ◆ SF3 (760 – 850 mm):
 - Usualmente producido con TMA menores a 16 mm y se utiliza para aplicaciones verticales en estructuras muy congestionadas con acero de refuerzo, estructuras con formas complejas o para el llenado de cimbra desde la parte inferior. Los acabados son mejores que los concretos de la clasificación SF2, sin embargo, la segregación es más difícil de controlar.

En algunos casos especiales se pueden especificar valores de revenimiento superiores a 850 mm, pero se debe tener especial cuidado en la mezcla para evitar segregación, además, el tamaño máximo del agregado usualmente debe ser inferior a 12 mm [13]. La apariencia de un elemento construido con CAC es mejor que la lograda utilizando concreto convencional, usualmente el color es uniforme y las marcas que deja la cimbra en los elementos también se ven disminuidas. El puente Confederación en Canadá (Ilustración 3), es un claro ejemplo de los beneficios que se pueden lograr al utilizar CAC, el diseño contemplo una vida útil de 100 años. Para lograr la calidad deseada en los elementos de CAU es necesario cuidar parámetros importantes tales como: tipo de cemento, calidad del molde y agente desmoldante, composición de la mezcla y procedimiento de colocación, entre otros [13].

En los elementos construidos con CAC uno de los principales problemas que se presentan son las grietas provocadas por las contracciones a edades tempranas. Sin embargo, también existen otros factores que al interactuar con la mezcla pueden producir grietas y reducir la durabilidad de los elementos.



Fig. 3. Puente Confederación en Canadá [14]

3.3 Hidratación del cemento portland

El agua es un ingrediente indispensable en la elaboración del concreto, al entrar en contacto con el cemento portland inicia un conjunto de procesos físico-químicos y termodinámicos que permiten el desarrollo de la resistencia de la matriz cementante. Estos procesos usualmente son conocidos como “hidratación del cemento portland”. De igual manera se puede definir la hidratación que ha desarrollado cada partícula de cemento portland una vez que entro en contacto con el agua de reacción en la mezcla, es decir se puede establecer un “grado de hidratación” (α).

Existen modelos que describen como se distribuye el agua durante el proceso de hidratación, uno de ellos es el modelo de hidratación de Powers [15]. Este modelo establece que el agua de reacción se distribuye en varias partes diferentes conforme comienza a reaccionar con el cemento portland, dando paso a distintos tipos de agua clasificados según sea el tipo de enlace que se forma con los productos de hidratación o fuera de ellos.

Las categorías establecidas para los distintos tipos de agua pueden resumirse en [15]:

- ◆ Agua ligada en enlaces covalentes
- ◆ Agua ligada en enlaces de hidrogeno
- ◆ Agua ligada en hidróxidos
- ◆ Agua adsorbida (enlazada por fuerzas de Van Der Waals).
- ◆ Agua zeolítica (agua almacenada entre las capas de los cristales o en los intersticios de la estructura)
- ◆ Agua de cristalización (no se considera ligada debido a los principios constituyentes de las redes cristalinas).

Años más tarde, Jensen & Hansen [16,17] basándose en el modelo de Powers, simplificaron la clasificación en tres categorías:

- ◆ Agua químicamente ligada (b_w)
- ◆ Agua físicamente ligada (agua de gel, p_w)
- ◆ Agua capilar (agua disponible para hidratar el cemento localizada en los poros).

Dentro de los estudios realizados también se encontró que las cantidades de “ b_w ” y “ p_w ” en una pasta de cemento portland es de 0.23 y 0.19 gramos de agua por cada gramo de cemento (g/g); es decir, se necesitan 0.42 g/g para que el cemento se hidrate al 100% ($\alpha = 1$), por esta razón se establece que en las mezclas que cuentan con relación $a/c \geq 0.42$ pueden hidratarse por completo siempre y cuando estén en un sistema donde no hay intercambio de humedad con el exterior, también conocido como sistema cerrado (Fig. 4 y Fig. 5). Sin embargo, Jensen y Hansen establecieron que, si una fuente de agua externa está disponible durante el proceso de hidratación del cemento portland, es posible obtener una pasta de cemento sin poros cuando la relación a/c es igual o menor a 0.36 [18].

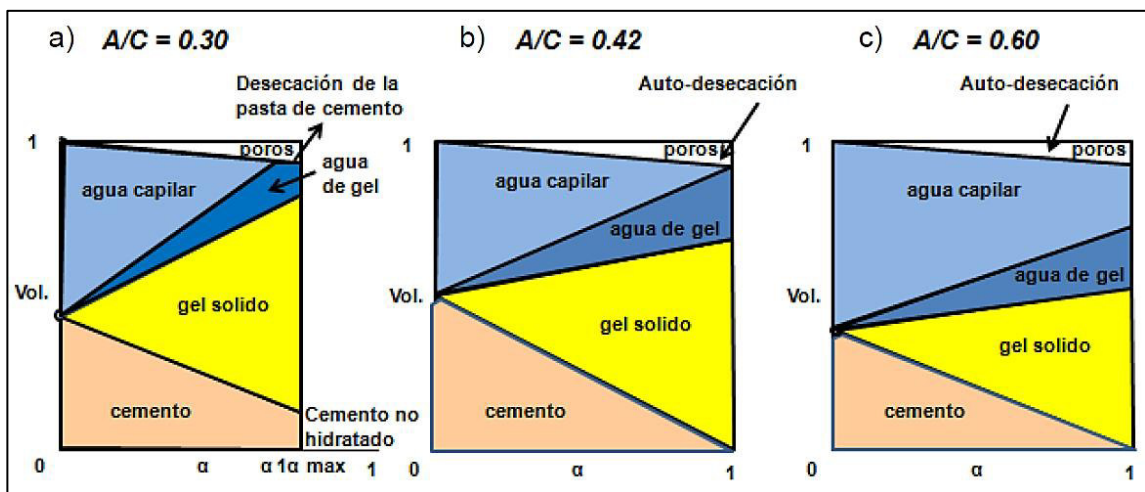


Fig. 4. Análisis del grado de hidratación (α) de una pasta de cemento portland expuesta a un sistema cerrado según Powers et al [18]

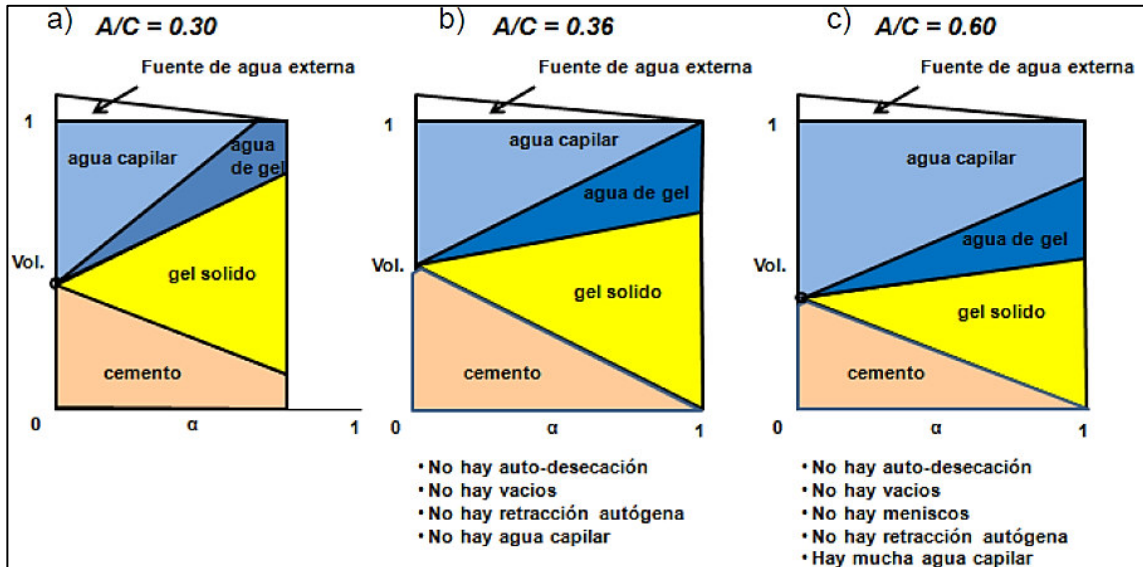


Fig. 5. Análisis del grado de hidratación (α) de una pasta de cemento portland expuesta a un sistema abierto según Powers et al [18]

En las pastas cementantes, un sistema que permite el intercambio de humedad con el exterior (sistema abierto) puede verse beneficiado con el agua de curado externa y/o interna según sea el caso. Mientras que un sistema cerrado está ausente de cualquier tipo de agua de curado (interno o externo) [19]. Debido a la baja cantidad de agua disponible en los CAC que utilizan relaciones $a/c < 0.42$, la pasta no puede lograr un grado de hidratación total ($\alpha = 1$), en consecuencia, se comienzan a formar meniscos dentro de la red de poros capilares que tienen como resultado la generación de esfuerzos en la matriz cementante.

El proceso causa contracciones en la pasta debido a que la resistencia a este tipo de esfuerzos (tensiones) es prácticamente nula porque no ha desarrollado la capacidad de resistir cualquier tipo de esfuerzos. Estos esfuerzos son responsables de la contracción volumétrica aparente, una vez finalizada la reacción de hidratación y debido a la baja cantidad de agua disponibles se comienza a presentar otro fenómeno denominado contracción autógena.

3.4 Contracciones en el concreto

3.4.1 Efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido

La estabilidad del volumen de concreto es el problema más grave en los elementos contruidos con este material, ya que se puede contraer y/o expandir debido a los cambios de temperatura y humedad en su entorno, además, puede sufrir deformaciones dependiendo del tipo de carga aplicado en los elementos. Las contracciones en cualquier tipo de concreto son un problema debido a que se traducen en agrietamiento [20]. Las grietas permiten que los agentes externos como las sales y los cloruros ingresen en el concreto, provocando reacciones químicas que debilitan el acero de refuerzo y tienen como consecuencia una disminución en la durabilidad. El concreto puede sufrir distintos tipos de contracciones en los primeros días después del colado cuando aún es débil para resistir esfuerzos o durante su vida de servicio cuando ya ha endurecido [21]. Cuando la materia prima del concreto es mezclada, comienza a pasar por distintas etapas conforme pasa el tiempo, pasando por el fraguado inicial y final, hasta rigidizarse (Fig. 6).

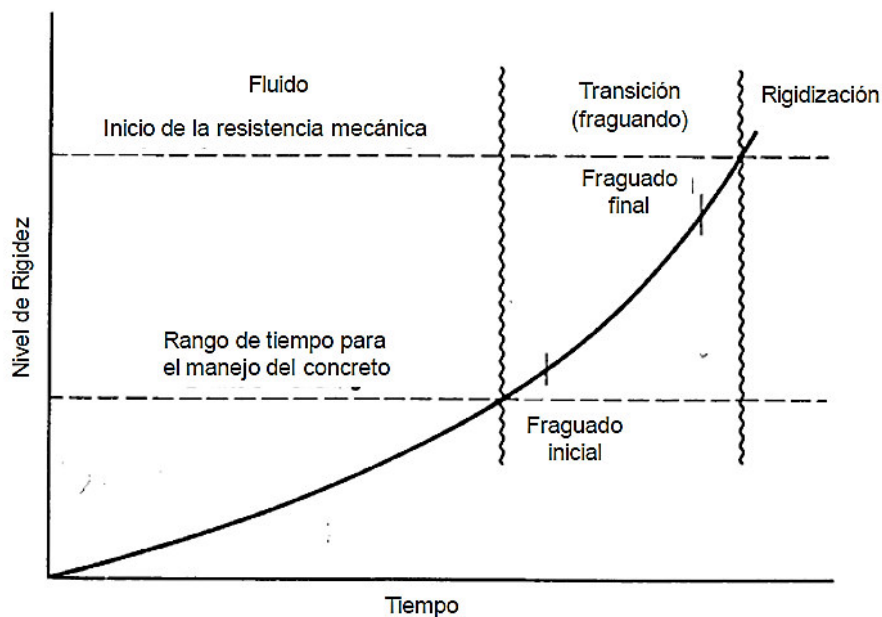


Fig. 6. Etapas de rigidización del concreto [21]

Generalmente las contracciones en el concreto son atribuidas a la pérdida de agua en la matriz cementante debido a la interacción con el medio ambiente que la rodea. Sin embargo, también se pueden presentar debido a las reacciones internas generadas por la interacción entre el agua y el material cementante durante el proceso de hidratación de la mezcla. Cuando estas se presentan en los primeros días después del colado pueden tener un impacto más negativo debido a que la resistencia de la mezcla a los esfuerzos de tensión es prácticamente nula y se dice que hasta el esfuerzo de tensión más pequeño durante esta etapa puede verse traducido en agrietamiento [21].

- ◆ Contracción química
- ◆ Contracción autógena
- ◆ Contracción por secado
- ◆ Contracción plástica
- ◆ Contracción térmica.
- ◆ Contracción por carbonatación.

3.4.2 Contracción química

La contracción química describe el fenómeno en el que el volumen de los productos hidratados por la reacción química al mezclar agua con el cemento es menor que el volumen total de cemento y agua sin hidratar [22] [23] [24]. Mientras mayor sea la retracción química mayor será la hidratación del cementante utilizado. Esta contracción es una forma de medir el proceso de hidratación en la mezcla, como está relacionada a dicho proceso no puede ser eliminada debido a que es un fenómeno natural. Le Chatelier (1904) concluyó que dependiendo de las condiciones de curado la contracción volumétrica absoluta producida debido a la hidratación del cemento, puede resultar en un incremento o disminución del volumen aparente.

La relación a/c no tiene algún efecto sobre esta contracción, pero si es un factor junto a la fineza del cemento que afecta la velocidad con la que se desarrolla la contracción química. La contracción química puede ser calculada mediante la ecuación 1 [25].

$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde: CS = Contracción Química (%).

V_c = Volumen de cemento hidratado

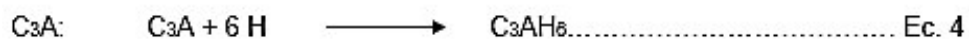
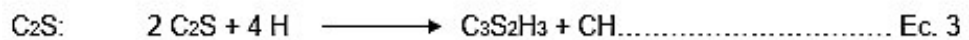
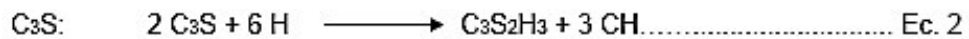
V_{ci} = Volumen del cemento antes del mezclado

V_{wi} = Volumen de agua antes del mezclado

V_w = Volumen de agua que ha reaccionado

V_{hy} = Volumen de productos hidratados

Cuando en las mezclas que utilizan cemento portland se añade agua, comienzan a presentarse una serie de reacciones químicas que permiten el desarrollo de la resistencia de la mezcla. Los compuestos potenciales del cemento portland que reaccionan al entrar en contacto con el agua son:



Una vez que el grado de hidratación en la pasta cementante que incluye cemento portland es igual a 1 ($\alpha = 1$), por lo regular la contracción química se cuantifica entre 6 a 7 ml por cada 100 gramos de cemento que han reaccionado. Menores cantidades de contracción química pueden ser atribuibles a valores bajos de C_3S , C_3A y álcalis presentes en el cemento [26].

3.4.3 Contracción autógena

La contracción que no incluye ningún cambio de volumen debido a la pérdida o ingreso de sustancias, variaciones en la temperatura, aplicaciones de fuerzas externas y restricciones puede ser considerada como contracción autógena [18]. Cuando los materiales cementantes se hidratan sin interferencia del exterior, se crean porosidades dentro de la microestructura de la pasta debido a que los productos de hidratación del cemento ocupan un volumen menor que el volumen original ocupado por los materiales de reacción [27]. En la Fig. 7 podemos observar un esquema que describe el fenómeno de la contracción autógena.

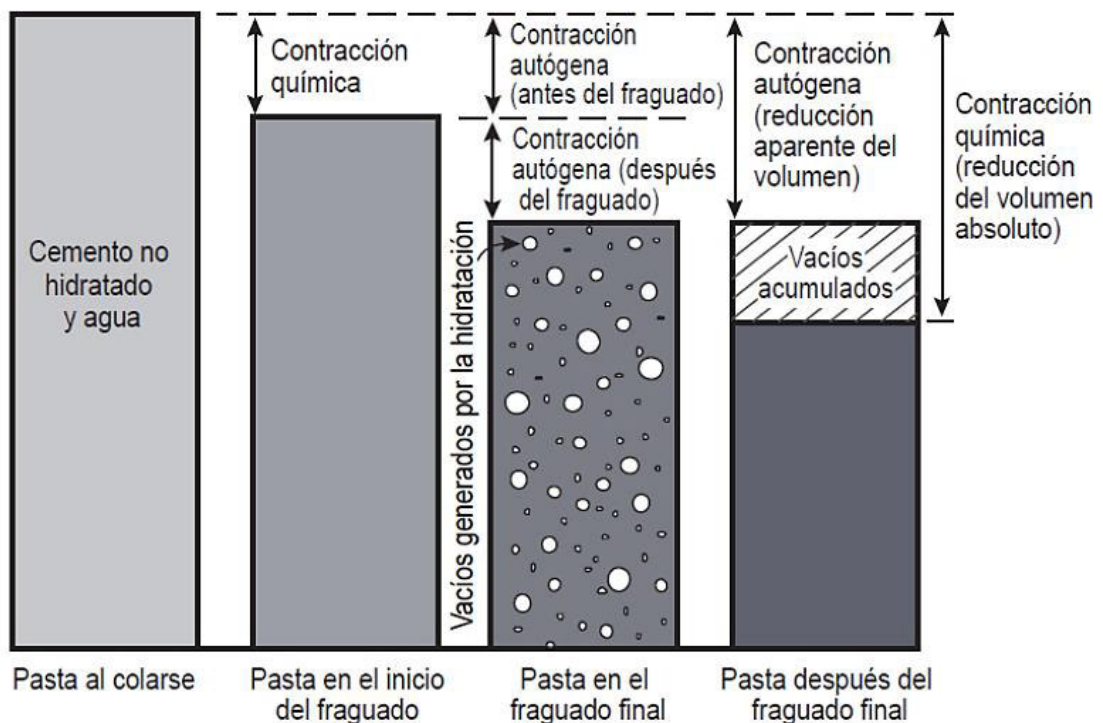


Fig. 7. Esquema de contracciones química y autógena en una mezcla cementante [28]

La contracción autógena puede ser reducida en presencia de agua de curado, sin embargo, cuando no está disponible el proceso de hidratación del cemento comienza a consumir el agua alojada en los poros.

Después del fraguado inicial se comienza a formar una microestructura de poros llenos de solución. Es en este momento que los productos de hidratación comienzan a consumir la solución disponible en los poros de la pasta. Como consecuencia, la tensión superficial generada en la solución provoca esfuerzos internos dentro del poro que se traducen en contracción, a este fenómeno se le conoce como autodesecación. Tal y como se describe en la ecuación 7, la presión de agua de poro está en función de la tensión superficial y es inversamente proporcional al radio del poro [29]. Los CAC cuentan con relaciones $a/c < 0.42$, como consecuencia la red de poros que se forma presenta poros más pequeños que en el concreto convencional ($a/c > 0.42$), por lo que el esfuerzo que se ejerce en estos es mayor [21].

$$\sigma = \frac{2\gamma \text{ sen } \theta}{r} \dots\dots\dots \text{Ec. 6}$$

Donde:

σ = Esfuerzo capilar

γ = Tensión superficial de la solución de los poros

θ = Ángulo de contacto

r = radio promedio de los poros

La combinación de esfuerzos generados en la microestructura de los poros se traduce en agrietamiento en la matriz cementante que no ha desarrollado la resistencia necesaria para soportarlos. Este micro-agrietamiento puede disminuir la durabilidad de las estructuras elaboradas con CAC ya que permite que los agentes externos causen deterioro en el acero de refuerzo disminuyendo la vida útil de la estructura.

Si se disminuyen los esfuerzos en la microestructura de los poros, se reducen las contracciones y por consecuencia el micro-agrietamiento aumentando la vida útil de las estructuras. Analizando la ecuación 6, se puede deducir que una manera de mitigar estos esfuerzos es disminuyendo la tensión superficial de la solución de poro y consecuentemente la presión en los poros [30] [31], esto se puede lograr mediante el uso de aditivos reductores de la contracción que se añaden a la mezcla durante el mezclado. Otra opción que se para evitar la formación del menisco que se genera conforme el agua de poro es consumida en el proceso de hidratación es a través de una técnica denominada curado interno, que consiste en la generación de poros de sacrificio llenos de humedad que será liberada durante el proceso de hidratación de la mezcla manteniendo el nivel de agua de poro en la microestructura y evitando las contracciones.

Para concretos convencionales los cambios volumétricos de la pasta cementante asociados a la contracción autógena representan menos del 10% de las variaciones volumétricas asociadas con la contracción por secado [32]. En contraste, debido a la baja relación a/c utilizada en la producción de CAC y en ausencia de agua de curado, la contracción autógena que se presenta en este tipo de concreto puede llegar a ser igual o mayor que la contracción por secado. Conforme se reduce la relación a/c la contracción autógena aumenta, pero la contracción por secado disminuye [33]. La parte más susceptible a sufrir agrietamiento en una mezcla de concreto es la pasta (mezcla de agua y cemento) y su contracción está en función de la relación a/c o a/cm , tiempo de fraguado, tipo y finura del cemento y cualquier elemento que tenga un efecto sobre la distribución de tamaño de los poros [34].

3.4.4 Contracción por secado

Esta contracción es provocada por la pérdida de humedad del concreto a través de su superficie debido a la interacción con el medio ambiente [35]. El ACI 214 define la contracción por secado como: “La deformación lineal dependiente del tiempo a temperatura constante medida sobre una probeta no cargada que se deja secar” [36]. El concreto endurecido suele aumentar su volumen ligeramente en presencia de humedad. Sin embargo, cuando pierde humedad suele contraerse y es mayor el grado de contracción que el de expansión. Bajo condiciones normales el concreto suele perder humedad debido a la interacción con el medio ambiente y debido al proceso de hidratación de la pasta cementante.

La humedad relativa, tipo y contenido de agregados, contenido de pasta, cantidad de agua y relación a/c son algunos de los factores principales que influyen en el desarrollo de esta contracción. Además, la tasa de pérdida de humedad y contracción del concreto se ve influenciada por el tamaño del elemento, la humedad relativa, distancia desde la superficie expuesta y el tiempo de secado [36]. El secado del concreto no es uniforme debido a que comienza desde la superficie hacia el núcleo del concreto. Los poros de mayor tamaño dentro de la matriz cementante son los primeros en perder humedad y conforme avanza el proceso se pueden producir esfuerzos de tensión internos y cercanos a la superficie causando contracciones que pueden tener como resultado alabeos y grietas superficiales [34]. Conforme la pérdida de humedad se desarrolla en el elemento, este puede sufrir agrietamiento si está restringido. Usualmente las estructuras de concreto reforzado siempre cuentan con algún tipo de restricción que combinado con la contracción permite el desarrollo de tensiones dentro del elemento que se traducen en grietas (Fig. 8).

Dentro de las medidas recomendables para contrarrestar este tipo de agrietamiento podemos encontrar:

- ◆ Para grandes superficies (pisos y/o losas) es recomendable realizar un curado adecuado y eficiente para conservar la humedad.
- ◆ Se puede cubrir la superficie con una lona o material de polietileno.
- ◆ Aplicación superficial de curadores químicos.
- ◆ Curado por encharcamiento durante las primeras 72 horas.

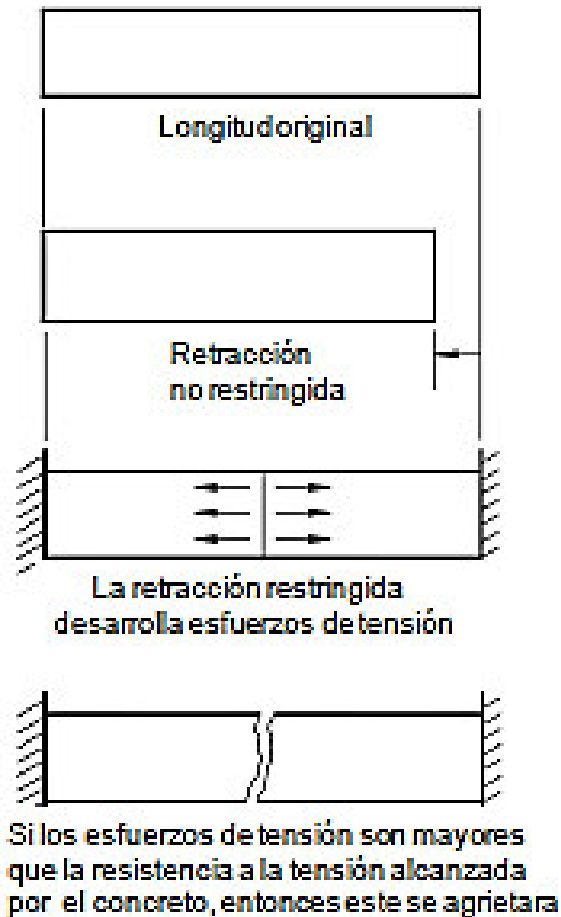


Fig. 8. Agrietamiento provocado debido a contracción por secado [36]

3.4.5 Contracción plástica

La contracción plástica se refiere a los cambios que se pueden presentar durante la etapa plástica en una mezcla de concreto. Básicamente es la combinación de la retracción química, contracción autógena y la pérdida de humedad acelerada en la superficie de concreto, por encima de la tasa de sangrado. Esta contracción puede resultar en agrietamiento especialmente bajo climas con viento, cálidos y/o secos [37][38][39]. El agua atrapada por debajo de la superficie de concreto forma un menisco entre las partículas finas de cemento y agregados, causando tensiones en las capas superficiales. Cuando la superficie de concreto está en estado plástico y se seca rápidamente, la formación de las grietas será inevitable y serán visibles conforme avance el proceso de endurecimiento del concreto [40].

La capa de agua de mezcla que aparece en la superficie de la matriz cementante durante el proceso de hidratación es conocida como sangrado o exudación. Un alto contenido de material cementante, alto contenido de finos, bajo contenido de agua, aire incluido y una elevada temperatura del concreto son factores que tienen influencia en la cantidad de sangrado que puede aparecer durante el desarrollo del proceso de hidratación de la mezcla. Si la tasa de evaporación es mayor que la tasa de sangrado, se generan presiones negativas que se traducen en esfuerzos en la microestructura. La resistencia a la tensión de la mezcla puede verse superada por dichos esfuerzos y es entonces que las grietas se hacen presentes en la matriz cementante. Factores como clima frío, alto contenido de agua, bajo contenido de cemento, uso de aditivos reductores de agua y la utilización de adiciones minerales tienden a retrasar el fraguado de la mezcla [20].

Las mezclas que presentan un retraso en el fraguado son más propensas al agrietamiento por contracción plástica. Las grietas que se forman en la superficie del concreto como consecuencia de la contracción plástica pueden llegar a reducir la durabilidad de la estructura a largo plazo debido a que permiten el paso de agentes que causan deterioro en el concreto [40]. Para prevenir este tipo de agrietamiento se debe prevenir el secado rápido de la superficie de concreto a través de buenas prácticas de curado. Además, el uso de fibras como un mecanismo de refuerzo secundario puede ayudar a disminuir los esfuerzos que se desarrollan sobre la superficie [41][42].

3.4.6 Contracción térmica

El concreto es un material que puede expandirse ligeramente con el aumento de temperatura y cuando el agua libre en el concreto se congela, sin embargo, si la temperatura disminuye y no llega al punto de congelación usualmente se contrae. Diferentes pueden ser los factores que tengan el efecto de cambiar la temperatura del concreto, entre ellos están las condiciones ambientales, la hidratación del cemento, condiciones de servicio de las estructuras o condiciones extremas causadas por fuego [5]. La contracción térmica se refiere a los cambios de volumen en el concreto originados por tensiones locales producidas por las diferencias térmicas entre el concreto y el medio ambiente.

Las grietas se presentarán en el concreto una vez que el valor de contracción sea igual a la relación entre el esfuerzo de tensión de ruptura del material y su módulo de elasticidad [43]. El tipo de agregado, contenido de cemento, relación a/c, variación en la temperatura y la edad son factores que afectan la expansión y la contracción que se puede presentar en el concreto. Cada concreto cuenta con un “coeficiente de dilatación térmica” que se ve influenciado por las proporciones de la mezcla, las propiedades térmicas de los agregados y de la pasta hidratada.

Las mezclas que cuentan con altos contenidos de cemento pueden generar una mayor cantidad de calor debido al proceso de hidratación de la mezcla. Por lo general se considera que la temperatura adiabática generada debido al calor de hidratación a edad temprana aumenta de 5 a 8°C por cada 45 kg de cemento. Algunas de las recomendaciones que se tienen para evitar las grietas de origen térmico son [43]:

- ◆ Evitar utilizar cemento con alto contenido de aluminato tricalcico (C_3A) y agregados con alta capacidad calorífica.
- ◆ Evitar gradientes térmicos entre la superficie y el interior del elemento.
- ◆ Diseñar y construir correctamente juntas de dilatación.

La Ilustración 9 nos muestra el agrietamiento que puede sufrir el pavimento de concreto debido al alabeo producido por los gradientes de temperatura, el peso propio de la losa y el tránsito generan cargas que se oponen a la curvatura del pavimento, generando esfuerzos internos que se ven traducidos en agrietamiento.

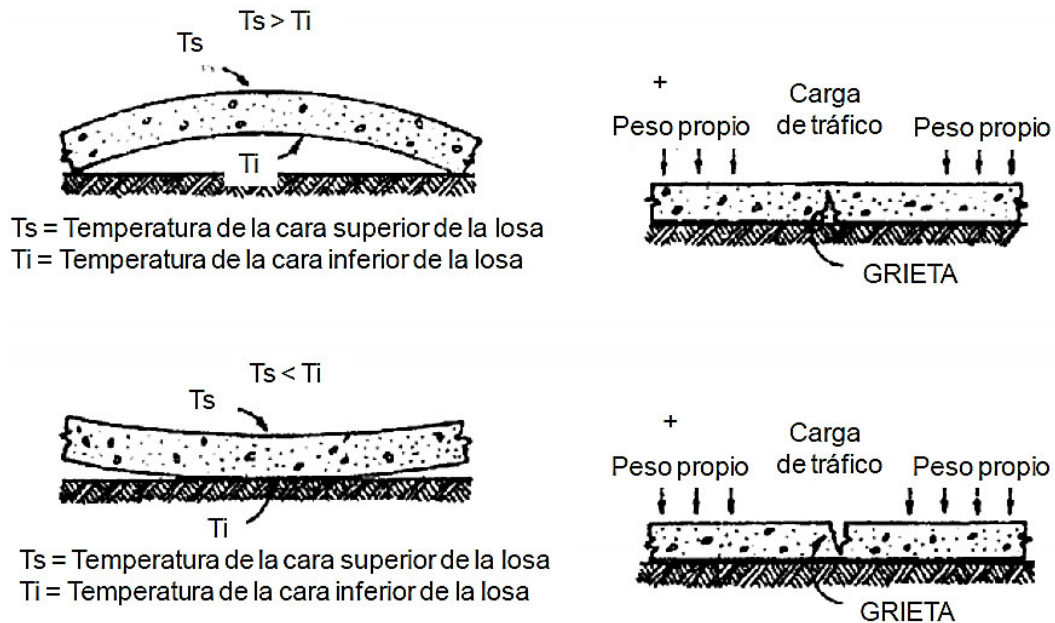
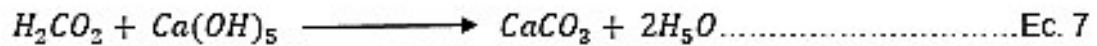


Fig. 9. Agrietamiento por contracción térmica en pavimento de concreto [43]

3.4.7 Contracción por carbonatación

Otro tipo de contracción que puede sufrir el concreto es debido a la carbonatación. Cuando la humedad atrapada en el concreto se combina con el dióxido de carbono (CO_2) se genera ácido carbónico que posteriormente reacciona con los hidróxidos en el concretos, especialmente con el hidróxido de calcio (Ec. 8), como consecuencia se produce una pequeña contracción en la pasta de concreto [43]. Generalmente esta reacción aumenta la estabilidad química y la resistencia del concreto. Sin embargo, el pH del concreto se reduce y cuando la carbonatación se ha extendido hasta un área que contiene acero de refuerzo, el acero pierde la capa de óxido que se había generado al estar en un ambiente con un pH más alcalino; como consecuencia se puede desencadenar el fenómeno de la corrosión en el acero [5]. El fenómeno de la corrosión reduce la vida útil de las estructuras de concreto reforzado significativamente.



La carbonatación y la contracción de las pastas se presenta generalmente a aproximadamente 50% de la humedad relativa. Este fenómeno es irreversible y se obtiene una ganancia de masa que puede ayudar a disminuir los cambios de volumen respecto a cambios de humedad, así como una reducción en la permeabilidad. En concretos recién colocados y no endurecidos se puede generar otro tipo de carbonatación que tiene como resultado una superficie blanda y gredosa. Este fenómeno usualmente se presenta durante la colocación en clima frío cuando hay una cantidad anormal de dióxido de carbono en el aire. La alta cantidad de dióxido de carbono puede provenir del uso de calefacción sin ventilación o la utilización de equipo con motor a gasolina dentro de recintos [5].

3.5 Curado del concreto

3.5.1 Significado e influencia dentro del concreto

Una vez que el concreto es colocado y la etapa de acabado es finalizada, se debe de prestar especial atención a la etapa de curado. El curado en el concreto se refiere a la manutención de temperatura y humedad adecuados para el desarrollo de las propiedades deseadas dentro del elemento [5]. La durabilidad, impermeabilidad, estabilidad volumétrica, así como las resistencias a la compresión, abrasión y congelamiento-deshielo, son solo algunas de las propiedades que se pueden ver afectadas debido a la ausencia o mala aplicación del curado [44]. Si se realiza de la manera adecuada, la pérdida de humedad del elemento se verá disminuida y como consecuencia el proceso de hidratación se podrá desarrollar de manera adecuada. Tal como se muestra en la Fig. 10, la resistencia a la compresión puede disminuir en gran medida debido a su ausencia, así mismo, el tiempo de curado tiene un efecto directo en esta propiedad debido a que, si se prolonga por un tiempo indefinido, la resistencia a la compresión puede aumentar significativamente.

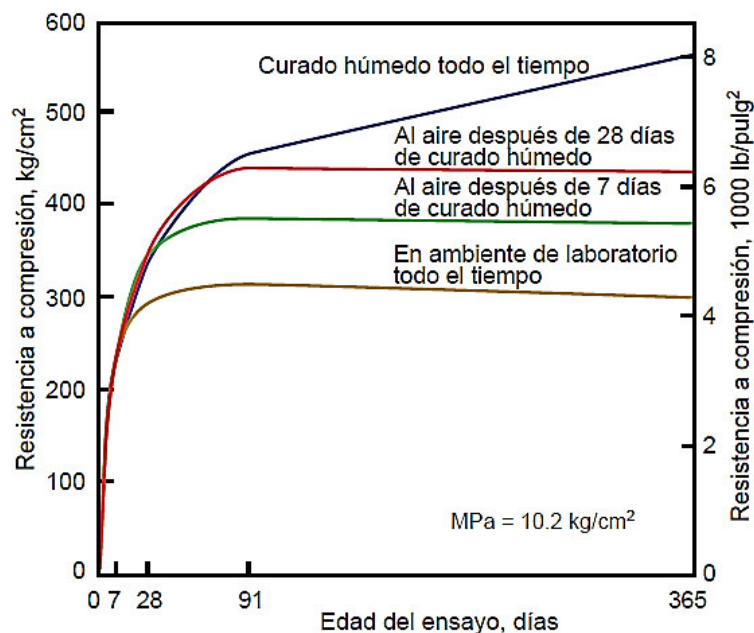


Fig. 10. Efecto del curado en el concreto [5]

3.5.2 Tipos de Curado

Usualmente el curado se especifica con base en el tipo de estructura, tipo de materiales, tipo de clima y métodos constructivos empleados en la construcción de la obra. El agrietamiento de la superficie es otro fenómeno que puede presentarse debido a la pérdida de humedad. La PCA [5], describe diferentes métodos de curado para conservar la humedad en el concreto, clasificados de la siguiente manera:

- ◆ Métodos que conservan el agua de mezcla del concreto durante el periodo de endurecimiento. Además, proporcionan enfriamiento a través de la evaporación, especialmente útil en climas calurosos. Ej.:
 - Encharcamiento o inmersión
 - Rociado
 - Aspersión o niebla
 - Coberturas saturadas de agua
- ◆ Métodos que evitan la pérdida de humedad en la superficie de la mezcla de concreto. Generalmente se colocan membranas y/o plásticos que sirven de barrera entre la superficie del concreto y el medio ambiente que lo rodea.
- ◆ Métodos que proporcionan calor y humedad para acelerar el desarrollo de la resistencia. Usualmente se aplica vapor directamente en el concreto, espirales de calentamiento o almohadillas calentadas eléctricamente.

Sin embargo, los CAC deben contar con un tipo especial de curado debido a que estos elementos presentan una densidad mayor que los concretos convencionales y esto evita que el agua de curado externa ingrese dentro del elemento. Usualmente se utilizan agentes que proporcionan la humedad necesaria para el desarrollo del proceso de hidratación, estos agentes se agregan durante el proceso de mezclado y este tipo de curado es conocido como “curado interno”.

3.5.3 Curado interno

El curado interno es una tecnología que ha permitido el desarrollo de elementos con mayor durabilidad gracias a que proporciona la humedad necesaria para la hidratación del material cementante utilizado en los CAC [45] [46] [47]. Debido a la baja relación a/c utilizada en estos concretos, se produce una mayor densidad y por consecuencia el agua de curado externa solo puede ingresar pocos mm [1]. Como resultado se pueden desarrollar contracciones que resultan en agrietamiento y afectan la durabilidad de los elementos construidos con CAC.

Una de las soluciones encontradas para disminuir el agrietamiento a edades tempranas en el concreto es el curado interno que se basa en la generación de poros de sacrificio llenos de agua dentro del concreto; la humedad es liberada gradualmente conforme se desarrolla el proceso de hidratación del cementante evitando la generación del menisco en la microestructura debido al consumo de agua de poro (Fig. 11).

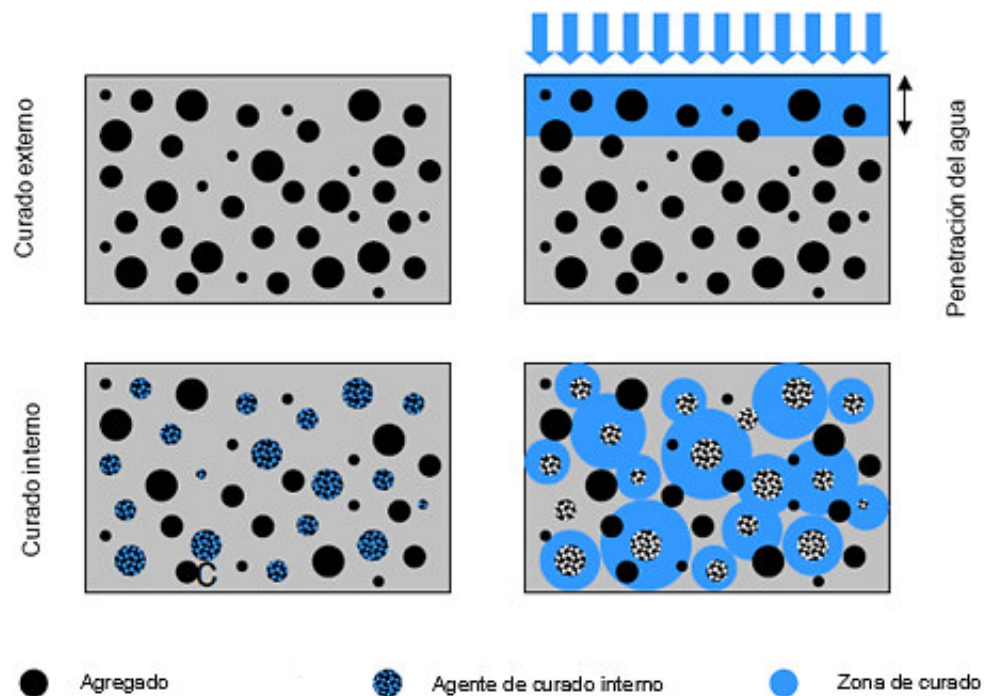


Fig. 11. Diferencias entre el curado interno y curado externo [48]

El ACI define el curado interno como: “Acción de suplir agua a toda una mezcla cementicia utilizando reservas, por medio de agregados de peso ligero pre-saturados, que libera fácilmente el agua necesaria para la hidratación o para remplazar la humedad perdida por medio de la evaporación autodesecación” [49]. Los principales objetivos del curado interno son maximizar la hidratación y minimizar la autodesecación en el CAC [1]. La autodesecación trae como consecuencia una reducción en la humedad relativa interna de la pasta cementante hidratada, que resulta en un incremento en los esfuerzos producidos dentro de la microestructura del concreto durante los primeros días después del colado, esta reducción en la humedad puede ser descrita por la ecuación 8 [50].

$$\sigma = \frac{(RT \ln(RH))}{V_m} \dots\dots\dots \text{Ec. 8}$$

Donde:

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta

RH = Humedad relativa

V_m = Volumen molar de la solución de poros

Otros beneficios que se pueden encontrar al utilizar curado interno en el concreto son mejoras en la resistencia a la compresión, mayor grado de hidratación, reducción en la permeabilidad y mayor durabilidad. Al utilizar el curado interno se proporciona una fuente adicional de agua permitiendo que la porosidad capilar de la pasta permanezca saturada, disminuyendo las tensiones internas y por consecuencia la contracción autógena [51].

Para poder implementar este tipo de curado se necesita emplear un agente que cuente con buenas características de absorción y desorción de agua, considerada para ayudar al desarrollo del proceso de hidratación dentro del concreto. La Tabla 2 muestra algunos de los materiales y técnicas que se han investigado para este fin [52]. Además, otro tipo de materiales como agregado reciclado, fibras naturales y aditivos reductores de la contracción (SRA, por sus siglas en inglés) han sido investigados en los últimos años. Las fibras naturales tales como fibra de yute y fibra de agave lechuguilla han mostrado resultados alentadores en la reducción de la contracción autógena [53][54]. Sin embargo, al utilizar SRA las reducciones de agrietamiento son mayores [54] pero su valor comercial es elevado.

Tabla 2. Materiales para curado interno en el concreto [52]

Clasificación	Material o técnica
Substancias con agua ligada químicamente	Aluminatos de calcio ¹
Substancias con agua adsorbida	Arcilla de bentonita
	Polímeros superabsorbentes
	Pumicita
Substancias con agua retenida físicamente	Perlita
	Liapor y Leca
	Stalite
	Tierra diatomácea
Substancia con agua no ligada	Micro-encapsulación
	Agua emulsificada

¹ Su utilización no es recomendable debido a su relación con reacciones deletéreas en la pasta de cemento.

3.6 Aditivos

3.6.1 Definición

Es un material cualquiera aparte del agua, agregados, cementantes y fibras de refuerzo utilizado para modificar las propiedades del concreto en estado fresco y/o endurecido agregado a la mezcla antes o durante el mezclado [55]. Los aditivos son componentes utilizados para aumentar el desempeño del concreto. Algunos de los principales aditivos utilizados en el concreto son [56][5]:

- ◆ Superplastificantes
- ◆ Incluidores de aire
- ◆ Aceleradores de fraguado
- ◆ Aditivos reductores de agua
- ◆ Aditivos retardantes del fraguado
- ◆ Aditivos de control de la hidratación
- ◆ Inhibidores de la corrosión
- ◆ Reductores de la contracción (SRA).
- ◆ Inhibidores de reacción álcali-agregado
- ◆ Aditivos colorantes
- ◆ Anti-congelamiento
- ◆ Expansivos a base de sulfoaluminato de calcio

Dependiendo del tipo de aditivo utilizado se pueden encontrar diversos beneficios que van desde una reducción en el costo de la construcción, hasta la mantención de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado y curado, especialmente en climas adversos.

3.6.2 Aditivo reductor de la contracción (SRA)

En 1982 se desarrolló el primer SRA en Japón por Nihon Cement Co y Sanyo Chemical Industries. Sin embargo, la patente fue entregada hasta el año 1985 a Goto et al; por el componente principal polioxialkileno acil éter. Conforme han pasado los años estos aditivos también han sido desarrollados utilizando propileno glicol [57]. Los SRA son aditivos que permiten mitigar el agrietamiento gracias a que reducen la tensión superficial del agua en los poros capilares y por consecuencia los esfuerzos generados dentro de la matriz cementante [58][59].

Las contracciones por secado se ven claramente disminuidas gracias a la incorporación de este aditivo. Además, las contracciones autógenas también se ven reducidas mejorando la durabilidad de los elementos de concreto. La reducción de la contracción autógena se atribuye a una expansión a edades tempranas producida por la sobresaturación y cristalización de la portlandita (Ca(OH)_2) que resulta por la incorporación del SRA [60]. Al agregar el aditivo la tensión superficial es disminuida y los esfuerzos provocados en la microestructura disminuyen reduciendo el agrietamiento provocado por la contracción autógena [61]. Los CAC son especialmente beneficiados al utilizar SRA debido a que el porcentaje de reducción en las contracciones es mayor mientras menor sea la relación a/c [62].

La incorporación del SRA en la mezcla de concreto puede aumentar el revenimiento y la porosidad, puede disminuir la velocidad de hidratación, aumentar el fraguado y afectar el contenido de aire de la matriz cementante. Sin embargo, puede ser utilizado junto al curado interno para encontrar mayores reducciones de agrietamiento y dar una solución sostenible, teniendo en cuenta que el aditivo tiene un costo elevado.

3.7 Fibras

3.7.1 Generalidades

A través de los años las fibras han sido incorporadas en el concreto, especialmente en los concretos premezclado (orientación 3-D), dentro del concreto en elementos prefabricados (orientación 2-D) e incorporados en el concreto lanzado (orientación 3-D) [5]. Las fibras de asbesto se utilizaron en la matriz cementante alrededor de 1898, pero debido a los riesgos que representaba para la salud, fibras alternativas fueron introducidas en la industria de la construcción alrededor de 1960 y 1970 [63]. Los tipos de fibras actualmente se utilizan en las mezclas pueden ser fibras plásticas, de acero, de vidrio y de origen natural, algunas de estas fibras se muestran en la Fig. 12.

Usualmente están disponibles en una gran variedad de formas, tamaños y espesores dependiendo del tipo y el fin con que se utilice la fibra. La forma depende del tipo de fibra, por lo regular pueden encontrarse presentaciones cilíndricas, llanas, rizadas y deformadas. Son añadidas durante el mezclado y el desempeño del material compuesto se ve influenciado por factores como [5]:

- ◆ Propiedades físicas de la matriz cementante y las fibras incorporadas.
- ◆ Adherencia desarrollada entre la matriz y las fibras.



Fig. 12. Fibras utilizadas en el concreto [5]

Las propiedades de los materiales cementantes reforzados con fibras depende de la estructura del compuesto. Los tres componentes que deben ser considerados para el estudio de la estructura interna del compuesto son [64]:

- ◆ La estructura de la matriz cementante
- ◆ El tamaño y distribución de las fibras
- ◆ La estructura de la interfaz fibra-matriz

Usualmente las fibras se adicionan en el concreto en volúmenes menores a 1% y se pueden utilizar para aumentar la resistencia a flexión (fibras de acero), reducir el agrietamiento por contracciones (fibras sintéticas) y más recientemente utilizadas como agentes de curado interno (fibras naturales). Las propiedades en estado fresco de la mezcla se pueden ver alteradas debido a la adición de fibras en el concreto, aumentando en el contenido de aire, reducción en la trabajabilidad y reducción en la consistencia. La efectividad de las fibras para mejorar el desempeño mecánico de la matriz depende en gran medida de las interacciones fibra-matriz. Tres tipos de las interacciones son particularmente importantes [64]:

- ◆ Adhesión física y química
- ◆ Fricción
- ◆ Anclaje mecánico inducido por deformaciones en la superficie de la fibra o por geometría compleja general (por ejemplo, rizos, ganchos, fibras deformadas)

Usualmente las fibras se distribuyen aleatoriamente dentro de la matriz cementante debido a esto muchas fibras no pueden resistir eficientemente las tensiones dando como resultado factores de eficiencia relativamente bajos. El factor de eficiencia depende de la longitud de la fibra y de la longitud crítica embebida [5]. Entre menor sea el factor se dice que es menor la cantidad de fibras que están resistiendo tensiones, siendo menor el factor para los sistemas con orientación 3-D (producidos con mezcladoras).

3.7.2 Fibras Naturales

3.7.2.1 Propiedades

Las fibras naturales han sido utilizadas en la industria de la construcción mucho tiempo antes a la llegada de la armadura convencional del concreto reforzado [5]. Ladrillos de barro eran construidos con mezclas que incluían paja, también utilizada para aislar algunos tipos de techumbre en hogares donde esta materia prima es abundante y se puede conseguir a bajos costos. A finales de los años 60, se encontró algunas fibras naturales podían incorporarse en el concreto la producción de planchas finas para muros y techos [64]. Estas fibras pueden competir con las fibras de vidrio en cuanto a rigidez por unidad de peso. Tradicionalmente las fibras naturales se pueden clasificar según su origen: animales, vegetales y minerales. Las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales dependen principalmente de los siguientes factores [65]:

- ◆ Contenido de celulosa (afecta la resistencia a la tensión proporcionalmente), lignina (afecta la rigidez proporcionalmente), hemicelulosa, pectina, ceras y contenido de agua.
- ◆ Geometría de la celda elemental.
- ◆ El tratamiento previo que pueden sufrir las fibras dependiendo del fin con el que serán utilizadas, puede ser un tratamiento con NaOH a varios niveles de concentración para remover el contenido de humedad de las fibras verdes e incrementar su esfuerzo a la tensión.
- ◆ Ángulos de la estructura interna.

Estas fibras son de gran interés debido a su bajo costo de producción. Además, la energía necesaria para la producción de las fibras naturales es en promedio menor que la mitad de la cantidad necesaria para la producción de fibras sintéticas, tal y como se muestra en la Fig. 13.

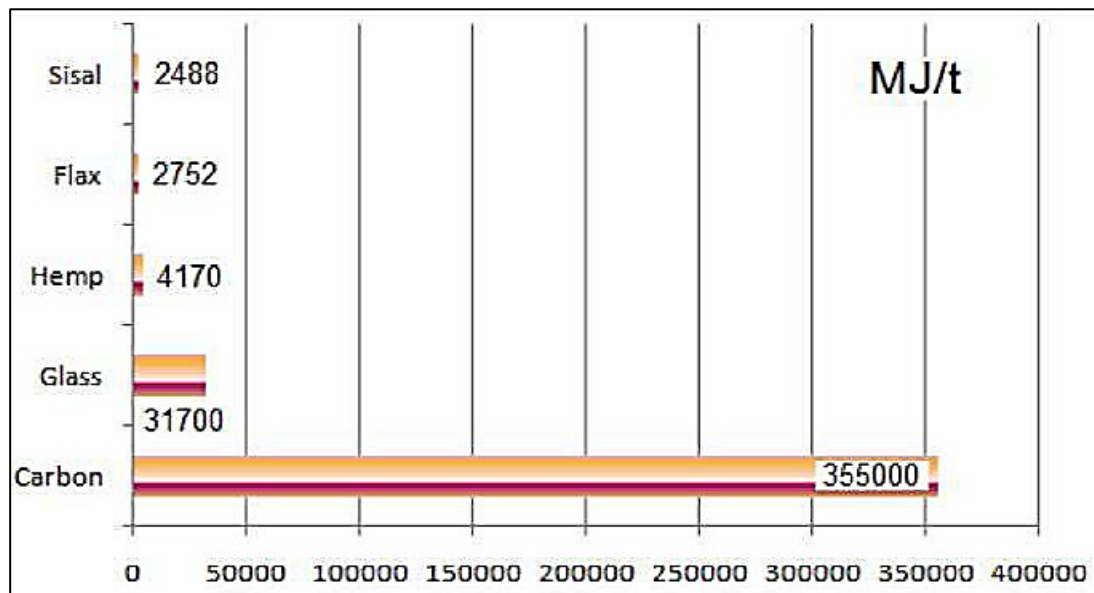


Fig. 13. Energía necesaria para producir algunas fibras naturales (MJ/T) [65]

3.7.2.2 Composición

Las fibras naturales son una fuente renovable y están disponibles casi por todo el mundo [66]. Estas fibras están compuestas principalmente por una estructura celular conformada por capas en diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina [67]. La celulosa es un polímero que contiene unidades de glucosa; mientras que la hemicelulosa es un polímero elaborado con varios polisacáridos. Por otra parte, la lignina es una mezcla amorfa y heterogénea de polímeros aromáticos y monómeros de fenilpropano [68]. Los componentes de azúcar de la fibra hemicelulosa y lignina pueden disminuir el proceso de hidratación de la pasta de cementante, afectando el tiempo de fraguado.

Lo anterior se le atribuye a un componente de la fibra denominado pectina que puede afectar la formación de CSH (silicato de calcio hidratado) debido al efecto que puede tener sobre el calcio [68]. La Tabla 3 nos muestra la composición química de algunas fibras naturales basada en estos tres elementos (celulosa, hemicelulosa y lignina) [65].

Tabla 3. Composición de fibras naturales [65]

%	Algodón	Jute	Sisal	Lino	Cáñamo	Kenaf
Celulosa	82.7	61 - 71	67 – 78	71 – 75	70.2 – 74.4	53 – 57
Hemicelulosa	5.7	13.6 – 20.4	10 - 14.2	18.6 – 20.6	17.9 – 22.4	15 – 19
Lignina		12 - 13	8 - 11	2.2	3.7 – 5.7	5.9 – 9.3

3.7.2.3 Materiales cementantes reforzados con fibras naturales

Diferentes tipos de fibras han sido incorporadas en el concreto buscando mejorar sus propiedades, entre ellas podemos encontrar fibras de coco, yute, sisal, madera, caña de azúcar, agave lechuguilla, entre otros. Cada fibra cuenta con propiedades diferentes debido a las variaciones de su origen. Además, pueden ser utilizadas con diferentes fines; es decir desde reducciones en el agrietamiento, hasta aumentar la resistencia de elementos sujetos a flexión. Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción. Los principales parámetros que rigen las propiedades mecánicas del compuesto cementante reforzado con fibras son: la resistencia de la fibra, módulo de elasticidad (ME), longitud y orientación de las fibras y la fuerza de enlace en la zona interfacial [65]. Algunas de las fibras han sido utilizadas en el concreto a través de los años y sus propiedades se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 4. Propiedades de fibras naturales

Propiedad	Jute [69]	Sisal [69]	Coco [69]	Caña (azúcar) [70]	Bagazo [69]
Esfuerzo (Mpa)	250 - 350	280 - 750	120 - 200	170 - 290	20
ME (Gpa)	26 - 32	13 - 26	19 - 26	15-29	1.7
Elongación (%)	1.5 - 1.9	3-5	10 - 25	-	-
Diámetro (mm)	0.1 - 0.2	-	0.1 - 0.4	0.2 - 0.4	0.24
Longitud (mm)	1800 - 3000	-	50 - 350	50 - 300	-
Absorción (%)	-	60 - 70	130 - 180	70 - 75	78.5

Algunos autores estudiaron el efecto que puede tener la adición de fibras en el agrietamiento del concreto. Se encontró que el uso de una fracción de volumen de 0.2% de fibras de sisal con una longitud de 25 mm puede reducir el agrietamiento producido por contracción plástica [71]. Las propiedades mecánicas también pueden verse beneficiadas al adicionarle pequeños porcentajes de fibras naturales; de igual manera, la resistencia al impacto del concreto puede verse mejorada, logrando un desempeño similar o mejor al logrado mediante la adición de fibras sintéticas [72][73].

Savastano et al. (2009) confirmaron que la longitud de la fibra influye en el proceso mediante el cual la carga es transferida de la matriz a las fibras. Se añadieron fibras de sisal, banana y eucalipto con diferentes longitudes (1.65 mm, 1.95 mm y 0.66mm), encontrando un comportamiento de fractura más estable con las longitudes mayores [74]. Sin embargo, Silva et al. (2008) estudiaron la adición de fibras de sisal en el concreto reportando que la adición de fibras puede tener un efecto adverso en la resistencia a la compresión debido a la reducción en la trabajabilidad [75]. Juarez et al. (2015) encontraron que la adición de fibras de lino y Agave lechuguilla en 0.7% del volumen de concreto resultaba en una reducción del 93% del área de agrietamiento total comparado con las mezclas que no tenían fibras [76].

3.7.2.4 Durabilidad de elementos de concreto reforzados con fibras naturales

La durabilidad de las matrices cementantes reforzadas con fibras naturales está relacionada a la habilidad de resistir daño causado por factores externos (variaciones de temperatura y humedad, ataque de sulfatos y cloruros, etc.) e internos (compatibilidad entre las fibras y la matriz cementante, cambios volumétricos, etc.) [67]. Cuando las fibras naturales se exponen a un ambiente alcalino comienzan a degradarse perdiendo la capacidad de resistir esfuerzos [68].

Gram (1988) investigó la durabilidad de fibras de sisal dentro de una matriz de cementante. En el estudio se reportó que la descomposición de los componentes principales de la fibra en un ambiente alcalino podría darse de acuerdo con dos mecanismos: separación de la fibra e hidrólisis alcalina [77] [78]. Dentro de su investigación se menciona que el primer mecanismo ocurrió cuando las cadenas lineales de glucosa de la celulosa fueron disueltas debido a la reacción con los iones hidroxilos (OH⁻), resultando en radicales de metanol (-CH₂OH).

El metanol podría ser liberado fácilmente de la cadena molecular causando la descomposición de la celulosa. De esta manera, la separación de la fibra fue un proceso continuo y ocurrió debido a la exposición al ambiente alcalino a temperaturas menores a 75 °C. El segundo mecanismo involucro la descomposición de la cadena molecular y se combinó con la separación de cadenas, debido a la división de la cadena que proporciona mayor exposición a la estructura interna de la fibra. Este proceso ocurre a temperaturas alrededor de 100°C. Otros autores [79] estudiaron la durabilidad de fibras de coco y sisal en soluciones alcalinas encontrando que las fibras expuestas a una solución de hidróxido de sodio conservaban 60.9% y 72.7% de su esfuerzo inicial después de ser expuestas a la solución durante 420 días.

Cuando las fibras eran expuestas a hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) la capacidad de resistir esfuerzo se perdió después de 300 días, esta disminución en el esfuerzo pudiera estar relacionada con la cristalización de cal en los poros de las fibras. Otro factor que puede causar deterioro dentro de las matrices cementantes fibro-reforzadas es atribuido a la capacidad absorber agua en las fibras naturales. Una vez que las fibras absorben agua se generan cambios volumétricos que pueden provocar esfuerzos dentro de la matriz generando grietas [80][81]. Para poder aumentar la vida útil de los elementos cementantes fibro-reforzados se pueden muestran dos opciones:

- ◆ Modificar la matriz cementante utilizando adiciones puzolánicas como la ceniza volante o ceniza de cascara de arroz. El uso de mezclas ternarias que contienen escoria, metacaolín y humo de sílice son efectivas para prevenir la degradación de la fibra [82]; así como, la utilización de cementantes a base de polímeros puede aumentar la durabilidad del elemento.
- ◆ Modificación de la fibra utilizando repelentes de agua o impregnando la fibra con silicato de sodio, sulfato de sodio, sulfato de magnesio o algún otro protector.

Juarez et al. (2007) utilizaron fibra de lechuguilla (1% de volumen del concreto) como refuerzo en el concreto. Encontraron que un tratamiento con parafina en la fibra de lechuguilla permitía reducir la absorción de agua, así como, mantener la capacidad de resistir esfuerzos de tensión incluso después de un año de exposición en ambientes húmedos y alcalinos [83]. También reportaron que el efecto combinado de la protección de parafina y la utilización de ceniza volante resultaba en un compuesto durable que podría tener una aplicación económica en la construcción. La fibra de Agave lechuguilla ya ha demostrado que puede ser utilizada para reforzar el concreto una vez que se ha tratado para protegerla del ambiente alcalino.

Sin embargo, el enfoque de la investigación va dirigido a utilizar esta fibra como agente de curado interno, sin agregarle ningún tratamiento de protección aprovechando así su gran capacidad de absorción y desorción, aportando agua esencial para el concreto durante el proceso de hidratación.

3.7.3 Fibra de Agave Lechuguilla

3.7.3.1 Descripción y Ubicación

El Agave lechuguilla (Fig. 14) es una planta no maderable que se puede encontrar en la región ixtlera ubicada en la zona noreste de México, conformada por los estados de Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas. Es un arbusto rosetófilo pequeño, su tallo es tan pequeño que no supera el nivel de la tierra. En promedio cuenta con alrededor de 11 a 30 hojas. Aproximadamente entre 6.9 y 9.12% del peso de una hoja corresponde a fibra [84]. El ancho del Agave lechuguilla varía entre 30 y 40 cm, mientras que de altura puede tener entre 20 a 70 cm. Tiene un rango de casi 20 millones de hectáreas equivalentes al 10% del país [85]. Este agave se puede encontrar en climas secos, semisecos y templados subhúmedos, generalmente a temperaturas de -8 a 44 °C. La densidad de la población del Agave lechuguilla puede variar desde 21,000 a 28,333 [86]; localizándose entre 200 y 2400 metros sobre el nivel del mar [87].



Fig. 14. Agave Lechuguilla del semidesierto de Zacatecas [88]

3.7.3.2 Obtención de la fibra

La fibra de agave lechuguilla también es conocida como: istle, ixtle, mexican fibre o tuta fiber y ha sido utilizada desde hace 8000 años [89]. Su obtención representa beneficios significativos para los habitantes de las áreas rurales de estas zonas, debido a que la extracción de esta fibra ha sido una actividad de la que subsisten varias familias desde hace más de 70 años [84]. Existen dos maneras de obtener la fibra del Agave lechuguilla: por tallado manual o utilizando medios mecánicos. (Fig. 15).



Fig. 15. Obtención de la fibra lechuguilla: a) tallado manual, b) medios mecánicos [90]

En promedio un ixtlero puede obtener manualmente 1.87 kg de fibra seca por hora, con un precio de venta de 8 a 11 pesos [91]. La fibra se obtiene de los cogollos de la planta cuando estos alcanzan una longitud de 25 cm [92], cuando esto ocurre el Agave lechuguilla puede medir alrededor de 42 a 60 cm y tener una edad aproximada de 6 años [93]. Una vez retirado el cogollo la planta se puede recuperar en un periodo de 6 a 12 meses dependiendo de las condiciones climáticas [94]. Del cogollo se pueden obtener alrededor de 6 a 8 hojas en buenas condiciones [88], de las cuales, un ixtlero puede obtener manualmente de 4.5 a 6.0 kg de fibra por día [95].

Por otro lado, si se utiliza maquinaria para extraer la fibra se pueden obtener alrededor de 15 a 18 kilogramos de fibra seca por hora. Las primeras máquinas “ripiadoras” se comenzaron a utilizar en los años 70's [91]. El desfibrado mecánico demanda un menor esfuerzo físico que el tallado manual, también aumenta la producción obteniendo mayores ingresos económicos debido a la rapidez en la obtención de la fibra. Utilizando este proceso se pueden obtener hasta 100 kg de fibra en una jornada de trabajo [90]. Sin embargo, la calidad de la fibra es mejor si se obtiene manualmente; lo anterior se debe a que al utilizar maquinaria la limpieza es deficiente, como consecuencia las fibras pueden presentar manchas y un alto contenido de bagazo lo que puede afectar la calidad de la fibra y por lo tanto el precio. Sin importar que método se utilice para extraer la fibra, la fibra obtenida se extiende en capas delgadas y se deja secar al sol alrededor de 2 a 3 horas.

3.7.3.3 Aprovechamiento

Gran parte de la producción de fibra de Agave lechuguilla se exporta a países como Suiza, Japón, Holanda, Alemania, Gran Bretaña, Argentina, Brasil, Canadá, España, Francia, Italia y Venezuela [96][97]. Esta fibra ha sido utilizada para la elaboración de diferentes tipos de cepillos, alfombras, bolsas, limpieza de alfombras, brochas y utilizada para el pulido de automóviles. Gracias a su versatilidad puede ser utilizada en la industria, comercio y uso doméstico. Con la materia prima sobrante se suelen elaborar estropajos y rellenos para muebles. La fibra que se exporta se selecciona con base en criterios de asociados primordialmente con su color, longitud, suavidad, diámetro, resistencia, elasticidad, textura y capacidad de absorción de humedad. El contenido de celulosa puede variar de un 40 a 70 %, mientras que la hemicelulosa y la lignina suele ser de aproximadamente 18%.

La fibra tiene una alta absorción aproximadamente 98% en peso a las 24 horas, además es dura, de alta resistencia y durabilidad, altamente resistente a los solventes químicos, calor, ácidos y productos abrasivos como ácidos diluidos y concentrados, alcoholes, destilados de petróleo y también es resistente en agua a altas temperaturas (exposición continua de hasta 150°C) [90]. Usualmente el color de la fibra de agave lechuguilla es blanco opaco, con un tono verdoso y la longitud varía entre los 42 y 60 cm dependiendo del largo de la hoja. Las principales propiedades físicas de la fibra de lechuguilla son [98]:

- ◆ Resistencia a la tensión: alrededor de 275 a 627 Mpa.
- ◆ Elongación: aproximadamente 10%.
- ◆ Densidad: 1.38 g/cm

Capítulo 4. Antecedentes

4.1 Curado interno en el concreto

En la primera década del siglo XXI se comenzaron a incorporar diferentes agentes de curado interno dentro del concreto con la intención de disminuir el agrietamiento. Entre los materiales utilizados se encontraban agregado ligero pre-humedecido (LWA, por sus siglas en inglés), concreto reciclado, polímeros superabsorbentes (SAP, por sus siglas en inglés), más recientemente se han comenzado a estudiar las fibras naturales [51]. Paul klieger (1957) reconoció las bondades del agregado ligero para ser utilizado como agente de curado interno [99]. Por su parte Phileo (1991) propuso el remplazo de una porción de agregado fino, por agregado fino saturado para resolver el mismo problema [100]; brindando así, una opción para los productores de concreto de alta resistencia, que al utilizar agregado ligero no pueden lograr las resistencias objetivo.

En los años 90`s investigadores en Alemania [101], Holanda [102] e Israel [103] estudiaron el curado interno utilizando LWA. Mas tarde, se comenzaron a estudiar SAP [16][17] y fibras de madera pre-saturadas con el mismo fin [104]. También se realizaron estudios utilizando ceniza de cascara de arroz en concreto de ultra alto comportamiento [105]. Además, cenizas de fondo [106] y cenosferas [107] fueron estudiadas con el mismo fin. En los últimos años LWA y SAP han sido utilizados con mayor frecuencia. LWA se basan en mecanismos de succión capilar, difusión de vapor y condensación capilar [108]; mientras que los SAP afectan el curado a través de una combinación de expansión, filtración iónica y el espaciado entre partículas del SAP [109].

Craeye et. al (2011) estudiaron diferentes grados de curado interno suministrados a través de SAP, evaluando la efectividad, las propiedades térmicas y mecánicas de CAC.

Dentro de su investigación encontraron que la contracción autógena puede ser reducida con la adición de SAP, sin embargo, una alta y temprana velocidad de producción de calor debido a la hidratación puede ser encontrada, además concluyeron que la adición de SAP trae consigo una reducción de los esfuerzos mecánicos y módulo de elasticidad del concreto [110]. Hasholt et al. (2012) reportaron que el curado interno a través de SAP puede mitigar la contracción autógena con una pérdida mínima en la resistencia a la compresión e incluso se puede tener una ganancia de resistencia en CAC [111].

Mechtcherine et. al (2013) investigaron la utilización de polímeros súper absorbentes en CAC con agregado fino. Como resultado de la investigación confirmaron que los SAP pueden mitigar la deformación a edades tempranas de la pasta. Sin embargo, el tamaño y la forma de las partículas de SAP pueden tener influencia en los valores de esfuerzo del concreto. además, se debe tomar en cuenta la cinética de desorción ya que una liberación prematura de agua puede tener como resultado un aumento en la relación a/c, disminuyendo la resistencia [112]. Ghourchian et. al (2013) utilizaron agregado ligero de arcilla expandida y agregados de zeolita provenientes de Irán, concluyendo que el desempeño de los agregados porosos dentro del CI está íntimamente ligado a su microestructura y descartando el agregado ligero natural de zeolita de Irán (tipo clinoptilolita) como agente de CI, ya que la mayoría del agua queda retenida entre sus poros y no ayuda a contrarrestar la auto-deseccación y secado [113]. De Sensale et. al (2014) compararon el desempeño de agregado ligero fino (LWAF) y SAP como agentes de curado interno en CAC, concluyendo que ambos agentes cuentan con propiedades adecuadas para ser utilizados como agente de curado interno, sin embargo, se encontró mejor desempeño en la mitigación de la contracción autógena por parte del LWA, aunque ambos en grandes cantidades afectan los esfuerzos de compresión [114].

Por otro lado, la ceniza de fondo de carbón que es un producto de las centrales de combustión de carbón también ha sido evaluado como un material alternativo para el curado interno. Se ha reportado que la contracción autógena del CAC se puede ver reducida o eliminada mediante la incorporación de este material en la mezcla de concreto [115]. Además, el grado de hidratación de la matriz cementante puede verse mejorado debido al agua aportada internamente por la ceniza de carbón y la alta reactividad puzolánica [116]. Zhutovsky et al. (2017) reportaron que al utilizar LWA como agente de curado interno en mezclas de CAC con baja relación agua cemento ($a/c = 0.21$) se puede reducir el potencial de agrietamiento en el concreto debido a que las contracciones por secado y autógenas se ven claramente disminuidas [117].

4.2 Fibras naturales como agentes de curado interno

Algunas fibras naturales presentan gran potencial para ser utilizadas como agente de curado interno debido a sus características físicas y químicas, además de su gran disponibilidad en el mercado y bajo costo económico. Sin embargo, es poca la investigación que se ha realizado utilizándolas con este fin. Si bien se ha mostrado interés, las fibras naturales han sido utilizadas en su gran mayoría como refuerzo en elementos de CAC.

Se han realizado investigaciones utilizando Fibra de Agave lechuguilla como refuerzo en CAC [98]. Su incorporación trajo como resultado una disminución en la resistencia a la compresión de 15%. También se encontró que la absorción de la fibra era de 98% en peso a las 24 horas, lo que represento un problema para el fin con el que fue incorporado en la investigación debido a la pérdida de adherencia que se podía generar entre la matriz y la fibra. Para resolver el problema la fibra fue recubierta con parafina disminuyendo su absorción y protegiendo del deterioro por la exposición a un ambiente alcalino.

Algunos investigadores han utilizado la pulpa de origen natural para reducir los problemas de agrietamiento. Jongvisuttisun et. al (2018) estudiaron la interacción temprana entre pulpas de eucalipto de madera dura y cemento portland, añadiendo 3% de metacaolín como remplazo del cemento y utilizando dos relaciones a/cm (0.30 y 0.34). Reportaron que después de 25 horas de hidratación, el calor de la hidratación de pastas cementosas de pulpa fue mayor que la de la pasta de control de $w/cm = 0.30$, esto indican la reacción de hidratación adicional asociada con el agua atrapada. Comportamientos similares han sido reportados con el uso de LWA y SAP para curado interno [118]. Las investigaciones que utilizan fibras naturales como agentes de curado interno son escasas.

Mitsuo Ozawa et al. (2012) dosificaron fibra de yute como agente de curado interno a razón de 0.5, 1 y 2.0% en volumen en una pasta de cemento portland con relación $a/c = 0.25$ [53]. Encontraron reducciones de 12% y 36% de la contracción autógena los 8 días, utilizando 0.5% y 1% de volumen de la fibra. Mientras que la reducción en la resistencia a la compresión resulto en 3% y 22% respectivamente. En la mezcla que se incorporó 2% de volumen de fibra se pudo observar segregación. Dávila & colaboradores (2016), encontraron que utilizado solamente fibra de Agave lechuguilla Torrey como agente de curado interno, la contracción autógena se redujo aproximadamente en un 54.6% a los 28 días; además se encontró que, utilizando solo aditivo reductor, las contracciones autógenas y por secado se redujeron en un 68 y 56% respectivamente [52]. Sin embargo, se necesita investigar la durabilidad de los compuestos cementantes que incluyen fibras naturales. La Fibra de Agave lechuguilla ha demostrado ser un buen agente de curado interno y aunque se ha encontrado mayor eficiencia al utilizar SRA, el costo y la disponibilidad de esta fibra es significativamente menor que el del SRA.

4.3 Aditivo Reductor de la Contracción (SRA) en CAC

Las contracciones en el concreto significan reducciones en el volumen de la matriz cementante debido a procesos químicos y físicos que ocurren en este material; mientras el concreto está en estado plástico, los cambios volumétricos no causan agrietamiento en el concreto [119]. El agrietamiento por contracción sirve para acelerar otras formas de daño en el concreto como son la corrosión y los ciclos de hielo-deshielo que disminuyen la vida de servicio de las estructura [120]. Una opción que se tiene para disminuir las contracciones es a través de la SRA, son un tipo especial de químicos orgánicos que cuando se mezcla en agua reducen la tensión superficial del líquido. Se ha encontrado que, disminuyendo la tensión superficial del fluido, los SRA pueden reducir la contracción por secado hasta en un 56% [54]; adicionalmente reducen las tensiones capilares generadas por la contracción autógena en CAC con baja relación a/c y mejoran la resistencia del concreto contra el agrietamiento por contracción plástica.

Rajabipour et. al (2008) encontraron que el SRA reduce la polaridad del agua de mezclado y su concentración en la solución de poro incrementa el proceso de hidratación [120]. Si se incrementa el proceso de hidratación la mezcla puede alcanzar una mayor resistencia. Por otro lado, la utilización de SRA también tiene efectos negativos en la pasta cementante, se ha observado que su adición puede causar pérdida de aire atrapado, lo que puede afectar negativamente la resistencia del concreto contra los ciclos de hielo y deshielo [120]. Meddah et. al (2011) estudiaron el efecto sinérgico de SRA y aditivo expansivo (AE) para mitigar la contracción autógena y las tensiones en CAC.

Encontraron que en concretos con relación $a/c = 0.15$, la combinación de los aditivos redujo en un 50 % la contracción autógena, mientras que incrementando la relación a/c a 0.23 y 0.30, se lograba la mitigación casi total de las tensiones y la contracción autógena en el concreto [121]. Oliveira et al. (2014) investigaron el efecto combinado de SRA y AE para controlar la contracción autógena en concretos auto-compactables; los resultados de la investigación mostraron que la contracción autógena puede ser significativamente reducida e incluso eliminada con la incorporación de estos aditivos, ya que se logra un efecto sinérgico en la mitigación de las contracciones, desviando el efecto de retardo negativo de los aditivos químicos [122]. El SRA es una gran opción para mitigar la contracción autógena, sin embargo, la combinación de este aditivo con otras tecnologías puede llegar a presentar mejores resultados. El problema de utilizar estos aditivos es que generan un incremento considerable en los costos de elaboración del concreto.

El estudio de las diferentes opciones para mitigar las contracciones es de vital importancia porque genera un criterio acerca de que técnica es la más adecuada para la reducir el agrietamiento en el CAC, en especial el causado debido a la contracción autógena. Buscando utilizar materiales sostenibles (aprovechando las propiedades como agente de curado interno que brinda la fibra de lechuguilla) e intentando encontrar la condición óptima para la reducción de las contracciones en los CAC, con un enfoque de bajo costo; se plantea evaluar la combinación de agente reductor y la fibra de agave de lechuguilla como agentes para mitigar la contracción autógena, mejorando la inestabilidad volumétrica de los CAC.

Capítulo 5. Justificación, Hipótesis y Objetivos

5.1 Justificación

El CAC ha desempeñado un papel primordial en el desarrollo de estructuras con una vida de servicio prolongada. Sin embargo, este tipo de concreto es susceptible al agrietamiento a edades tempranas causado principalmente por la contracción autógena. El curado interno es la técnica principalmente utilizada para mitigar la contracción autógena. Diferentes agentes de curado interno se han utilizado para proporcionar agua extra a la pasta cementante durante el proceso de hidratación del cemento, sin embargo, la mayoría de estos materiales no tienen un enfoque sostenible

La fibra de lechuguilla ha mostrado características adecuadas para ser utilizada como agente de curado interno, además de ser un material de fácil disponibilidad que proviene de una fuente renovable. Aunque los aditivos reductores de la contracción (SRA, por sus siglas en inglés) tienen una gran efectividad en la reducción de las contracciones, su uso puede llegar a elevar de manera significativa los costos del concreto. La combinación de SRA y fibra de lechuguilla como agente de curado interno de los CAC puede disminuir la contracción autógena, brindando una opción sostenible y amigable con el medio ambiente.

5.2 Hipótesis

El efecto complementario de la fibra de lechuguilla como agente de curado interno y aditivo reductor de la contracción disminuirán la contracción autógena en concreto de alto comportamiento mejorando su estabilidad volumétrica, sin efectos adversos en sus propiedades en estado fresco y en estado endurecido.

5.3 Objetivos

5.3.1 Objetivo General

Evaluar el efecto complementario de fibra de agave lechuguilla como agente de curado interno y aditivo reductor de la contracción en la disminución de la contracción autógena en concretos de alto comportamiento.

5.3.2 Objetivos Específicos

- ◆ Caracterizar las propiedades físicas del aditivo reductor de la contracción, fibra de lechuguilla y de los materiales que se utilizaran en el diseño del CAC. (densidades, absorciones, humedad en los agregados, granulometría de los agregados y contenido de sólidos del aditivo superfluidificante).

- ◆ Diseñar el CAC de referencia con una extensibilidad objetivo de 600 ± 50 mm (clase SF2) y 0% de segregación; manteniendo fijo el consumo de cementante (400 kg/m^3), la relación a/c (0.40), el tamaño máximo de agregado (TMA = 19 mm) y la longitud de la fibra ($L = 5$ mm).

- ◆ Caracterizar las propiedades de las mezclas de CAC en estado fresco mediante:
 - ❖ Habilidad de paso con Anillo "J".
 - ❖ T50.
 - ❖ Índice de estabilidad visual (VSI, por sus siglas en ingles).
 - ❖ Extensibilidad
 - ❖ Resistencia a la segregación
 - ❖ Tiempos de fraguado
 - ❖ Contenido de aire
 - ❖ Peso unitario

- ◆ Determinar las propiedades de las mezclas de CAC en estado endurecido a través de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad

- ◆ Contrastar los resultados experimentales con la estimación obtenida mediante la fórmula propuesta por Jensen para calcular el agua necesaria para eliminar la contracción autógena.

- ◆ Evaluar el desempeño de la fibra de lechuguilla como agente de curado interno y el SRA, para disminuir las contracciones autógenas y por secado del CAC.

- ◆ Evaluar la durabilidad de las mezclas a través de la resistividad eléctrica y el coeficiente de migración de iones cloruro.

Capítulo 6. Materiales

6.1 Descripción de los materiales

6.1.1 Cemento portland

La marca del cemento portland utilizado fue Moctezuma y su clasificación Tipo I según la norma ASTM C 150 [123] y como CPO 40 según la NMX-414-ONNCCE [124], proveniente de la planta de Cerritos ubicada en el estado de San Luis Potosí, México. El cementante fue almacenado hasta su implementación en la experimentación. Fue colocado en bolsas y en sacos de plástico para evitar la hidratación debido a la interacción con la humedad.

6.1.2 Agregados

6.1.2.1 Agregado grueso

El agregado grueso debe ser retenido entre las mallas de 90 mm (3½”) y 4.75 mm (#4) y puede ser obtenido de manera natural o por trituración de rocas, escoria de alto horno, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u algún otro [125]. El TMA fue de 19 mm, de origen calizo y fue obtenido en la mina ubicada en el cerro de las Mitras propiedad de la empresa Industrializadora de Caliza, S. A. de C. V. ubicada en Santa Catarina, Nuevo León, México (Fig. 16).

6.1.2.2 Agregado fino

EL agregado fino debe ser retenido entre las mallas de 4.75 mm (#4) y 75 mm (#200) y puede ser obtenido de forma natural o por medio de la trituración de rocas, escoria volcánica o una combinación de estos u otros [125]. El origen del agregado fino fue el mismo que el agregado grueso y fue proporcionado por la misma empresa.

Debido a que su origen se basa en la trituración, el agregado en la región de Monterrey suele contener un alto contenido de microfinos (Fig. 17). Sin embargo, este contenido de microfinos no afecta la producción del CAC de referencia debido a que se recomienda una mayor cantidad de polvos que el concreto convencional, logrando aumentar la cohesividad del concreto y evitar la segregación del concreto.



Fig. 16. Muestra de agregado grueso utilizado en la investigación



Fig. 17. Muestra de agregado fino utilizado en la investigación

6.1.3 Aditivo superfluidificante

Se utilizó un aditivo superfluidificante de alto rango base policarboxilatos color ambar para proporcionar la fluidez a las mezclas de CAC (Fig. 18). El aditivo lleva el nombre de Plastol Precast Plus y es de la marca Euclid producido por la empresa EUCOMEX S.A de C.V. El aditivo cumple la clasificación de Tipo A (reductor de agua) y Tipo F (aditivo reductor de agua de alto rango) según ASTM C 494 [126] La dosificación del aditivo fue establecida para la referencia buscando cumplir la extensibilidad objetivo de 60 ± 5 cm, esta dosificación se utilizó como constante en todas las mezclas posteriores. La ficha técnica recomienda dosificar el aditivo dosificado en un rango de 4 a 15 cm^3/kg de cemento.



Fig. 18. Aditivo plastol precast plus.

6.1.4 Aditivo reductor de la contracción (SRA)

Se utilizó un SRA base éter monobutílico del dietilenglicol con cero contenido de agua. El aditivo es comercializado con el nombre de EUCON SRA de la marca Euclid producido por la empresa EUCOMEX S.A de C.V. El SRA no presenta color, es decir es transparente. La máxima dosificación del SRA fue de 2% debido a que en la ficha técnica se establece que para esta dosificación la reducción en la resistencia a la compresión puede llegar a ser del 15%.

El resto de las dosificaciones fueron de 1.5, 1.0 y 0.5 % esperando menores reducciones en la resistencia a la compresión y con el objetivo de observar la influencia de este aditivo en las propiedades en los estados fresco y endurecido de las mezclas, así como en las contracciones e indicadores de durabilidad.

6.1.5 Fibra de Agave Lechuguilla Torrey

La fibra de Agave lechuguilla fue adquirida en la planta Ixtlera de Santa Catarina S.A. de C.V (Fig. 19). Una vez adquirida fue cortada para obtener fibras con una longitud de 5 mm esto debido a que se ha reportado que al utilizar esta longitud se puede lograr una buena distribución de las fibras dentro de la matriz cementante, logrando así una mejor distribución en el curado interno del elemento [54]. Parte de la fibra utilizada fue sometida a un proceso de lavado para poder contrastar el desempeño de la fibra como agente de curado interno lavada y sin lavar.



Fig. 19. Fibra de Agave lechuguilla adquirida directamente de la Ixtlera

Capítulo 7. Metodología Experimental

7.1 Matriz de experimentos

Para la experimentación se diseñó un CAC con fluidez del tipo 2 (EFNNARC) extensibilidad objetivo: 650 ± 5) utilizando cemento portland como material cementante. La mezcla fue elaborada con relación a/c de 0.40 y tamaño máximo de agregado de 19 mm. Los parámetros antes mencionaos se justifican en la Tabla 5. El estudio experimental contemplo la evaluación de 4 variables: dosificación de fibra, dosificación de fibra lavada, dosificación de SRA y dosificación combinada fibra lavada-SRA. Para evaluar las cuatro variables fueron contempladas 5 series, la primera de ellas fue una serie en la que se evaluó las propiedades de la mezcla de CAC diseñada y tomada como referencia.

Tabla 5. Parámetros para el diseño de CAC

Concepto	Parámetro seleccionado	Criterios de justificación
Consumo de cementante	400 k/m ³	ACI 237, Tabla 4.2; se recomiendan consumos de entre 386 y 475 kg/m ³ [127]
Relación agua / cemento (a/c)	0.40	ACI 237, Tabla 4.2; típicas relaciones utilizadas entre 0.32 y 0.45 [127]
Tamaño máximo del agregado (TMA)	19 mm	EFNARC 2002; se menciona que el TMA de la grava se suele limitar a 19 mm [13]
Extensibilidad	60 ± 5 cm	ACI 237, Tabla 2.5; se encuentra en el rango medio de los elementos a colar [127] EFNARC; Clasificada como SF1 al estar en el punto edio de 55 y 65 cm [10]

7.2 Proporcionamiento de la mezcla de referencia

La Tabla 6 nos muestra el proporcionamiento de la mezcla de referencia.

Tabla 6. Proporcionamiento de la mezcla de referencia

Material	Material seco sin agua de absorción (kg/m ³)
Cemento	400.00
Agua de reacción	159.43
Agregado grueso	594.95
Agregado fino	1213.61
Aire (2.5%)	-
Aditivo superfluidificante	1.30 ²

Las 5 series evaluadas se dividieron de la siguiente manera:

- ◆ Serie A (referencia)
- ◆ Serie B (fibra sin lavar)
- ◆ Serie C (fibra lavada)
- ◆ Serie D (SRA)
- ◆ Serie E (1% de fibra lavada y SRA)

Jensen et al. (2001) reportaron una fórmula para calcular el agua de curado interno necesaria para eliminar la contracción autógena (ecuación 11) [16]. Los porcentajes de fibra se consideraron tomando en cuenta esta ecuación. Con base en los parámetros contenido de cementante (400 kg/m³) y relación a/c (0.40) utilizados en la mezcla de referencia y tomados como constantes para la elaboración de las mezclas posteriores, se calculó el agua necesaria para eliminar la contracción autógena en el CAC, dando como resultado 8 kg/m³.

² Dosificación: 3.0 ml/kg de cemento

La cantidad de fibra de Agave lechuguilla que se debe de incorporar en el CAC para aportar esta cantidad de agua y así eliminar por completo la contracción autógena en el CAC se calculó utilizando la ecuación establecida por Bentz et al. [46] (ecuación 12).

$$\frac{W}{C} + \left[\frac{W}{C} \right]_e = 0.42 \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\frac{W}{C}$ = relación a/c de la mezcla

$\left[\frac{W}{C} \right]_e$ = relación en función del agua de curado interno

La ecuación descrita por Bentz et al [46], involucra 3 parámetros para poder conocer el agua de curado interno aportada por la fibra.

$$ACF = M_{fib} * Abs_{fib} * Des_{fib} \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$

Donde:

ACF = Agua de curado interno aportada por la fibra

M_{fib} = Peso de la fibra

Abs_{fib} = Absorción de la fibra

Des_{fib} = Desorción de la fibra

Tomando en cuenta el agua de curado interno calculada con la ecuación 11 (8 kg/m^3) y con base en las propiedades de la fibra de absorción 98% [98] [54] y desorción 80.2 [54], se utilizó la ecuación 12. Se determinó que eran necesario incorporar 10.17 kg/m^3 de fibra de Agave lechuguilla en la mezcla de CAC para lograr el objetivo de mitigar por completo el agrietamiento. Esta cantidad de fibra corresponde a 1.7% del volumen del CAC. Con base en el cálculo anterior fueron escogidos los porcentajes para las series que incluían fibra (“B” y “C”) escogiendo porcentajes de fibra de 2%, 1.7%, 1.0%, 0.5% del volumen del CAC. En la serie “C” se omitió el porcentaje de 1.5% debido a la cantidad de pruebas y el tiempo de la experimentación.

El porcentaje superior de 2% se utilizó para poder medir las propiedades del CAC si se añadiera un porcentaje mayor que el determinado con las ecuaciones 11 y 12 (1.7%). El resto de los porcentajes se escogieron para ver qué porcentaje era el que tenía mejor desempeño en el CAC en estado fresco y en el estado endurecido. Los porcentajes involucrados en cada una de las series, así como la cantidad de agua de curado interno aportada por la fibra de agave lechuguilla en cada mezcla se pueden observar en la Tabla 7. Los porcentajes de la serie D que incluía SRA, se consideraron tomando en cuenta la recomendación del fabricante; en la ficha técnica se establece que al adicionar una dosis de 2% las reducciones pueden ser de 15% en la resistencia a la compresión. El resto de los porcentajes (1.5%, 1.0% y 0.5%) fueron escogidos para ver la influencia de esta variable en las propiedades del CAC.

Tabla 7. Series evaluadas en la experimentación

Serie	Clave	Agente incorporado	Características
			Agua de curado interno kg/m ³
A	A	Ninguno	No incluye
	B-0.5%		3
B	B-1.0%	Fibra de Agave	4.7
	B-1.7%	lechuguilla sin lavar ³	8
	B-2.0%		9.4
	C-1.0%	Fibra de Agave	4.7
C	C-1.7%	lechuguilla lavada ³	8
	C-2.0%		9.4
	D-0.5%		
D	D-1.0%	SRA ⁴	No incluye
	D-1.5%		
	D-2.0%		
	E-1.0%		
E	E-1.5%	Fibra lavada 1% ³ + SRA ⁵	4.7
	E-2.0%		4.7

³ El porcentaje en la clave se refiere al volumen de fibra incorporado respecto al volumen de concreto

⁴ El porcentaje en la clave se refiere al porcentaje de SRA incorporado respecto al peso del cemento

⁵ El porcentaje en la clave se refiere al porcentaje de SRA incorporado respecto al peso del cemento (en esta serie se utilizó 1% de fibra lavada respecto al volumen de concreto y se varió la cantidad de SRA).

7.3 Métodos de prueba

Se caracterizaron los siguientes materiales: cemento portland, grava, arena, fibra y aditivos. Los resultados fueron utilizados durante la investigación para la elaboración de mezclas e incorporación de los agentes que disminuirían el agrietamiento del concreto. Las pruebas necesarias para determinar las diferentes propiedades en las mezclas de CAC fueron divididas en 4 etapas: pruebas en estado fresco, pruebas en estado endurecido, estabilidad volumétrica e indicadores de durabilidad

7.3.1 Caracterización de los materiales

7.3.1.1 Cementante

7.3.1.1.1 Densidad

La densidad del cemento portland utilizado se determinó mediante el uso del frasco de Le Chatelier siguiendo la norma ASTM C 188 [128].

7.3.1.1.2 Composición química

La composición química del material cementante se obtuvo mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (ED-XRF) utilizando un equipo PANalytical modelo Epsilon3-XL (Fig. 20).



Fig. 20. Analizador de ED-XRF PANalytical Epsilon 3-XL

7.3.1.2 Agregados

7.3.1.2.1 Caracterización de los agregados

La densidad y absorción de los agregados (fino y grueso) fue determinada siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 127 [129] y ASTM C 128 [130]. El PVSS y PVVS fueron determinados siguiendo el procedimiento de ASTM C 29 [131] (Fig. 21).



Fig. 21. Determinación del PVSS de la arena

7.3.1.2.2 Análisis granulométrico

Las pruebas granulométricas de la arena y la grava se realizaron conforme a la norma ASTM C 136 [132]. En la Fig. 17 se puede observar parte del procedimiento descrito.

7.3.1.2.3 Contenido de humedad

La corrección por humedad necesaria al momento de fabricar las mezclas CAC debido a las condiciones de los agregados (fino y grueso) se realizó siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 566 [133]. Esta corrección es necesaria para evitar alteraciones en la relación a/c de las mezclas de CAC.

7.3.1.3 Fibra

7.3.1.3.1 Densidad

La densidad de la fibra fue determinada utilizando fibras de 10 mm de largo. Las fibras fueron colocadas en recipientes y trasladadas al horno eléctrico donde fueron expuestas a una temperatura de 110°C hasta eliminar todo rastro de humedad (peso constante). Una vez que las fibras se encontraban en la condición seca, se pesó una cantidad de 35,000 g. La fibra pesada fue sumergida durante 24 horas en agua para conseguir la sobresaturación de la fibra. Una vez pasado ese tiempo, la fibra fue retirada del agua y colocada sobre un recipiente para posteriormente secarla cuidadosamente con papel absorbente hasta conseguir el peso calculado para la condición “sss” (W_{sss}). Después se agregó agua a un frasco de Chapman para poder tomar la lectura inicial “ L_1 ”, una vez conseguido lo anterior se introdujo la fibra en condición “sss” (saturado superficialmente seco) dentro del frasco y el frasco fue agitado para con desalojar el aire atrapado. Una segunda lectura fue tomada cuando todo el aire fue desalojado “ L_2 ”. Para determinar la densidad de la fibra en condición “sss”, se utilizó la ecuación 9.

$$D_f = \frac{W_{sss}}{L_1 - L_2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 9}$$

Donde:

D_f = Densidad de la fibra

W_{sss} = peso de la fibra en condición “sss”

L_1 = Lectura inicial

L_2 = Lectura final

7.3.1.3.2 Absorción

Se cortaron fibras con una longitud de 15 cm, posteriormente fueron sumergidas en agua para su saturación durante un periodo de 24 horas. Pasado ese periodo se la fibra fue colocada en una charola metálica y secada con papel absorbente hasta conseguir la condición “sss”, una vez logrado esto la fibra fue protegida con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Se registro el peso de la fibra en condición “sss”, después la fibra fue colocada en el horno eléctrico a 110°C hasta eliminar todo rastro de humedad (peso constante) y se registró el peso seco de la fibra. Se calcula el % de absorción de la fibra utilizando la ecuación 10.

$$\% \text{ absorción} = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

Donde:

W_{sss} = Peso en de la fibra en condición “sss”

W_s = Peso de la fibra seca

7.3.1.4 Aditivos

7.3.1.4.1 Densidad

La densidad de los aditivos superfluidificante y SRA fue determinada utilizando un frasco de Le Chatelier, teniendo en cuenta el volumen desplazado al momento de incorporar el aditivo y el peso registrado en una báscula electrónica de marca Ohaus, modelo Explorer E04130 con 1mg de precisión, la prueba se elaboró para cada aditivo por separado.

7.3.1.4.2 Contenido de solidos

Este parámetro solo fue calculado para el aditivo superfluidificante, debido a que el SRA es 100% éter glicol. Se obtuvo colocando 190g (peso inicial) de aditivo en un recipiente que fue colocado en el horno eléctrico a 110°C hasta peso constante. Una vez cumplido lo anterior, el recipiente fue retirado del horno y el contenido restante dentro del recipiente fue pesado. El porcentaje correspondiente a ese peso tomando en cuenta el peso inicial como el 100% es el porcentaje correspondiente al contenido de sólidos.

7.3.2 Preparación de la fibra

7.3.2.1 Procedimiento de corte

La longitud original de la fibra adquirida en la Ixtlera era de 35 cm. Sin embargo, para poder ser utilizada como agente de curado interno debía tener una longitud de 5 mm. Las fibras fueron cortadas manualmente utilizando una guillotina de oficina para papel (Fig. 22). Una vez cortadas las fibras se almacenadas en botes tapados para evitar la contaminación con algún otro agente. Las muestras secadas se almacenaron en bolsas plásticas cerradas e identificadas.



Fig. 22. Corte de la fibra

7.3.2.2 Saturación y lavado de la fibra

7.3.2.2.1 Saturación

Se utilizaron recipientes plásticos en los que se agregó la fibra y posteriormente agua para su sobresaturación durante 24 horas. Concluido el periodo de tiempo se registró el peso. Al peso obtenido se le restaba el peso del recipiente para obtener el peso de la fibra sobresaturada (fibra en condición “sss” + agua). Se calculo el peso de la fibra en condición “sss” con base en la absorción de la fibra (98% en peso) y se restó del peso en condición sobresaturada. El resultado era igual al exceso de agua que había en los recipientes, este exceso se restaba del agua de mezcla para no alterar la relación a/c.

7.3.2.2.2 Lavado

Para la fibra de la serie C (fibra lavada) se incorporaron algunos pasos extra al procedimiento anterior. Es decir, el proceso iniciaba de la misma manera agregando la fibra y agua a los recipientes dejando sobresaturar por 24 horas. Una vez concluido ese periodo, la fibra fue colocada sobre la malla #100 para lavarla con agua (Fig. 23 a). El proceso de lavado se repetía hasta que el agua de lavado fue transparente. De esta manera se disminuyeron los compuestos que incorporaban un exceso de aire en el CAC. Después la fibra fue sobresaturada nuevamente y pesada. Se determino el agua en exceso restando el peso de la fibra en condición “sss”. para evitar alterar la relación a/c una vez que se añadía a la mezcla de CAC.



Fig. 23 Lavado de la fibra: a) fibra sin lavar, b) fibra lavada

7.3.3 Mezclado del CAC

Para la elaboración de la mezcla de referencia y las mezclas necesarias para poder evaluar las variables en la investigación se implementó una mezcladora convencional en la cual se elaboraron batchadas de 20 litros. El procedimiento de mezclado utilizado fue el descrito por Dávila & colaboradores [54] y se describe en la Tabla 8.

Tabla 8. Procedimiento de mezclado para la fabricación del CAC

Tiempo (minutos : segundos)		Procedimiento
Parcial	Acumulado	
	0 : 00	Incorporación de los agregados, comenzando por la grava y posteriormente la arena. Adición de la mitad de agua de mezcla para asegurar la distribución de la humedad en los agregados.
1 : 00	1 : 00	Mezcla para la homogenización de los agregados y la distribución el agua añadida.
14 : 00	15 : 00	Reposo de los agregados para lograr al menos un 70% de la absorción de agua en la grava y 90% de la absorción en la arena. La boca de la revolvedora fue cubierta con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad
1 : 00	16 : 00	Adición del cemento portland y el resto del agua de mezcla con el aditivo superfluidificante mezclado en el agua. Si es el caso se incorpora el SRA.
3 : 00	19 : 00	Se mezclan los materiales y si es el caso se incorpora la fibra de agave lechuguilla.
3 : 00	22 : 00	En este período se le da un reposo a la mezcla y la boca de la revolvedora es cubierta con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad.
2 : 00	24 : 00	Proceso de mezclado
Fin de mezclado		Se vacía la mezcla en una carretilla previamente humedecida y se homogeniza con una pala humedecida para posteriormente elaborara las pruebas o elaborar especímenes correspondiente.

7.3.4 Pruebas en estado fresco





7.3.4.1 Extensibilidad, T_{50} e Índice de estabilidad visual

La prueba de extensibilidad evalúa la capacidad del CAC de fluir bajo su propio peso sin confinamiento (Fig. 24). Además, sirve para comparar el flujo lateral y la capacidad de llenado de las mezclas. Un valor elevado de este parámetro nos indica que el CAC puede fluir una mayor distancia por su propio peso. Para elaborar la prueba se utiliza el cono de Abrams, el cual se llena con concreto y se enrasa una vez finalizado el concreto. La prueba inicia una vez que el cono es levantado de forma vertical, respetando los tiempos y recomendaciones que se describen en ASTM C 1611 [134], dicha norma también describe los procedimientos para determinar el T_{50} y el índice de estabilidad visual (VSI, por sus siglas en inglés). Una vez iniciada la prueba de extensibilidad se mide el tiempo que tarda la mezcla en alcanzar un diámetro de 50 cm; este tiempo es denominado T_{50} . Un valor elevado de T_{50} nos indica una alta viscosidad de la mezcla. El VSI se basa en asignar un valor de estabilidad a la mezcla de concreto tomando en cuenta los criterios descritos en la Tabla 9.



Fig. 24. Extensibilidad.

Tabla 9. Índice de estabilidad visual [134][135]

Valor de VSI	Criterio	Ejemplo
0 = altamente estable	Sin evidencia de segregación o sangrado	
1 = Estable	Sin evidencia de segregación, pero ligero sangrado observado como un brillo en la superficie de la masa del concreto	
2= Inestable	Se puede apreciar un ligero halo de mortero (≤ 10 mm) y/o un ligero apilamiento de agregados en el centro de	
3 = Altamente inestable	Se observa segregación evidente, un halo de mortero >10 mm y/o una pila grande de agregados en el centro de la masa de concreto	

7.3.4.2 Anillo J

La capacidad de paso de las mezclas se determinó según la norma ASTM C 1621 [136]. La diferencia entre la extensibilidad de la mezcla con y sin “anillo J” es indicador de la capacidad de paso de las mezclas y se clasifica según la Tabla 10.

Tabla 10. Evaluación del bloqueo [136]

Diferencia entre extensibilidad con y sin anillo J.	Evaluación del bloqueo
0 a 25 mm	Sin bloqueo visible
>25 a 50 mm	Bloqueo mínimo a notable
>50 mm	Bloqueo notable a extremo

7.3.4.3 Columna de segregación

La resistencia a la segregación estática de la mezcla se determinó utilizando la columna de segregación (Fig. 25) siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 1610 [137].



Fig. 25. Columna de segregación

7.3.4.4 Contenido de aire atrapado

Para determinar el contenido de aire atrapado en las mezclas utilizo el método de presión (Fig. 26) descrito en la norma ASTM C 231 [138]. Cada valor obtenido fue corregido restándole el factor de corrección por el agregado. El factor de corrección por el agregado obtenido fue de 0.5%.



Fig. 26. Contenido de aire atrapado por medio del método de presión.

7.3.4.5 Peso unitario

El peso unitario de cada mezcla se obtuvo a través del procedimiento descrito en la norma ASTM C 138 [139].

7.3.4.6 Temperatura

La temperatura de las mezclas de concreto se determinó con base en ASTM C 1064 [140].

7.3.4.7 Tiempos de fraguado

Los tiempos de fraguado fueron obtenidos conforme a la norma ASTM C 403 [141]. Se obtuvo una muestra de cada mezcla por medio de cribado en húmedo. El mortero obtenido fue colocado en un recipiente y posteriormente se protegieron para evitar la pérdida excesiva de humedad. Además, fueron almacenado en un cuarto de humedad y temperatura controlada. Se midió la resistencia a la penetración del mortero a intervalos regulares de tiempo, respetando las especificaciones de la norma (Fig. 27).



Fig. 27. Tiempos de fraguado

7.3.5 Pruebas en estado endurecido

7.3.5.1 Resistencia a la compresión

La fabricación y el curado de los especímenes necesarios para determinar la resistencia a la compresión de las mezclas fue establecido siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 192 [142]. Los especímenes fueron elaborados y protegidos con una membrana plástica por un periodo de 24 horas. Finalizado este periodo, los cilindros fueron desmoldados y colocados en un cuarto de curado a 23 ± 2 °C con humedad relativa de 100%. El curado se mantuvo hasta la fecha correspondiente de ensaye de cada espécimen. Sin embargo, los especímenes ensayados a 1 día no fueron curados debido a que fueron ensayados después de ser desmoldados y cabeceados considerando el tiempo suficiente para que el azufre desarrollara la resistencia requerida. Los especímenes fueron ensayados a la edad de 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días. Fueron tres los cilindros ensayados por edad para cada mezcla siguiendo las recomendaciones establecidas en ASTM C 39 [143]. Todos los especímenes fueron cabeceados según ASTM C 617 [144].

7.3.5.2 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático se determinó con base en ASTM C 469 [145]. En la Fig. 28 se observa el equipo utilizado para este fin.



Fig. 28. Determinación del módulo de elasticidad.

7.3.6 Contracciones

7.3.6.1 Contracción por secado

Para evaluar la contracción por secado, se elaboraron tres especímenes prismáticos (Fig, 29) y se colocaron pernos a una distancia de 25.4 cm entre la parte interna de los pernos de medición. La sección transversal fue de 7.62 x 7.62 cm (ancho x alto). Los especímenes fueron elaborados y curados siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C 157 [146]. Pasado 24 horas después de su elaboración y una vez que fueron desmoldados, se tomó una lectura inicial de cada barra. Posteriormente las barras fueron colocadas en agua saturada con cal durante 7 días. El séptimo día las barras se retiraron de la solución y se registró una segunda lectura. A partir de este día se comenzaron a tomar lecturas a edades de 4, 7, 14, 28, 56 y 91 días.



Fig. 29. Contracción por secado

7.3.6.2 Contracción autógena

La contracción autógena se determinó a través del procedimiento descrito en ASTM C 1698 [147]. Se registraron lecturas a una y dos horas después del fraguado final de cada mezcla, posteriormente se registró una lectura diaria por probeta durante un periodo de 28 días (Fig. 30). La muestra de mortero correspondiente a cada mezcla para la elaboración de las barras fue obtenida mediante cribado en húmedo a través de la malla # 4.



Fig. 30. Contracción autógena.

7.3.7 Indicadores de durabilidad

7.3.7.1 Resistividad eléctrica superficial

La resistividad eléctrica se determinó de acuerdo con la norma AASHTO TP 95 [148]. El desarrollo de la resistividad en los especímenes se monitoreo durante las edades de 1, 3, 7, 14, 28 ,56 y 91 días. Las muestras estuvieron sujetas a curado durante todo momento. Esta prueba es un ensayo no destructivo basado en los cuatro puntos de Webber (Fig. 31). Consiste en aplicar una corriente alterna a la superficie del espécimen de concreto para medir el cambio de potencia producido por el paso de la corriente. La caída e potencial medido en el área afectada y los valores de la corriente aplicada se utilizan para calcular la resistividad eléctrica superficial del concreto.

La norma establece una clasificación de la resistencia de penetración del ion cloruro en el concreto basándose en valor obtenido de resistividad eléctrica superficial. La clasificación se describe en la Tabla 11.

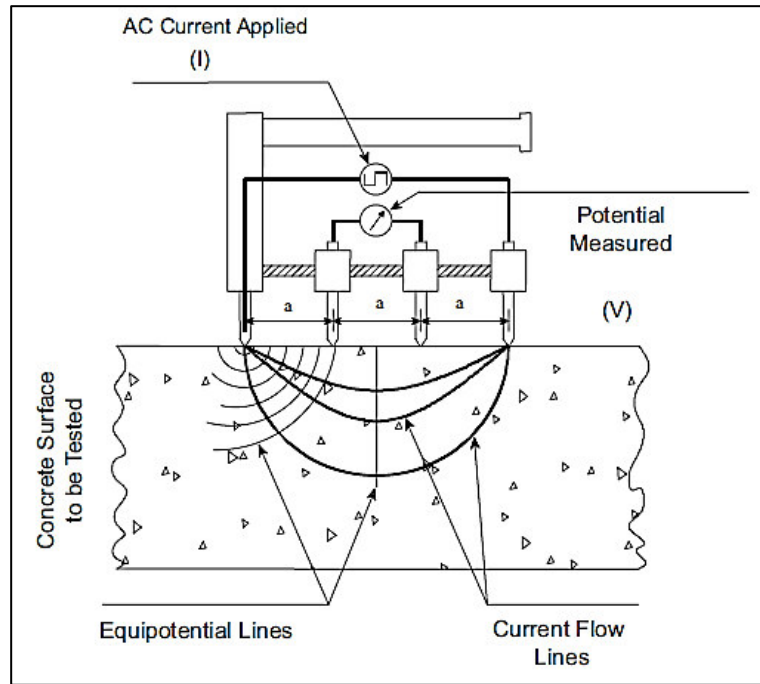


Fig. 31. Resistividad Eléctrica Superficial de acuerdo con los 4 puntos de Wenner [148]

Tabla 11. Difusión del ion cloruro [148]

Penetración del Ion cloruro	Prueba de resistividad superficial	
	100-mm x 200-mm (4-in. x 8-in.) Cilindro (kiloohm-cm) $a^6 = 1.5$	150-mm x 300-mm (6-in. x 12-in.) Cilindro (kiloohm-cm) $a = 1.5$
Alta	< 12	< 9.5
Moderada	12-21	9.5-16.5
Baja	21-37	16.5-29
Muy baja	37-254	29-199
Despreciable	>254	>199

⁶ a = espaciado de la punta de la sonda Wenner

7.3.7.2 Migración de iones cloruro

La migración de iones cloruros dentro de las mezclas de concreto se determinó a la edad de 56 días de acuerdo con la norma Nordtest NT Build 443 [149]. Los especímenes fueron curados de todo el tiempo de manera estándar. Se trata de un ensayo destructivo que consiste en obtener muestras de 5 cm de espesor y 10 cm de diámetro de un cilindro de mismo diámetro, pero altura de 20 cm. Las muestras son colocadas en una solución anódica (hidróxido de sodio, NaOH) y en una catódica (cloruro de sodio, NaCl) tal y como se describe en la Fig. 32. Una vez finalizado el ensamble de la probeta, se aplica un voltaje en el rango de 30 a 60 V, esto dependiendo de las características de nuestro concreto (densidad). Con esta acción se inicia la migración de iones Cl^- de la solución catódica a la solución anódica. Después que se cumple el lapso siguiendo las recomendaciones de la norma, las probetas son desmontadas y se registra el frente de penetración de iones cloruro. Para calcular el coeficiente de migración de cloruros se utiliza la ecuación 11.

$$D_{\text{nssm}} = \frac{0.0229(273+T)L}{(U-2)t} (X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}}) \dots\dots\dots \text{ecuación 11}$$

Donde:

- D_{nssm} = coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)
- T = promedio de la temperatura inicial y final en la solución anódica ($^{\circ}\text{C}$)
- U = valor absoluto de voltaje aplicado (V)
- L = es el ancho del espécimen (mm)
- t = tiempo que llevo la prueba (hrs)
- X_d = promedio de las medidas de las distancias que penetran los cloruros (mm)

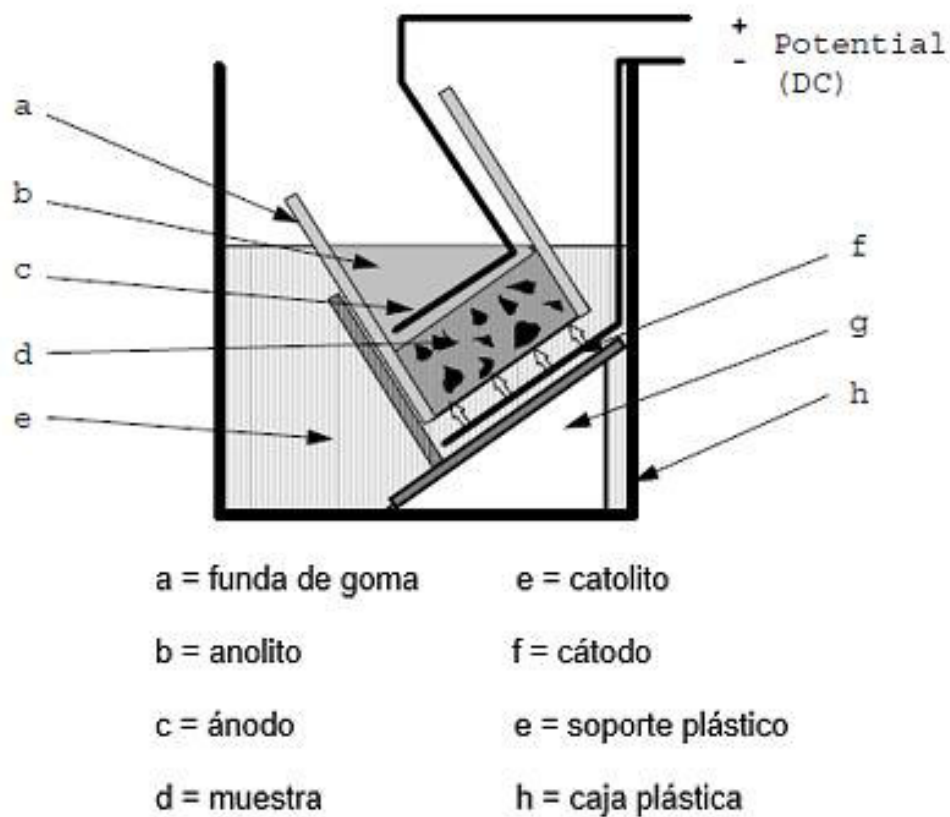


Fig. 32. Configuración del equipo para la determinación de la migración de los iones cloruro [149]

Capítulo 8. Resultados y Discusión

8.1 Caracterización de materiales

8.1.1 Cementante

8.1.1.1 Densidad

La densidad del cementante utilizado se determinó por duplicado con base en ASTM C 188, verificando que el resultado no variara en más de ± 0.03 , el resultado se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Densidad del cementante

Cementante	Densidad (g/cm ³)
CPO 40	3.10

8.1.1.2 Composición química

En la Tabla 3 se muestra la composición química de las fases mineralógicas constitutivas del cemento portland (CPO 40) que fue determinada por fluorescencia de rayos "x" (FRX).

Tabla 13. Composición química del cemento portland

Cementante	Contenido (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
CPO 40	17.665	4.718	2.263	63.678	1.202	5.116	0.659	0.743	0.235	0.092	0.078

8.1.2 Agregados

8.1.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los agregados como absorción, desorción, peso volumétrico seco suelto (PVSS) y peso volumétrico varillado suelto (PVVS) se presentan en la Tabla 14.

Los datos recopilados fueron utilizados en el diseño del concreto de alto comportamiento. Las propiedades se determinaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM que le corresponde a cada propiedad, dichas normas se mencionan en el Capítulo 6.

Tabla 14. Propiedades físicas de los agregados

Propiedades	Agregados			
	Arena (#4)	Desviación estándar	Grava (TMA =19 mm)	Desviación estándar
Absorción (%)	2.40	0.09	0.38	0.08
Densidad (g/cm³)	2.6	0.06	2.71	0.08
PVSS (g/cm³)	1.69	9.2	1.54	0.06
PVVS (g/cm³)	---	---	1.60	0.03

8.1.2.2 Granulometría

La granulometría del agregado grueso se presenta en la Tabla 15, mientras que la granulometría del agregado fino se presenta en la Tabla 16. Ambos agregados cumplen con la granulometría establecida por ASTM C 33 tal y como se muestra en la Fig. 33 y Fig. 34 que corresponden a los valores graficados, así como los límites establecidos por la norma para el agregado grueso y el agregado fino respectivamente. En las tablas también se incluye el tamaño máximo del agregado grueso (TMA) y el módulo de finura del agregado fino (MF). El agregado grueso cumple con el TMA recomendado por EFNARC para la elaboración de concreto autocompactable, dicha norma establece como limite el valor de 19 mm [13].

Tabla 15. Granulometría del agregado grueso

Malla (μm)	Retenido		Pasa (%)
	Parcial (%)	Acumulado (%)	
25000	0	0	100
19000	9.14	9.14	90.86
12500	42.42	51.56	48.44
9500	29.82	81.38	18.62
4750	17.14	98.52	1.48
2360	0.25	98.74	1.26
TMA = 19 mm			

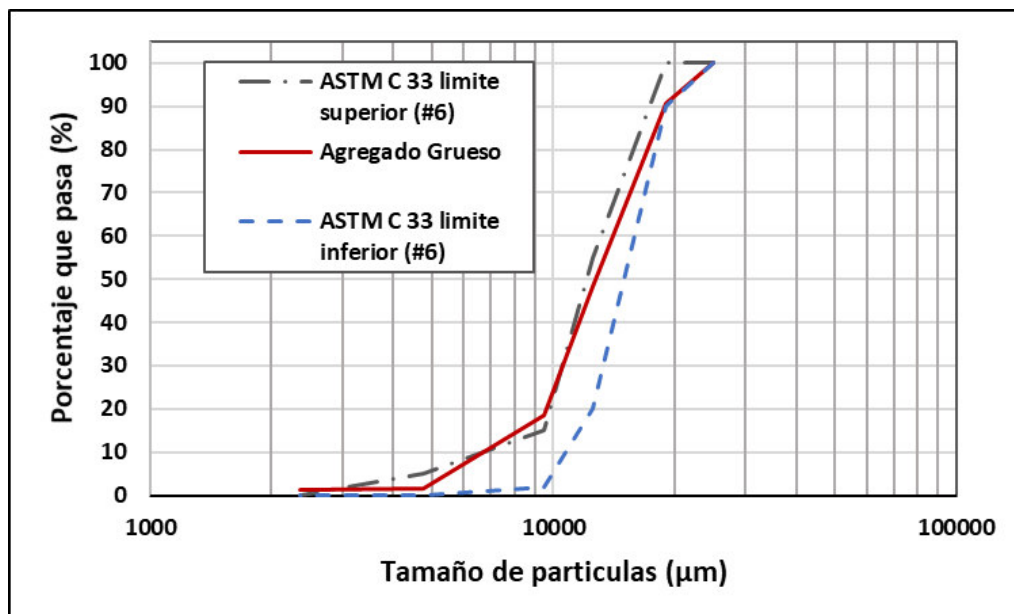


Fig. 33. Granulometría del agregado grueso

Tabla 16. Granulometría del agregado fino

Malla (µm)	Retenido		Pasa (%)
	Parcial (%)	Acumulado (%)	
9500	0.00	0.00	0.00
4750	0.00	0.00	0.00
2360	41.00	15.71	15.71
1180	77.50	29.69	45.40
600	63.50	24.33	69.73
300	43.50	16.67	86.40
150	22.00	8.43	94.83
75	2.8	97.62	2.37
MF = 3.12			

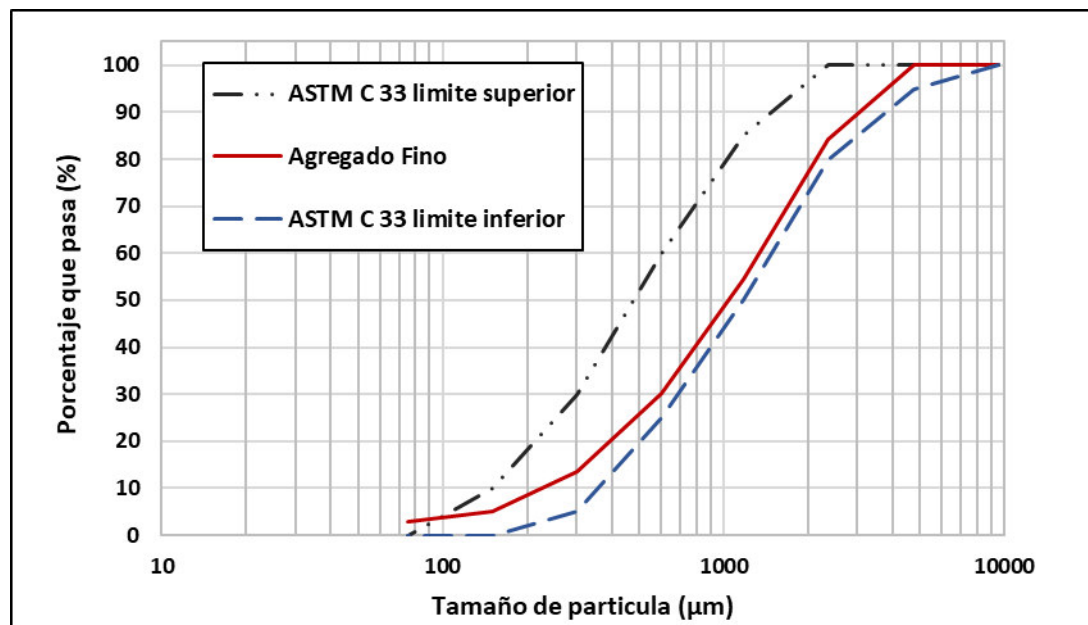


Fig. 34. Granulometría del agregado fino

8.1.3 Aditivos

8.1.3.1 Densidad y contenido de solidos

La densidad del aditivo superfluidificante (plastol precast plus) y el SRA (Eucon SRA) se presenta en la Tabla 17, los resultados son congruentes con los datos reportados por el proveedor en la ficha técnica; así mismo, en dicha tabla se reporta el contenido de solidos del aditivo superfluidificante, la diferencia en porcentaje respecto al 100% se consideró como parte del agua de reacción.

Tabla 17. Propiedades de los aditivos

Aditivo	Densidad (g/cm ³)	Desviación estándar (g/cm ³)	Solidos (%)	Desviación estándar (%)
Eucon SRA	0.95	0.004	---	---
Plastol precast plus	1.10	0.003	50.2	0.3

8.1.4 Fibra

8.1.4.1 Densidad y absorción

La densidad (condición “sss”) y absorción de la fibra se reportan en la Tabla 18; debido a la naturaleza de la fibra, se obtiene una rápida absorción de agua, así como una gran capacidad de almacenamiento respecto a su volumen. El agave lechuguilla es una planta que se encuentra en lugares semiáridos, debido a esto ha desarrollado la capacidad de absorber eficientemente el agua disponible.

Tabla 18. Densidad y absorción de la fibra de agave lechuguilla

Material	Densidad (g/cm ³)	Desviación estándar (g/cm ³)	Absorción (%)	Desviación estándar (%)
Fibra de Agave lechuguilla	1.17	0.01	98%	

El mecanismo de absorción de la fibra es promovido por la expansión [54], lo que permite que el aire incluido sea desplazado de manera eficiente dentro de la fibra. Este efecto le brinda ventajas a la fibra de agave lechuguilla respecto a otros materiales para ser utilizada como agente de curado interno debido a que no presenta el denominado “rebote” que se presenta en otros materiales; por ejemplo, debido a su naturaleza el mecanismo de absorción de la arena se basa en la fuerza capilar que desplaza el aire atrapado dentro de los poros al absorber algún líquido, lo que tiene como consecuencia la presencia del fenómeno anteriormente descrito (rebote).

8.1.4.2 Morfología de la fibra

La Fig. 35 muestra dos micrografías de la fibra de agave lechuguilla obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Del lado derecho observa una magnificación de la sección transversal de la fibra en la que se puede apreciar la porosidad de la fibra que le permite actuar como una esponja y expandirse al entrar en contacto con el agua logrando así tener una absorción de 98% de agua con respecto a su peso seco a las 24 horas.

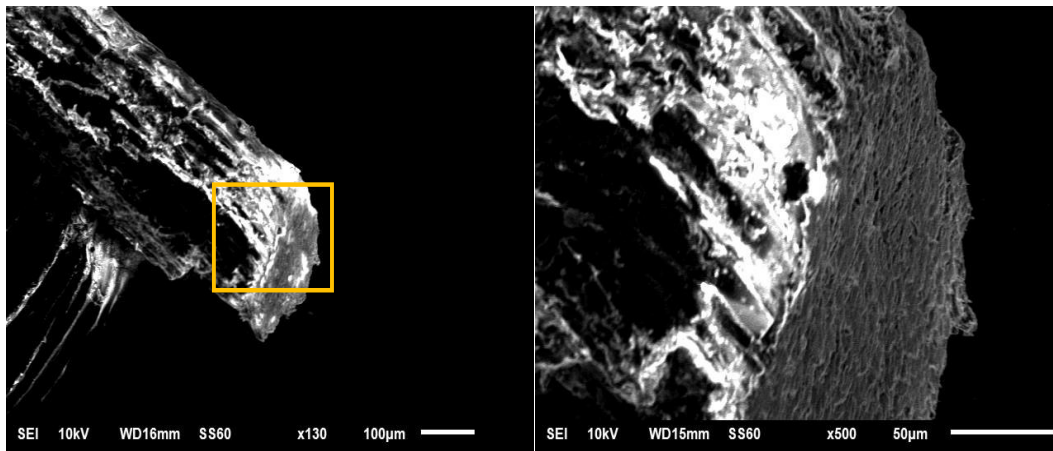


Fig. 35 Sección transversal de la fibra

Las fibras de agave lechuguilla cuentan con un porcentaje de absorción respecto a su peso seco de los más altos dentro de la familia de los agaves, comparando contra la absorción de las fibras que provienen del maguey que absorben solo el 69% [150] y el sisal entre el 60 y 70 % [63] [151]. Lo anterior se puede deber a que las fibras de sisal y maguey cuentan con una menor porosidad que las fibras de agave lechuguilla. En la Fig. 36 muestra dos micrografías obtenidas mediante SEM; se puede apreciar la morfología de la fibra, en la parte derecha se muestra una magnificación de una sección de la fibra que nos permite apreciar más a detalle cómo está conformada la estructura externa de la fibra.

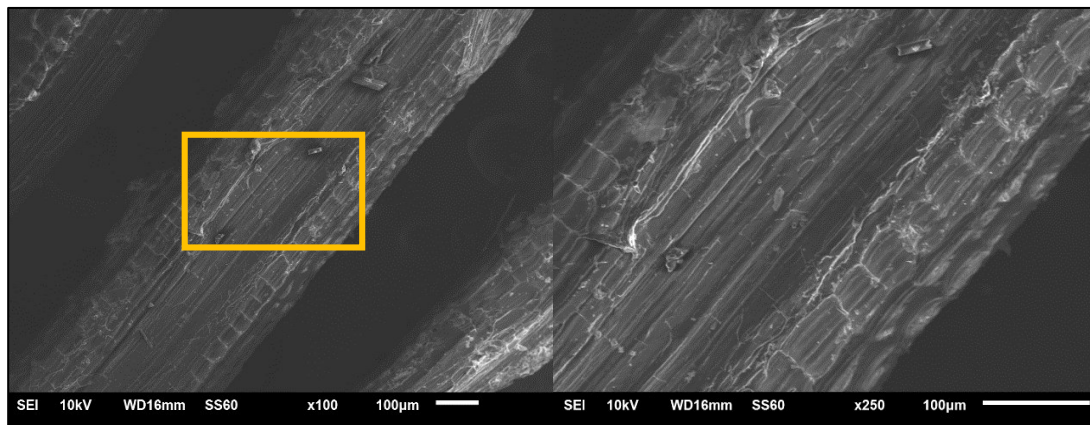


Fig. 36 Estructura externa de la fibra

8.2 Resultados experimentales

8.2.1 Clasificación del CAC de referencia

La mezcla de referencia se fabricó cinco veces para determinar las variaciones en la capacidad de llenado (extensibilidad), viscosidad (T_{50}), capacidad de bloqueo (anillo J), resistencia a la segregación (VSI y columna de segregación) y otras propiedades en estado fresco (peso unitario, contenido de aire). Los resultados se observan en la Tabla 19. La extensibilidad objetivo de 600 ± 50 mm fue alcanzada. Sin embargo, la capacidad de bloqueo de la mezcla se mantuvo en el límite permisible de 50 mm, lo anterior se le puede atribuir al alto contenido de polvos que aumentan la cohesión de la mezcla. Otro factor que tuvo influencia fueron las características del agregado grueso; aunque su contenido en la mezcla no era abundante, la angulosidad del agregado y el poco tiempo disponible que tienen las partículas del agregado para alinearse en dirección al flujo nos arrojó los resultados mostrados.

Tabla 19. Repetibilidad de la mezcla de referencia

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T_{50} (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)
A-1	630	590	40	0	5.21	0	2.2	2444
A-2	620	570	50	0	4.61	0	2.6	2431
A-3	640	590	50	0	4.01	0	2.4	2449
A-4	610	560	50	0	6.54	0	2.5	2428
A-5	620	560	60	0	4.73	0	2.5	2426
Promedio	624	574	50	0	5.02	0	2.44	2436
Desviación estándar	11.40	15.16	7.07	0	0.95	0	0.15	10.26

Debido al alto contenido de arena en la mezcla y al alto contenido de polvos, la viscosidad de la mezcla se ve aumentada, lo que dio como resultado una alta resistencia a la segregación estática. Sumado con la alta fluidez lograda, la mezcla es adecuada para utilizarse en elementos que demanden concreto autocompactable. También puede ser utilizada en elementos verticales u horizontales que no cuenten con un espesor delgado [151]. Sin embargo, el TMA de 19 mm solo permite su utilización en elementos con un nivel de refuerzo bajo para evitar segregación. Dicha mezcla fue clasificada en la Tabla 20 siguiendo los parámetros establecidos por ASTM [151] y EFNARC [3].

Tabla 20. Clasificación del CAC de referencia

Característica del CAC	Método de prueba	Promedio	Desviación estándar	Clase
Capacidad de llenado	Extensibilidad	624 mm	11.40 mm	SF2
Capacidad de paso	Anillo J	574 mm	15.16 mm	Bloqueo extremo
Viscosidad	T ₅₀	5.02 seg	0.95 seg	VS2
Resistencia a la segregación	Columna de segregación	0%	0	<10%

8.2.2 Pruebas en estado fresco

8.2.2.1 Caracterización de las mezclas de CAC.

Los resultados de las pruebas en estado fresco evaluadas en todas las series que conforman la experimentación fueron divididos en dos tablas (Tabla 21 y Tabla 22). La Tabla 21 nos muestra los resultados de la caracterización del CAC mediante las pruebas de extensibilidad T₅₀, VSI [134], anillo J [136] y columna de segregación [137]. Al analizar la Tabla 21 podemos observar que en las mezclas que conforman la serie "B", la adición de fibra afecto la consistencia de las mezclas reduciendo la extensibilidad y la capacidad de paso.

La reducción en la consistencia de las mezclas fue proporcional a la adición de fibra. Las fibras de agave lechuguilla está compuesta principalmente por celulosa hemicelulosa, y lignina, sin embargo, también contiene otro tipo de sustancias como son taninos, pectinas y otros compuestos que son solubles en agua. Una vez que entran en contacto las fibras con el agua, estos compuestos se comienzan a disolver y generan reacciones que pueden modificar la tensión superficial de la solución y en su caso producir burbujas [98]. Cuando la fibra no fue lavada (serie B) y se incorporó en la mezcla de concreto, los compuestos antes mencionados se disolvieron en agua y afectaron directamente las propiedades en estado fresco incorporando aire en las mezclas y reduciendo su consistencia. Para la serie "C" en la que se utilizó fibra de agave lechuguilla lavada, no se observaron los efectos negativos que se observaron en la serie B por lo que estos componentes perjudiciales disminuyeron gracias al lavado que se le dio a la fibra.

Para las mezclas B-2.0%, B-1.7%, y B-1.0% la adición de esta fibra no permitió que la mezcla se extendiera al menos 50 cm, haciendo imposible medir el parámetro denominado como T_{50} , esto fue consecuencia de la pérdida de consistencia en la mezcla. En la serie "C" también se observó el mismo efecto que en la serie "B", sin embargo, la reducción en la consistencia fue menor debido al lavado que se le dio a la fibra, disminuyendo los componentes que afectan las propiedades del concreto. Para la mezcla C-1%, la reducción en la consistencia fue aproximadamente de 4% respecto a la mezcla de referencia. Por otro lado, la capacidad de paso no fue afectada en esta serie.

Para ambas series (B y C) el valor del VSI fue de 0, lo que se puede traducir en una ausencia de segregación o sangrado en las mezclas [134]. Lo anterior fue comprobado a través de la prueba de columna de segregación, encontrando porcentajes de segregación de 0% para ambas series. Contrario a lo anterior la adición de SRA aumento la extensibilidad y la capacidad de paso en la serie “D”, mostrando índices de algún tipo de segregación en la mezcla D-2%. Al incorporar el SRA se modifica la tensión superficial de la solución de poro lo que tiene como consecuencia un aumento en la fluidez de la mezcla. El valor del VSI de la mezcla D-2.0% fue de 1, mostrando un ligero halo y una pequeña pila de agregado en el centro. Para la mezcla D-1.5% no se observó algún tipo de segregación, pero si se observó la formación de un pequeño halo en la circunferencia de la mezcla.

Tabla 21. Pruebas en estado fresco primera parte.

Serie	Clave	Extensibilidad (mm)	s	Anillo J (mm)	s	T ₅₀ (s)	s	VSI	Columna de segregación (%)	s
A (referencia)	A	624.00	11.40	574	15.16	5.02	0.95	0	0.0	0.0
	B-0.5%	537.0	12.71	491.8	14.46	7.3	0.58	0	0.0	0.0
B (fibra)	B-1.0%	495.40	17.68	469.40	13.63	-	-	0	0.0	0.0
	B-1.7%	425.60	9.83	418.40	10.01	-	-	0	0.0	0.0
	B-2.0%	440.40	10.15	410.00	7.25	-	-	0	0.0	0.0
C (fibra lavada)	C-1.0%	610.00	20.99	579.20	13.29	4.0	0.32	0	0.0	0.0
	C-1.7%	554.80	19.50	448.80	23.97	5.0	0.62	0	0.0	0.0
	C-2.0%	513.80	10.28	445.40	19.81	5.6	0.51	0	0.0	0.0
D (Aditivo)	D-0.5%	650.20	18.06	562.00	14.90	4.44	1.0	0	0.0	0.0
	D-1.0%	650.20	10.67	590.20	13.01	4.08	0.39	0	1.94	0.24
	D-1.5%	669.20	15.66	582.20	27.64	3.82	0.25	1	3.84	0.72
	D-2.0%	705.80	21.76	676.00	30.54	3.7	0.25	1	9.68	1.38
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.0%	600	23.7	546.20	12.80	5.34	0.16	0	0.0	0.0
	E-1.5%	620	22.6	558.20	15.05	5.00	0.29	0	0.0	0.0
	E-2.0%	629.20	10.72	566.40	14.40	4.86	0.35	0	0.0	0.0

En las series “B” y “C” se observó que la incorporación de fibra redujo la extensibilidad de las mezclas. En contraste, en la serie “D” la incorporación del SRA aumento este parámetro. En la serie “E” se pudo observar un efecto de compensación en la extensibilidad por la adición de fibra e incorporación de SRA, siendo la mezcla E-1.0% la que mostro mayor reducción de aproximadamente 4%. El bloqueo de las mezclas evaluado mediante el “anillo J” aumento en todas las series. Si bien el SRA aumenta la fluidez de la mezcla, el TMA utilizado (19 mm) y la modificación en la tensión superficial de la solución de poro, no permite que la mezcla tenga un mejor comportamiento comparando con las mezclas que no cuentan con esta tecnología.

La Tabla 22 nos muestra los resultados del contenido de aire atrapado obtenido a través del método de presión [138], peso unitario [139] y temperatura [140] medidos en todas la series. Conforme las series que incluían fibra eran evaluadas, se observó un incremento considerable en el contenido de aire; dicho incremento fue más notable en las mezclas de la serie “B” llegando a ser de hasta 18.3% para la mezcla B-2.0% que fue la mezcla que contenía la mayor cantidad de fibra sin lavar. La tendencia en el incremento de aire en la serie “B” no se vio afectada en gran medida por el porcentaje de fibra adicionado en cada mezcla ya que las mezclas que contaban con una menor cantidad de fibra (B-0.5%) arrojaron como resultado un 16.2% de aire atrapado.

Estos resultados nos muestran que el contenido de aire atrapado en CAC que incluya fibra sin lavar no será proporcional al contenido de fibra. Si bien la fibra por si sola incorpora aire, la mayoría del aire atrapado en esta serie es producto de la disolución en agua de los componentes que conforman la fibra y son solubles en este medio. El aumento en el contenido de aire atrapado en la serie "B" se vio reflejado en una disminución del peso unitario llegando a ser de hasta 2010.0 kg/m³ en la mezcla B-2.0%; vale la pena resaltar que esta mezcla fue la que presento el mayor aumento en el contenido de aire atrapado. Sin embargo, la reducción en el peso unitario persistió en las mezclas B-1.7%, B-1.0% y B-0.5%, dando como resultado 2018.0, 2028.0 y 2053.6 (kg/m³) respectivamente.

Tabla 22. Pruebas en estado fresco segunda parte

Serie	Clave	Aire (%)	s	Peso unitario (kg/m ³)	s	Temperatura (°C)	s
A (referencia)	A	2.44	0.15	2435.6	10.26	22.3	0.83
B (fibra)	B-0.5%	16.2	0.57	2053.6	24.75	23.1	0.74
	B-1.0%	16.7	0.84	2028.0	19.17	22.4	1.81
	B-1.7%	17.6	0.82	2018.8	7.65	22.4	0.82
	B-2.0%	18.3	0.67	2010.0	18.07	21.9	0.74
C (fibra lavada)	C-1.0%	3.6	0.32	2401.6	12.00	22.2	0.57
	C-1.7%	5.5	0.7	2347.6	12.27	22.0	0.75
	C-2.0%	7.0	0.76	2203.0	13.54	23.5	0.79
D (Aditivo)	D-0.5%	1.3	0.27	2436.6	8.29	21.7	0.27
	D-1.0%	1.0	0.22	2441.4	7.16	23.0	0.57
	D-1.5%	1.0	0.27	2464.6	10.81	22.4	0.89
	D-2.0%	1.0	0.35	2463.6	18.87	22.0	0.74
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.0%	1.0	0.00	2433.2	8.64	22.8	0.67
	E-1.5%	1.0	0.22	2435.6	6.73	23.0	0.61
	E-2.0%	1.0	0.27	2449.4	13.09	23.0	0.5

Por otra parte, el mayor contenido de aire atrapado que se presentó en la serie “C” fue en la mezcla “C-2.0” y fue de tan solo 7.0%. Vale la pena resaltar que la mezcla “B-2.0” y la “C-2.0” contaban con la misma cantidad de fibra incorporada como agente de curado interno, la única diferencia fue que en la mezcla “C-2.0” si incorporo fibra lavada y en la mezcla “B-2.0” fibra sin lavar. Esto nos da un indicio de que la mayor cantidad de aire atrapado que se incorpora en la mezcla al añadirle fibra sin lavar se le puede atribuir a los compuestos que son solubles en agua y modifican la tensión superficial de la solución produciendo burbujas (Fig. 37).

Cuando la fibra entra en contacto con el agua, los compuestos solubles modifican la tensión superficial de la solución, dando como resultado la generación de burbujas que incorporan aire en las mezclas, Sin embargo, una vez que la fibra es lavada, la mayoría de los subproductos que generan burbujas son eliminados (Fig. 37). Los resultados de contenido de aire en la serie “C” nos muestran que debido a su naturaleza porosa la fibra lavada incorpora una cantidad de aire en la mezcla. El aire atrapado incluido por la fibra lavada es proporcional al volumen de fibra que se utilice en la mezcla. Si bien el aumento de aire es menor, este efecto también puede verse reflejado en el peso unitario. La mezcla “C-2.0” fue la que presento la mayor reducción de la peso unitario en la serie “C” (2203 kg/m³) y también la que presento un mayor aumento en el contenido de aire atrapado de esa serie (7%).



Fig. 37 Fibra en contacto con agua: A) Fibra sin lavar, B) Fibra lavada.



Fig. 38 Lavado de la fibra para retirar componentes de la fibra solubles en agua: A) Fibra sin lavar, B) Fibra lavada

Para las mezclas de la serie D, la dosificación del SRA disminuyó el contenido de aire atrapado hasta llegar a un 1.0% en las series D-2.0%, D-1.5% y D-1.0%. La serie D-0.5% nos dio como resultado un 1.3%. Este beneficio persiste aun cuando hay presencia de fibra de lechuguilla en la mezcla, tal es el caso de la serie E, en la que se encontraron contenidos de aire de 1.0% para las mezclas E-1.0%, E-1.5% y E-2.0%.

Lo anterior se puede atribuir a que durante el mezclado el SRA disminuye la tensión superficial de la solución de poro lo que permite que gran parte de aire sea desalojado de la mezcla. Por otro lado, los resultados de temperatura en todas las series nos muestran que la fibra (lavada y sin lavar) y el SRA no tiene efecto sobre este parámetro, de igual manera no se consigue alguna variación de la temperatura cuando se mezclan ambas tecnologías. La temperatura de las mezclas en todas las series se mantuvo en el rango de 21.9 a 23.5°C.

8.2.2.2 Tiempos de fraguado

El tiempo de fraguado de las mezclas se evaluó según ASTM C 403 [141]. Los resultados de las distintas mezclas de CAC se observan en la Fig. 39. Se puede observar que la incorporación de fibra de Agave lechuguilla lavada puede retardar los tiempos de fraguado. La mezcla que sufrió un mayor retraso en los tiempos de fraguado en contraste con la mezcla "A", fue la mezcla C-2.0% sufriendo retraso inicial y final de 60 y 66 minutos respectivamente, De igual manera, en la mezcla C-1.5% se presentaron retrasos de 42 minutos para ambos tiempos de fraguado. La mezcla C-1.0% sufrió un retraso de 18 y 30 minutos correspondientes al fraguado final e inicial. Se puede observar una tendencia en el retraso de esta serie, dicha tendencia va acorde a la cantidad de fibra incorporada como agente de curado interno. A mayor volumen de fibra, mayor retraso del fraguado; lo anterior puede ser atribuido a varios factores, siendo uno de ellos la mayor cantidad de agua que internamente se incorpora en la mezcla al aumentar el porcentaje de fibra. De igual manera, otro factor son los subproductos de la fibra que al entrar en contacto con el agua se disuelven en la mezcla y modifican internamente la mezcla causando retrasos en el fraguado.

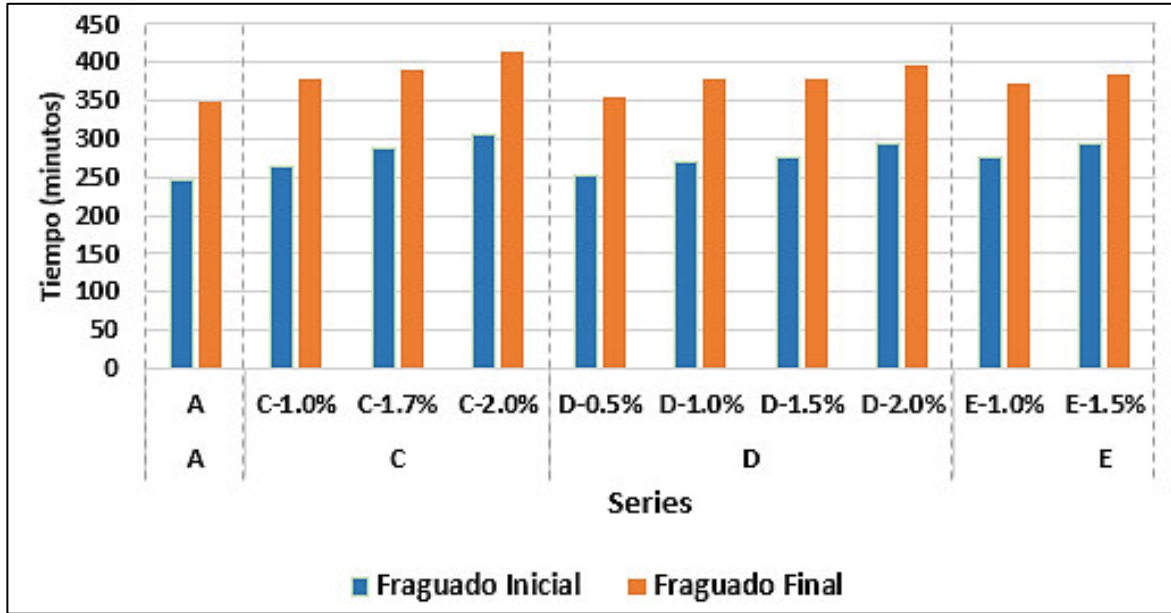


Fig. 39 *Tiempos de fraguado*

La adición del SRA también tuvo como consecuencia retrasos en el fraguado de las mezclas, esto puede ser visible observando los resultados de la serie “D”. El efecto que tiene este aditivo en la tensión superficial de la solución de poro tiene consecuencias en el fraguado de la mezcla, debido a que conforme se aumenta la dosis, el retraso es mayor, es decir, el retraso en el fraguado aumenta conforme se aumenta la dosis suministrada. Sin embargo, el retraso que se tiene como consecuencia de la utilización del SRA es menor que el retraso causado al agregar fibra de lechuguilla. El mayor retraso en la serie “D” se dio en la mezcla D-2.0% y fue de 48 minutos tanto en el fraguado final como en el fraguado inicial. Para la mezcla D-1.5% se encontró un retraso en el fraguado tanto inicial como final de 30 min y para la mezcla D-1.0% se encontró un retraso de 24 y 30 min en el fraguado inicial y final. La mezcla que mostro un menor retraso fue la mezcla D-0.5% y tuvo una variación mínima de aproximadamente 6 min en ambos fraguados respecto a la mezcla “A”.

Si bien ambas tecnologías retrasan el fraguado por si solas, cuando se combinan (Fibra y SRA) el retraso en el fraguado final e inicial es similar al que se presenta cuando solo se incorpora fibra de agave lechuguilla, contrario a lo que se esperaría de un retraso aún más significativo por la combinación de ambas tecnologías. La mezcla que presento menor retraso fue la E-1.0% que presento un retraso en el fraguado inicial de 12% y en el fraguado final de 6% respecto a la referencia. Los resultados numéricos de los tiempos de fraguado de todas las mezclas se pueden observar en la Tabla 23.

Tabla 23. Tiempos de fraguado de todas las series

Serie	Clave	Inicial	Final
		(Minutos)	
A (referencia)	A	246	348
C (fibra lavada)	C-1.0%	264	378
	C-1.7%	288	390
	C-2.0%	306	414
D (Aditivo)	D-0.5%	252	354
	D-1.0%	270	378
	D-1.7%	276	378
	D-2.0%	294	396
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.0%	276	372
	E-1.5%	294	384
	E-2.0%	294	390

8.2.3 Pruebas en estado endurecido

8.2.3.1 Resistencia a la compresión

Los especímenes se elaboraron según ASTM C 192 [142], se cabecearon siguiendo ASTM C 617 [144] y se ensayaron según ASTM C 39 [143]. En la Fig. 40 podemos observar de manera gráfica los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de las series A, B y C. Analizando los resultados podemos resaltar que se presentó una reducción significativa en la resistencia a la compresión en todas las mezclas que conforman la serie “B”, contrastando con la resistencia alcanzada por la mezcla de referencia (A). La mezcla que mostro la reducción más significativa fue la B-2% que contiene el porcentaje máximo de fibra (2% el volumen de concreto).

Esta reducción fue de 42% aproximadamente respecto a la resistencia alcanzada por la mezcla de referencia a los 28 días. El efecto adverso se le puede atribuir a los compuestos que conforman la fibra y son solubles en agua, entre ellos los taninos y las pectinas. Una vez que los compuestos entran en contacto con el agua comienzan a generar reacciones que tienen como consecuencia la generación de burbujas de aire. Los resultados en estado fresco mostraban un indicio de que un efecto como este se podría presentar en la serie “B”. La incorporación de la fibra mostro un aumento en el contenido de aire y una reducción en la peso unitario. Como consecuencia la resistencia a la compresión de las mezclas que contenían fibra se vio disminuida.

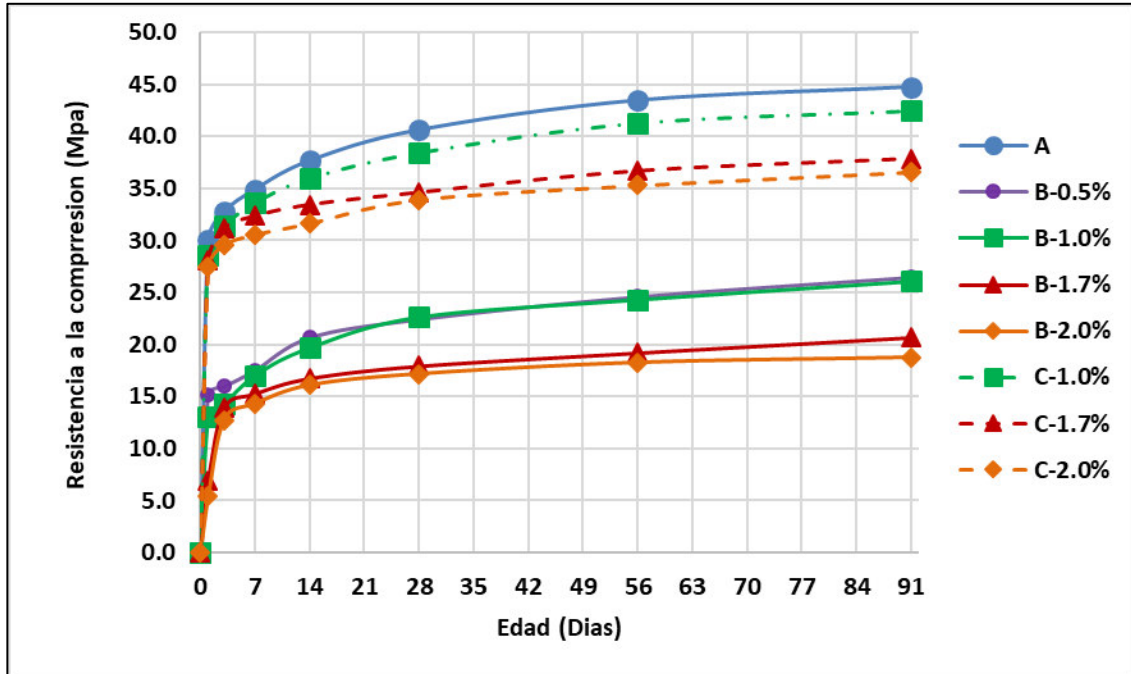


Fig. 40 Resistencia a la compresión de las series A, B y C

La serie “B” presento las reducciones más significativas de peso unitario y presento los mayores contenidos de aire, en consecuencia, la resistencia a la compresión se vio afectada adversamente. En la serie “C” el efecto de la incorporación de fibra se también se vio reflejado, pero en menor medida, debido a que la fibra que se utilizó en esta serie fue lavada previamente al mezclado del CAC. Si bien la incorporación de fibra de agave lechuguilla tiene como resultado un aumento en el contenido de aire y una reducción en el peso unitario, el lavado de la fibra puede disminuir claramente estos efectos adversos. Lo anterior puede ser sustentado con los resultados de las mezclas de la serie C, que mostro una reducción menor en la resistencia a la compresión, La mezcla C-2% que representa el mayor porcentaje de fibra sin lavar, solo mostro una reducción del 17%. El resto de las mezclas que conforman la serie “C” mostrar reducciones en la resistencia menores al 15% que la referencia a los 28 días.

Todos estos resultados nos dan un indicio de que los componentes que afectan las propiedades en estado fresco y en estado endurecido del concreto con fibras de Agave lechuguilla pueden ser claramente mitigados si se implementa el lavado de la fibra. Los resultados de la resistencia a la compresión de las serie A y C se muestran en la Fig. 41. La mayor reducción en la resistencia a la compresión para esta serie se dio en la mezcla D-2% siendo de 20% a los 28 días comparando con la mezcla A. Los resultados nos muestran que a mayor cantidad de SRA, mayor reducción en la resistencia a la compresión. Sin embargo, las resistencias alcanzadas en las series D-1.5%, D-1.0 y D-0.5% a la edad de 28 no fueron menores al 15% de la resistencia de la mezcla "A" a la misma edad.

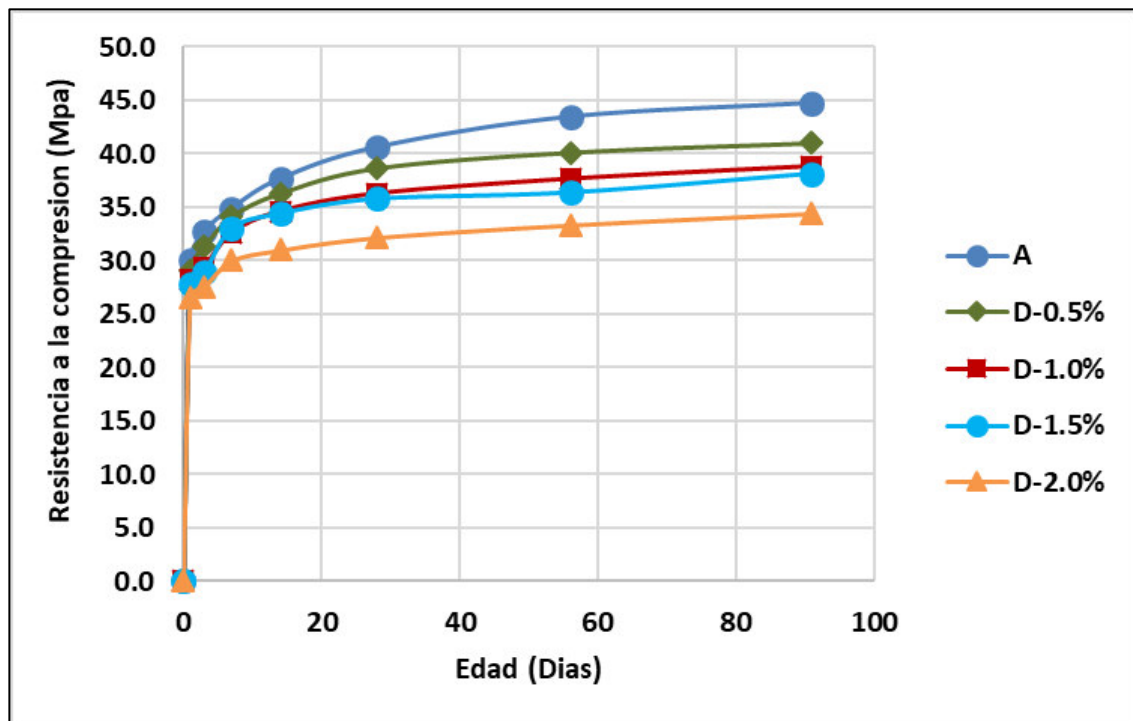


Fig. 41 Resistencia a la compresión de las series A y D

La Fig. 42 nos muestra la resistencia a la compresión de las mezclas A y E para todas las edades evaluadas. Para la serie “E” la mayor reducción de resistencia a los 28 días se observó en la mezcla E-2% y fue de tan solo 9%. La incorporación de la fibra en las mezclas tiene como resultado una disminución en la consistencia, sin embargo, cuando se agrega el SRA en la fluidez aumenta. Como resultado tenemos que las mezclas que cuentan con ambas tecnologías, no se ven afectadas en gran medida en cuanto a su consistencia se refiere porque las tecnologías se compensan entre sí, logrando un buen acomodo de partículas sin mostrar disminuciones significativas en la resistencia a compresión (reducciones menores al 15%). En las mezclas E1.0% y E-1.5% la disminución en la resistencia a la compresión fue menor al 9%.

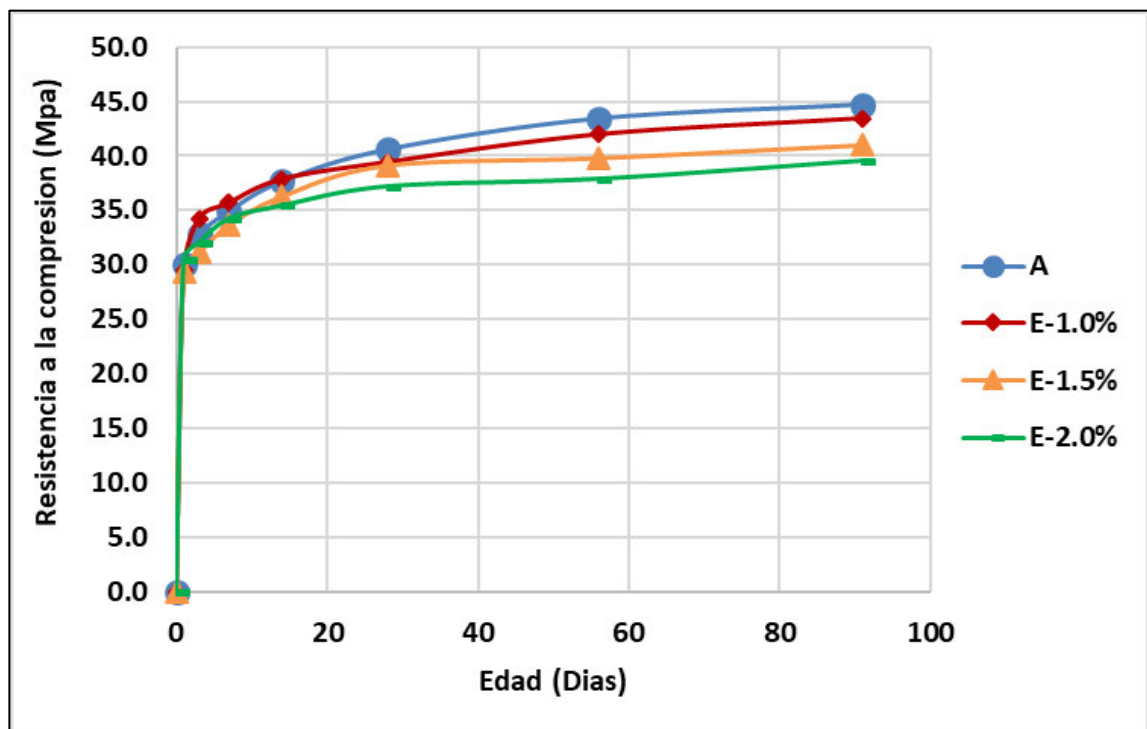


Fig. 42 Resistencia a la compresión de la serie A y E

En la Tabla 24 podemos encontrar los resultados numéricos de la resistencia a la compresión de todas las series evaluadas durante la investigación. La desviación estándar se reporta como una medición de la incertidumbre en la medición de la resistencia a la compresión.

Tabla 24. Resistencia a la compresión

Serie	Clave	Resistencia a la compresión (Mpa)													
		1d	s	3d	s	7d	s	14d	s	28d	s	56d	s	91d	s
A (referencia)	A	30.0	1.89	32.2	1.71	34.9	0.89	37.2	1.06	40.3	1.09	43.4	0.60	44.8	0.51
	B-0.6%	15.2	1.42	16.0	1.22	17.6	1.78	20.7	1.03	22.5	1.07	24.6	0.93	26.5	0.80
B (fibra)	B-1.0%	13.0	1.56	14.3	1.65	17.1	0.92	19.7	0.89	22.7	0.91	24.3	0.56	26.1	0.13
	B-1.7%	7.0	1.16	13.9	1.02	15.3	1.14	16.8	0.92	17.9	0.56	19.2	0.42	20.7	0.28
	B-2.0%	5.3	2.24	12.7	1.34	13.01	0.83	16.1	1.05	17.2	0.84	18.2	0.30	18.7	0.26
	C-1.0%	28.6	1.28	31.4	1.13	33.6	1.09	36.0	0.91	38.4	0.57	41.4	2.4	42.5	0.30
C (fibra lavada)	C-1.7%	28.1	1.20	31.2	1.10	32.4	0.89	33.4	0.85	34.6	0.9	36.8	0.85	37.9	0.69
	C-2.0%	27.5	1.28	29.6	1.25	30.6	1.02	31.7	0.76	33.9	0.87	35.3	0.78	36.6	0.64
	D-0.5%	29.0	2.20	31.3	2.20	34.1	1.66	36.3	1.89	38.6	1.11	40.1	0.99	41.0	0.79
D (Aditivo)	D-1.0%	28.2	2.07	29.4	1.91	32.7	1.95	34.6	1.8	36.3	1.32	37.7	1.26	38.8	0.92
	D-1.5%	27.9	1.77	28.9	1.72	33.0	1.68	34.1	1.38	35.8	1.27	36.4	1.31	38.1	1.18
	D-2.0%	26.6	2.12	27.7	2.05	30.1	2.13	31.0	1.88	32.2	1.66	33.3	1.31	34.4	1.07
	E-1.0%	29.5	2.59	34.2	2.29	35.7	1.76	37.9	1.9	39.5	1.49	42.0	1.35	42.7	0.75
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.5%	29.3	1.78	31.1	1.63	33.6	1.51	36.3	1.39	39.1	1.29	39.8	1.19	41.0	1.02
	E-2.0%	30.4	0.99	32.0	0.80	34.2	0.76	35.4	0.74	37.2	0.67	37.9	0.62	39.5	0.60

8.2.3.2 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad para todas las series fue calculado siguiendo la norma ASTM C 469 [145]. Los resultados se pueden observar gráficamente en la Fig. 43. Si bien, en la serie “C” no se encontraron repercusiones significativas en la resistencia a la compresión de las mezclas, si se observaron variaciones en el módulo de elasticidad estático de esta serie, ya que esta fue en la que se encontró la mayor variación, comparándolo con las otras series. La mayor reducción se encontró en la mezcla C-2% que fue de 10% a los 28 días y 9% a los 91 días contrastando contra la mezcla A.

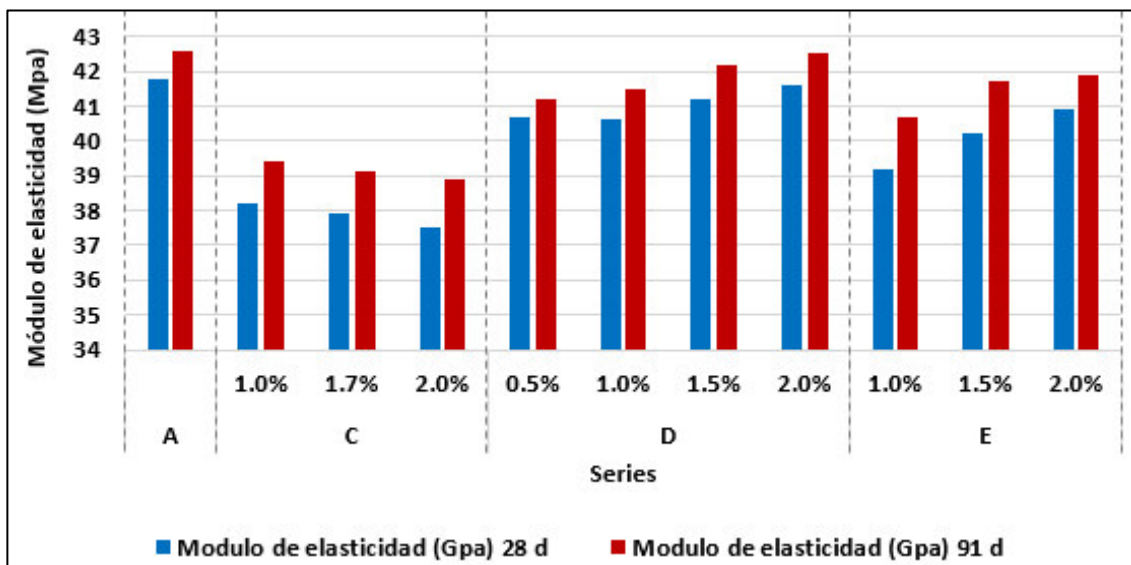


Fig. 43 Módulo de elasticidad estático

En todas las mezclas el módulo de elasticidad a 91 días fue mayor que el determinado a la edad de 28 días. El mayor aumento se dio en la mezcla “C-2%” y fue de 3.7% respecto al valor determinado a los 28 días. Por el contrario, el menor aumento se dio en la mezcla “A” siendo de tan solo 1.9% a los 91 días. Los resultados numéricos se pueden observar en la Tabla 25.

La tecnología que mostro una mayor influencia negativa en el módulo de elasticidad estático fue la fibra de lechuguilla lavada, sin embargo, su efecto no fue tan significativo en cuanto a la disminución del módulo se refiere. El SRA fue la tecnología que mostro una menor influencia en esta propiedad. En las mezclas que incluían tanto fibra de lechuguilla como SRA el comportamiento no difirió significativamente respecto a la mezcla de referencia "A", las variaciones máximas y mínimas a los 28 días para esta serie fueron de 0.9 y 0.2 Gpa respectivamente, mientras que las variaciones máximas y mínimas para la edad de 91 días fueron de 0.3 y 0.1 Gpa respectivamente.

Tabla 25. Módulo de elasticidad estático

Serie	Clave	Módulo de elasticidad (Gpa)			
		28 d	s	91 d	s
A (referencia)	A	41.8	1.49	42.6	1.10
C (fibra lavada)	C-1.0%	38.2	1.28	39.4	3.84
	C-1.7%	37.9	0.76	39.1	1.23
	C-2.0%	37.5	0.67	38.9	0.49
D (Aditivo)	D-0.5%	40.7	0.41	41.2	0.63
	D-1.0%	40.6	0.72	41.5	1.73
	D-1.5%	41.2	0.51	42.2	0.24
	D-2.0%	41.6	1.24	42.5	0.51
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.0%	39.2	2.34	40.7	3.41
	E-1.5%	40.2	0.59	41.7	1.34
	E-2.0%	40.9	1.54	41.9	3.22

8.2.4 Contracciones en el CAC

8.2.4.1 Contracción por secado

La contracción por secado en las mezclas se obtuvo siguiendo las indicaciones de ASTM C 157 [146]. La Fig. 44 nos muestra las contracciones que se presentaron en las distintas mezclas de la serie C y la serie A. La mayoría de las mezclas de la serie "C" mostraron un aumento en la contracción en todas las edades, excepto por la mezcla C-1.0%. La mezcla C-1.0% fue la mezcla que presentó una menor contracción en la serie C. A la edad de 91 días la mezcla C-1% presentó una reducción en la contracción de aproximadamente 12.8% respecto a la mezcla de referencia (Mezcla A) a los 91 días. La mezcla C-2.0% y C-1.7% mostraron un aumento en la contracción por secado de 10.07% y 4.47% respectivamente a la misma edad.

Los resultados nos muestran que conforme aumenta la cantidad de fibra y en su caso la cantidad de agua en la mezcla, se pueden presentar más contracciones en la matriz cementante debido a que se presenta una mayor cantidad de evaporación. Sin embargo, aunque la mezcla C-1% tiene una mayor cantidad de agua (agua aportada por la fibra) que la mezcla de referencia (mezcla A), podemos inferir que parte del agua es aprovechada para hidratar una mayor cantidad de cemento, debido a que se cuenta con una relación a/c 0.40, tomando en cuenta que la relación a/c = 0.42 es la que permite lograr el grado de hidratación $\alpha = 1$, por esta razón parte del agua que aporta la fibra es aprovechada y las contracciones por secado se ven reducidas.

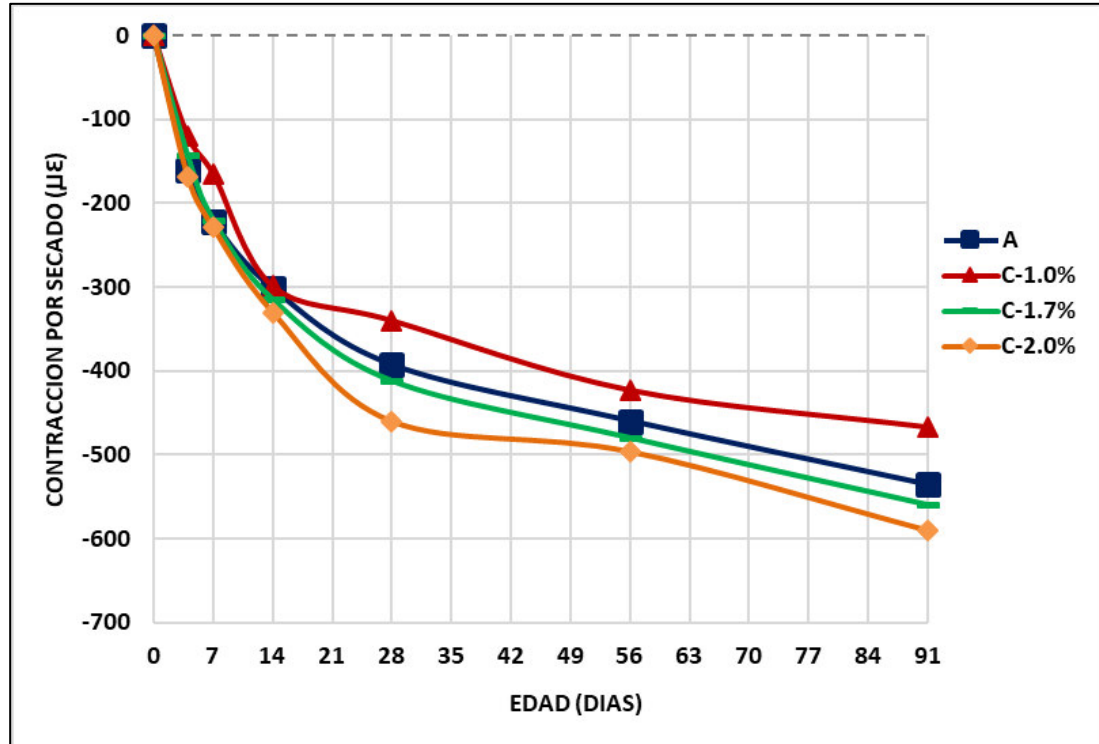


Fig. 44 Contracción por secado de las series A y C.

En la Fig. 45 podemos observar las mediciones de contracción correspondientes a las series “A” y “D”. Dichos resultados nos muestran que el SRA tiene una mayor eficiencia en la reducción de las contracciones por secado. Todas las mezclas de la serie “D” (mezclas que contaban con SRA) mostraron contracciones menores respecto a la mezcla “A” en todas las edades medidas. La mezcla que presentó una menor reducción en esta serie fue la mezcla D-2.0%; dicha mezcla contiene el mayor porcentaje de SRA respecto al peso de cemento (2.0%) para esta serie. A los 91 días, la mezcla D-2.0% presentó una reducción en las contracciones de aproximadamente 50% respecto a la mezcla A. Por otro lado, la mezcla que presentó la menor reducción en las contracciones para esta serie fue la mezcla D-0.5% que mostró una reducción de aproximadamente 3.3% para la misma mezcla en la misma edad.

Las mezclas D-1.0% y D-1.5% presentaron reducciones de 20.5 y 41.7% respectivamente en contraste con la referencia. Los resultados nos muestran de que la reducción en la contracción por secado es proporcional a la cantidad de SRA que se incorpore al momento de mezclar. Mayor cantidad de SRA tiene como consecuencia una menor presencia de agrietamiento producto del secado del elemento de CAC; esto es debido a que la reducción en la tensión superficial de la solución de poro aumenta. Lo anterior puede ser visible en los resultados de las pruebas en estado fresco, específicamente en la prueba de extensibilidad en la que se podía ver el efecto del SRA en la mezcla aumentando la extensibilidad. Además, en la prueba de columna de segregación se pudo observar dicho efecto mostrando indicios de segregación para las mezclas D-2.0% y D-1.5%, sin embargo, la segregación no fue mayor al 10% para ambas mezclas.

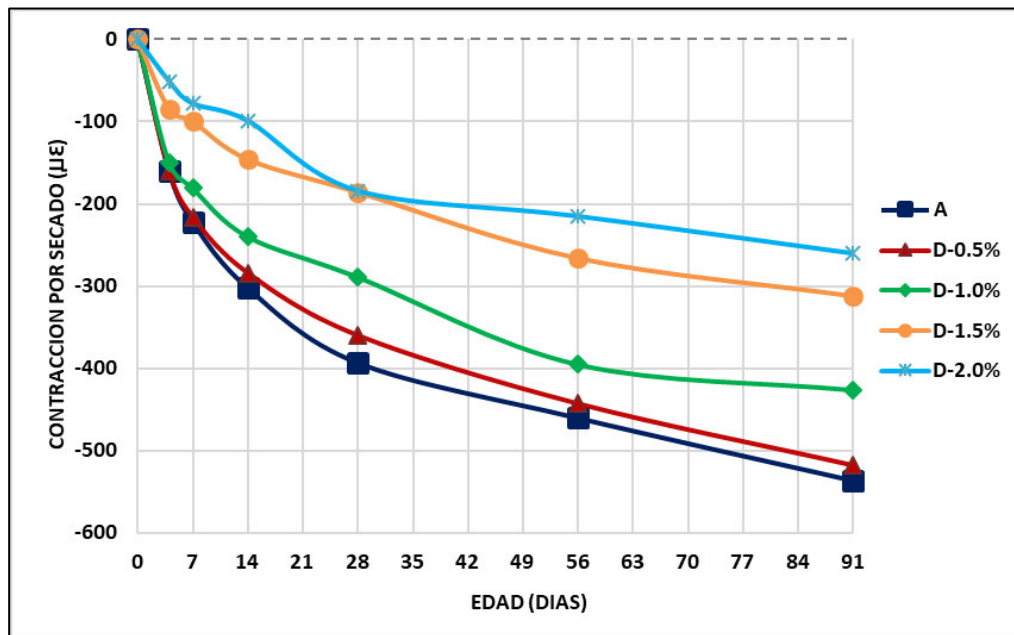


Fig. 45 Contracciones por secado de las series A y D

Los resultados de la serie A y E se muestran en la Fig. 46. La mayor reducción en la contracción por secado para la serie “E” se dio en la mezcla E-2.0% y fue de 55% aproximadamente. Este resultado es muy similar al logrado en la mezcla D-2.0%, vale la pena mencionar que ambas mezclas contaron con la misma cantidad de SRA (2% respecto al peso del cemento); sin embargo, la mezcla E-2.0% también incluyó 1% de fibra de agave lechuguilla. La menor reducción para esta serie se presentó en la mezcla E-1.0% y fue de 27.2% respecto a la mezcla “A” a los 91 días. Podemos observar que, aunque combinemos las dos tecnologías (fibra y SRA) los resultados en la reducción de las contracciones por secado no varían en gran medida respecto a la serie “D” que incluye solo SRA. Por lo que podemos determinar que la mayoría de las reducciones en este parámetro son consecuencia directa del SRA, lo anterior se resalta debido a que no se muestra una reducción significativa al combinar las dos tecnologías.

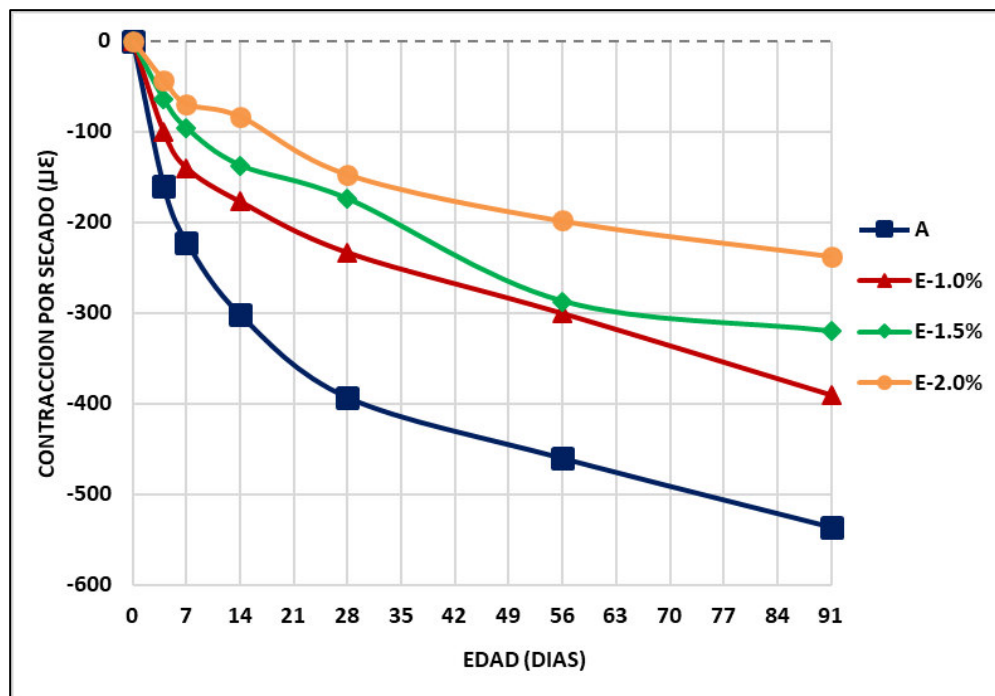


Fig. 46 Contracciones por secado de las series A y E

Los resultados numéricos de las mediciones de contracción por secado en todas las series se pueden observar en la Tabla 26

Tabla 26 Contracción por secado

	Clave	Curado (μm)		Secado (μm)											
		1d	s	4d	s	7d	s	14d	s	28d	s	56d	s	91d	s
A (referencia)	A	-81	0.20	-160	0.20	-222	0.20	-302	0.20	-393	0.20	-460	0.20	-536	0.20
C (fibra lavada)	C-1.0%	14	0.15	-120	0.15	-165	0.15	-299	0.15	-340	0.15	-423	0.15	-467	0.15
	C-1.7%	20	0.33	-143	0.33	-220	0.33	-315	0.33	-412	0.33	-480	0.33	-560	0.33
	C-2.0%	23	0.80	-168	0.80	-229	0.80	-330	0.80	-460	0.80	-496	0.80	-590	0.80
D (Aditivo)	D-0.5%	-57	1.06	-160	1.06	-216	1.06	-284	1.06	-360	1.06	-443	1.06	-518	1.06
	D-1.0%	-30	0.22	-150	0.22	-181	0.22	-240	0.22	-289	0.22	-395	0.22	-426	0.22
	D-1.5%	0	0.66	-85	0.66	-100	0.66	-146	0.66	-186	0.66	-266	0.66	-312	0.66
	D-2.0%	0	0.40	-51	0.40	-78	0.40	-99	0.40	-184	0.40	-215	0.40	-260	0.40
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.0%	9	0.11	-100	0.11	-140	0.11	-177	0.11	-233	0.11	-300	0.11	-390	0.11
	E-1.5%	8	0.58	-64	0.58	-96	0.58	-137	0.58	-174	0.58	-287	0.58	-320	0.58
	E-2.0%	9	0.75	-43	0.75	-69	0.75	-83	0.75	-147	0.75	-198	0.75	-237	0.75

8.2.4.2 Contracción autógena

La contracción autógena se determinó con base en la norma ASTM C 1698 [147]. Los resultados de la contracción autógena de la serie “A” y “C” se muestra en la Fig. 47. La incorporación de fibra de agave lechuguilla lavada en la serie “C” dio como resultado la disminución de la contracción en contraste con la referencia. La reducción más significativa a los 28 días de iniciada la prueba se dio en la mezcla C-2.0% y fue de aproximadamente 76.2%. Utilizando la ecuación 11 [16] y la ecuación 12 [46] se determinó que el porcentaje de 1.7% de fibra lavada saturada en agua mitigaría por completo la contracción autógena en el CAC. Sin embargo, los resultados nos muestran que la mezcla C-1.7% solo redujo la contracción autógena en un 72.0% lo anterior nos da un indicio de que no toda el agua de curado interno incorporada a través de la fibra de Agave lechuguilla es proporcionada a la mezcla. Parte del agua adsorbida por la fibra se queda atrapada en la porosidad de la fibra y de esta manera no se logra obtener una mitigación del 100% de la contracción autógena. Aun cuando se utilizó el 2% de fibra de agave lechuguilla no se logró eliminar por completo dicha contracción (Mezcla C-2.0%).

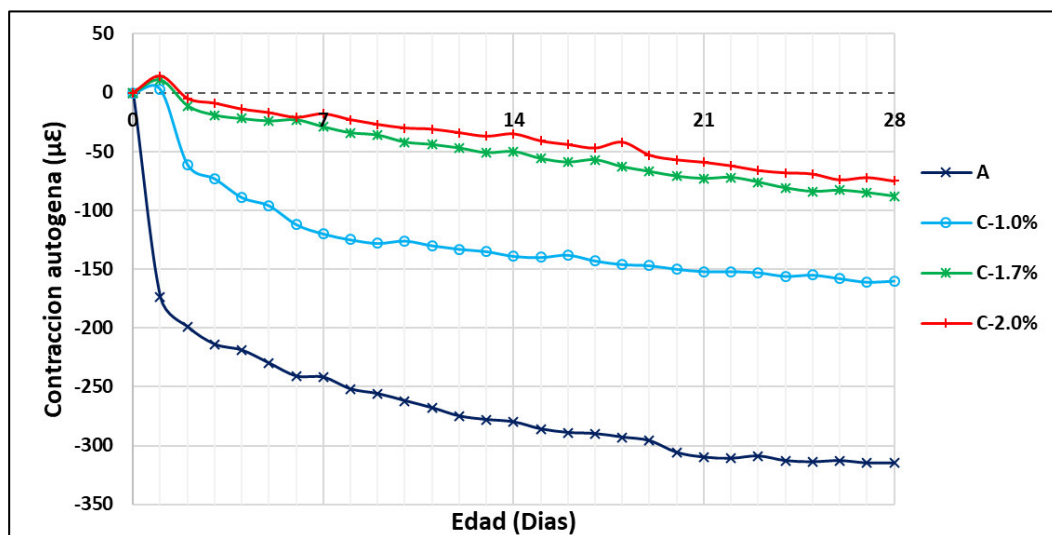


Fig. 47 Contracción autógena de las series A y C

Por otro lado, la mezcla C-1.0% dio como resultado una disminución en la contracción autógena a los 28 días de aproximadamente 49.20%. Todas la mezclas de la serie “C” sufrieron una pequeña expansión lo que les permitió reducir la contracción en la mezclas. Por otra parte, los resultados de las contracciones de las mezclas A y D se muestran en la Fig. 48. La reducción más significativa a la edad de 28 días se dio en la mezcla D-2.0% y fue de 66.7%, mientras que las mezclas D-1.5%, D-1.0% y D-0.5% mostraron reducciones de 52.0%, 37.8% y 15.6% respectivamente. Analizando los resultados de esta serie podemos determinar que conforme se aumenta la cantidad de fibra de lechuguilla (serie C) y la cantidad de SRA (serie D) se obtienen una mayor reducción en la contracción autógena en el CAC. No obstante, el porcentaje más alto de fibra (mezcla C-2.0%) dio como resultado una mayor reducción que la encontrada utilizando el porcentaje más elevado de SRA (mezcla D-2.0%) en esta experimentación.

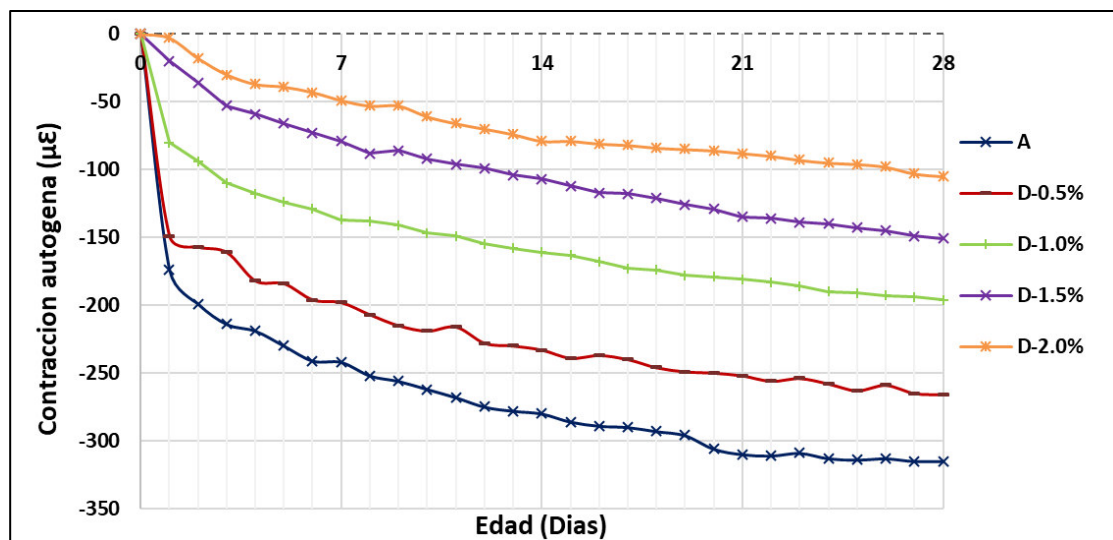


Fig. 48 Contracción autógena de las mezclas A y D

La Fig. 49 nos muestra la contracción autógena de las mezclas A y E. Analizando los resultados podemos observar que la menor contracción encontrada en esta serie a la edad de 28 días fue la determinada en la mezcla E-1.0% y dio como resultado un 41.9%.

Por su parte, la mezcla E-2.0% dio como resultado una reducción de 80.60% respecto a la mezcla “A” a la edad de 28 días. Dicha reducción se puede atribuir al efecto benéfico que se logra al combinar las dos tecnologías (SRA y fibra de Agave lechuguilla), incluso la reducción es ligeramente mayor a la obtenida al utilizar por separado los porcentajes más elevados de fibra (C-2.0%) y SRA (D-2.0%). La fibra de lechuguilla otorga agua necesaria para evitar la desecación de las microporosidades y de esta manera los esfuerzos capilares disminuyen teniendo como resultados una reducción en la contracción autógena. Por su parte, el SRA reduce la tensión superficial de la solución de poro en el CAC, mitigando de esta manera las deformaciones que se pueden presentar por la formación del menisco entre la solución de poro y la pared capilar. Aun así, los resultados muestran que no se logra eliminar por completo la contracción autógena en la mezcla que contiene la mayor cantidad de SRA y 1% de fibra (E-2.0%), pero si se logra una reducción significativa. Las mezclas E-1.5% y E-1.0% mostraron reducciones en la contracción autógena de 51.9% y 41.9%. Una mayor cantidad de SRA tiene como resultado una mayor reducción en este tipo de agrietamiento

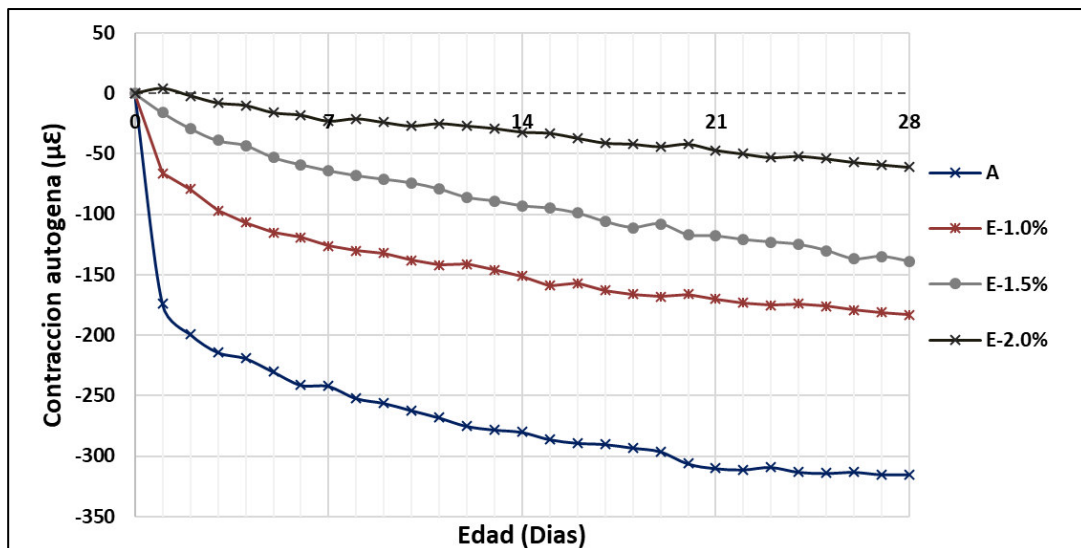


Fig. 49 Contracción autógena de las mezclas A y

8.2.5 Indicadores de durabilidad

8.2.5.1 Resistividad eléctrica

La resistividad de eléctrica se determinó de acuerdo con la norma AASHTO TP 95 [148]. Los resultados de las series A y C se muestra en la Fig. 50. La resistividad eléctrica de la mezcla C-2% fue la más baja registrada durante todas las edades. Todas las mezclas de la serie “C” presentaron valores menores de resistividad en todas las edades, aun así, la diferencia entre mediciones no es considerable ya que no superan los 4 kΩ-cm. Por otro lado, después de 91 días todas las mezclas de la serie “C” ya se encontraban en la zona moderada de penetración del ion cloruro [148]. A la edad de 56 días, las tres mezclas (C-1.0%, C-1.7% y C-2.0%) ya se encontraban prácticamente en la zona moderada.

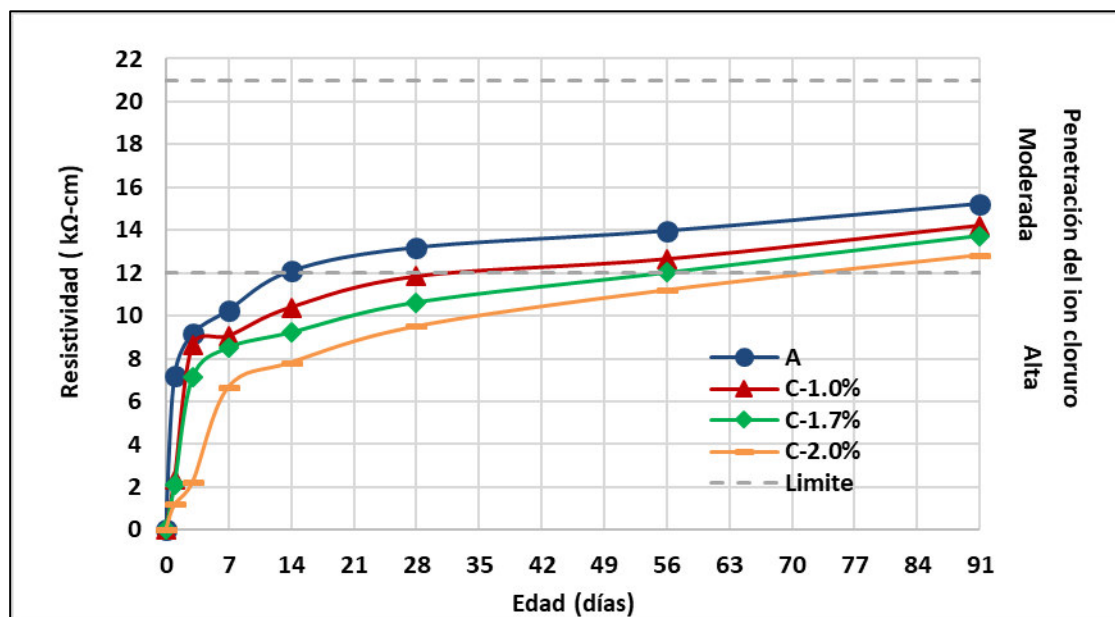


Fig. 50 Resistividad eléctrica de las series A y C

La Fig. 51 muestra la resistividad eléctrica de las series A y D. Los valores de las mezclas que incluían SRA muestran que las mezclas conservaron una tendencia en los valores, sin importar la cantidad de SRA que se le haya incorporado a la mezcla. A la edad de 91 días las mezclas presentaron un aumento de 3 kΩ-cm aproximadamente respecto a la mezcla “A”, aun así, no representa un cambio significativo. Sin embargo, todas las mezclas de esta serie (serie D) presentaron un ligero aumento, estos resultados dan indicio de que probablemente se creó un sistema de poros más refinado con un nivel ligeramente mayor de densificación. Es importante resaltar que a diferencia de la serie “C” en la que las mezclas se posicionaron en una zona moderada hasta la edad de 56 días, las mezclas de la serie “D” se colocaron en esta zona a la edad de 14 días.

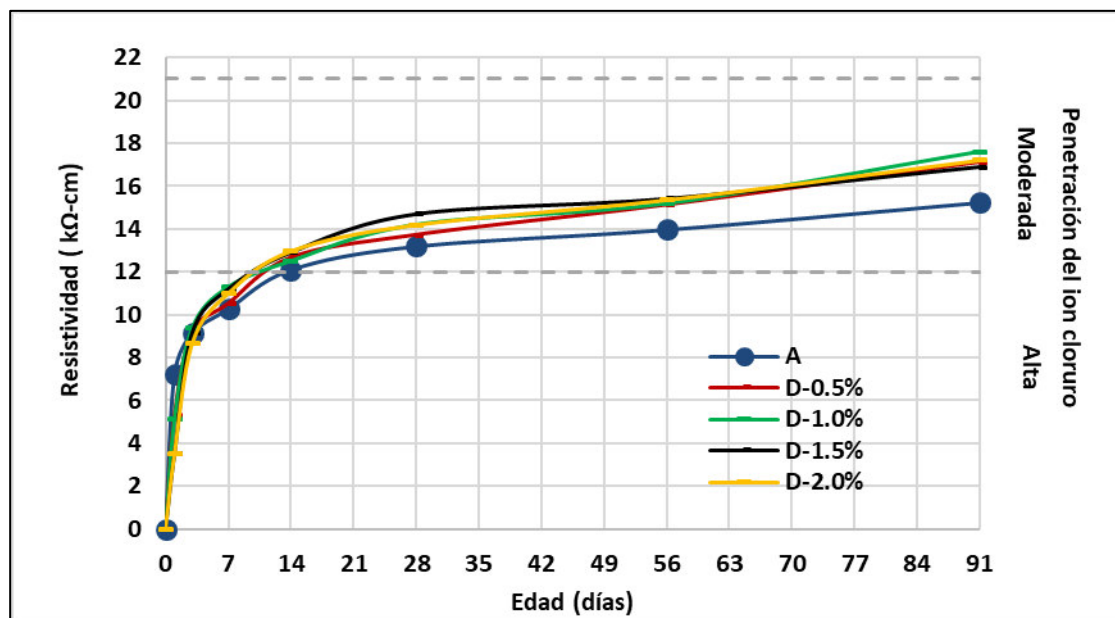


Fig. 51 Resistividad eléctrica de las series A y D

En la Fig. 52 se muestran los resultados de resistividad de las mezclas A y E. Las mezclas se posicionaron en la zona moderada a la edad de 14 días, y se mantuvieron en dicha zona hasta la edad de 91 días. Ninguna mezcla se posiciono en la zona baja de penetración del ion cloruro. Las mezclas E-1.0% y E-1.5% presentaron valores muy similares de resistividad en todas las edades.

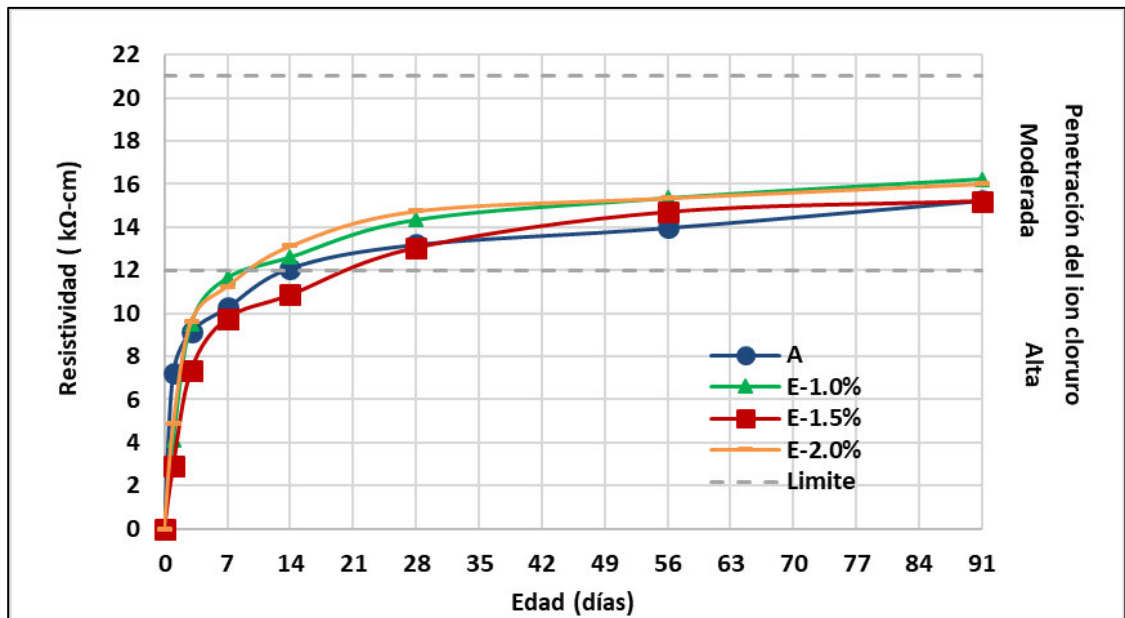


Fig. 52 Resistividad eléctrica de las mezclas A y E.

Los resultados numéricos de la resistividad eléctrica de todas las mezclas se observan en la Tabla 27.

Tabla 27 Resistividad eléctrica

Serie	Clave	Resistividad eléctrica (k Ω -cm)													
		1d	s	3d	s	7d	s	14d	s	28d	s	56d	s	91d	s
A	A	7.2	1.36	9.1	1.06	10.3	0.52	12.1	1.04	13.2	0.93	14.0	0.86	15.2	0.92
C	C-1.0%	2.1	0.52	7.1	0.99	8.5	0.78	9.2	0.43	10.6	1.10	12.0	1.12	13.7	0.61
	C-1.7%	2.4	0.38	8.6	0.65	9.1	0.56	10.4	0.65	11.8	0.74	12.6	0.90	14.2	0.62
	C-2.0%	1.2	2.11	2.2	0.64	6.7	0.42	7.8	1.83	9.5	1.24	11.2	1.02	12.8	0.88
D	D-0.5%	5.3	0.33	9.2	0.54	10.5	0.45	12.6	1.06	13.7	0.78	15.1	0.78	17.1	1.4
	D-1.0%	5.1	0.78	9.4	0.66	11.3	0.98	12.5	0.78	14.2	0.69	15.2	0.47	17.6	1.63
	D-1.5%	3.5	0.85	9.2	0.77	11.2	0.57	12.9	0.77	14.7	0.69	15.4	1.12	16.9	0.83
	D-2.0%	3.5	0.79	8.7	0.92	11.0	1.02	13.1	0.63	14.2	0.55	15.4	0.54	17.2	0.74
E	E-1.0%	4.1	0.58	9.5	0.69	11.6	0.83	12.6	0.57	14.3	0.74	15.3	0.91	16.2	1.16
	E-1.5%	2.9	1.08	7.4	0.69	9.8	0.74	10.9	0.99	13.0	0.41	14.7	0.42	15.2	1.12
	E-2.0%	4.9	0.34	9.6	0.46	11.3	0.84	13.1	0.14	14.7	0.57	15.3	0.82	16.1	0.82

8.2.5.2 Difusión del ion cloruro

La difusión del ion cloruro en los diferentes especímenes de todas las series se evaluó con base en la norma NORDTEST NT Build 443 [149]. Los resultados se pueden observar en la Fig. 53. Dicha figura muestra tres límites que dividen en zonas dependiendo de la intensidad con la que la difusión del ion cloruro se presenta en los especímenes, la clasificación es propuesta por Nilsson [156] para catalogar a las mezclas investigadas. Podemos observar que la mezcla de referencia se posiciono en una zona baja en cuanto a la difusión del ion cloruro se refiere. En la serie “C” se observa un aumento en la difusión, el mayor aumento se presentó en la mezcla C-2.0% y fue de 9.6% respecto a la referencia; la mezcla C-1.7% y C-1.0% tuvieron aumentos de 8.7 y 6.1% respectivamente. Lo anterior puede ser consecuencia de la naturaleza porosa de la fibra, así como las reacciones que provocan los subproductos que conforman las fibras de agave lechuguilla.

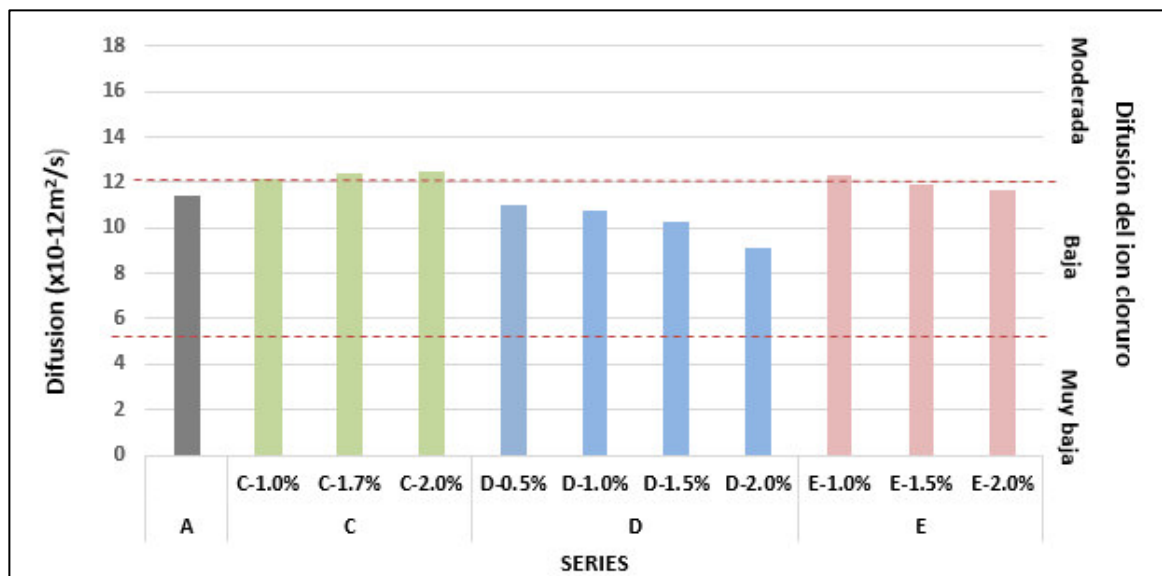


Fig. 53 Difusión del ion cloruro

Por otro lado, en la serie “D” pudimos observar una disminución en la difusión del ion cloruro. La mezcla que presentó la mayor disminución fue la D-2.0% y fue de 20.1%. Las mezclas D-1.5% y D-1.0% disminuyeron en un 9.6 y 5.2%, mientras que en la mezcla D-0.5% la difusión se redujo en un 3.5%. Los resultados nos indican que las mezclas que cuentan con SRA pueden lograr un mayor grado de densificación que las mezclas que incluyen fibra de agave lechuguilla e incluso la densificación puede ser mayor que la lograda en la mezcla de referencia. Si revisamos los resultados de resistividad eléctrica podemos observar que en la serie “D” se encuentran los valores de resistividad más altos, los resultados anteriores pueden ser consecuencia de un mejor acomodo de las partículas gracias a la disminución en la tensión superficial de la solución de poro y aun mayor refinamiento del poro.

A mayor porcentaje de SRA podemos encontrar menores valores de difusión; sin embargo, esta disminución no es significativa contrastando contra las zonas de la clasificación de Nilsson [149]. Aun con la disminución de la difusión del ion cloruro en las mezclas, las mezclas de la serie D continúan en una zona de difusión baja. En la serie “E” se presentaron valores más altos, siendo el más significativo el que se presentó en la mezcla E-1.0% que fue de 7.8%, mientras que en las mezclas E-1.5% y E-2.0% los valores de difusión aumentaron 4.3 y 2.6%. Al igual que en la serie “D” encontramos una relación directa entre la cantidad de SRA y la disminución de la difusión del ion cloruro. Si bien la fibra aumentó la difusión de ion cloruro en la serie “E”, al interactuar con el SRA dentro de la mezcla se disminuye gradualmente la difusión conforme la cantidad de aditivo aumenta. Los resultados numéricos se pueden observar en la Tabla 26.

Tabla 28. Difusión del ion cloruro en todas las series

Serie	Clave	Difusión	s
A (referencia)	A	11.4	0.11
C (fibra lavada)	C-1.0%	12.1	0.32
	C-1.5%	12.4	0.7
	C-2.0%	12.5	0.4
D (Aditivo)	D-0.5%	11	0.8
	D-1.0%	10.8	0.6
	D-1.5%	10.3	0.38
	D-2.0%	9.1	0.25
	E-1.0%	12.3	0.28
E (Fibra al 1% y aditivo)	E-1.5%	11.9	0.26
	E-2.0%	11.7	0.21

Capítulo 9. Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Conclusiones

Con base en los resultados experimentales obtenidos en esta investigación, las siguientes conclusiones fueron deducidas en función de la hipótesis y objetivos propuestos:

9.1.1 Propiedades en estado fresco

1. La fibra de Agave lechuguilla puede afectar las propiedades en estado fresco del CAC, disminuyendo su consistencia, incrementando el contenido de aire, disminuyendo el peso unitario y aumentando la viscosidad. Sin embargo, si la fibra es lavada las afectaciones se pueden reducir considerablemente debido a que la mayoría de los subproductos solubles en agua que conforman la fibra se eliminan durante el proceso de lavado.
2. El SRA tiende a incrementar la fluidez y reducir el contenido de aire de la mezcla de CAC debido a la disminución en la tensión superficial de la solución de poro, no obstante, conforme se aumenta la dosificación se puede tener una tendencia a la segregación de la mezcla.
3. El SRA y la fibra de lechuguilla no tienen un efecto en la temperatura del concreto, ni siquiera cuando se combinan ambas tecnologías.
4. La incorporación de fibra de agave lechuguilla lavada y SRA tiende a retardar los tiempos de fraguado de la mezcla de CAC. Aun así, el efecto es más significativo cuando solo se utiliza fibra de lechuguilla lavada.

9.1.2 Pruebas en estado endurecido

5. La incorporación de fibra de agave lechuguilla puede reducir significativamente la resistencia a la compresión llegando de hasta un 42% a los 28 días en la mezcla B-2%. Sin embargo, el lavado de la fibra puede eliminar los compuestos perjudiciales logrando así que las afectaciones no sean mayores al 15% en la resistencia a la compresión determinada a los 28 días, lo anterior puede ser visible en la mezcla C-2%.
6. El SRA disminuye la resistencia a la compresión, en la mezcla que contenía el mayor porcentaje de SRA no fue mayor al 20% a los 28 días.
7. Al agregarse tanto fibra de agave lechuguilla como SRA la reducción en la resistencia a la compresión no fue significativa pues todas las mezclas se mostraron reducciones menores al 10%.
8. La mayor reducción en el módulo de elasticidad determinado a los 28 y 91 días se encontró en las mezclas que contenían fibra de agave lechuguilla lavada sin embargo no fue superior al 8%. Las mezclas que contenía SRA y la combinación (SRA y fibra al 1%) no mostraron una reducción significativa en dicho parámetro.

8.1.3 Contracciones en el CAC

9. La incorporación de fibra de agave lechuguilla lavada en los porcentajes mayores al 1% mostraron un aumento en la contracción por secado de fibra debido a que se proporciona una mayor cantidad de agua en la matriz cementante. Mientras mayor sea el porcentaje de fibra agregado a la mezcla mayor será la contracción por secado. El aumento en la contracción por secado de las mezclas evaluada en la investigación no fue superior al 11% a los 28 días.

10. El SRA fue la tecnología que presentó una mayor eficiencia en la reducción de la contracción por secado y fue de aproximadamente 50% a los 28 días, su efecto fue visible en las mezclas de la serie D y E llegando a reducir dicha contracción hasta en un 50% aproximadamente.
11. La Fibra de lechuguilla lavada mostró gran eficiencia en la reducción de la contracción autógena llegando a reducirla en un 76% aproximadamente.
12. La mezcla C-1.7% que incluía el agua de curado interno recomendada por Jensen et al [16] no logró eliminar la contracción autógena en un 100%. La reducción en la contracción para esta serie fue de 72% a los 28 días. Con base en lo anterior se puede intuir que parte del agua de curado interno se queda atrapada dentro de las microporosidades de la fibra, por esta razón no se logra la reducción al 100% de la contracción autógena.
13. El SRA mostró gran eficiencia en la reducción de la contracción autógena, logrando reducciones de aproximadamente 66.7% a los 28 días.
14. Se confirmó la hipótesis planteada puesto que al incorporar fibra de lechuguilla y SRA en las mezclas se logró reducir la contracción autógena en un 80% a los 28 días.

9.1.4 Indicadores de durabilidad

- 10 Al incorporar fibra de lechuguilla en las mezclas se puede apreciar que los especímenes tardan hasta 56 días en posicionarse en una zona moderada de penetración del ion cloruro [148], mientras que la referencia lo logra a la edad de 14 días. Después de 91 días ambas mezclas continuaron en la zona moderada.

- 11 Las mezcla que incluían SRA mostraron valores ligeramente mayores de resistividad que la referencia a partir de los 28 días, sin embargo, después de 91 días los especímenes continuaron en zona moderada de penetración del ion cloruro.
- 12 Al incorporar la fibra de lechuguilla y el SRA no se observan cambios significativos en la resistividad, puesto que el comportamiento para todas las mezclas que incluían estas tecnologías fue muy similar a la referencia en todas las edades.

9.1.5 Difusión del ion cloruro

- 10 La fibra de agave lechuguilla aumento ligeramente la difusión del ion cloruro, posicionando todas las mezclas en la zona moderada [156]. La mezcla que presento el mayor aumento fue la C-2.0% y el aumento fue de 9%. Se puede observar una relación entre el aumento en el porcentaje de fibra y el aumento en la difusión del ion cloruro en las mezclas.
- 11 La adición de SRA dio como resultado la reducción en la difusión del ion cloruro, la mayor reducción se dio en la mezcla D-2.0% y fue de aproximadamente 20%. Sin embargo, los especímenes continuaron posicionándose en la zona baja [156] de difusión.
- 12 Las mezclas que incluyeron SRA y fibra de lechuguilla no mostraron un cambio significativo en cuanto a la difusión del ion cloruro se refiere

9.2 Recomendaciones

1. Al diseñar un concreto autocompactable se recomienda utilizar agregados con un TMA de agregado menor a 19 mm debido a que este agregado está al límite del establecido por EFNARC [13].
2. Al diseñar un CAC es recomendable saturar los agregados para evitar que estos absorban el aditivo superfluidificante y/o el SRA.
3. Lavar la fibra de agave lechuguilla para poder utilizarse como agente de curado interno, al lavar la fibra se eliminan gran parte de los componentes solubles en agua que perjudican las propiedades en estado fresco y en estado endurecido del CAC.
4. Secar la fibra y mantenerla en un lugar libre de humedad para evitar que el proceso de degradación natural se desarrolle.
5. Asegurarse de que las condiciones de laboratorio sean las óptimas para poder elaborar el CAC.
6. Diluir los aditivos en agua para tener una mejor distribución al momento de incorporarse al momento del mezclado.
7. Mantener las condiciones de laboratorio durante la elaboración de todas las pruebas, específicamente en las pruebas que de contracción donde un cambio de humedad relativa o temperatura puede dar una lectura errónea.

Trabajo futuro

- Realizar pruebas de durabilidad en el CAC que incluye fibras de lechuguilla como agente de curado interno para evaluar el efecto de la degradación natural en la fibra a largo plazo.
- Evaluar el efecto combinado de la fibra de lechuguilla como agente de curado interno y SRA con materiales cementantes suplementarios para aumentar la sustentabilidad de los elementos y ampliar el espectro de conocimiento.
- Evaluar mediante pruebas de carbonatación los elementos elaborados con fibras de Agave lechuguilla como agente de curado interno.

Bibliografía

- [1] A. Durán-Herrera, P. C. Aïtcin, and N. Petrov, "Effect of saturated lightweight sand substitution on shrinkage in 0.35 w/b concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. M06, pp. 48–52, 2007.
- [2] D. Cusson and T. Hoogeveen, "Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 757–765, 2008.
- [3] J. Zhang, Y. Han, J. Zhang, Z. Jun, H. Yudong, and Z. Jiajia, "Evaluation of Shrinkage Induced Cracking in Concrete with Impact of Internal Curing and Water to Cement Ratio," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 14, pp. 324–334, 2016.
- [4] ACI 318S-08. Requisitos para concreto estructural y comentario, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCyC), 2008.
- [5] Portland Cement Association (PCA), Diseño y control de mezclas de concreto. Skokie, Illinois, USA: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), 2004.
- [6] N. Quangphu, J. Linhua, L. Jiaing, T. Quian and D.m Tienquan, "Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete", *Water Sci. Eng*, vol. 1, no. 44, pp 67-44, 2008.
- [7] P. C. Aïtcin, "High performance concrete". *Modern concrete technology 5*. E & FN Spon, 1998.
- [8] ACI 318-05, Requisitos para concreto estructural y comentario, American Concrete Institute, 2007.
- [9] S. W. Yoo, S. J. Kwon and S. H. Jung, "Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures", *Construction and Building Materials.*, vol. 34, pp 1-10, 2012.
- [10] S. Zhutovsky and K. Kovler, "Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete with mineral and chemical admixtures," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 1, pp 20-26, 2012.

- [11] High Performance Concrete Technology Delivery Team, High Performance Concrete Structural Designers Guide, Federal Highway Administration`s. 2005.
- [12] V. M. Malhotra, "Innovative Applications of Superplasticisers in Concrete A Review", Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome, P. K., Metha, Editor, pp. 271-314, 1997.
- [13] EFNARC, "Guidelines for self-compacting concrete", UK:EFNARC, 2002.
- [14] Megaconstrucciones, "image: confederation-bridge", fecha de consulta: 23-03-18, Recuperado de: <http://megaconstrucciones.net/en/confederation-bridge/>
- [15] T.C. Powers and T.L. Brownyard, ""Studies of the physical properties of hardened Portland Cement pastes" Journal of the American Concrete Institute, USA., 1948.
- [16] O. M. Jensen. and P. Hansen. "Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background" Cement and Concrete Research, vol. 31, no. 4, pp. 647-654, 2001.
- [17] O. M. Jensen. and P. Hansen. "Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations" Cement and Concrete Research, vol. 32, no.6, pp. 973-978, 2002.
- [18] L. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang, and H. Wang, "Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review," Constr. Build. Mater., vol. 149, pp. 62–75, 2017.
- [19] O. M. Jensen, "Autogen deformation og RF-ændring: Selvudtørring og selvudtørringssvind" Tesis Doctoral. Universidad Técnica de Dinamarca, 1993.
- [20] National Ready Mixed Concrete Association. CIPIES 04/NRMCA. 1978, 1990 and 1990.
- [21] E. E. Holt, "Early age autogenous shrinkage of concrete". 184, s. I. : Technical Research Centre of Finland, Vol. 446, 2001.
- [22] E. Tazawa, S. Miyazama and T. Kasai, "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste", Cement and Concrete Research, Vol. 25, no. 2 pp. 288-292, 1995.
- [23] Craeye B. et al, "Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks", Construction and building materials, no. 25, pp.1-13, 2011.
- [24] S. Afzal, K. Shahzada, M. Ashraf, B. Alam, and K. Khan, "Autogenous Shrinkage in High-Performance Concrete-A Review," vol. 1, no. 1, 2012.

- [25] Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability. By Hoam Lam Portland Cement Association Research & Development Information Serial No. 2620.
- [26] T.C. Powers, T.L. Brownyard., "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste". Chicago: Research Laboratories of the Portland cement Association, vol. Bulletin 22, 1948.
- [27] M. Geiker, D. Bentz, and O. Jensen, "Mitigating autogenous shrinkage by internal curing," ACI Spec. Publ., vol. 218, pp. 143–148, 2004.
- [28] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff and W. C. Panarese, "Design and Control of concrete Mixtures" Portland Cement Association, 2004.
- [29] R. Silbey, R. Alberty & M. Bawendi. "Physical chemistry". Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [30] S. P. Shah, W. J. Weiss, & W. Yang, "Shrinkage Cracking--Can It Be Prevented?", Concrete International, vol. 20, no. 4, pp. 51-55, 1998.
- [31] D. Bentz, M. Geiker, & K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars", Cement and Concrete Research, vol. 31, no. 7, pp. 1075-1085, 2001.
- [32] P. C. Aïtcin, "Ingeniería de los Cementantes Hidráulicos", 1° Edición, pp. 188-263, 1998.
- [33] J. Zhang, Y. Han, J. Zhang, Z. Jun, H. Yudong, and Z. Jiajia, "Evaluation of Shrinkage Induced Cracking in Concrete with Impact of Internal Curing and Water to Cement Ratio," J. Adv. Concr. Technol., vol. 14, pp. 324–334, 2016.
- [34] IMCYC, "Construcción y Tecnología", pp. 35-36, s.l. vol. 246, 2008.
- [35] S. Zhutovsky, K. Kovler, and A. Bentur, "Effect of hybrid curing on cracking potential of high-performance concrete," Cement and Concrete Research., vol. 54, pp. 36–42, 2013.
- [36] ACI 224-01, "Control de fisuración de estructuras de concreto". pp. 12-13, 2001.
- [37] S. Ahmed, A. I. Bukhari, J. L. Sddiqui, S. A. Qureshi, "A Study on Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete", CI-premier Pte. Ltd., Singapore, pp. 11, 2006.

- [38] J. Mora-Ruacho, R. Gettu, and A. Aguado, "Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete", *Cement and Concrete Research*, no. 39, pp. 141-146, 2009.
- [39] NRMCA, "Concrete in Practice Series". Silver spring, MD, 2015.
- [40] L. Pietro, "Plastic shrinkage and cracking", *Concrete Construction Chemistry*. EMPA, 2011.
- [41] K. Ramujee, "Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no. 8, 2013.
- [42] G. M. Sadiqul and S. Das, "Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete", *International Journal of Sustainable Built Environment*, no. 5, pp. 345-354, 2016.
- [43] J. T. Corral, "Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención"; *Ciencia y Sociedad*, pp. 72-114, Republica Dominicana: Instituto tecnológico de Santo Domingo, vol. 29, no.1, 2004.
- [44] ACI Committee 308, "ACI 308R-01-Guide to Curing Concrete", Farmington Hills, Michigan, USA, American Concrete Institute, 2008.
- [45] Mather, B., "Self-Curing Concrete, Why Not?" *Concrete International*, vol. 23, no. 1, pp. 46-47, 2001.
- [46] D. Bentz, P. Lura and J. W. Roberto, "Mixture Proportioning for Internal Curing", *Concrete International*, vol. 27, no. 2, pp. 35-40, 2005.
- [47] K. Kovler and O. M. Jensen, "Novel Techniques for Concrete Curing," *Concrete International*, vol. 27, no. 9, pp. 39-42, 2005.
- [48] J. Castro, I. De la Varga, M. Golias and W. Weiss, "Extending Internal Curing Concepts to Mixtures Containing High Volumes of Fly Ash". *International Bridge Conference*, 2010.
- [49] ACI Committee 116, "ACI 116; Terminología del cemento y el concreto". Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2013.
- [50] R. Silbey, R. Albery and M. Bawendi, "Physical chemistry", Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc, 2005.

- [51] D. P. Bentz and W. J. Weiss, "Internal curing: a 2010 state-of-the-art review", Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 2011.
- [52] O. M. Jensen, and P. Lura, "Techniques and materials for internal water curing of concrete". Rilem, vol. 39, pp. 817-825, 2006.
- [53] M. Ozawa and H. Morimoto, "Reduction of Autogenous Shrinkage in Cement Paste by IC Using Jute Fiber". En 2. & Committees 231, A. K. Schindler, J. Grygar, & W. Weiss, ACI SP-290, The Economics, Performance, and Sustainability of Internally Cured Concrete, Toronto, Ontario, Canada: ACI, pp. 1-12, 2012.
- [54] R. Dávila, "Fibra natural de lechuguilla para el curado interno de concretos de alto comportamiento", Tesis Maestría, UANL, 2016.
- [55] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C125, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2007.
- [56] R. Rixom and N. Mailganam, "Chemical admixtures for concrete", 3a ed. E & FN Spon, 1999.
- [57] Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability. By Hoam Lam Portland Cement Association Research & Development Information Serial No. 2620
- [58] ACI committee E-701. ACI education bulletin E403. Chemical admixtures for concrete. American Concrete Institute.
- [59] P. C. Aitcin, "Binders for durable and sustainable concrete" Modern concrete Technology Series. Taylor and Francis group editorial.
- [60] Sant G. et al. "The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures" Cement and concrete research, vol. 41, pp. 218-229, 2011.
- [61] D. Bentz et al. "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars" Cement and concrete research, vol. 31, pp.1075-1085, 2001.
- [62] R. Tomita, "Concrete" lybrary of JSCE, vol. 6, no. 19, pp. 233-245, 1992.
- [63] ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2002.
- [64] B. Arnon and S. Mindess, "Fibre Reinforced Cementitious Composites", Modern Concrete Technology Series, Taylor and Francis group editorial. no. 2, pp. 13-18, 2007.

- [65] J. Nitin, R. Mishra and H. Thakur, "Natural Fibre Reinforce Compoiste Laminates – A Review*", *Materialstoday: Proceedings*, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, no. 2, pp. 2868-2877, 2015.
- [66] A. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering". *Compos Struct*, no. 86, pp.3–9, 2008.
- [67] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 575–581, 2011.
- [68] V. John, M. C. Cincotto, V. Agopyan, C. Oliveira, "Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre". *Cem Concr Compos*, vol. 27, no. 5, pp. 565–574, 2007.
- [69] C. Yan and S. Mindess, 'Bond between epoxy coated reinforcing bars and concrete under impact loading', *Can. J. Civ. Eng*, no. 21, pp. 89–100, 1994.
- [70] B. Barr and M.K. Lee, "FRC guidelines in the UK, with emphasis on SFRC in floor Slabs", in A. Ahmad, M. di Prisco, C. Meyer and S.P. Shah (eds) *Fiber Reinforced Concrete – From Theory to Practice*, Int.Workshop on Advances in Fiber Reinforced Concrete, Starrylink-Editrice, Bergamo, Italy, pp. 29–38, 2005.
- [71] R. Filho, K. Ghavami, M. Sanjuán and G. England, "Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres". *Cem Concr Compos*, vol 27, no.5, pp. 537–546, 2005.
- [72] S. Al-Oraimi, A. Seibi, "Mechanical characterization and impact behavior of concrete reinforced with natural fibres", *Compos Struct*, vol. 32, no. 1-4, pp. 165-171, 1995.
- [73] J. Reis, "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete". *Constr Build Mater*, vol. 20, no. 9, pp. 673-678, 2006.
- [74] H. Savastano, S. Santos, M. Radonjic, W. Soboyejo, "Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites", *Cem Concr Compos*, vol. 31, no. 4, pp. 232-243, 2009.
- [75] J. Silva, D. Rodrigues, Dias. "Compressive strength of low resistance concrete manufactured with sisal fiber", 51° Brazilian congress of ceramics, Salvador, Brazil; 2007.

- [76] C. Juárez, G. Fajardo, S. Monroy, A. Duran-Herrera, P. Valdez, and C. Magniont, "Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 164–170, 2015
- [77] H. C. Gram, "Durability of natural fibres in concrete, concrete technology and design", natural fibre reinforced cement and concrete, vol. 5 London: Blackie and Son Ltd.; pp. 143–72, 1988.
- [78] H. E. Gram, "Natural fibre concrete roofing". Concrete technology and design, natural fibre reinforced cement and concrete, vol. 5, London: Blackie and Son Ltd.; pp. 256–84. 1998.
- [79] R. D. Toledo, K. Scrivener, G. England, K. Ghavami, "Durability of alkali-sensitive sisal and coconuts fibres in cement mortar composites". *Cem Concr Compos*, vol. 22, no. 2, pp. 127–143, 2000.
- [80] K. Ghavami "Bamboo as reinforcement in structure concrete elements", *Cem Concr Compos*, vol 27, no. 6, pp.637–649, 2005.
- [81] G. Tonoli, A. Joaquim, M. Arsne, K. Bilba, H. Savastano, "Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp". *Mater Manuf Process*, vol. 22, no. 2, pp. 149–156, 2007.
- [82] B. Mohr, J. Biernacki, K. Kurtis, "Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber cement-composites", *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 7, pp.1531–1543, 2007.
- [83] C. Juárez, A. Durán, P. Valdez, and G. Fajardo, "Performance of 'Agave lechuguilla' natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1151–1157, 2007.
- [84] H. Belmares, A. Barrera, E. Castillo, and M. Monjaras, Capítulo V: Problemas y perspectivas tecnológicas de las fibras duras; El Uso de Fibras Naturales Duras como material de construcción. En C. Cruz, *Biología y aprovechamiento integral del henequén y otros agaves*. San Cristobal de las Casas, Chiapas, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, pp. 231-242, 1985.
- [85] J. E. Carmona, T. K. Morales-Martínez, S. I. Mussatto, D. Castillo-Quiroz, L. J. Ríos-González, "Chemical, structural and functional properties of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.)", *Rev. Mex. Cienc. Forest*, no. 8, pp. 1–16, 2017.

- [86] E. Alderete and J. Aguirre, "Diferenciación de sitios y condición de agostaderos del noreste del estado de Zacatecas", *Revista Chapingo*, pp. (35-58), 1982.
- [87] R. Berlanga, R. González and L. Franco, "Metodología para la evaluación y manejo de lechuguilla en condición natural". Folleto técnico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, SARH, no. 1, vol. 21, 1992.
- [88] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), "Estudio orientado a identificar los mercados y canales de comercialización internacionales para la oferta de productos de ixtle con valor agregado", Integradora de Ixtleros de Zacatecas S. A. de C. V., Promercado, 2009, recuperado de: http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/IXTLE.pdf, fecha de consulta: 24-08-2018.
- [89] S. Sheldon, "Ethnobotany of Agave lechuguilla and Yucca carnerosana in Mexico's Zona Ixtlera", *Economic Botany*, vol. 34, no. 4, pp. 173–190, 1980.
- [90] D. Castillo, R. Berlanga and A. Cano, "Recolección, extracción y uso de la fibra de lechuguilla (agave lechuguilla torr.) en el estado de Coahuila". Publicación especial, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, publicación especial, no. 6, 2005.
- [91] E. Mayorga-Hernández, D. Russell-Kipping, H. Ortiz-Laurel, A. Quero-Carrillo, A. Amante-Orozco, "Análisis comparativo en la calidad de la fibra de Agave lechuguilla Torr., procesada manual y mecánicamente", *Agrociencia*, no. 38, pp. 219–225, 2004.
- [92] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), "Procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de cogollos (NOM-008-SEMARNAT-1996)". cd. de México: SEMARNAT, 1996.
- [93] P. Nobel, "Los Incomparables Agaves Y Cactus". 1. ed. en español. México, D.F.: Editorial Trillas, 1998.
- [94] A. González and A. Scheffel, "Las zonas áridas del centro y norte de México", Instituto Mexicano de los Recursos Naturales Renovables, Cd. de Mexico, 1964.

- [95] M. Orozco, R. Nava, R. Armijo, and J. Gasto, "Investigación silvoagropecuaria de las zonas áridas de México. Monografía Técnico-Científica", Monografía Técnico-Científica, vol. 3, pp. 182-265, 1977.
- [96] A. García and A. Sicilia, "El mercado mundial de las fibras duras", Mérida, Yucatán, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, 1984.
- [97] C. Nieto, "La lechuguilla", Xalapa, Veracruz, México: Instituto Nacional de Investigación sobre Recursos Bióticos, 1983.
- [98] C. Juárez, "Concreto base cemento Portland reforzado con fibras naturales (Agave lechuguilla)", San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México: Facultad de Ingeniería Civil, UANL, 2002.
- [99] P. Klieger, "Early High Strength Concrete for Prestressing", Proceedings World Conference on Prestressed Concrete, A5-1 to A5-14, 1957.
- [100] R. Philleo, "Concrete Science and Reality", En J. Skalny, & S. Mindess, Materials Science of Concrete II, Westerville, OH, USA: American Ceramic Society, pp. 1-8, 1991.
- [101] S. Weber and H. Reinhardt, "A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete", En I. Holand, T. Hammer, & F. Fluge, Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway: Norwegian Concrete Association, pp. 662-671, 1995.
- [102] K. Van Breugel and H. de Vries, "Mixture Optimization of Low Water/Cement Ratio in view of Reduction of Autogenous Shrinkage". En P. Aïtcin, & Y. Delagrave, Proceedings of the International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Quebec, Canada: University of Sherbrooke, pp. 365-382, 1998.
- [103] A. Bentur, S. Igarishi and K. Kovler, "Control of Autogenous Stresses and Cracking in High Strength Concretes". En Proceedings of the 5th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway: Norwegian Concrete Association, pp. 1017-1026, 1999.

- [104] B. Mohr, L. Premenko, H. Nanko, and K. Kurtis, "Examination of Wood-Derived Powders and Fibers for Internal Curing of Cement-Based Materials", En D. Bentz, L. Nilsson, & B. Persson, Proceedings of the 4th International Seminar: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Gaithersburg, Maryland, USA: Lund Institute of Technology, Lund University, pp. 229-244, 2005.
- [105] N.V. Tuan, G. Ye, K.V. Breugel, "Internal curing of ultra-high-performance concrete by using rice husk ash", *Mater. Struct.*, 2010.
- [106] M. Wyrzykowski, S. Ghourchian, S. Sinthupinyo, N. Chitvoranund, T. Chintana, P. Lura, "Internal curing of high performance mortars with bottom ash", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 71, pp. 1–9, 2016.
- [107] F. Liu, J. Wang, X. Qian, J. Hollingsworth, "Internal curing of high performance concrete using cenospheres", *Cem. Concr. Res.*, vol. 95, pp. 39–46, 2017.
- [108] S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur, "Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes", *Cem. Concr. Res.*, vol.41, no. 9, pp. 981-986, 2011.
- [109] W. Siriwatwechakul, J. Siramanont, W. Vichit-Vadakan, "Behavior of superabsorbent polymers in calcium- and sodium-rich solutions", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 8, pp. 976–980, 2012.
- [110] B. Craeye, M. Geirnaert, and G. D. Schutter, "Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–13, 2011.
- [111] M. T. Hasholt, O. M. Jensen, K. Kovler, and S. Zhutovsky, "Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 226–230, 2012.
- [112] V. Mechtcherine et al., "Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 3, pp. 541–562, 2013.

- [113] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, M. Shekarchi, and B. Ahmadi, "An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 135–144, 2013.
- [114] G. R. de Sensale and A. F. Goncalves, "Effects of Fine LWA and SAP as Internal Water Curing Agents," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 229–238, 2014
- [115] H.K. Kim, H.K. Lee, "Autogenous shrinkage reduction with untreated coal bottom ash for high-strength concrete", *ACI Mater. J.* vol. 113, no. 3, pp. 277–285, 2016.
- [116] H. K. Kim and H. K. Lee, "Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 91, no.1 January, pp. 67–75, 2018.
- [117] S. Zhutovsky and K. Kovler, "Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 311–316, 2017.
- [118] P. Jongvisuttisun, J. Leisen, and K. E. Kurtis, "Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 107, no. February, pp. 206–220, 2018.
- [119] K. Matulová and S. Un, "Effect of Shrinkage Reducing Admixtures (SRA) on Selected Properties of Cement Mortars," vol. 1, no. 4, pp. 278–282, 2014.
- [120] F. Rajabipour, G. Sant, and J. Weiss, "Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 5, pp. 606–615, 2008.
- [121] M. S. Meddah, M. Suzuki, and R. Sato, "Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 239–250, 2011.
- [122] M. José Oliveira, A. B. Ribeiro, and F. G. Branco, "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 267–275, 2014.
- [123] American Society Testing Materials (ASTM), Committee C01, ASTM C 150; Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [124] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), NMX-C-414-ONNCCE-2014; Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo. cd. de México: ONNCC, 2014.

- [125] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, (ONNCCE) S. C. NMX-C-111-ONNCCE, “Industria de la construcción–Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Prueba”, México, 2004.
- [126] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C 494, “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”, West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2010.
- [127] ACI Committee 237, “ACI 237R-07 –Self-Consolidating Concrete”, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2007.
- [128] American Society Testing Materials, Committee C01, ASTM C188; Standard test method for density of hydraulic cement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [129] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C127; Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2007.
- [130] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C128; Standard test method for density, relative density (Specific Gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2007.
- [131] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C29; Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [132] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C136; Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2006.
- [133] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C566; Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying. Conshohocken, PA, USA: ASTM, 1997.
- [134] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C1611; Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [135] Ready Mixed Concrete Association of Ontario (RMCAO), Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete, Appendix A. Ontario, Canada, 2009.

- [136] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C1621; Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [137] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C1610; Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2006.
- [138] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C231; Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method¹. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [139] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C138; Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [140] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C1064; Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [141] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C403; Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2008.
- [142] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C192; Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [143] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C39; Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [144] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C617; Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.

- [145] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C469; Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2002.
- [146] American Society Testing Materials, Committee C09, ASTM C157; Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2008.
- [147] American Society Testing Materials, ASTM C1698; Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2009.
- [148] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), AASHTO TP 95; Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, D.C.: AASHTO, 2011.
- [149] NORDTEST, NT Build 443; Accelerated chloride penetration. Espoo, Finland: NORDTEST, 1995.
- [150] J. Castro, A. E. Naaman, "Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers" ACI Journal, Proceedings, vol. 78, no. 1, pp. 69-78, 1981.
- [151] M. A. Azis, P. Paramaswivam, S. L. Lee, "Concrete Reinforced with Natural Fibers", Concrete Technology and Design, New Reinforced Concretes, vol. 2, pp. 106-140, 1984.
- [152] S. D. Hwang, H. K. Khayat and O. Bonneau, "Performance-based specifications of self-consolidating concrete used in structural applications", ACI materials journal, vol.103, no. 2, pp. 121-129, 2006.
- [153] L. Nilsson, M. Ngo & O. Gjrv, "High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg". En O. Gjrv, K. Sakai, & N. Banthia, Concrete under severe conditions: environment and loading, Troms, Noruega: E & FN Spon vol. 2, pp.1193-1198, 1998.

Anexos

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

A.1 Pruebas en estado fresco

A.1.01 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie A

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
A-1	630	590	40	0	5.21	0	2.2	2444	23
A-2	620	570	50	0	4.61	0	2.6	2431	21
A-3	640	590	50	0	4.01	0	2.4	2449	22
A-4	610	560	50	0	6.54	0	2.5	2428	23
A-5	620	560	60	0	4.73	0	2.5	2426	22.5
Promedio	624	574	50	0	5.02	0	2.44	2435.6	22.3
Desviación estándar	11.40	15.16	7.07	0	0.95	0	0.15	10.26	0.83
Nominal según norma	620	570	50	0	5.0	0	2.0	2440	22.0

A.1.02 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie B-0.6%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
B-0.6%	560	490	70	0	7.2	0	15.5	2089.00	23
B-0.6%	523	465	58	0	8.4	0	16.0	2070.0	23
B-0.6%	540	506	34	0	6.9	0	16.5	2035.0	24
B-0.6%	532	496	36	0	7.4	0	17.0	2033.0	23.5
B-0.6%	530	502	28	0	7.1	0	16.0	2041.0	22
Promedio	537.00	491.8	45.2	0	7.3	0	16.2	2053.6	23.1
Desviación estándar	12.71	14.46	16.03	0	0.5874	0	0.57	24.75	0.74
Nominal según norma	540	490	50	0	7.4	0	16.0	2030	23.0

A.1.03 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie B-1.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
B-1.0%	510	455	55	0	8	0	16.0	2050.0	21.0
B-1.0%	487	459	28	0	-	0	17.0	2041.0	20.0
B-1.0%	490	466	24	0	-	0	16.5	2010.0	24.0
B-1.0%	520	462	19	0	7	0	18.0	2031.0	24.0
B-1.0%	490	481	39	0	-	0	16.0	2006.0	23.0
Promedio	495.40	469.4	33.0	0	-	0	16.7	2028.0	22.4
Desviación estándar	17.68	13.63	12.82	0	-	0	0.84	19.17	1.81
Nominal según norma	500	470	30	0	-	0	17.0	2030	22.0

A.1.04 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie B-1.7%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
B-1.7%	434	427	7	0	-	0	18.0%	2002	23
B-1.7%	422	418	4	0	-	0	18.0%	2010	22.5
B-1.7%	418	409	9	0	-	0	16.5%	2022	23
B-1.7%	414	406	9	0	-	0	17.0%	2005	22.5
B-1.7%	440	432	8	0	-	0	18.5%	2011	21
Promedio	425.6	418.4	7.2	0	-	0	17.6%	2010	22.4
Desviación estándar	9.83	10.01	1.72	0	-	0	0.82	7.65	0.82
Nominal según norma	430	420	10	0	-	0	18.0	2010	22.0

A.1.05 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie B-2%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
B-2%	441	415	35	0	-	0	18	2009	21.5
B-2%	446	420	8	0	-	0	19	2002	22
B-2%	439	405	48	0	-	0	19	2030	21
B-2%	437	400	42	0	-	0	18	2008	23
B-2%	439	414	16	0	-	0	17.5	2045	22
Promedio	440.40	410.08	29.8	0	-	0	18.3	2018.8	21.9
Desviación estándar	10.15	7.25	15.32	0	-	0	0.67	18.07	0.74
Nominal según norma	440	410	30	0	-	0	18.0	2020	22.0

A.1.06 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie C-1.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
C-1.0%	630	580	50	0	3.8	0	4.0	2391.0	22.0
C-1.0%	594	570	24	0	3.8	0	3.5	2387.5	21.0
C-1.0%	640	600	40	0	4.2	0	3.5	2415.3	22.0
C-1.0%	585	561	24	0	4.4	0	4.0	2404.2	21.5
C-1.0%	605	585	20	0	3.6	0	3.0	2410.0	22.5
Promedio	610.80	579.20	31.60	0	3.96	0	3.60	2401.6	21.8
Desviación estándar	20.99	13.29	11.48	0	0.32	0	0.42	12.00	0.57
Nominal según norma	610	580	30	0	4.0	0	3.5	2400	22.0

A.1.07 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie C-1.7%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
C-1.7%	586	471	115	0	5.6	1	5.0	2349.0	22.0
C-1.7%	530	480	50	0	4.4	0	4.5	2327.0	23.5
C-1.7%	542	445	97	0	4.2	0	5.5	2354.3	22.0
C-1.7%	550	433	117	0	5.2	0	5.0	2346.0	21.5
C-1.7%	566	415	151	0	5.4	0	6.0	2359.0	22.0
Promedio	554.80	448.80	106.0	0	4.96	0	5.20	2347.06	22.20
Desviación estándar	19.50	23.97	33.00	0	0.62	0	0.57	12.27	0.75
Nominal según norma	540	490	106	0	5.0	0	5.0	2350	22.0

A.1.08 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie C-2%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
C-2%	530	469	61	0	4.8	1	7.0	2193.0	24.0
C-2%	510	453	57	0	5.6	0	8.5	2189.0	23.5
C-2%	520	460	60	0	5.4	0	7.0	2223.0	24.5
C-2%	500	416	84	0	6.2	0	6.5	2209.0	23.0
C-2%	509	429	80	0	5.8	0	7.0	2201.0	22.5
Promedio	513.80	445.40	68.4	0	5.56	0	7.2	2203.0	23.5
Desviación estándar	10.28	19.81	11.25	0	0.51	0	0.76	13.56	0.79
Nominal según norma	520	450	70	0	5.6	0	16.0	2200	23.0

A.1.09 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie D-0.5%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
D-0.5%	661	556	105	0	4.4	0	1.5	2441.0	21.5
D-0.5%	639	579	60	0	4.7	0	1.5	2449.0	22.0
D-0.5%	621	580	41	0	4.6	0	1.0	2429.0	21.5
D-0.5%	672	543	129	0	3.9	0	1.5	2433.0	21.5
D-0.5%	658	552	106	0	4.6	0	1.0	2431.0	22.0
Promedio	650.20	562.00	88.20	0.00	4.44	0.0	1.3	2436.6	21.70
Desviación estándar	18.06	14.90	32.52	0.00	0.32	0.0	0.27	8.29	0.27
Nominal según norma	650	560	90	0	4.4	0	1.5	2440	22.0

A.1.10 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie D-1.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
D-1.0%	664	610	54	2.1	4.6	0	1.5	2446.0	23.5
D-1.0%	652	589	63	1.6	4.3	0	1.0	2437.0	23.0
D-1.0%	647	577	70	2.2	3.6	0	1.0	2433.0	23.0
D-1.0%	656	599	57	2.0	3.6	0	1.0	2440.0	22.5
D-1.0%	632	576	56	1.8	4.1	0	1.0	2451.0	22.0
Promedio	650.20	590.20	60.0	1.94	4.08	0.0	1.1	2441.4	22.80
Desviación estándar	10.67	13.01	5.83	0.24	0.39	0.0	0.22	7.16	0.57
Nominal según norma	650	590	60	2.0	4.0	0	1.0	2440	23.0

A.1.11 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie D-1.5%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
D-1.5%	650	540	110	3.7	3.9	0	1.0	2477.0	23.0
D-1.5%	684	606	78	4.9	4.1	1	1.0	2472.0	21.0
D-1.5%	690	618	72	3.1	4.0	1	1.5	2450.0	22.0
D-1.5%	667	569	98	3.3	3.6	0	1.0	2466.0	23.0
D-1.5%	655	578	77	4.2	3.5	0	1.5	2458.0	23.0
Promedio	669.20	582.20	87.00	3.84	3.82	0.6	1.2	2464.6	22.40
Desviación estándar	15.66	27.64	14.53	0.72	0.25	0.55	0.27	10.81	0.89
Nominal según norma	670	580	130	3.8	3.82	1	1.0	2460	22.0

A.1.12 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie D-2.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
D-2.0%	675	667	8	8.8	4.0	1	1.0	2440.0	23.0
D-2.0%	688	662	26	10.3	3.5	1	1.5	2468.0	21.0
D-2.0%	710	631	79	7.9	3.7	1	1.0	2440.0	22.0
D-2.0%	721	705	16	11.5	4.1	2	1.5	2451.0	22.0
D-2.0%	735	715	20	9.9	3.6	2	1.0	2489.0	22.5
Promedio	705.80	676.00	39.80	9.68	3.78	1.4	1.2	2463.6	22.10
Desviación estándar	21.76	30.54	25.29	1.38	0.25	0.54	0.27	18.87	0.74
Nominal según norma	710	680	30	9.7	3.8	1	1.5	2440	22.0

A.1.13 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie E-1.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
E-1.0%	597	534	63	0	5.3	0	1.0	2423.0	22.0
E-1.0%	616	565	51	0	5.6	0	1.0	2435.0	22.5
E-1.0%	609	553	56	0	5.4	0	1.0	2438.0	23.5
E-1.0%	600	549	51	0	5.2	0	1.0	2426.0	23.5
E-1.0%	589	530	59	0	5.2	0	1.0	2444.0	22.5
Promedio	602.20	546.20	56.00	0.00	5.34	0.0	1.0	2433.2	22.80
Desviación estándar	9.41	12.80	4.65	0.00	0.16	0.0	0.00	8.64	0.67
Nominal según norma	600	550	60	0	5.4	0	1.0	2430	22.0

A.1.14 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie E-1.5%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
E-1.5%	639	574	65	0	5.3	0	1.0	2447.0	22.0
E-1.5%	626	542	84	0	5.2	0	1.0	2436.0	23.5
E-1.5%	616	568	48	0	5.4	0	1.0	2433.0	23.5
E-1.5%	605	554	36	0	4.7	0	1.0	2432.0	23.0
E-1.5%	613	538	75	0	4.9	0	1.5	2430.0	23.0
Promedio	619.80	558.20	61.60	0.00	5.1	0.0	1.1	2435.6	23.0
Desviación estándar	11.72	15.05	17.51	0.00	0.29	0.0	0.22	6.73	0.6
Nominal según norma	620	560	60	0	5.0	0	1.0	2440	23.0

A.1.15 Repetibilidad de las propiedades en estado fresco en la Serie E-2.0%

Mezcla	Extensibilidad (mm)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Segregación (%)	T ₅₀ (s)	VSI	Aire (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Temperatura (°C)
E-2.0%	642	574	105	0	4.4	0	1.0	2438.0	22.0
E-2.0%	622	542	60	0	4.7	0	1.0	2439.0	23.5
E-2.0%	639	568	41	0	4.8	0	1.5	2456.0	23.5
E-2.0%	630	554	129	0	5.1	0	1.0	2445.0	23.5
E-2.0%	613	538	106	0	5.3	0	1.5	2469.0	23.0
Promedio	630.20	555.20	88.20	0.00	4.86	0.0	1.2	2449.4	23.20
Desviación estándar	10.72	14.06	32.52	0.00	0.32	0.0	0.27	13.09	0.75
Nominal según norma	630	560	90	0	4.8	0	1.0	2450	23.0

A.2 Pruebas en estado endurecido

A.2.1 Resistencia a la compresión

A.2.1.1 Resistencia a la compresión de la mezcla A (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
A	27.84	33.48	34.98	38.31	39.61	44.05	43.60
A	31.35	32.90	35.94	37.09	39.79	42.85	46.44
A	30.84	30.26	33.84	36.20	37.94	43.31	44.20
Promedio	30.01	32.2	34.92	37.20	40.33	43.40	44.79
Desviación estándar	1.89	1.71	1.05	1.06	1.09	0.60	0.51
Nominal según norma	30.0	32.2	34.9	37.2	40.3	43.4	44.8

A.2.1.2 Resistencia a la compresión de la mezcla B-0.6% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
B-0.6%	16.80	17.34	19.30	21.84	23.54	25.63	27.20
B-0.6%	15.60	15.93	17.83	20.49	22.67	24.53	26.35
B-0.6%	13.98	14.89	15.74	19.80	21.41	23.78	26.0
Promedio	15.28	16.05	17.62	20.71	22.54	24.64	26.51
Desviación estándar	1.42	1.22	1.78	1.03	1.07	0.93	0.61
Nominal según norma	15.3	16.1	17.6	20.7	22.5	24.6	26.5

A.2.1.3 Resistencia a la compresión de la mezcla B-1.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
B-1.0%	11.30	12.90	16.10	19.82	21.77	23.99	26.34
B-1.0%	14.35	13.93	17.80	18.86	22.85	24.98	26.10
B-1.0%	13.40	16.14	17.58	20.65	23.59	24.02	26.12
Promedio	13.01	14.32	17.16	19.77	22.73	24.33	26.18
Desviación estándar	1.56	1.65	0.92	0.89	0.91	0.56	0.13
Nominal según norma	13.0	14.3	17.1	19.8	22.7	24.3	26.1

A.2.1.4 Resistencia a la compresión de la mezcla B-1.7% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
B-1.7%	5.88	12.91	14.21	17.90	18.60	18.90	20.89
B-1.7%	8.21	14.96	15.22	16.61	17.530	19.10	20.45
B-1.7%	7.01	13.89	16.49	16.13	17.76	19.72	20.98
Promedio	7.03	13.92	15.30	16.86	17.96	19.24	20.77
Desviación estándar	1.16	1.02	1.14	0.92	0.56	0.42	0.28
Nominal según norma	7.0	13.9	15.3	16.9	18.0	19.2	20.7

A.2.1.5 Resistencia a la compresión de la mezcla B-2.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
B-2.0%	7.90	13.78	13.86	15.03	16.42	18.53	18.99
B-2.0%	4.18	12.99	12.97	16.50	17.22	17.93	48.46
B-2.0%	3.87	11.34	12.19	16.99	18.10	18.22	18.74
Promedio	5.31	12.70	13.01	16.17	17.24	18.22	18.73
Desviación estándar	2.24	1.34	0.83	1.02	0.84	0.30	0.26
Nominal según norma	5.3	12.8	13.0	16.1	17.2	18.2	18.7

A.2.1.5 Resistencia a la compresión de la mezcla C-1.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.0%	29.58	32.65	34.40	36.94	39.04	41.77	42.82
C-1.0%	27.12	30.50	34.19	36.10	38.12	41.61	42.46
C-1.0%	28.99	31.14	32.41	35.11	37.99	40.89	42.22
Promedio	28.56	31.43	33.66	36.05	38.38	41.42	42.5
Desviación estándar	1.28	1.10	1.09	0.91	0.57	0.46	0.30
Nominal según norma	28.6	31.4	33.6	36.0	38.4	41.4	42.5

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla C-1.7% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.7%	29.33	32.16	33.54	33.93	35.31	37.56	38.60
C-1.7%	26.93	30.09	31.77	32.42	33.59	35.87	37.22
C-1.7%	27.92	31.95	33.03	33.86	34.96	36.88	37.88
Promedio	28.06	31.40	32.40	33.40	34.62	36.77	37.90
Desviación estándar	1.20	1.13	0.89	0.85	0.90	0.85	0.69
Nominal según norma	28.1	31.4	32.40	33.40	64.6	36.8	37.9

A.2.1. 2 Resistencia a la compresión de la mezcla C-2.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-2.0%	28.91	30.32	31.66	32.17	34.56	36.02	37.25
C-2.0%	26.41	28.15	29.87	30.81	32.91	34.47	35.96
C-2.0%	27.15	30.31	31.32	32.11	34.22	35.40	36.58
Promedio	27.49	29.6	30.59	31.69	33.90	35.30	36.60
Desviación estándar	1.28	1.25	1.02	0.76	0.87	0.78	0.64
Nominal según norma	27.5	29.6	30.6	31.7	33.9	35.3	36.6

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla D-0.5% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
D-0.5%	31.46	33.56	34.99	38.38	39.44	41.02	41.80
D-0.5%	27.22	29.16	31.66	34.66	37.34	39.04	40.21
D-0.5%	28.30	31.02	33.21	35.85	39.01	40.22	40.97
Promedio	29.0	31.24	33.28	36.30	38.60	40.10	41.00
Desviación estándar	2.2	2.20	1.66	1.89	1.11	0.99	0.79
Nominal según norma	29.0	31.2	33.28	36.3	38.6	40.1	41.0

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla D-1.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
D-1.0%	26.52	27.27	30.88	34.51	37.01	38.41	39.01
D-1.0%	27.54	29.78	32.44	32.86	34.79	36.28	37.79
D-1.0%	30.52	31.13	34.76	36.50	37.18	38.51	39.59
Promedio	28.19	29.41	32.69	34.63	36.33	36.74	37.74
Desviación estándar	2.07	1.96	1.95	1.81	1.32	1.26	0.92
Nominal según norma	28.2	29.4	32.7	34.60	36.3	36.7	37.7

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla D-1.5% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.7%	29.90	30.44	34.83	35.47	36.58	37.18	39.02
C-1.7%	26.46	27.02	31.51	32.71	34.33	34.89	36.78
C-1.7%	27.38	29.23	32.64	34.22	36.47	37.14	38.54
Promedio	27.92	28.90	33.00	34.14	35.80	36.41	38.12
Desviación estándar	1.77	1.72	1.68	1.38	1.27	1.31	1.18
Nominal según norma	27.9	28.9	33.0	34.1	35.8	36.4	38.1

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla D-2.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
D-2.0%	28.95	29.23	32.16	32.80	33.19	34.11	35.30
D-2.0%	24.78	28.38	30.21	31.16	33.13	34.09	34.78
D-2.0%	26.14	25.32	27.88	29.03	30.27	31.81	33.23
Promedio	26.63	27.65	30.09	31.00	32.20	33.34	34.44
Desviación estándar	2.12	2.05	2.13	1.88	1.66	1.31	1.07
Nominal según norma	26.6	27.7	30.1	31.0	32.2	33.3	34.4

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla E-1.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.7%	32.35	36.78	37.69	39.32	40.45	42.83	43.28
C-1.7%	27.26	32.39	34.25	35.85	37.75	40.43	41.89
C-1.7%	28.91	33.41	35.24	38.52	40.22	42.73	43.11
Promedio	29.51	34.20	35.72	37.90	39.48	42.0	42.76
Desviación estándar	2.59	2.29	1.76	1.81	1.49	1.35	0.75
Nominal según norma	29.5	34.2	35.7	37.9	39.5	42.0	42.76

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla E-1.5% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.7%	31.23	32.80	35.16	37.17	39.68	40.44	41.58
C-1.7%	27.69	29.53	32.12	32.42	37.62	38.42	39.82
C-1.7%	28.97	30.98	33.57	34.74	39.98	40.52	41.59
Promedio	29.30	31.11	33.62	36.32	34.62	39.80	41.0
Desviación estándar	1.78	1.63	1.51	1.39	1.29	1.19	1.02
Nominal según norma	29.3	31.1	33.62	36.3	39.1	39.8	41.0

A.2.1.6 Resistencia a la compresión de la mezcla E-2.0% (Mpa)

Mezcla	Edad (Dias)						
	1	3	7	14	28	56	91
C-1.7%	31.08	32.80	35.04	35.86	37.65	38.24	39.26
C-1.7%	30.75	32.02	34.00	34.57	37.53	38.28	39.05
C-1.7%	29.22	31.20	33.54	33.86	36.43	37.17	40.18
Promedio	30.35	32.01	34.20	35.43	37.21	37.90	39.5
Desviación estándar	0.99	0.80	0.76	0.74	0.67	0.62	0.60
Nominal según norma	30.4	32.0	34.2	35.4	37.2	37.9	39.5

Resumen autobiográfico

Jorge Luis Herrera De Casas

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Lugar y fecha de Nacimiento: Nacido en Fresnillo, Zacatecas; el 1 de septiembre de 1993

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas con el grado de Ingeniero Civil en el año 2016. Graduado del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario # 167 como Técnico en informática. Durante sus estudios participo en el proyecto *“Comparativa patológica de pavimentos flexibles en climas extremos y la toma de decisiones asociadas”* convocatoria PROBIC/UNILA, año 2014. Participo en la iniciativa *“Jóvenes por un México Alfabetizado” en el marco de la Campaña Nacional de Alfabetización y Abatimiento del rezago Educativo 2014-2018*. En el año 2017 formo parte del comité interno de organización del *XXVII Verano de la Investigación Científica de la Academia de Ciencias* realizado en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León bajo la asesoría del Dr. Alejandro Duran Herrera.

Experiencia profesional: Docente auxiliar en la Universidad Autónoma de Zacatecas en el periodo de junio 2014-julio 2014. Supervisor de Proyectos de Construcción de obra pública y privada por parte de la empresa REGIO ASFALTOS Y CONCRETOS S.A. de C.V. desde Agosto de 2018.

Certificaciones: Técnico ACI grado I en pruebas al concreto en estado fresco Vigencia actual de la certificación: Julio/2016-Julio/2021.