

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**FIBRA NATURAL DE LECHUGUILLA
PARA EL CURADO INTERNO DE CONCRETOS DE ALTO COMPORTAMIENTO**

POR

ROGELIO DÁVILA POMPERMAYER

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN
EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

JULIO, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**FIBRA NATURAL DE LECHUGUILLA
PARA EL CURADO INTERNO DE CONCRETOS DE ALTO COMPORTAMIENTO**

**POR
ROGELIO DÁVILA POMPERMAYER**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA
EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. CÉSAR A. JUÁREZ ALVARADO**

JULIO, 2016



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



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 este medio le comunico que el **Ing. Rogelio Dávila Pompermayer**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominada **“Fibra natural de lechuguilla para el curado interno de concretos de alto comportamiento”**, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado del Ing. Dávila Pompermayer para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes

ATENTAMENTE,
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria, a 29 de junio de 2016

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Archivo.



Visión
2020
UANL

*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455
Tel.: 1442 4400 Fax:1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil UANL.

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis **“Fibra natural de lechuguilla para el curado interno de concretos de alto comportamiento”**, que presenta el Ing. **Rogelio Dávila Pompermayer**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro en particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE,
“ALERE FLAMMAM VERITATIS “
Cd. Universitaria, a 29 de junio del 2016



Dr. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ
EVALUADOR

C.c.p. Archivo.



*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>

Agradecimientos

A mi esposa, María Magdalena Elizondo, a mis hijos, Carolina y Alejandro Dávila por haberme apoyado y entendido mis ausencias para poder realizar este proyecto de vida.

A madre y mi padre[†] por su apoyo incondicional.

A mis hermanos, especialmente a mi hermana Yolanda por su apoyo moral en todo momento.

A mi prima Diana por haberme dado ánimos para terminar este proyecto y continuar adelante.

A mis cuñados y concuños, en especial a Francisco Oranday, Héctor Elizondo, Irma Elizondo y Arnoldo Hinojosa.

A la Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico para llevar a cabo la maestría.

A Reynaldo Cabrera, Gerardo Garza y Andrés Dávila, por su apoyo moral y económico para poder llevar a buen término esta tesis.

A mis compañeros de la maestría; Sergio Gutiérrez, Joana Campos, Daniel Gálvez, Francisco Anguiano, Guillermo Hernández y Jennifer Canul, por haberme apoyado con explicaciones técnicas y compañía en los largos momentos de estudio y pruebas.

A mi director de tesis, Dr. Alejandro Durán, que sin su intervención no hubiera podido ingresar a la maestría y mucho menos llevarla a buen término.

Al director de la FIC, Dr. Pedro Valdez, por su apoyo para ingresar a la maestría y en la intervención quirúrgica de Magda.

Al subdirector de Estudios de Posgrado, Dr. César Juárez, por dar las facilidades para realizar este proyecto sin contratiempos.

A mis maestros que pusieron su interés para transmitir sus conocimientos.

Al Ing. Ramón Álvarez, gerente de Concretos La Silla y a Cementos Moctezuma por la donación del cemento.

A la Comisión Federal de Electricidad por el donativo de la ceniza volante.

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

A todo el personal del departamento de tecnología para apoyar en la ejecución de las pruebas y prestar material de trabajo.

Índice

Capítulo 1. <u>Introducción</u>	1
1.1 <u>Concreto autocompactable (CAC)</u>	1
1.1.1 <u>Historia</u>	1
1.1.2 <u>Fundamentos</u>	3
1.1.3 <u>Componentes</u>	4
1.1.4 <u>Características</u>	8
1.1.5 <u>Pruebas</u>	9
1.1.6 <u>Métodos de diseño</u>	11
1.2 <u>Curado del concreto</u>	12
1.2.1 <u>Conceptos del curado</u>	12
1.2.2 <u>Curado interno</u>	13
1.3 <u>Fibra de Agave lechuguilla Torrey</u>	17
1.3.1 <u>Historia</u>	17
1.3.2 <u>Distribución geográfica del Agave lechuguilla Torrey</u>	18
1.3.3 <u>Aprovechamiento de la fibra</u>	21
Capítulo 2. <u>Antecedentes</u>	24
Capítulo 3. <u>Hipótesis, objetivos y justificación</u>	27
3.1 <u>Hipótesis</u>	27
3.2 <u>Objetivo general</u>	27
3.3 <u>Objetivos particulares</u>	27
3.4 <u>Justificación</u>	28
Capítulo 4. <u>Descripción de los materiales</u>	30
4.1 <u>Cemento portland</u>	30
4.2 <u>Ceniza volante</u>	31
4.3 <u>Humo de sílice</u>	31
4.4 <u>Agregados</u>	32
4.5 <u>Aditivo superfluidificante</u>	34
4.6 <u>Aditivo reductor de la contracción</u>	34

4.7	<u>Fibra de Agave lechuquilla Torrey</u>	35
Capítulo 5.	<u>Metodología experimental</u>	37
5.1	<u>Matriz de experimentos</u>	37
5.1.1	<u>Determinación del contenido óptimo de fibra</u>	37
5.1.2	<u>Determinación de la longitud óptima de la fibra</u>	38
5.1.3	<u>Mezclas de concreto</u>	38
5.2	<u>Métodos de prueba</u>	40
5.2.1	<u>Materia prima</u>	41
5.2.1.1	<u>Caracterización de los agregados</u>	41
5.2.1.1.1	<u>Densidad, absorción, peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico varillado</u>	41
5.2.1.1.2	<u>Análisis granulométrico</u>	41
5.2.1.1.3	<u>Contenido de humedad</u>	41
5.2.1.1.4	<u>Compacidad máxima de los agregados</u>	41
5.2.1.1.5	<u>Optimización de la relación grava / arena mediante la medición del bloqueo por el anillo J (nuevo método de prueba)</u>	42
5.2.1.1.6	<u>Velocidad de absorción de los agregados (nuevo método de prueba)</u>	43
5.2.1.2	<u>Preparación y caracterización de la fibra</u>	46
5.2.1.2.1	<u>Procedimiento de corte</u>	46
5.2.1.2.2	<u>Medición del diámetro, longitud y peso por unidad de longitud</u>	47
5.2.1.2.3	<u>Porcentaje de absorción</u>	48
5.2.1.2.4	<u>Densidad</u>	49
5.2.1.2.5	<u>Velocidad de absorción</u>	50
5.2.1.2.6	<u>Velocidad de desorción</u>	50
5.2.1.2.7	<u>Lavado y saturación de la fibra</u>	51
5.2.1.2.8	<u>Distribución de la fibra en el concreto endurecido</u>	51
5.2.1.3	<u>Fabricación y ensaye de morteros</u>	52
5.2.1.4	<u>Contracción química</u>	52
5.2.1.5	<u>Densidad de los cementantes</u>	53
5.2.1.6	<u>Densidad del aditivo y contenido de sólidos</u>	53
5.2.1.7	<u>Caracterización del concreto hidráulico</u>	54
5.2.1.7.1	<u>Tiempos de fraguado</u>	54

5.2.1.7.2	Contracción autógena	54
5.2.1.7.3	Mezclado de concreto	55
5.2.1.7.4	Contenido de aire atrapado	56
5.2.1.7.5	Columna de segregación	56
5.2.1.7.6	Peso unitario	56
5.2.1.7.7	Extensibilidad, T_{50}, índice de estabilidad visual y revenimiento	56
5.2.1.7.8	Habilidad de paso por el método de anillo J	57
5.2.1.7.9	Resistencia a la compresión	57
5.2.1.7.10	Módulo de elasticidad estático	58
5.2.1.7.11	Contracción por secado	58
5.2.1.7.12	Resistividad eléctrica	58
5.2.1.7.13	Migración de iones cloruro	59
Capítulo 6.	Resultados y discusión	60
6.1	Agregados	60
6.2	Fibra	66
6.3	Cementantes	79
6.4	Aditivos	82
6.5	Concretos	83
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones	111
7.1	Conclusiones	111
7.2	Recomendaciones	113
7.2.1	Trabajos futuros	113
	Glosario	115
	Bibliografía	118

Lista de figuras

Tabla 1	Pruebas al concreto autocompactable para determinar sus propiedades físicas.	8
Tabla 2	Serie para definir el contenido de la fibra en función de pérdida de resistencia a la compresión.	37
Tabla 3	Serie para definir la longitud de la fibra en función de la disminución de la resistencia a la compresión.	38
Tabla 4	Justificación de parámetros para el diseño de mezclas experimentales.	39
Tabla 5	Series de mezclas de concreto.	40
Tabla 6	Procedimiento de mezclado para la fabricación del concreto.	56
Tabla 7	Análisis granulométrico: a) arena y b) grava.	61
Tabla 8	Propiedades físicas de los agregados.	61
Tabla 9	Relaciones G/A y su respectivo bloqueo utilizadas en la prueba para definir la relación óptima.	62
Tabla 10	Velocidad de absorción de los agregados de caliza de tamaño máximo a) 4.75 mm y b) 19 mm.	64
Tabla 11	Velocidad de absorción de la grava de pumicita.	65
Tabla 12	Velocidad de absorción de la fibra de lechuguilla.	66
Tabla 13	Serie para definir el contenido óptimo de fibra en morteros estándar mediante la resistencia a la compresión en cubos a las edades de 3,7 y 28 días.	72
Tabla 14	Serie para definir la longitud óptima de fibra en morteros estándar.	72
Tabla 15	Distribución de la fibra dentro del concreto endurecido.	73
Tabla 16	Estadística de la medición del diámetro y la longitud de la fibra.	74
Tabla 17	Densidades de los cementantes determinadas por duplicado.	79
Tabla 18	Composición química del cemento portland ordinario, ceniza volante y humo de sílice.	79
Tabla 19	Contracciones químicas de los cementantes (ml/100 g-cm), determinadas por duplicado.	80
Tabla 20	Contracciones químicas de la ceniza volante y el humo de sílice.	81
Tabla 21	Reducción de volumen por contracción química para los cementantes utilizados.	82

Tabla 22	Densidad y contenidos de sólidos de los aditivos superfluidificante y reductor de la contracción.	82
Tabla 23	Tiempos de fraguado inicial y final para todas las mezclas de concreto.	84
Tabla 24	Propiedades en estado fresco de todas las mezclas de concreto.	90
Tabla 25	Resistencia a la compresión para todas las mezclas de concreto, ensayos por triplicado.	92
Tabla 26	Módulo de elasticidad para todas las mezclas de concreto a 28 y 91 días.	96
Tabla 27	Registro de contracciones por secado, promedio de tres mediciones.	98
Tabla 28	Desarrollo de la resistividad eléctrica para diferentes edades y todas las mezclas.	102
Tabla 29	Difusión de iones cloruro para todas las mezclas, promedio de tres mediciones.	108

Lista de figuras

Figura 1	Comparativa entre proporciones de un concreto autocompactable y uno convencional.	2
Figura 2	Técnicas para asegurar las propiedades de autocompactabilidad.	3
Figura 3	Composición esquemática del CAC.	4
Figura 4	Comparación de proporciones en volúmenes para CCR, normal y CAC.	8
Figura 5	a) Prueba de flujo en U, b) equipo de prueba de la caja.	10
Figura 6	a) Prueba de extensibilidad, b) prueba del embudo V.	10
Figura 7	Cambios de volumen por contracción química y contracción autógena en muestras de pastas frescas y endurecidas.	14
Figura 8	Relación entre el radio de poro y la humedad relativa.	16
Figura 9	Sandalia tejida con hoja de lechuguilla procedente de la cueva del cuervo, perteneciente al municipio de nadadores, Coahuila.	17
Figura 10	Clasificación taxonómica del Agave de lechuguilla Torrey.	18
Figura 11	Agave lechuguilla Torrey.	19

Figura 12	Distribución geográfica de la fibra de lechuguilla.	20
Figura 13	Procedimiento para la obtención de la fibra de lechuguilla; a) tallado manual y b) tallado mecánico.	22
Figura 14	Humo de sílice.	32
Figura 15	Micrografías de la fibra; a) corte longitudinal y transversal, b) detalle de sus alveolos.	36
Figura 16	Micrografía longitudinal de la fibra; a) perfil, b) detalle de textura.	36
Figura 17	Cálculo de la compacidad máxima para la grava de 19 mm y la arena de 4.75 mm (# 4).	42
Figura 18	Prueba de velocidad de absorción del agregado ligero.	46
Figura 19	a) Guillotina para papel utilizada en el corte de la fibra, b) almacén de la fibra en botes identificados para evitar su deterioro.	47
Figura 20	Etapas de determinación de la absorción de la fibra; a) saturación, b) secado a sss, c) protección para evitar la pérdida de humedad, d) secado al horno eléctrico.	49
Figura 21	Frascos de Chapman con la fibra para la determinación su densidad.	50
Figura 22	Determinación de la velocidad de absorción de la fibra; a) colocada sobre una malla # 100 para su inmersión, b) se sumergió en agua suspendida de una báscula, c) la fibra que quedó fuera de la malla fue recolectada por filtración en una malla # 100.	50
Figura 23	Conteo de fibras en una sección de cilindro de 10 x 20 cm.	52
Figura 24	Medición de la contracción química de los cementantes.	53
Figura 25	Determinación del tiempo de fraguado.	54
Figura 26	Prueba de medición de la contracción autógena.	55
Figura 27	Métodos para determinar la consistencia; a) extensibilidad, b) revenimiento.	57
Figura 28	Método de grabación sincronizado de lecturas de deformación, de carga y de tiempo.	58
Figura 29	Comportamiento de la relación G/A para un bloqueo máximo en el anillo J de 5 cm con relación a la extensibilidad.	62
Figura 30	Velocidad de absorción de los agregados de caliza de tamaño máximo 4.75 y 19 mm.	64
Figura 31	Comportamiento logarítmico de la velocidad de absorción.	65

Figura 32	Velocidad de absorción de la fibra de longitud nominal 10 mm y la velocidad de absorción de la fibra detallado a 3 minutos	66
Figura 33	Desorción de la fibra de lechuguilla de 5 y 10 mm.	68
Figura 34	Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas C-R y C-R-C.	69
Figura 35	Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas D-20y D-20-C.	69
Figura 36	Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas E-30 y E-30-C.	70
Figura 37	Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas F-40 y F-40-C.	70
Figura 38	Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas G-HS y G-HS-C.	71
Figura 39	Contracciones químicas de los cementantes.	80
Figura 40	Tiempos de fraguado para cada serie.	84
Figura 41	Contracciones autógenas para los diferentes cementantes utilizados.	86
Figura 42	Contracciones autógenas serie C.	87
Figura 43	Contracciones autógenas serie D.	87
Figura 44	Contracciones autógenas serie E.	88
Figura 45	Contracciones autógenas serie F.	88
Figura 46	Contracciones autógenas serie G.	89
Figura 47	Resistencia a la compresión para los diferentes cementantes utilizados.	93
Figura 48	Resistencia a la compresión serie C.	93
Figura 49	Resistencia a la compresión serie D.	94
Figura 50	Resistencia a la compresión serie E.	94
Figura 51	Resistencia a la compresión serie F.	95
Figura 52	Resistencia a la compresión serie G.	95
Figura 53	Comportamiento del módulo de elasticidad a 28 días.	97
Figura 54	Comportamiento del módulo de elasticidad a 91 días.	97
Figura 55	Contracción por secado para los diferentes cementantes utilizados.	99
Figura 56	Contracción por secado serie C.	99

Figura 57	Contracción por secado serie D.	100
Figura 58	Contracción por secado serie E.	100
Figura 59	Contracción por secado serie F.	101
Figura 60	Contracción por secado serie G.	101
Figura 61	Comportamiento de la resistividad eléctrica para todas las series.	103
Figura 62	Influencia de los cementantes y la edad en la resistividad eléctrica.	104
Figura 63	Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie C.	104
Figura 64	Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie D.	105
Figura 65	Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie E.	105
Figura 66	Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie F.	106
Figura 67	Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie G.	106
Figura 68	Difusión de iones cloruro para todas las mezclas.	108
Figura 69	Correlación entre difusión de iones cloruro y la resistividad eléctrica, y la clasificación propuesta por AASHTO TP 95 y Nilsson para la penetración de iones cloruro.	109
Figura 70	Correlación entre la difusión y resistividad eléctrica en base al tipo de mitigador de la contracción autógena.	110

RESUMEN

El uso cada vez más frecuente del concreto autocompactable (CAC) en estructuras importantes, y como uso inherente de relaciones agua / cemento (a/c) menores a 0.42 con la consecuente generación de contracciones autógenas debido a la auto-deseccación del concreto, y por consecuencia el potencial agrietamiento de los elementos estructurales que disminuyen su durabilidad al ingresar agentes externos por las grietas provocadas, llevando así a la disminución de la vida útil de dicha estructura.

Es debido a esto que en el presente proyecto de investigación, se analizó la posibilidad de utilizar la fibra de Agave lechuguilla Torrey (fibra o fibra de lechuguilla) como una alternativa de mitigar las contracciones autógenas y disminuir el potencial de agrietamiento de este tipo de concretos. Las pruebas efectuadas para este fin fueron principalmente la medición de las contracciones autógenas y como soporte de esta información fue la caracterización de las mezclas fabricadas mediante pruebas tales como extensibilidad o medición del revenimiento según aplique, T_{50} , índice de estabilidad visual, bloque mediante el anillo J, contenido de airea atrapado, columna de segregación, peso volumétrico del concreto fresco, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistividad eléctrica, migración de iones cloruro, contracción por secado, contracción química, ensaye de morteros estándar para la determinación del volumen y longitud de la fibra, dispersión de la fibra en el concreto, así como la caracterización de las materias primas como densidades, absorciones, granulometrías, diámetro, longitud y desorción de la fibra, compacidad de los agregados, contenido de sólidos de los aditivos.

Como parte del desarrollo de la investigación, fue propuesto un método para determinar el rango de trabajo con la relación grava / arena (G/A) en que el concreto quede dentro de las especificaciones de bloqueo medido por el método de anillo J, además fue propuesto un método para determinar la velocidad de absorción de los agregados y la fibra. Como resultado de lo anteriormente expuesto, los resultados obtenidos indican que la fibra se puede utilizar como una opción como agente de curado interno, se propone un procedimiento para evaluar las fórmulas para estimar la cantidad de agua para el curado interno propuestas por Jensen y Bentz, deducir el mecanismo de absorción de la fibra, y un procedimiento analítico para estimar la cantidad de agua de curado interno que conduzca a una mitigación de la contracción autógena similar a la del ARC propuesta para hacer la equivalencia de hidratación del aditivo reductor de la contracción (ARC).

Capítulo 1. Introducción

1.1 Concreto autocompactable (CAC)

1.1.1 Historia

El CAC es un concreto altamente fluido, no se segrega, se puede extender desde su sitio de colocación para llenar cimbras y encapsular el acero de refuerzo sin algún mecanismo de consolidación [1].

Teniendo como objetivo principal el incrementar la durabilidad del concreto sin la necesidad de cuadrillas numerosas por la escases de la mano de obra calificada, en 1986 surge en Japón el concreto autocompactable / autoconsolidante.

El concreto desarrollado para tal efecto fue propuesto por el Dr. Hajime Okamura como un concreto capaz de consolidarse por su propio peso, sin la necesidad de aplicar vibración para su compactación.

El primer prototipo del CAC fue fabricado en 1988 con materiales convencionales como agregados con tamaños máximos de hasta 19 mm, mayor cantidad de polvos (cementos convencionales, ceniza volante, humo de sílice, polvo de caliza y/o caolín) y aditivos superfluidificantes (*figura 1*), y estableciendo características de desempeño tales como; Contracción por secado, resistencia a la compresión, calor de hidratación y densidad. Este concreto fue llamado “concreto de alto comportamiento” teniendo dos características principales; qué en estado fresco fuera autocompactable y que una vez endurecido no presentara defectos estéticos que pudiesen mermar su durabilidad [2]:

Concreto Autocompactable
(Aditivo: superplastificante)

aire	Agua	Polvo	Arena	Grava
aire	Agua	Cemento	Arena	Grava

Concreto Convencional

Figura 1. Comparativa entre proporciones de un concreto autocompactable y uno convencional

Conforme se ha empleado el CAC, se han encontrado otros beneficios como los que se mencionan a continuación [3]:

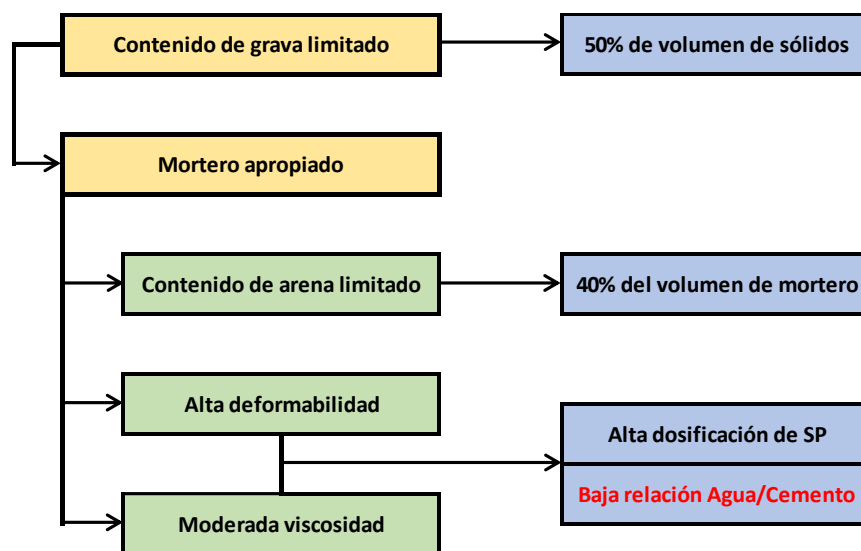
- Construcción rápida.
- Reducción de la mano de obra para su colocación.
- Mejor acabado superficial.
- Se facilita la colocación.
- Mejora la durabilidad.
- Secciones estructurales más esbeltas.
- Reducción de ruido en su colocación.
- Entornos de trabajo más seguros.

En 1989, el profesor Aïtcin definió al “concreto de alto comportamiento” como un concreto de alta durabilidad por las bajas relación agua / cemento con que típicamente se producen [4]. Desde entonces, a este tipo de concretos se les refiere como de alta durabilidad o “concreto autocompactable de alto comportamiento”. En el año 2000 el volumen estimado de CAC en el mercado de prefabricados en los Estados Unidos de Norteamérica, fue de 135,000 m³, el cual se incrementó a 1.8 millones de m³ en el año 2003. En 2002, el 40 % de los elementos prefabricados en los Estados Unidos de Norteamérica se produjeron con CAC [1].

1.1.2 Fundamentos

El mecanismo para lograr el CAC no solo implica la deformabilidad de la pasta o mortero, sino también la resistencia a la segregación entre la grava y el mortero cuando el concreto pasa a través de secciones estrechas de la cimbra y las varillas de refuerzo.

Los profesores Okamura y Ozawa han utilizado las técnicas mostradas en la [figura 2](#), en la cual se indica que en estos concretos, se limita el contenido de agregado, la baja relación agua / polvo y el uso de superfluidificante [5].



SP = Aditivo superplastificante

Figura 2. Técnicas para asegurar las propiedades de autocompactabilidad.

La frecuencia con la que colisionan o entran en contacto las partículas de agregado puede incrementarse conforme disminuya la distancia entre ellas, entonces, los esfuerzos internos en la masa de concreto se verán incrementados cuando el concreto se deforme, en particular cuando el concreto pase cerca de un obstáculo.

Se ha demostrado que debido al incremento de los esfuerzos internos dentro de la masa de concreto la energía necesaria para que el concreto fluya se consume, lo que conduce en el bloqueo de los agregados. Por este motivo es que en el diseño de los CAC se limita el contenido de grava [2].

1.1.3 Componentes

Los componentes deben ser adecuados para el uso provisto de la estructura a colar (*figura 3*) y no debe de tener componentes dañinos que puedan causar un detrimento en la durabilidad del concreto. Una de las principal propiedades del CAC es su reología que se representa mediante el esfuerzo de cedencia y que para estos concretos estará caracterizado por un bajo valor de esfuerzo de cedencia, lo que permite que el CAC tenga una alta deformabilidad. A continuación se definen las principales propiedades del CAC:

Reología: Es la ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales. Para caracterizar los CAC se utiliza un reómetro que relaciona la variación del esfuerzo de corte con la velocidad de corte.

Trabajabilidad: Es la característica de un concreto de ser mezclado, colocado, compactado y terminado. Para el CAC la trabajabilidad se puede evaluar de manera cuantitativa por medio de en las pruebas de capacidad de llenado, capacidad de paso y de estabilidad (resistencia a la segregación).

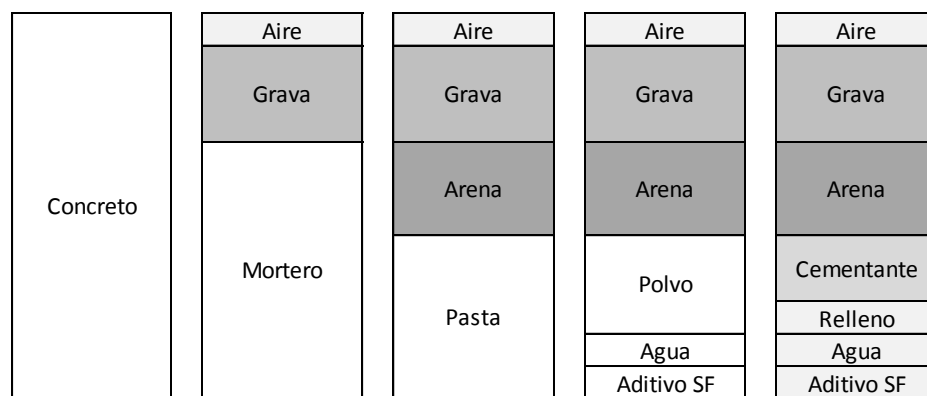


Figura 3. Composición esquemática del CAC [6]

Debido a los requerimientos de fluidez y cohesividad para evitar la segregación, es necesario el uso de relaciones agua / cementante (a/cm) menores a las de un concreto convencional, típicamente las relaciones a/cm utilizadas en este tipo de concretos se

encuentran entre 0.32 a 0.40, lo cual dá como resultado altas resistencias a la compresión.

Debido a estas bajas relaciones a/cm se debe poner especial atención a la contracción autógena, a los altos contenidos de cemento y a la presencia de cementantes suplementarios en adición al cemento que tengan un alto índice de actividad puzolánica a edades tempranas.

La contracción por secado está en función del contenido de agua, la cantidad de pasta, así como por la cantidad, tamaño y rigidez del agregado. Con los CAC se generan mayor potencial de presentar este tipo de contracciones debido a que tiene una alta cantidad de pasta y menor volumen de agregado que un concreto convencional.

Los CAC son muy propensos a la contracción plástica debido a su baja relación a/cm, este tipo de concretos presenta poco o ningún sangrado, por lo que es necesario prevenir el secado durante las primeras 24 horas [7].

En investigaciones realizadas que compararon el comportamiento de CAC con concretos convencionales, se ha comprobado que el esfuerzo de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo puede ser superior en un 40 % [8], esto puede ser debido a que este tipo de concreto presenta bajo sangrado por las bajas relaciones a/cm utilizadas, por lo cual el acero de refuerzo horizontal queda libre del acumulamiento de sangrado en su parte inferior.

El desarrollo de la microestructura del CAC diseñado correctamente, presenta una porosidad capilar más fina, lo que redundará en una reducción en las propiedades de transporte. Comparando concretos convencionales compactados con vibrado con el CAC, se han registrado bajos valores de coeficiente de permeabilidad al aire y absorción de agua en favor del CAC [9]. Los CAC probados fueron diseñados con cantidades de

360 a 550 kg/m³ de material en polvo compuesto de cemento, ceniza y polvo de caliza, con una relación agua / polvo de 0.33 a 0.58. El coeficiente de migración de cloruros obtenido dependerá del tipo de polvo usado. Tanto el concreto convencional como el CAC fabricados con ceniza volante, presentaron un coeficiente de migración menor que los concretos fabricados sin ceniza volante.

El módulo de elasticidad del concreto está relacionado con la resistencia a la compresión, el tipo y contenido de agregado y su peso volumétrico. En el caso de los CAC, el módulo de elasticidad puede verse influido por la relación arena / agregado. Bennenk et al. [10] reportaron que en pruebas de concreto para resistencias similares, el módulo elástico en el CAC fue menor entre un 10 y un 15 % en comparación con el concreto convencional. Sin embargo, otras investigaciones reportan que para concretos con resistencia similar, el módulo elástico entre el CAC y el concreto convencional fue similar [11].

A continuación se enlistan los ingredientes que se utilizan para la producción de un CAC, así como características particulares de cada una de ellas.

Cementos: Deben cumplir con la calidad requerida por ASTM C150 [12]. Se recomiendan cementos con contenidos de C₃A menores al 10 %, ya que contenidos mayores pueden causar problemas con la permanencia de la trabajabilidad.

Agregados: El tamaño máximo suele limitarse a 19 mm lo cual depende de la concentración del acero de refuerzo y de la separación de la cimbra. Las partículas inferiores a 0.125 mm (malla # 100) constituyen los polvos. Las variaciones en la granulometría y la humedad libre de los agregados pueden tener influencia significativa en la estabilidad de los CAC [13].

Aditivos: Para obtener la suficiente fluidez, los aditivos son una parte esencial en los CAC, además, pueden incorporarse aditivos modificadores de la viscosidad para estabilizar la mezcla y su efectividad se evalúa mediante las pruebas enlistadas en la [tabla 1](#).

Adiciones: Las adiciones pueden ser materiales inertes tales como polvo de caliza, caolin, dolomita, granito, o hidráulicas latentes tales como cenizas volantes, humo de sílice o escoria granular (pulverizada) de alto horno. La función de las adiciones habitualmente se utilizan para mejorar y mantener la trabajabilidad, además de regular el contenido del cemento y reducir de esta forma el calor de hidratación. Aquellas adiciones con hidratación latente o puzolánica, pueden mejorar la durabilidad del concreto a largo plazo [3]. Las partículas de ceniza volante en su gran mayoría tienen forma esférica con una superficie lisa, lo que lubrica a la mezcla de CAC al trabajar como balines, dándole mayor trabajabilidad y extensibilidad a este tipo de mezclas, reemplazo de entre 20 y 40% de ceniza volante por cemento portland, pueden aumentar el valor de extensibilidad [14].

Fibras: Como en el concreto convencional, para mejorar algunas de sus propiedades, las fibras utilizadas en este tipo de concreto son de acero o de polipropileno; las de acero son utilizadas para mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión y la tenacidad, las fibras de polipropileno son utilizadas para reducir la segregación y la contracción plástica. El uso de fibras sintéticas puede reducir la fluidez en el concreto y por lo tanto su contenido no debe de superar de 1 kg/m^3 [3].

Tabla 1. Pruebas al concreto autocompactable para determinar sus propiedades físicas.

Propiedad	Método de ensayo
Capacidad de llenado	Ensayo de extensibilidad con cono Abrams Extensibilidad T _{50 cm} Embudo V Orimet
Capacidad de paso	Anillo J Caja en L Caja en U Caja de relleno
Resistencia a la segregación	Embudo V a T _{5 minutos} Ensayo de estabilidad GTM

1.1.4 Características

El aumento de la viscosidad en los CAC es necesaria para evitar el bloqueo del agregado cuando el concreto fluye a través de obstáculos. La pasta con una alta viscosidad también evita los esfuerzos internos en la masa de concreto cuando este se deforma debido a la aproximación de las partículas de grava. La alta deformabilidad puede lograrse solo por el uso de superfluidificante y mediante una muy baja relación agua / polvos. En la [figura 4](#) se muestra la comparativa de proporciones entre el concreto compactado con rodillo (CCR), concreto convencional (Normal) y el concreto autocompactable (CAC).

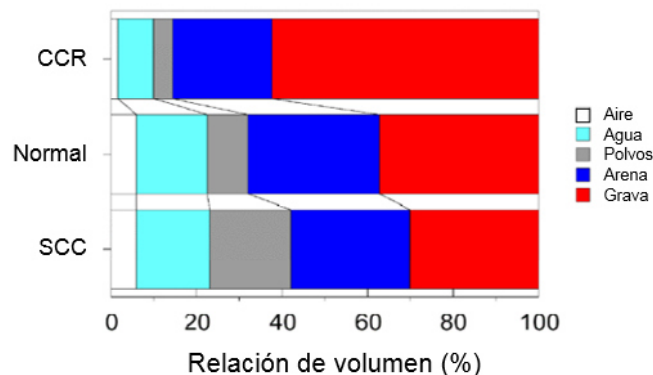


Figura 4. Comparación de proporciones en volúmenes para CCR, convencional (Normal) y CAC.

Los rangos comunes en parámetros o en propiedades clave para diseñar un CAC son los siguientes:

- 1) Relación agua / polvo en volumen entre 0.80 y 1.10.
- 2) Contenido de polvos de 160 a 240 litros, equivalentes a 400 a 600 kg por metro cúbico.
- 3) Contenido de grava entre un 28 y 35 % del volumen.
- 4) Contenido de agua máxima de 200 l/m³.
- 5) El contenido de arena será el necesario para producir un metro cúbico de concreto y dar las propiedades de autocompactabilidad.

Este tipo de concretos se debe limitar a caídas con alturas máximas de 5 m y la distancia de flujo horizontal desde la descarga a 10 m.

Los consumos comunes de cemento se encuentran de 350 a 450 kg/m³, consumos mayores a 500 kg/m³ pueden resultar riesgosos ya que aumentan la contracción autógena. Para CAC con consumos menores a 350 kg/m³, los finos deben complementarse con algún otro polvo [3].

1.1.5 Pruebas

El propósito práctico para las pruebas al CAC está orientado a verificar si el concreto es apropiado para la estructura, a ajustar las proporciones cuando la compactabilidad no es suficiente a caracterizar el desempeño y para asegurar la estabilidad del fluido.

Este tipo de concretos se puede caracterizar bajo las propiedades de; capacidad de llenado, capacidad de paso y resistencia a la segregación.

Existen muchos métodos de ensayo para caracterizar las propiedades del CAC, pero no existe un consenso para determinar uno o varios métodos para caracterizar los aspectos

relevantes de trabajabilidad, por lo que para los distintos parámetros de trabajabilidad un diseño de este tipo de mezcla deberá validarse con más de un método de ensayo. En la *tabla 1* se presentan los métodos de ensayo más comúnmente utilizados [3].

El grupo Taisei [15] desarrolló la prueba de flujo en U, el grado de compactabilidad puede ser indicado por la altura del concreto después de fluir a través de un obstáculo. Los concretos con una altura de llenado de más de 300 mm pueden ser catalogados como CAC. Para detectar la posibilidad de segregación de la grava del mortero en un CAC, es más apropiado el uso de la prueba de la caja U (*figura 5*).

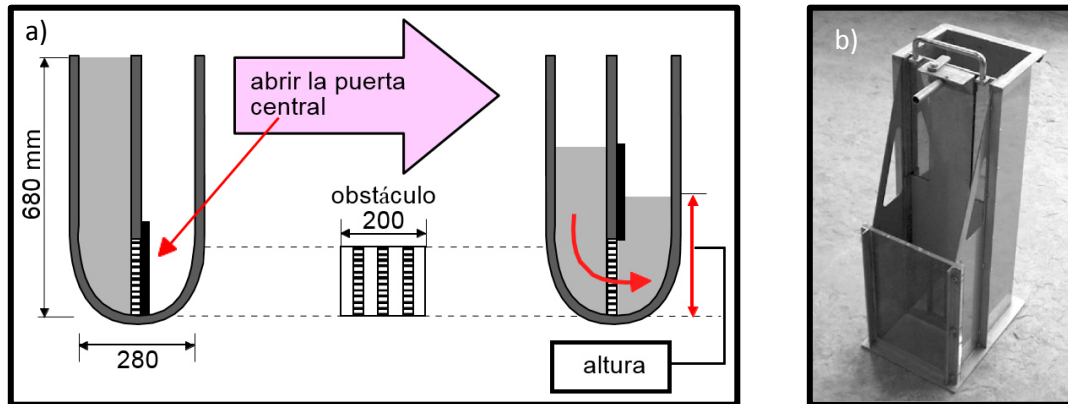


Figura 5. a) Prueba de flujo en U [16], b) equipo de prueba de la caja.

La prueba de extensibilidad y la prueba del embudo en V (*figura 6*), han sido propuestas para evaluar la deformabilidad y la viscosidad del CAC respectivamente.



Figura 6. a) Prueba de extensibilidad, b) prueba del embudo V.

1.1.6 Método de diseño

El CAC puede ser afectado en gran medida por las características de los materiales y la proporción de sus mezclas. Okamura y Ozawa [17] proponen un sistema simple asumiendo el suministro de una planta concretera. Tanto los contenidos de la grava y arena se fijan, logrando la autocompactabilidad ajustando solamente las relaciones agua / polvo y la dosis de aditivo superfluidificante :

- 1) El contenido de la grava se fija en 50 % del volumen de sólidos.
- 2) El contenido de arena se fija en 40% del volumen del mortero.
- 3) La relación agua / polvo en volumen se fija entre 0.9 a 1.0, esto dependiendo de los tipos de polvos.
- 4) La dosis del aditivo y la relación agua / polvo están relacionadas con el aseguramiento de la autocompactabilidad, y con la estabilidad de la mezcla en estado fresco.

A diferencia de un concreto convencional donde la relación agua / cemento se fija para obtener la resistencia especificada, en un CAC la relación agua / cemento se encuentra en función de la autocompactabilidad debido a que es muy sensible a esta relación.

La resistencia a la compresión no es un factor predominante en el diseño debido a que la relación agua / polvo en los CAC es lo suficientemente baja para asegurar la resistencia a la compresión requerida para estructuras ordinarias, a no ser que la mayor parte de los polvos usados no sean reactivos.

Para lograr la alta viscosidad y la alta capacidad de deformación del mortero del CAC, es necesario el empleo de un superfluidificante y por consecuencia una baja relación agua / polvo.

Requerimientos para el aditivo superfluidificante empleado para la producción de CAC:

- Alto efecto dispersante por la baja relación agua / polvo.
- Mantener el efecto dispersante por lo menos dos horas después de ser fabricado.
- Baja sensibilidad a cambios de temperatura.

Existen otros aditivos inhibidores de la segregación que hacen que el aditivo sea menos sensible a las variaciones del contenido de agua en el concreto. El contenido de agua en el concreto está influido por la variación en el contenido de agua en la arena, lo que resulta en variaciones en el contenido del agua del concreto [18]

1.2 Curado del concreto

1.2.1 Conceptos del curado

El curado es el proceso por el cual el concreto hidráulico endurece, es un proceso dependiente del tiempo que se presenta como resultado de la hidratación del cemento en presencia del agua y en el que el calor es un factor que influye en la velocidad con la que se desarrollan las propiedades mecánicas en el concreto. También puede ser descrito como la acción para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla de concreto, mismas que permiten la hidratación del cemento hidráulico y la reacción puzolánica cuando se adicionan suplementos cementantes, tales como la ceniza volante, la escoria de alto horno o el humo de sílice, todo lo anterior con el objetivo de desarrollar las propiedades ingenieriles en la mezcla.

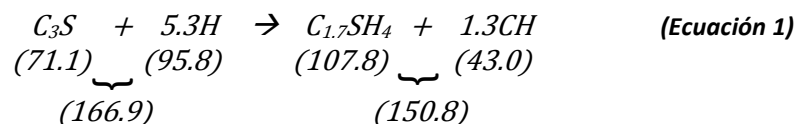
La finalidad del curado externo es la de prevenir la pérdida de humedad en el concreto y suministrar humedad adicional, para evitar que el material se seque y se agriete. Este escenario permite una mejor hidratación.

El curado tiene una influencia tanto en profundidad como en la superficie del concreto endurecido, en propiedades como son: la resistencia a la compresión, la permeabilidad, la resistencia a la abrasión, la estabilidad volumétrica y la resistencia al congelamiento, etc. [19].

1.2.2 Curado interno

La relación agua/cemento mínima, para que en teoría se pueda asegurar su hidratación oscila entre 0.42 y 0.44 g de agua por gramo de cemento, [19] [20] [21] [22], en concretos con relaciones agua / cemento menores a 0.42, es necesario proporcionar una fuente de agua que complemente la humedad necesaria para evitar la auto-desección al interior del concreto, lo que en consecuencia conducirá a una contracción autógena que (cambio volumétrico del concreto) que ocurre sin la transferencia de humedad al medio ambiente. La contracción autógena a edades tempranas en las que el concreto se encuentra en estado plástico anterior al fraguado inicial, son atribuibles a la contracción química, en esta a edades tempranas y antes del fraguado inicial, la contracción autógena es atribuible a la suma de las contracciones químicas del cemento más las contracciones por auto-desección. En la contracción química los productos de hidratación del cemento portland resultan de menor volumen que los compuestos que los generan.

Como ejemplo, a continuación se muestra el balance estequiométrico (*ecuación 1*) de la reacción para la hidratación del silicato tricálcico:



Considerando los volúmenes molares [23] esto implica que la hidratación del silicato tricálcico tiene una reducción de 9.6% de su volumen, entendiéndose esta reducción de volumen como una contracción autógena [24].

Después del fraguado inicial, y cuando comienza a formarse una estructura en la que existe una red de poros llenos de agua, que será consumida por los compuestos de hidratación, en este momento la tensión superficial del agua en los poros genera un esfuerzo que induce contracciones que pueden provocar agrietamientos, esta es la 2ª etapa de la contracción autógena (figura 7).

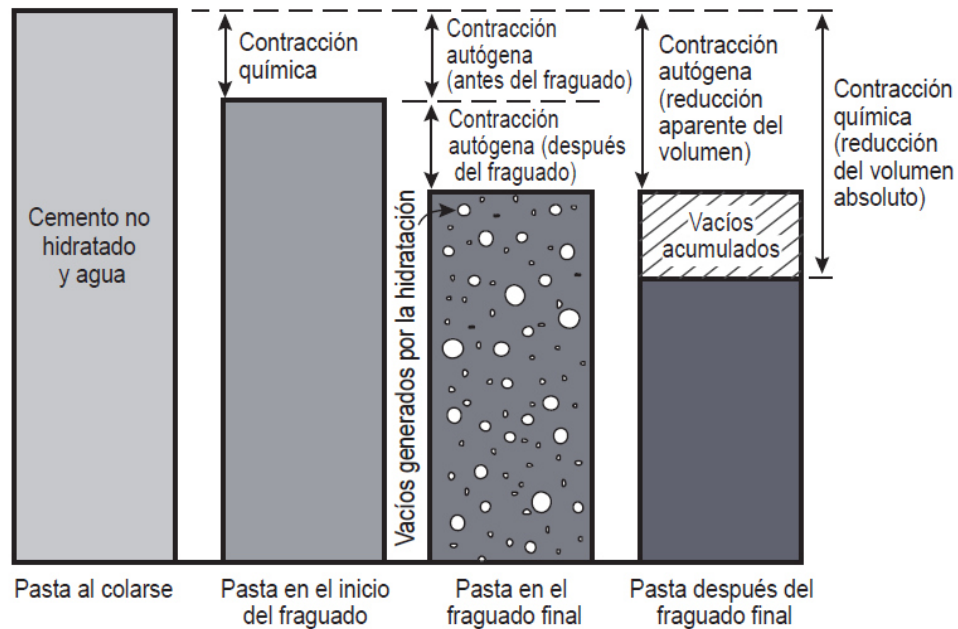


Figura 7. Cambios de volumen por contracción química y contracción autógena en muestras en una pastas frescas y endurecidas [25].

La presión de agua en el poro está en función de la tensión superficial y es inversamente proporcional al radio del poro, de tal forma que para concretos de alto comportamiento en donde la red está formada por poros más pequeños, el esfuerzo resultante es mayor [26]

La siguiente ecuación (*ecuación 2*) muestra la ecuación de Young [27] que relaciona estos conceptos:

$$\sigma = \frac{(-2\gamma \cos \theta)}{r} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

σ = Esfuerzo capilar

γ = Tensión superficial de la solución de los poros

θ = Ángulo de contacto

r = Radio promedio de los poros

De esta ecuación se deducen dos formas de reducir los esfuerzos en los poros; Una consistió en el uso de aditivos reductores de la contracción que al utilizarse ayudarían a disminuir la tensión superficial de la solución del poro y consecuentemente la presión en los poros [28] [29], y la otra mediante el curado interno que consiste en generar poros de sacrificio llenos de humedad que se liberará para contrarrestar las presiones que se presentan al vaciarse los poros dentro del concreto debido a la hidratación del cemento. Cuando los poros de sacrificio no están presentes, la tensión superficial de la solución del poro aumenta rápidamente con el tiempo. Conforme avanza el proceso de hidratación se reduce el tamaño de los poros conduciendo esto a incrementos en los esfuerzos de tensión sobre las paredes de estos poros, lo cual disminuye con la hidratación aún más el tamaño de los poros restantes e incrementando los esfuerzos de tensión.

Como se produce una desecación y un incremento del esfuerzo, habrá una reducción simultánea en la humedad relativa interna de la pasta de cemento hidratada, descrita por la ecuación de Kelvin (*ecuación 3*) [27].

$$\sigma = \frac{(RT \ln(RH))}{V_m} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta

RH = humedad relativa, y

V_m = volumen molar de la solución de los poros.

Esta ecuación exhibe la necesidad de un curado interno.

Cuando la [ecuación 2](#) y la [ecuación 3](#) se combinan, se establece una relación entre la humedad relativa y el tamaño de los poros que se han vaciado ([figura 8](#)).

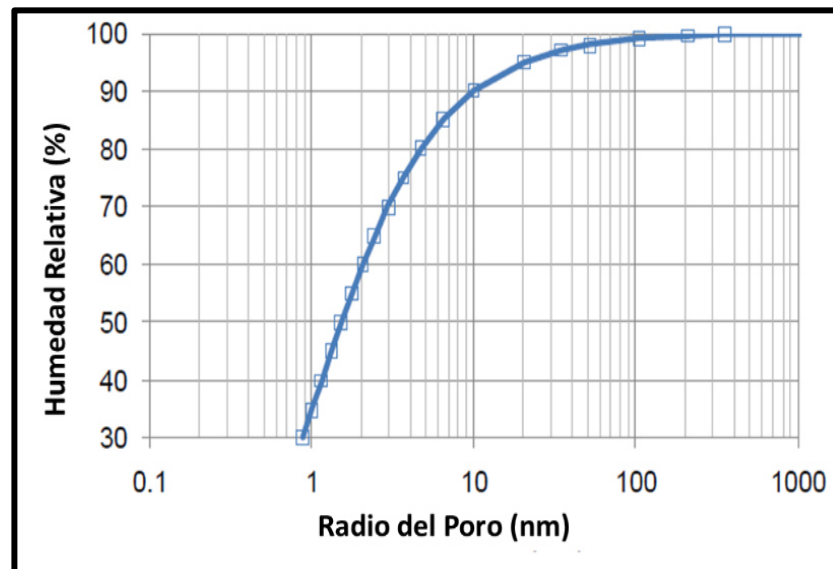


Figura 8. Relación entre el radio de poro y la humedad relativa.

Esto demuestra que el objetivo del curado interno es proporcionar una fuente adicional de agua de tal forma que la porosidad capilar de la pasta de cemento hidratado permanezca saturada, minimizando así las contracciones autógenas y en consecuencia las tensiones internas [24].

1.3 Fibra de Agave lechuguilla Torrey

1.3.1 Historia

El Agave lechuguilla fue descrita por primera vez por John Torrey en 1859 en el documento “Report on the United States and Mexican Boundary Survey”, en este documento dirigido al congreso de los Estados Unidos de Norteamérica, se especifica la agricultura, minerales y topografía de la frontera con México [30].

En la Cueva del Cuervo, ubicada en el municipio de Nadadores Coahuila, como evidencia arqueológica se han encontrado unas sandalias fabricadas con hoja de lechuguilla de aproximadamente 8,000 años de antigüedad (*figura 9*). Los Chichimecas una cultura que vivió del año 1000 a.C. al 1800 d.C., fabricaban cuerdas, cestos, sandalias, redes y cobertores mortuorios [31]. En la región actualmente denominada La Laguna entre los estados de Coahuila y Durango, los Irritilas Chichimecas, pescaban con redes cónicas que estaban hechas con fibras de Yucca y de lechuguilla, conocida como nazas de donde procede el nombre actual del río ubicado en esta región de México [32]. El uso comercial de la lechuguilla se inició en las haciendas, en la segunda mitad del siglo XIX.



Figura 9. Sandalia tejida con hoja de lechuguilla procedente de la Cueva del Cuervo, perteneciente al municipio de Nadadores, Coahuila [<http://www.benc.sepc.edu.mx/>].

La clasificación taxonómica del *Agave* fue propuesta por Dahlgren, Clifford y Jeo en 1995 (figura 10) [33].

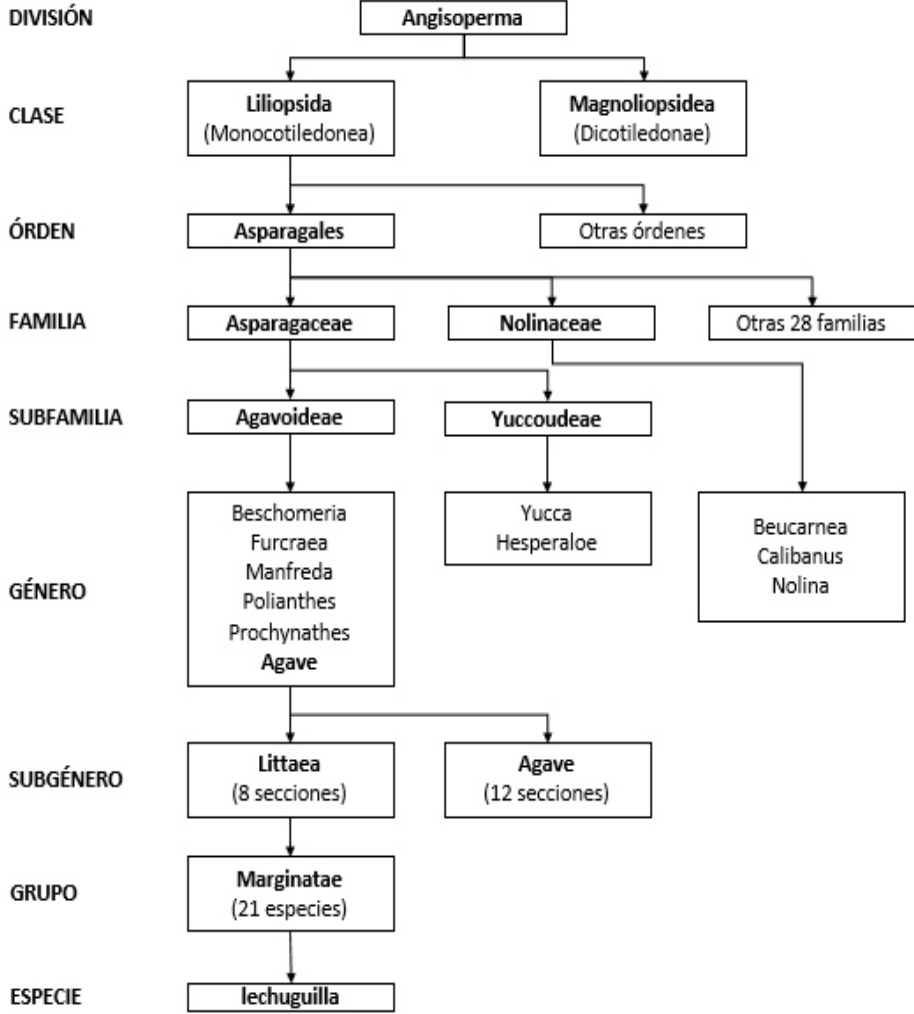


Figura 10. Clasificación Taxonómica del *Agave lechuguilla* Torrey.

1.3.2 Distribución geográfica del *Agave lechuguilla* Torrey

En las zonas lechugeras, los campesinos distinguen la planta del *Agave lechuguilla* de la lechuguilla mansa (*Agave filifera*) y la lechuguilla Jaumave (*Agave funkiana*) [34]. Una de las principales actividades de los campesinos en las zonas áridas del altiplano Mexicano es la recolección de materiales naturales para el autoconsumo y venta, entre las especies más recolectadas está la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), palma

samandoca (*Yucca carnerosa*), la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), el Mezquite (*Prosopis* spp) y los nopales (*Opuntia* spp).

La lechuguilla se destaca porque se ha recolectado desde el siglo XIX. La lechuguilla es una de las especies de *Agave* con la distribución natural más amplia y con mayor densidad en América del Norte.

El *Agave* lechuguilla es un arbusto rosetófilo, acaule, pequeño, con 11 a 30 hojas en promedio, puede llegar a medir entre 30 y 40 cm de ancho y entre 20 y 70 cm de alto (*figura 11*). Las hojas maduras miden entre 25 y 50 cm de alto y de 2.5 a 6.0 cm de ancho, su forma es lanceolada, cóncavas en el haz y cóncavas en el envés. Cuentan de 8 a 20 espinas que miden de 2 a 7 mm, separadas 1.5 a 4.0 cm, su extremo es una espina fuerte, cónica de 1.5 a 4.0 cm de largo. En las plantas con más de 20 hojas, la mayor parte de la biomasa (60%) está en las hojas. El número de hojas por planta es muy variable [35], en una muestra del Paso Texas reconocieron siete clases de tamaño de plantas; el mayor porcentaje de plantas tuvo entre 11 y 30 hojas. Para llegar a la madurez sexual, la planta requiere desde 4 hasta 15 años [36].



Figura 11. *Agave lechuguilla* Torrey [<https://es.wikipedia.org/>]

El *Agave* lechuguilla tiene una amplia distribución geográfica de aproximadamente 100,000 km² [37], desde Texas y Nuevo México, hasta Querétaro, Hidalgo y Guanajuato

(figura 12). Se considera que existen más individuos de la planta de lechuguilla, que cualquiera de las más de 125 especies de *Agave* que existen en México.



Figura 12. Distribución geográfica de la fibra de lechuguilla [<http://naturalista.conabio.gob.mx/>].

La distribución de esta planta corresponde a la altiplanicie y planicie del noreste de México, la región desértica [37]. El *Agave lechuguilla* se localiza entre 200 y 2400 metros sobre el nivel del mar [36] en los tipos de clima; secos, semisecos y templados subhúmedos, en temperaturas de -8 a 44 °C y precipitaciones entre 150 y 500 mm anuales. Para el caso del estado de Zacatecas el sustrato geológico donde se ubica el *Agave lechuguilla* está compuesto por rocas sedimentarias (caliza, conglomerado, lutita y arenisca), y en ocasiones localizado en rocas ígneas. Los suelos generalmente son litosoles con profundidades menores de 10 a 45 cm, correspondientes para suelos xerosoles, regosoles, fluviosoles y feozems. La densidad de la población de la planta de *Agave lechuguilla* puede variar desde 21,000 a 28,333 individuos por hectaria [38].

Los principales insectos perjudiciales son los picudos (*Peltophoros polymitus* y *scyphophoros interstitialis*), el gusano barrenador (*Megathymus* sp.), los insectos escamosos tales como los homópteros (cigarras, pulgones y cochinillas), ortópteros (chapulines y grillos). Los soricomorfos (topos) consumen las raíces, los roedores y los lagomorfos (liebres, conejos y picas) consumen la base tierna de la planta [39].

Al ser la lechuguilla una planta tóxica para el ganado tal como vacas, cabras y borregos, debido a la toxina saponina hepatonefrotoxin, llegándole a causar la muerte a los animales por inflamación en el hígado y riñones, la planta se encuentra protegida de este tipo de ataques [40].

1.3.3 Aprovechamiento de la fibra

La fibra de lechuguilla se conoce como; ixtle, istle, Mexican fibre o Mexican fiber, Tula fiber, Tampico fibre o Tampico fiber y Tampico hemp. La mayor parte de la producción se exporta a países como Estados Unidos de Norteamérica. Suiza, Japón, Holanda, Alemania, Gran Bretaña [41], Argentina, Brasil, Canadá, España, Francia, Italia, y Venezuela [42].

Las principales propiedades de esta fibra son su suavidad y su resistencia; de tal forma que se utiliza en la industria automovilística, elaboración de tapetes y bajo alfombras, cordelería y cepillería, bolsas, sacos y mantas, cepillos de aparatos de limpieza de alfombras y pulido de pisos, brochas, para la limpieza y pulido de maquinaria de acero. Los sobrantes se usan para hacer estropajos y rellenos de muebles [36].

La fibra formada junto con resina termoplástica o termofijas puede ser utilizada para fabricar láminas parecidas a las fibras de vidrio. Puede ser extraída celulosa de la fibra de lechuguilla, debido a que tiene rendimientos de un 40 a un 70 % de celulosa y un 18 % de lignina y hemicelulosa [43]. Esta celulosa no es apropiada para fabricar papel debido a que para su fabricación se requiere material vegetal con células más largas y angostas [44].

Las principales propiedades físicas de la fibra de lechuguilla son: resistencia a la tensión de 275 a 627 MPa, elongación de 10%, densidad de 1.38 g/cm³ [45].

Los cogollos pueden recolectarse cuando la planta tiene alrededor de seis años o cuando llegan a medir de 42 a 60 cm [46] o cuando el cogollo tiene una longitud mínima

de 25 cm [47]. De los cogollos se obtiene de 4.5 a 6.0 kg de fibra por día por persona, que es la máxima producción para una persona registrada [48]. Cuando el cogollo se corta correctamente y se deja una parte conocida como cogollito, la planta se puede regenerar, llevándole de 6 meses si la lluvia es abundante a un año si es escasa [49]. Para obtener la fibra es necesario hacer un descortezamiento o tallado de la hoja [50], eliminándose la epidermis y separando la fibra del guishe o gabazo, para esto se utiliza el método manual y el método mecánico (figura 13). Para el proceso manual se talla las hojas tiernas del cogollo [51], de esta manera se obtiene fibra de mejor calidad aunque el proceso es más lento y de menor producción (fibras más largas, uniformes y con mayor resistencia), al contrario, en el proceso mecánico es más rápido pero con fibras de menor calidad. En ambos métodos se utilizan solo las hojas o pencas más grandes, por lo tanto se eliminan las hojas más pequeñas del centro [36]. El color de la fibra es blanco opaco, con un tono verdoso, el cuál es más pronunciado de cuanto más imperfecto haya sido el tallado. La longitud de la fibra estará entre los 42 y 60 cm en función de la longitud de la hoja [46]. La fibra representa del 6.2 al 9.12 % del peso de la hoja [50], de un cogollo se obtienen de 6 a 8 hojas tallables (con longitud y dureza adecuada) [52].



Figura 13. Procedimiento para la obtención de la fibra de lechuguilla; a) Tallado manual y b) tallado mecánico [<http://www.inifap.gob.mx/>].

Para asegurar un aprovechamiento adecuado, es necesario una explotación límite de 4,000 plantas por hectárea [39]. Se ha calculado que la producción promedio por planta en condiciones de explotación es de 60 g, dato correspondiente a un estudio de las plantas pertenecientes al municipio de San Juan de Guadalupe, en el estado de Durango [53].

Capítulo 2. Antecedentes

En los pasados 100 años, el uso de agregado ligero en estructuras de concreto ha funcionado inadvertidamente como agente de curado interno. Es hasta la primer década del siglo XXI que esta tecnología ha sido intencionalmente incorporada para generar un curado interno, utilizando para ello diversos materiales con la característica de alta absorción, tales como; agregado ligero pre-humedecido, concreto reciclado pre-humedecido, polímeros súper absorbentes y fibras de madera con alta absorción. El uso de agregado ligero data de la época de los Romanos, uno de los ejemplos más notables es la construcción del panteón en Roma [54], en este notable caso el domo fue construido con seis diferentes concretos, en donde las paredes fueron construidas con concretos ligeros que van de una masa unitaria de 1750 kg/m^3 en la base del domo a 1600 kg/m^3 en la parte superior, el agregado ligero usado para este caso fue una pumicita [55].

En el año del 2010, el American Concrete Institute (ACI), definió el curado interno como: “El suministro de agua a través de una mezcla de cemento recién colocado mediante depósitos, a través de agregados ligeros pre humidificados, que liberan rápidamente el agua necesaria para la hidratación o para reemplazar la humedad perdida por evaporación o por auto desecación” [5]. Esta definición identifica los principios básicos por los cuáles fue concebido el curado interno; maximizar la hidratación, minimizar la auto desecación y en consecuencia, disminuir las tensiones inducidas a la matriz cementante que acompañan a este fenómeno y que llegan a producir agrietamientos. Probablemente la primera vez que se relacionó al agregado ligero con su capacidad para incorporar un curado interno al concreto, se dio en la publicación que en 1957 hiciera Paul Klieger quien manifestó: “Los agregados ligeros absorben agua

considerablemente durante la mezcla que al parecer puede transferirse a la pasta durante la hidratación” [56].

La búsqueda de una solución a la auto-deseccación de concretos de alto comportamiento, llevó a poner en contexto el tema a Robert Philleo al decir: "O la naturaleza básica de cemento portland se debe cambiar para que la auto-deseccación se reduzca, o hay que encontrar una manera para conseguir el curado con agua en el interior de los elementos estructurales de alta resistencia". Lo sugerido por Philleo es posible mediante el uso de agregado ligero saturado. Sin embargo, las personas que se esfuerzan por altas resistencias no están dispuestas a utilizar agregados ligeros. Un reemplazo parcial de la arena con finos ligeros saturados podría ofrecer una solución prometedora [57]. Este concepto se basa en que el curado externo solo penetra unos pocos milímetros en concretos de alto desempeño, mientras que el curado interno tiene una distribución uniforme en todo el elemento de concreto.

A mediados de la década de 1990, investigadores tanto en Alemania [58], como los Países Bajos [59], y de Israel [60], habían llevado a la investigación el concepto de Philleo con agregados pre-humedecidos. En años recientes otros materiales han sido utilizados como reservorios para el curado interno, tales como polímeros súper absorbentes (SAP por sus siglas en inglés) [61] [62] y fibras de madera [63]. Como en cualquier cambio tecnológico, la transferencia de resultados de la investigación a la práctica es muy lento, pero a partir del 2010 cientos de miles de metros cúbicos de concreto con agregado ligero pre-humedecido para curado interno, se han producido en Estados Unidos de Norte América [64].

En investigaciones previas, fueron probadas diferentes mezclas de concreto con fibras de lechuguilla para investigar su influencia como refuerzo para el concreto en estado endurecido, reportando que la absorción de agua de esta fibra fue de 98% en peso a las

24 horas y debido a que en esta investigación la adherencia fibra – matriz era un elemento clave para asegurar el reforzamiento del concreto mediante la fibra, esta se dosificó recubierta con productos como parafina para minimizar su deterioro e indirectamente por la aplicación de este recubrimiento fue disminuida la absorción del agua, de lo contrario, si la fibra hubiese sido dosificada sin algún recubrimiento, en el proceso de desorción se hubiera ocasionado una pérdida de adherencia con el concreto al disminuir su volumen. En esta investigación, a pesar de que la fibra se dosificó con un recubrimiento, a la edad de 28 días la resistencia a la compresión disminuyó un 15% [45]. Por el contrario, pruebas efectuadas por el Dr. Alejandro Durán Herrera et. al. [65], para concretos curados internamente con agregado ligero, encontraron resultados sin disminución significativa de la resistencia a compresión.

En la literatura científica, las investigaciones donde se ha utilizado fibras naturales como agente de curado interno son prácticamente inexistentes. En el año 2012 Mitsuo Ozawa y Hiroaki Marimoto [66] utilizaron fibra de yute como elemento de curado interno, una fibra similar a la de lechuguilla proveniente del continente Asiático. En su investigación la utilización de esta fibra dosificada a razón de 0.5, 1.0 y 2.0 % en volumen, en sus resultados las pruebas con 1.0% condujeron a una reducción del 36 % de la contracción autógena a la edad de 8 días.

Capítulo 3: Hipótesis, objetivos y justificación

3.1 Hipótesis

Por su alta capacidad de absorción de agua, la fibra de lechuguilla, utilizada como agente para implementar el curado interno en concretos de alto comportamiento, ayudará a mitigar las contracciones autógenas y por secado, sin modificar de manera considerable las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido.

3.2 Objetivo general

Reducir la contracción autógena y por secado, mediante la adición de fibra natural de lechuguilla como agente para introducir la tecnología de curado interno en concretos de alto comportamiento, así como medir su efecto en propiedades ingenieriles tanto en estado fresco como en estado endurecido.

3.3 Objetivos particulares

- Caracterización de los materiales a utilizar para disminuir el tiempo requerido en la etapa de optimización de proporciones mediante mezclas de tanteo.
- Caracterizar las propiedades de absorción, desorción y velocidad de absorción de la fibra para mantener constante la relación agua/cementante de 0.40.

- Establecer proporciones optimizadas por consistencia y homogeneidad para una mezcla de referencia, cuyas proporciones se establecerán manteniendo fijos los siguientes parámetros de diseño:
 - Consumo de cementante.
 - Relación agua/cementante.
 - Tipo y tamaño máximo de agregado.
 - Extensibilidad para la mezcla de referencia.
 - Sustituciones en masa del cemento por ceniza volante (20, 30 y 40%)
 - Sustitución en masa del cemento por humo de sílice (5%).

- Determinar mediante el ensaye de cubos de mortero, tanto la longitud como el volumen óptimo de fibra que condujera a reducciones no mayores al 15% de la resistencia a la compresión.

- Evaluar el desempeño de la fibra de lechuguilla como agente para la implementación del curado interno en las contracciones autógena y por secado, en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, así como en su durabilidad.

3.4 Justificación

Existen diferentes materiales que por su alta absorción y por su desorción apropiada podrían utilizarse como agentes para introducir y dosificar el curado interno en concretos de alto comportamiento. Por citar algunos se podrían mencionar: los polímeros súper absorbentes, las arcillas / pizarras expandidas, las pumicitas, las fibras de madera y las fibras naturales.

La fibra natural de lechuguilla surge como una alternativa para incorporar el curado interno en los concretos de alto comportamiento, ya que:

- Presenta una alta absorción, equivalente al 98%.

- Es un material disponible en México, para la que en su procesamiento industrial se genera aproximadamente el 40% como subproducto, cantidad importante que pudiese utilizarse para los fines evaluados en esta investigación. Por otro lado, esta nueva área de oportunidad podría representar un mayor ingreso para los trabajadores del campo que recolectan y procesan este material.
- Se han estudiado fibras naturales similares conduciendo a reducciones de hasta un 36% de la contracción autógena.

Capítulo 4: Descripción de los materiales

Los materiales seleccionados para esta investigación son fáciles de conseguir en el mercado de la construcción del área metropolitana de Monterrey, tanto los cementantes, agregados y aditivos. El parámetro seleccionado de extensibilidad, consumos de cemento, porcentajes de ceniza volante, porcentajes de humo de sílice y tamaño máximo del agregado, y por consecuencia sus resistencias a la compresión, son los que comúnmente se utilizan para un CAC en la industria de la construcción.

La fibra de lechuguilla, descrita en el capítulo 3, se presenta como opción para mejorar la estabilidad volumétrica y la durabilidad de este tipo de concretos ya que puede contribuir a mitigar las contracciones autógenas las cuales tienden a ser más significativas para este tipo de concretos.

4.1 Cemento portland

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por reacción química con el agua [25].

El cemento portland utilizado fue marca Moctezuma de la planta de Cerritos ubicada en el Estado de San Luis Potosí, México, clasificado como CPO 40 según la norma Mexicana NMX-414-ONNCCE [67] y como Tipo I según la norma ASTM C150 [12]. El cemento CPO 40 es de uso industrial para el mercado del concreto premezclado a diferencia del CPO 30R que es para uso de autoconstrucción. El cemento fue ensacado a su recepción en bolsas y en sacos de plástico para su protección contra la humedad, posteriormente fueron almacenados hasta su uso experimental.

4.2 Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón coque pulverizado en plantas generadoras de electricidad, básicamente es un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio [25].

La ceniza volante utilizada en este proyecto de investigación es procedente de la planta carboeléctrica de Río Escondido, ubicada en la ciudad de Nava Coahuila, México, clasificada como Tipo F según la norma ASTM C618 [68]. Para evitar una mayor variabilidad en los resultados, la ceniza fue cribada en una malla # 100 en una cribadora marca Swequipos, modelo LS30C666, desechándose el material retenido en esta malla, consistente en carbón coque sin calcinar el cual representa aproximadamente un 25% del total. La ceniza ya cribada fue colocada en bolsas y posteriormente esta se colocó en un saco de plástico y puesta en el mismo almacén del cemento para evitar contacto con la humedad y alguna posible contaminación. Los porcentajes utilizados en la presente investigación fueron de 20, 30 y 40% en sustitución en masa del cementante total.

4.3 Humo de sílice

El humo de sílice, también llamado microsíllice, es un subproducto que se usa como puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico en la producción de silicio o ferrosilicio a 2000 °C (figura 14) [25].

En esta investigación un humo de sílice fue utilizado ya que es una de las puzolanas más comúnmente utilizadas en la fabricación de CAC debido a que por su gran área superficial de aproximadamente 20,000 m²/kg, en comparación con un cemento Tipo I

que tiene alrededor de 300 a 400 m²/kg, el cual representa un elemento muy importante para obtener un alto grado de impermeabilidad y cohesividad [25].

El porcentaje utilizado fue de un 5% del total del material cementante, valor propuesto tanto por la PCA [25] como por el proveedor de este producto, además, el uso de este material en altos consumos (mayores al 10%), conduce a tener concretos con alta viscosidad, por lo tanto poca trabajabilidad lo cual resulta impráctico para su uso industrial, contrario a lo que se pretendía hacer en esta investigación al trabajar con CAC de uso común.

El humo de sílice utilizado para esta investigación fue de la marca BASF comercializado como Rheomac SF100.



Figura 14. Humo de sílice [http://www.silvi.com]

4.4 Agregados

La arena y grava ocupan entre el 67 al 75% del volumen del concreto, esto hace que influyan tanto en las propiedades del estado fresco y endurecido, así como en la economía del propio concreto [25].

Los agregados fueron del tipo calizo adquiridos en la mina del cerro de Las Mitras propiedad de la empresa Industrializadora de Caliza, S.A. de C.V., ubicada en el municipio de Santa Catarina, Nuevo León, México. Los agregados fueron utilizados sin ningún procesamiento posterior al de su fabricación. La arena consistió en caliza con un

Capítulo 4	Descripción de los materiales
-------------------	-------------------------------

tamaño máximo de 4.75 mm (malla #4), se destaca que en el análisis granulométrico, el 100 % pasó esta malla, excediendo la especificación de la norma ASTM C33 en el porcentaje de finos que pasa la malla # 100, ya que se obtuvo un 19% siendo que se encuentra establecido como límite máximo un 10%. Este exceso de finos es una característica de los agregados calizos de la región de la ciudad de Monterrey, debido a la pulverización del material al momento de su trituración, sin embargo, esto no representa un problema para el CAC debido a que para la fabricación de este concreto, se recomienda una mayor cantidad de polvos (cemento portland más puzolanas más polvo de los agregados), pudiendo llegar a ser de 600 kg/m³ [3], ayudando este exceso de finos a aumentar la cohesividad del concreto y evitar la segregación de los agregados con la pasta.

La grava al igual que la arena es de origen calizo de la misma procedencia, se seleccionó el tamaño máximo de 19 mm para que la investigación se realizara en base a un concreto con el mayor tamaño máximo para un concreto autocompactable recomendado para la extensibilidad propuesta de 60 ± 5 cm, [3], con el fin de lograr una mayor estabilidad volumétrica al ser el agregado un elemento más estable en la mezcla.

Debido a que no se conocía en qué medida los agregados absorbían el agua considerada como agua de absorción y para conocer si el agua que no fuera absorbida lo suficientemente rápido pudiera afectar tanto en el comportamiento del CAC al momento de determinar sus propiedades tales como extensibilidad y T₅₀, además de poder analizar cómo influía este fenómeno en el curado interno al existir la posibilidad de que los agregados puedan absorber parte del agua liberada por la fibra, fue por este motivo el diseñar un método para determinar la velocidad de absorción de los agregados y caracterizarlos por este método.

Capítulo 4	Descripción de los materiales
-------------------	-------------------------------

Se utilizó agregado ligero tipo pumicita para contrastar las pruebas de velocidad de absorción y también por el hecho de que este tipo de material es muy utilizado como elemento de curado interno. Este material presenta una densidad de 445 kg/m³ y una absorción aproximada de 32%. El agregado es procedente del ejido Alfredo V. Bonfil, Municipio de Mulegé, Baja California Sur, México.

4.5 Aditivo superfluidificante

En las etapas iniciales de la investigación, fue utilizado un aditivo superfluidificante de la marca BASF comercializado como MasterGlenium 3401, y debido a su bajo desempeño por su alto consumo en pruebas preliminares para lograr un CAC, se utilizó un aditivo superfluidificante de alto rango de la marca Euclid, base policarboxilato comercializado con el nombre de Plastol precast plus.

Este aditivo cumple con la norma ASTM C494 [69] como Tipo A (aditivo reductor de agua) y Tipo F (aditivo reductor de agua de alto rango).

Se definió la dosis del aditivo superfluidificante para alcanzar la extensibilidad objetivo de la mezcla de referencia R-C en 60 ± 5 cm, y para el resto de las mezclas esta se fijó con la finalidad de medir principalmente el efecto de la adición de la fibra en la extensibilidad, viscosidad con la prueba T₅₀, índice de estabilidad visual [70] y bloqueo con el anillo J [71].

4.6 Aditivo reductor de la contracción

La reducción de la presión capilar por agentes orgánicos reductores de la contracción disminuye los cambios volumétricos en el concreto debido a la auto-deseccación interna o por la contracción por secado causada por el aire circundante. [72].

Para tener una comparación de la mitigación por la adición de la fibra al CAC, a cada serie de mezclas de concreto, se le agregó una mezcla con la adición de un aditivo reductor de la contracción (ARC) de la marca Euclid, comercializado como EUCON SRA base éter monobutílico del dietilenglicol con cero contenido de agua [73]. La dosis empleada fue del 2% con respecto al peso del cemento, la máxima recomendada por el proveedor, con la finalidad de maximizar sus efectos y poder tener un punto de comparación más definido. La dosis de este aditivo definida para la mezcla de referencia C-R, fue fijada para el resto de las mezclas con la finalidad de analizar su efecto sin tener la dosis como una variable más. La ficha técnica del producto señala que para la dosis del 2% de ARC, el decremento en la resistencia a la compresión puede llegar a ser de aproximadamente 15%, este parámetro fue tomado en cuenta como límite para estimar el volumen y longitud de la fibra.

4.7 Fibra de Agave lechuguilla Torrey

La lechuguilla es una planta de la zona árida y semiáridas de México y sur de Estados Unidos de Norteamérica, utilizada por los nativos de Norteamérica por su fibra desde hace por lo menos 8000 años, la cantidad de celulosa que contiene la fibra se encuentra entre el 40 y 70 % y aproximadamente un 18% de lignina y hemicelulosa [39].

La fibra al tener una alta capacidad de absorción de un 98%, fue propuesta como elemento de mitigación de la contracción autógena. La fibra seleccionada fue adquirida en la planta Ixtlera Santa Catarina S.A. de C.V., procesadora de este material. Se estima que el 40% de la producción es un subproducto utilizado entre otras cosas para el relleno de asientos automotrices. La fibra presentó un aspecto tubular según las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, (*figura 15*) y (*figura 16*), cuentan con un diámetro promedio de 215 μm , determinado midiendo el diámetro de los extremos y

del centro de la fibra virgen, secada al horno por 24 horas a 110°C, debido a que en esta investigación se utilizó toda la fibra el diámetro considerado es el promedio de las tres mediciones, más sin embargo se presenta las mediciones por separado para que en caso de posteriores investigaciones con la fibra de desperdicio se tome en cuenta esta característica, la longitud promedio fue de 5.01 mm y una velocidad de absorción tal que a un minuto de su inmersión al agua, la fibra alcanzó una absorción aproximadamente de un 71% con respecto a su absorción a las 24 horas. El contenido de fibra por m³ de concreto y su longitud, fue determinado definiendo principalmente como límite la disminución de un 15% la resistencia a la compresión que manifiesta la ficha técnica del ARC, de tal forma que tanto la fibra y el ARC tuvieran este parámetro como punto de comparación.

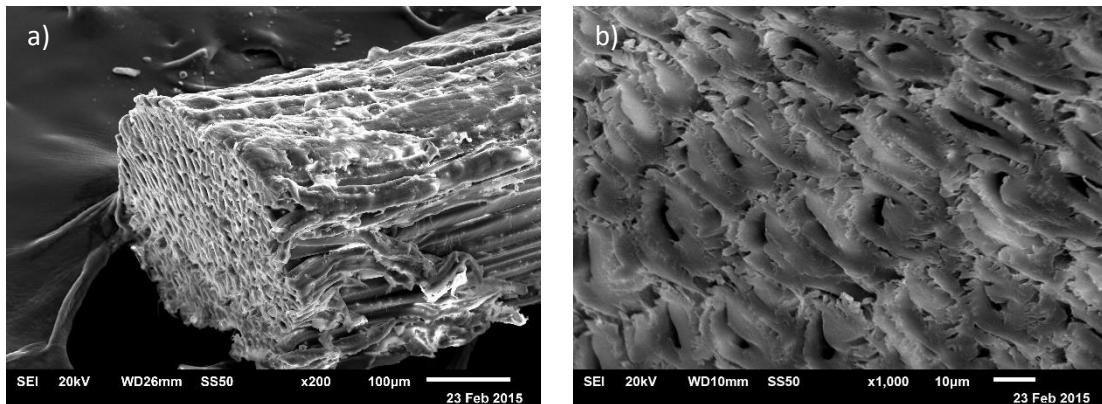


Figura 15. Micrografías de la fibra; a) corte longitudinal y transversal, b) detalle de sus alveolos.

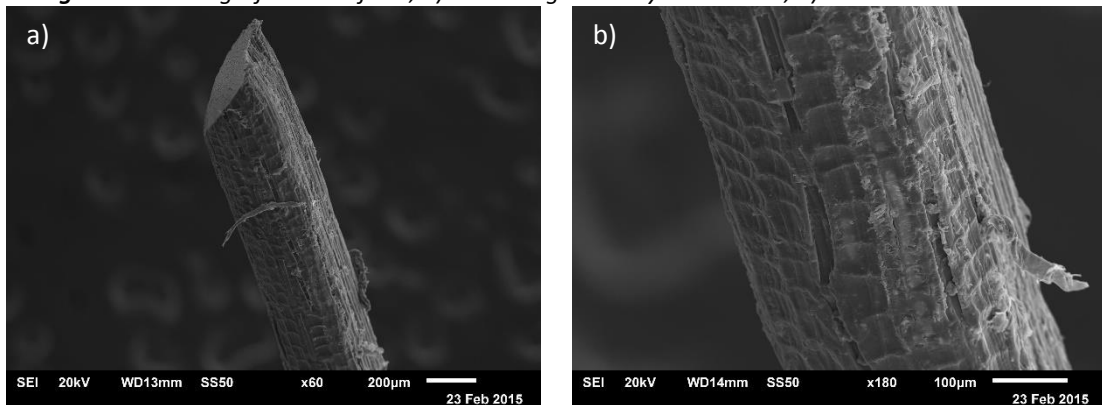


Figura 16. Micrografía longitudinal de la fibra; a) perfil, b) detalle de textura.

Capítulo 5: Metodología experimental

5.1 Matriz de experimentos

5.1.1 Determinación del contenido óptimo de fibra

El volumen de la fibra es un factor crítico en el desarrollo de la investigación debido a que esta es el medio para aportar el agua que necesite el concreto para mitigar sus contracciones autógenas. La cantidad de fibra optimizada se determinó mediante la adición de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% [66] con longitud promedio de 10 mm, dosificadas con relación al volumen de concreto y comparando su influencia en la resistencia a la compresión. Fue elegida aquella que presentó una disminución en la resistencia no mayor al 15% con respecto a la referencia. El diseño de mezclas para esta serie en particular se puede observar en la [tabla 2](#).

Tabla 2. Serie para definir el contenido de la fibra en función de la pérdida de resistencia a la compresión.

Serie	Clave	Adición de fibra * (%)	Longitud (mm)
	MRV	Sin	
	V0.5	0.5	
A	V1.0	1.0	10.0
	V1.5	1.5	
	V2.0	2.0	

* Volumen absoluto

MRV.- Mortero de referencia

V0.5.- Mezcla con 0.5 % de volumen de fibra

V1.0.- Mezcla con 1.0 % de volumen de fibra

V1.5.- Mezcla con 1.5 % de volumen de fibra

V2.0.- Mezcla con 2.0 % de volumen de fibra

5.1.2 Determinación de la longitud óptima de la fibra

Debido a que la fibra de lechuguilla tiene una forma física tal que absorbe un líquido en forma de popote, fue necesario determinar la longitud máxima de la fibra que se pudiese colocar para implementar el curado interno en un CAC, para este fin se compararon longitudes de fibra de 5, 10 y 20 mm [66], limitando la disminución de la resistencia en máximo 15 % con respecto a la referencia. El diseño de mezclas para esta serie se puede observar en la [tabla 3](#).

Tabla 3. Serie para definir la longitud de la fibra en función de la disminución de la resistencia a la compresión.

Serie	Clave	Adición de fibra *	Longitud de fibra
		(%)	(mm)
B	MRL	Sin	Sin
	1-5		5
	1-10	1	10
	1-20		20

* Volumen absoluto

MRL.- Mortero de referencia

1.5.- Mezcla con fibra 1 % en volumen y 5 mm de longitud

1.10.- Mezcla con fibra 1 % en volumen y 10 mm de longitud

1.20.- Mezcla con fibra 1 % en volumen y 20 mm de longitud

5.1.3 Mezclas de concreto

Con el fin de controlar las variables de estudio en la fabricación de las mezclas de pruebas, en todas ellas se mantuvo fijo el consumo de cementante (400 kg/m^3), la relación a/cm seleccionada fue de 0.40, así mismo se realizaron sustituciones de ceniza volante de 20, 30 y 40% y 5% de humo de sílice con relación al cementante total, se utilizó aditivo reductor de la contracción con una dosis de 2% con relación al peso del cementante y un tamaño máximo del agregado de 19 mm, fijando una extensibilidad de

60 ± 5 cm. En la **tabla 4** se presenta una serie de criterios para justificar cada uno de los parámetros definidos anteriormente.

Tabla 4. Justificación de parámetros para el diseño de mezclas experimentales.

Concepto	Parámetro seleccionado	Criterios de justificación
Consumo de cementante	400 kg/m ³	ACI 237 tabla 4.2; se da como directriz consumos de entre 386 y 475 kg/m ³
Relación agua / cementante	0.40	ACI 237 tabla 4.2; típicas relaciones utilizadas entre 0.32 y 0.45.
Ceniza volante	20, 30 y 40% en sustitución al consumo de cementante total	ACI 237 punto 4.3.2.2; para mejores resultados en extensibilidad se han utilizado porcentajes entre 20 y 40 % de CV.
Humo de sílice	5% en sustitución al consumo de cemento	Mínimo reemplazo recomendado por le ACI 237 para darle cohesividad al concreto. Recomendación del proveedor sugerido en la ficha técnica del producto.
Aditivo reductor de la contracción	2 % en relación al consumo de cementante	Recomendación del proveedor sugerido en la ficha técnica del producto.
Tamaño máximo del agregado	19 mm	EFNARC 2002; menciona que la grava suele limitarse a 19 mm.
Extensibilidad	60 ± 5 cm	ACI 237 tabla 2.5; cumple en el rango medio para las características de los elementos a colar. EFNARC; Clasificada como SF1 al estar en el punto medio de 55 y 65 cm.

Las mezclas de concreto fueron diseñadas en 5 series (**tabla 5**), con la finalidad principal de evaluar la influencia de la adición de la fibra de lechuguilla como elemento de curado interno, comparada contra el aditivo reductor de la contracción, la ceniza volante contra sus diferentes porcentajes de sustitución y estos a su vez comparados contra la sustitución del humo de sílice, además, todas estas mezclas se compararon contra la mezcla de referencia, es decir, sin el uso de cementantes suplementarios y/o agentes mitigantes de la contracción autógena.

Tabla 5. Series de mezclas de concreto.

Serie	Clave	Elemento de Mitigación de la Contracción Autógena	Cementante Complementario
C	R	Sin	Sin
	R-S	ARC	
	R-C	FL	
	R-CL		
D	20	Sin	CV20
	20-S	ARC	
	20-C	FL	
E	30	Sin	CV30
	30-S	ARC	
	30-C	FL	
F	40	Sin	CV40
	40-S	ARC	
	40-C	FL	
G	HS	Sin	HS5
	HS-S	ARC	
	HS-C	FL	

- | | |
|---|---|
| <p>R.- Referencia</p> <p>CV.- Geniza volante</p> <p>20.- 20% en sustitución del cementante</p> <p>30.- 30% en sustitución del cementante</p> <p>40.- 40% en sustitución del cementante</p> <p>HS.- Humo de sílice</p> | <p>5.- 5% en sustitución del cementante</p> <p>FL.- Curado interno con fibra de lechuguilla</p> <p>C.- Fibra de lechuguilla</p> <p>CL.- Fibra de lechuguilla lavada</p> <p>ARC.- Aditivo reductor de la contracción</p> <p>S.- Aditivo reductor de la contracción</p> |
|---|---|

5.2 Métodos de prueba

Para conocer la caracterización físico-químicos de los materiales y poder diseñar las mezclas tanto de mortero y concreto según las series presentadas en la [tabla 2](#), [tabla 3](#) y [tabla 5](#), y para definir las propiedades en estado fresco y estado endurecido de las mismas, a continuación se describen las pruebas utilizadas para este fin:

5.2.1 Materia prima

5.2.1.1 Caracterización de los agregados; para caracterizar los agregados tanto la grava como la arena, se llevaron los siguientes métodos de prueba:

5.2.1.1.1 Densidad, absorción, peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico varillado

Las pruebas de densidad y absorción fueron determinadas conforme a la norma ASTM C127 [74], para el caso de la arena, las pruebas fueron determinadas por la norma ASTM C128 [75]. Para determinar tanto el peso volumétrico seco suelto de la grava y arena, y el peso volumétrico varillado para la grava, se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C29 [76].

5.2.1.1.2 Análisis granulométrico

Las pruebas granulométricas tanto de la arena y la grava fueron realizadas conforme a la norma ASTM C136 [77].

5.2.1.1.3 Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad de los agregados al momento de la fabricación de las mezclas y con esto hacer su respectiva corrección en los diseños y no alterar su relación agua / cementante fue obtenida bajo la norma ASTM C566 [78].

5.2.1.1.4 Compacidad máxima de los agregados

Para lograr una mayor empaquetamiento de los agregados, fueron efectuadas pruebas de peso volumétrico seco suelto, haciendo combinaciones de grava y arena (G/A) de 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 y 30/70, obteniéndose para cada una de las combinaciones el peso volumétrico seco suelto (PVSS) según la norma ASTM C29 [76]. Con la gráfica resultante de porcentaje de relación G/A vs PVSS (*figura 17*) se obtuvo el máximo valor de compacidad (PVSS) y su correspondiente relación G/A.

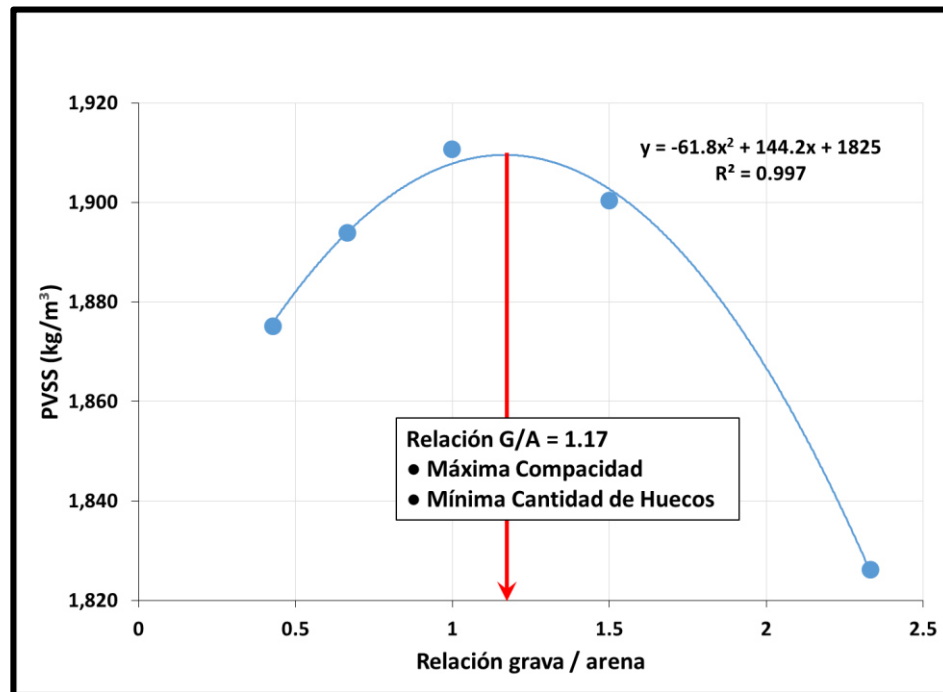


Figura 17. Cálculo de la compacidad máxima para la grava de 19 mm y la arena de 4.75 mm (# 4)

5.2.1.1.5 Optimización de la relación grava / arena mediante la medición del bloqueo por el anillo J (nuevo método de prueba)

Debido a que las pruebas efectuadas con la relación G/A producto de la prueba de compacidad (figura 17) resultó en un concreto no apto para ser considerado como autocompactable al presentar un bloqueo excesivo determinado por la prueba de anillo J [71] (el método de compacidad es aplicable para concretos convencionales). Para lograr optimizar las proporciones en la mezcla de concreto de referencia, se definieron límites de G/A, partiendo de un mortero con G/A = 0, hasta una proporción típica de un concreto convencional sobre arenado (concreto bombeable) y este rango fue dividido en 5 partes. El mortero fue diseñado con el consumo de cemento y la relación agua / cemento del concreto de referencia con la adición del aditivo superfluidificante para lograr la extensibilidad objetivo de 60 ± 5 cm, para el resto de las proporciones se

calcularon las correcciones con los materiales correspondientes para obtener una nueva relación G/A sin alterar los consumos de cemento ni la relación agua / cemento, determinando su extensibilidad y respectivo bloqueo por el método de anillo J, adicionando el aditivo superfluidificante en caso de ser necesario para llegar a la extensibilidad objetivo.

El procedimiento de mezclado seguido fue el descrito en el punto correspondiente de “procedimiento de mezcla” (*tabla 6*), con la variante de que posterior a cada ejecución de pruebas de cada relación G/A, se reintegraba el concreto dentro de la mezcladora con sus correcciones correspondientes para caracterizar la nueva relación G/A con la determinación de la prueba de extensibilidad y anillo J. Para la determinación de la G/A óptima, se graficaron los datos de G/A vs extensibilidad con la tolerancia de - 5 cm (ASTM C1621, define el bloqueo de 5 cm como máximo) para definir el límite en el que la prueba de anillo J se encuentra dentro de especificación (*figura 29*). La relación G/A seleccionada fue la intermedia entre aquella que se encontraba al límite de la tolerancia y la inmediata anterior.

5.2.1.1.6 Velocidad de absorción de los agregados (nuevo método de prueba)

Debido a que se desconocía la velocidad en que los agregados triturados absorben su agua de absorción y al dosificar un agregado semi-seco, que tanta de esta agua quede libre al llegar el tiempo de fraguado final como para que el agua no absorbida influya en el incremento de la relación agua / cementante, además de que el aditivo superfluidificante fuera absorbido dentro de los agregados al momento de dosificarlo y el efecto esperado de dispersión sea menor, otro aspecto sería que al determinar las pruebas de consistencia tales como la extensibilidad de un concreto recientemente fabricado, el agua aún no este absorbida por los agregados provoque un mayor

resultado de lo estimado, todo esto causando problemas de robustez y como consecuencia que el CAC quede fuera de especificación.

Para poder determinar la velocidad de absorción se siguió el principio de Arquímedes en el que el empuje del agua en el agregado está en función de su volumen incluyendo el del aire atrapado dentro de sus poros. El peso sumergido de la muestra registrado en una báscula analítica se va incrementando en proporción a la pérdida de aire de sus poros, de tal forma que es posible correlacionar la pérdida de aire (agua absorbida) contra el tiempo transcurrido para caracterizar su velocidad de absorción. Para obtener las mediciones de absorción del agregado sumergido en agua, se apoyó en el método descrito en la norma ASTM C127 [74], para ello, previamente a la prueba la grava fue lavado sobre una malla # 4 y para la arena en la malla # 100 con agua corriente hasta que el agua de lavado fuera transparente, posteriormente secándolo en un horno eléctrico a 110 °C hasta peso constante. En el caso de la grava se utilizó una muestra de aproximadamente 5.0 kg y 2.0 kg para la arena.

La grava fue sumergida en una sesta de alambre y la arena en una malla # 100. Para registrar las variaciones de peso se utilizó una báscula digital con aproximación a 0.5 g y debido a que la velocidad inicial de absorción fue demasiado rápida para ser registrada manualmente, fue colocada una cámara digital que grababa tanto el cambio de peso como el tiempo transcurrido medido en un cronómetro colocado junto a la pantalla de la báscula, empezando a cronometrar cuando la muestra era sumergida.

Debido a la dificultad de medir la absorción desde el tiempo cero [79] y hasta que se estabiliza la lectura de la báscula, al final de la prueba se obtuvo la absorción de la muestra con las normas ASTM C127 y C128 [74] [75], restándose la cantidad de agua registrada en la prueba de velocidad de absorción a la cantidad de agua absorbida por

el método estándar para la determinación de la absorción, de esta forma, se tenía el valor de absorción inicial.

Como el aire que era desalojado por el agua se podía alojar entre las partículas del agregado y en su superficie, este era liberado golpeando el recipiente que contenía el agregado sumergido en agua antes de tomar una lectura. El tiempo de duración de la prueba fue hasta que no existiera variación entre las lecturas en un período de tiempo de dos horas.

Para determinar la velocidad de absorción del agregado ligero de pumicita, el agregado fue lavado sobre una malla de 2.36 mm (# 8) y puesto a secar a 110 °C hasta peso contante, posteriormente se cribó por las mallas de 12.5 mm (1/2), 9.5 mm (3/8”), 4.75 mm (# 4) y 2.36 mm (# 8), para seleccionar los pesos según la granulometría de 9.5 a 2.36 mm (3/8” a # 8) según la norma ASTM C1761 [80]. Para evitar que el agregado saliera de la sesta metálica, esta fue tapada con una malla # 4, el material que pudiera salirse se recolectaba, se secaba a 110 °C a peso constante y se restaba del peso inicial de la muestra, el tiempo de duración de la prueba fue hasta que no existiera variación entre las lecturas en un período de tiempo de doce horas, de igual forma que en la prueba del agregado de caliza, el recipiente que contenía el agua era golpeada con la siguiente fuerza necesaria para liberar el aire atrapado entre las partículas del agregado *(figura 18)*.

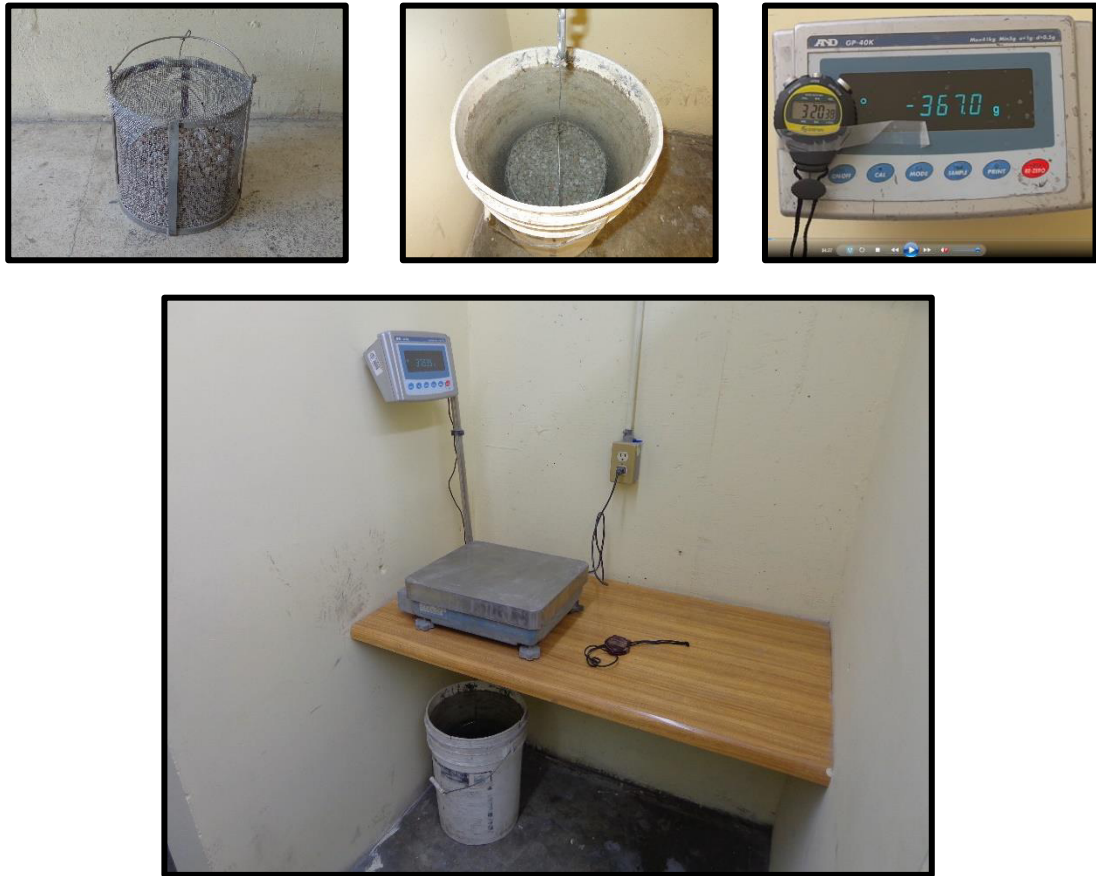


Figura 18. Prueba de velocidad de absorción del agregado ligero.

5.2.1.2 Preparación y caracterización de la fibra; La fibra fue caracterizada para diferentes longitudes por su complejidad de manipulación, cada uno de los métodos describen a continuación.

5.2.1.2.1 Procedimiento de corte

La fibra fue adquirida sin corte con longitud de aproximadamente 35 cm, para obtener la longitud requerida de 10.0 y 5.0 mm, fueron cortadas manualmente con una guillotina de oficina para papel (*figura 19*), las fibras cortadas fueron almacenadas en botes tapados, identificados para evitar alguna posible contaminación, las muestras que fueron secadas, se almacenaban en bolsas plásticas cerradas e identificadas.

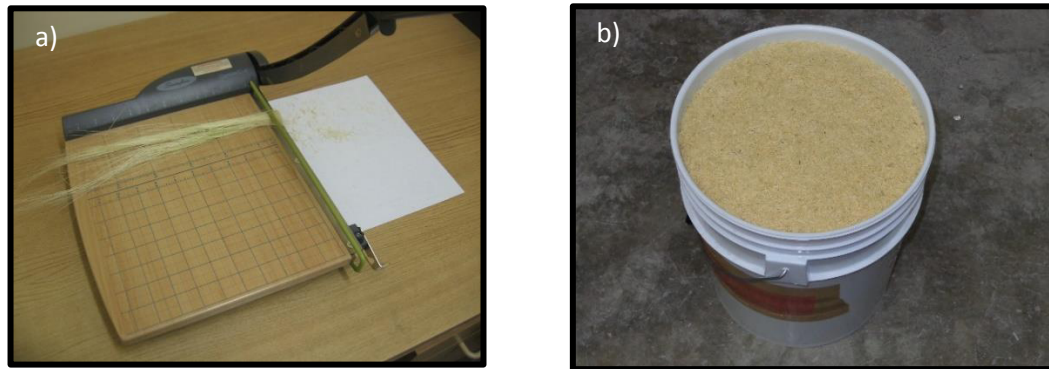


Figura 19. a) Guillotina para papel utilizada en el corte de la fibra, b) almacén de la fibra en botes identificados para evitar su deterioro.

5.2.1.2.2 Medición del diámetro, longitud y peso por unidad de longitud

Fue determinada de manera estadística el diámetro, la longitud y el peso por unidad de longitud de la fibra mediante un muestreo calculado de acuerdo con la [ecuación 4](#) [81].

$$n = ((s z)/E)^2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

s = desviación estándar (mm)

z = nivel de confianza

E = Error máximo admisible (mm)

Diámetro.- Se tomaron al azar 367 fibras sin cortar a las que se le midió los diámetros a aproximadamente 25 mm de los extremos y el centro, posteriormente se le dio tratamiento estadístico para determinar el promedio y su desviación estándar. El equipo de medición utilizado fue un micrómetro de 0 a 1" marca Mitutoyo. El motivo de medir los extremos y el centro de la fibra es debido a que en el proceso de manufactura de la fibra los extremos son desechados y el centro es la parte de la fibra que es comercializada, además que el diámetro cambia considerablemente entre los extremos.

Longitud.- Se tomaron al azar 1000 fibras cortadas, este número fue seleccionado para cubrir el tamaño de muestra de 772 fibras requerida según un muestreo previo donde

se tomaron al azar 100 fibras las cuales condujeron a un resultado de una desviación estándar de 0.94 mm, para un nivel de confianza del 95% ($z = 1.96$) y un error máximo admisible de 0.1 mm.

Peso por unidad de longitud.- Fueron seleccionadas al azar 1000 fibras las cuales fueron pesadas en una báscula analítica marca Ohaus, modelo Explorer E04130 de 1 mg de precisión, el resultado fue dividido entre la longitud promedio para obtener el peso por unidad de longitud.

5.2.1.2.3 Porcentaje de absorción

En la determinación de la absorción fue saturada una muestra de fibra de 15 cm de largo por 24 horas, posteriormente se tomaron porciones de la fibra escurriéndose el agua en exceso y secándolas con papel absorbente extendiéndola en una charola metálica rectangular plana, hasta llegar a la condición saturada superficialmente seca (sss), la porción en sss se colocó en un recipiente no absorbente cubierta con una franela húmeda para prevenir la pérdida de humedad, al tener un peso aproximado de 400 g la fibra fue pesada para conocer el peso en condición sss (B) y posteriormente se obtuvo el peso seco (A) al colocarse al horno eléctrico a una temperatura de 110 °C hasta peso constante. Se obtuvieron 4 muestras con este mismo procedimiento. El porcentaje de absorción fue calculado con la [ecuación 5](#).

$$\% \text{ de absorción} = [(A - B)/A] \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

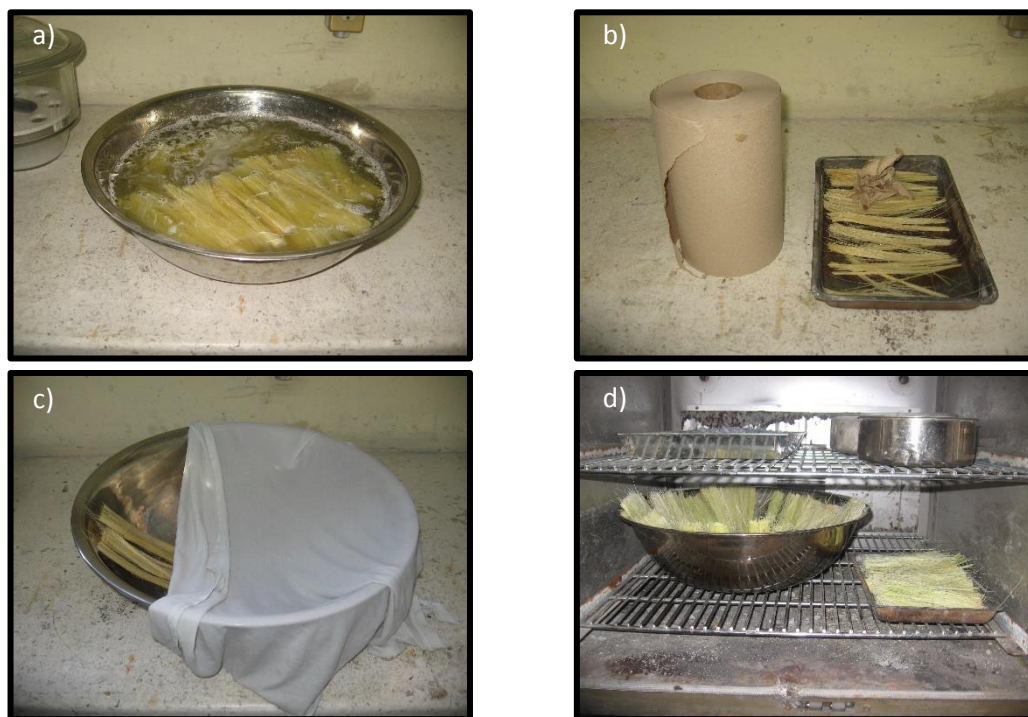


Figura 20. Etapas de determinación de la absorción de la fibra; a) saturación, b) secado a condición sss, c) protección para evitar la pérdida de humedad, d) secado al horno eléctrico.

5.2.1.2.4 Densidad

En la prueba de densidad se utilizaron fibras de 10 mm de largo secadas al horno eléctrico a 110 °C hasta peso constante, posteriormente se pesaron 34.484 g, se dejaron saturar por 24 horas y evitando la pérdida del material, se secó con papel absorbente hasta la condición de sss, considerando que se llegó a la condición sss hasta llegar al peso calculado para llegar a este estado (A). Utilizando un frasco Chapman con agua a una lectura tomada como la inicial (C), la fibra fue introducida dentro del frasco agitándolo para desalojar el aire atrapado, tomándose la lectura en el frasco al terminar de desalojarse el aire del líquido (B). La densidad se determinó en base a la [ecuación 6](#), de manera similar que el procedimiento anterior y fue determinada la densidad de la fibra saturada con 50% de agua y 50% ARC, además, se determinó la densidad de la fibra introduciéndola dentro del frasco en condición seca.

$$\text{Densidad} = (A)/(B - C) \quad (\text{Ecuación 6})$$



Figura 21. Frascos de Chapman con la fibra para la determinación su densidad.

5.2.1.2.5 Velocidad de absorción

Para determinar la velocidad de absorción de la fibra, se siguió el procedimiento anteriormente descrito para determinar la velocidad de absorción de la arena. De la misma manera que se procedió en la prueba de la determinación de la velocidad de absorción del agregado ligero, el material que quedara fuera de la malla fue restado del peso de la muestra.



Figura 22. Determinación de la velocidad de absorción de la fibra; a) colocada sobre una malla # 100 para su inmersión, b) se sumergió en agua suspendida de una báscula, c) la fibra que quedó fuera de la malla fue recolectada por filtración en una malla # 100.

5.2.1.2.6 Velocidad de desorción

Con el fin de conocer la factibilidad del uso de la fibra como agente de curado interno y determinar la desorción de la fibra ya que sería un error considerar toda su agua de

absorción como disponible para el curado interno [82], fue utilizado el procedimiento descrito en la norma ASTM C1761 [80], colocando 5 g de fibra en condición sss en un desecador de cristal con nitrato de potasio [83] para lograr la humedad relativa del 94% al iniciar la prueba, registrándose la pérdida de humedad con respecto al tiempo.

5.2.1.2.7 Lavado y saturación de la fibra

Debido a que los tiempos de fraguado determinados con la fibra presentaron un retraso considerable (2.14 veces de retraso del fraguado final para la mezcla E-30-C con respecto a su referencia E-30), y que el objetivo de la presente investigación tiene por efecto analizar la fibra natural, solamente fue incluida en la serie C una mezcla extra con fibra lavada (C-R-CL) para conocer su efecto en todos los parámetros que se le midieron a cada mezcla. El procedimiento de lavado consistió en dos sesiones de enjuague consistente cada una en un remojo de la fibra por 24 horas y posteriormente enjuagarla sobre una malla # 100 hasta que el agua de lavado fuera transparente, posteriormente a este procedimiento la fibra se dejó sobresaturada en agua para incluirla en la mezcla correspondiente, el agua de sobresaturación se corrigió del agua de mezcla. La fibra sin lavar, fue dejada saturándose en agua por 24 horas previas a la realización de la mezcla. Para asegurar su saturación, la fibra fue colocada con una cantidad excedente de agua y la cantidad en exceso de agua se corrigió del agua de mezcla.

5.2.1.2.8 Distribución de la fibra en el concreto endurecido

Para conocer si la distribución de la fibra dentro de la matriz de concreto se encontraba uniformemente distribuida para asegurar la uniformidad del curado interno, fueron comparados su distribución en una muestra constituida de dos cilindros estándar de 10 x 20 cm para cada una de las series, los cuales fueron probados a tensión por compresión diametral para exponer la fibras y poder hacer el conteo (en pruebas

previas, se cortó con cierra de disco un cilindro, pero fue difícil identificar la fibra en el concreto), posteriormente fue seleccionado una mitad de cada cilindro y con una lupa de tres aumentos se procedió al conteo de las fibras, marcando su ubicación con un marcador de punta fina y así distinguir las fibras ya contadas (*figura 23*). El valor del conteo fue dividido entre el área de la sección de cada cilindro para obtener su valor por unidad de área.

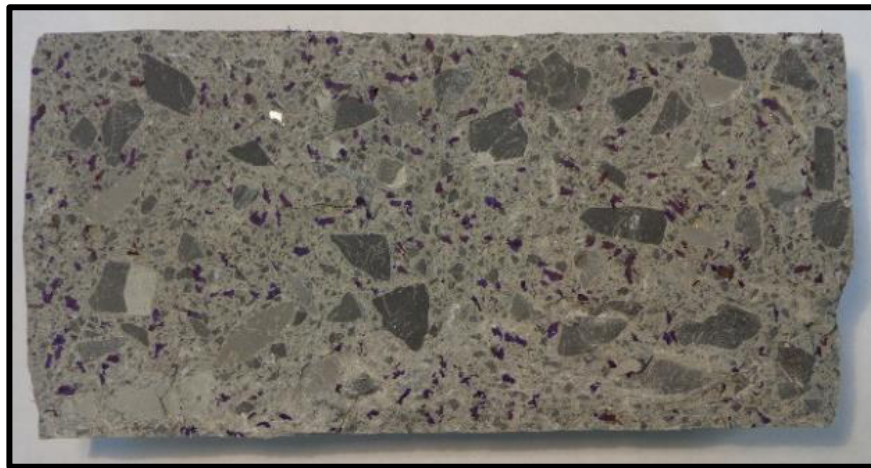


Figura 23. Conteo de fibras en una sección de cilindro de 10 x 20 cm.

5.2.1.3 Fabricación y ensaye de morteros

El procedimiento para el mezclado de morteros, fue siguiendo la norma ASTM C305 [84], para la fabricación de los especímenes cúbicos, la determinación de la fluidez y el procedimiento de ensaye fue utilizada la norma ASTM C109 [85].

5.2.1.4 Contracción química

Para determinar la contracción química en pastas de los cementantes utilizados en esta investigación, como; cemento portland, cemento portland con 20, 30 y 40% de ceniza volante y 5% de humo de sílice en sustitución del cementante total, fue utilizada la norma ASTM C1608 [86]. Los frascos fueron colocados en un recipiente de plástico lo

suficientemente grande para contener todas las muestras y así evitar en lo más posible variaciones entre los resultados de las diferentes muestras. Para evitar el enfriamiento por la evaporación las muestras fueron tapadas (*figura 24*).

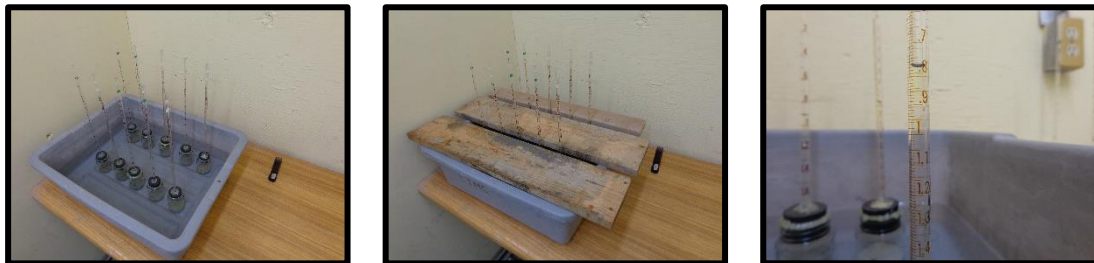


Figura 24. Medición de la contracción química de los cementantes.

5.2.1.5 Densidad de los cementantes

Para determinar la densidad de los cementantes utilizados; cemento portland, ceniza volante y humo de sílice, se siguió la norma ASTM C188 [87].

5.2.1.6 Densidad del aditivo y contenido de sólidos

En la determinación de la densidad del aditivo superfluidificante y del aditivo reductor de la contracción, fue utilizado un frasco de Le Chatelier, registrando el volumen desplazado en la escala de graduación del frasco y su peso en una báscula electrónica marca Ohaus, modelo Explorer E04130 con 1 mg de precisión. El contenido de sólidos fue aplicado al aditivo superfluidificante Plastol precast plus, debido a que el aditivo reductor de la contracción, EUCON SRA, no se encuentra diluido en agua al ser solo éter glicol. El procedimiento de obtención del contenido de sólidos fue el de colocar aproximadamente 190 g de aditivo en un recipiente, el cual fue puesto en un horno a 110 °C hasta peso contante, el peso del residuo expresado en porcentaje de la muestra original corresponde al contenido de sólidos en el aditivo.

5.2.1.7 Caracterización del concreto hidráulico

En el desarrollo de esta investigación se planteó la influencia que pueda tener en un CAC el uso de ceniza volante, el humo de sílice, la fibra de lechuguilla y un aditivo reductor de la contracción, principalmente en la mitigación de la contracción autógena. Las pruebas consideradas para la caracterización de los concretos se mencionan a continuación:

5.2.1.7.1 Tiempos de fraguado

Para iniciar la toma de lecturas en las pruebas de contracción autógena, es necesario determinar el tiempo de fraguado final en cada de las mezclas de prueba, para ello se llevaron a cabo las pruebas bajo la norma ASTM C403 [\(figura 25\)](#) [\[88\]](#).



Figura 25. Determinación del tiempo de fraguado.

5.2.1.7.2 Contracción autógena

La medición de la contracción autógena de cada una de las mezclas en probetas por triplicado fue llevada a cabo de acuerdo a la norma ASTM C1698 [\[89\]](#) con lecturas a una y dos horas posteriores al fraguado final, y con una lectura diaria por probeta hasta los 28 días. Fue necesario implementar una modificación a la prueba consistente en fijar los tubos de polietileno corrugado contra los ángulos que sirvieron de soporte mediante

el uso de cinchos de plástico, con la finalidad de que la longitud del espécimen no sea mayor que el espacio libre del banco de dilatación, esto fue implementado debido a la expansión sufrida por el espécimen al momento de ser compactado con la varilla dispuesta para este fin. Para evitar la posibilidad de que se conserven esfuerzos remanentes en los tubos producto de la sujeción descrita, al final de la compactación los cinchos fueron cortados y el tubo junto con su soporte fue colocado en la mesa vibratoria, este procedimiento de sujeción fue aplicado para las mezclas E-30-C, F-40-C, G-HS-C y C-R-C (L) [\(figura 26\)](#).

Para obtener la muestra de mortero se siguió el procedimiento de mezclado de concreto, posteriormente descrito, y a continuación se obtuvo la muestra del mortero mediante el cribado en húmedo a través de una malla # 4.



Figura 26. Prueba de medición de la contracción autógena.

5.2.1.7.3 Mezclado de concreto

Para la fabricación tanto de los especímenes cilíndricos, tiempos de fraguado y los tubos de contracción autógena, se utilizó una mezcladora convencional con 20 litros de concreto por mezcla. Las proporciones de cada mezcla fueron corregidas con la humedad de obra de los agregados según la norma ASTM C566 [\[78\]](#).

Los tiempos de mezclado y el procedimiento de adición se mencionan en la [tabla 6](#).

Tabla 6. Procedimiento de mezclado para la fabricación del concreto

Tiempo (minutos : segundos)		Procedimiento
Parcial	Acumulado	
0:00		Adición de los agregados, iniciando por la grava y posteriormente la arena. Adición del agua de absorción y parte del agua de reacción para asegurar la distribución de la humedad en los agregados.
1:00	1:00	Mezclado para la homogenización de los agregados y la distribución del agua añadida.
14:00	15:00	Reposo de los agregados para lograr al menos un 70% de la absorción del agua en la grava y 90% de la arena. En este período de tiempo, la boca de la revolvedora se tapó con una franela húmeda para evitar pérdida de humedad.
1:00	16:00	Adición de los cementantes y el resto del agua de reacción con el aditivo superfluidificante mezclado en el agua y si aplica, el aditivo reductor de la contracción.
3:00	19:00	Proceso de mezclado. En este tiempo es agregado la fibra sobre saturada, el agua en exceso es restada del agua de mezcla.
3:00	22:00	Reposo, la boca de la revolvedora se tapa con una franela húmeda para evitar pérdida de humedad.
2:00	24:00	Proceso de mezclado
Fin de mezclado		Se vacía la mezcla a una carretilla previamente humedecida y se procedió a homogenizarla con una pala para después pasar a hacer las pruebas y/o llenado de especímenes según corresponda.

5.2.1.7.4 Contenido de aire atrapado

Para determinar el contenido del aire atrapado se siguió el método de presión según la norma ASTM C231 [90]. Fue calculada el valor para el factor de corrección por el agregado con las proporciones de G/A seleccionadas, dando un resultado de 0.4%, con este valor las mediciones del contenido de aire para cada mezcla fueron corregidas.

5.2.1.7.5 Columna de segregación

Para la caracterización del concreto de referencia, mezcla C-R, para determinar su tendencia a la segregación estática se utilizó la norma ASTM C1610 [91]

5.2.1.7.6 Peso unitario

Para cada mezcla, el peso unitario se determinó en base a la norma ASTM C138 [92]

5.2.1.7.7 Extensibilidad, T_{50} , índice de estabilidad visual y revenimiento

Las pruebas de extensibilidad, T_{50} e índice de estabilidad visual, fueron ejecutadas inmediatamente al terminar el período de mezclado siguiendo el procedimiento descrito

en la norma ASTM C1611 [70]. Para las mezclas en que la adición de cementante y/o la adición de la fibra condujeron a que la consistencia fuera menor al rango de un CAC, se determinó el revenimiento por el método de la norma ASTM C143 (figura 27) [93].

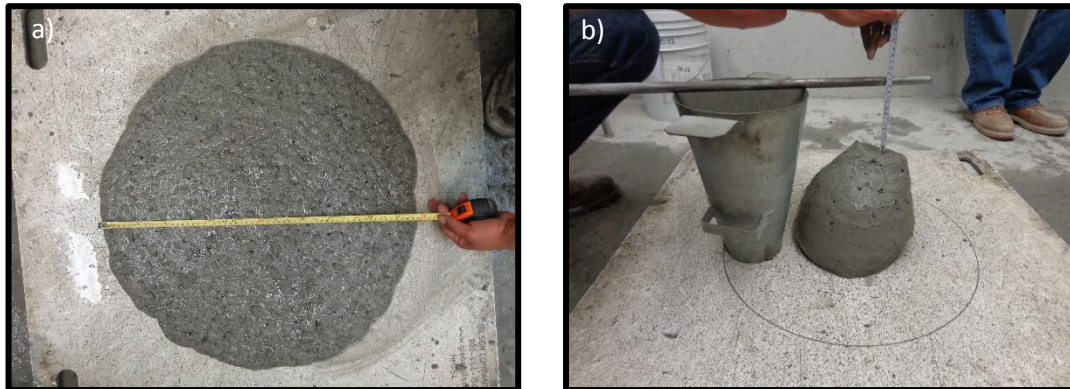


Figura 27. Métodos para determinar la consistencia; a) extensibilidad, b) revenimiento.

5.2.1.7.8 Habilidad de paso por el método de anillo J

La habilidad de paso del CAC se determinó por el método de anillo J según la norma ASTM C1621 [71].

5.2.1.7.9 Resistencia a la compresión

La fabricación de los especímenes fabricados para el ensaye a la compresión y el método de curado, se siguió la norma ASTM C192 [94]. Para cada mezcla fueron ensayados tres especímenes cilíndricos según ASTM C39 [95] a la edad de 1, 3, 7, 28, 56 y 91 días, con curado hasta la fecha de ensaye a excepción de los especímenes programados a 1 día que fueron ensayados después de ser desmoldados. Todos los especímenes fueron cabeceados según ASTM C617 [96]. Los resultados de los ensayes a compresión a 28 y 91 días se tomaron de las correspondientes pruebas del módulo de elasticidad [97].

5.2.1.7.10 Módulo de elasticidad estático

Para la determinación del módulo de elasticidad estático se siguió la norma ASTM C469 [97]. Para la toma de lecturas fueron utilizadas dos cámaras digitales que grababan tanto la lectura de los micrómetros como la lectura de la carga en el monitor de la computadora, ambas cámaras estaban sincronizadas por dos cronómetros iniciados al mismo tiempo que eran videograbados (*figura 28*).

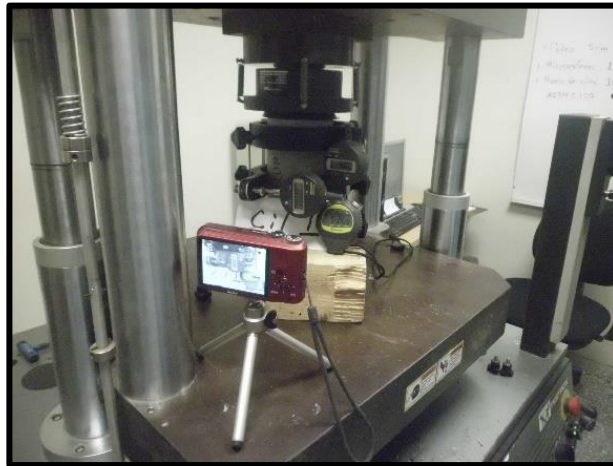


Figura 28. Método de grabación sincronizado de lecturas de deformación, de carga y de tiempo.

5.2.1.7.11 Contracción por secado

Fueron fabricados tres especímenes prismáticos de sección de 7.62 x 7.62 y 25.4 cm de longitud entre la parte interna de los pernos de medición, fabricados y curados conforme la norma ASTM C157 [98] por 7 días. Se tomó la lectura inicial de cada barra un día después de su fabricación y posteriormente fueron puestos en agua saturada con cal hasta cumplir el 7° día, entonces fueron tomadas sus respectivas lecturas y se colocaron en el cuarto de secado donde se midieron lecturas a 4, 7, 14, 28, 56 y 91 días.

5.2.1.7.12 Resistividad eléctrica

Como un parámetro de durabilidad se determinó la resistividad eléctrica de acuerdo a la norma AASHTO TP 95 [99]. Los resultados se correlacionaron con los resultados de

migración de iones cloruro a los 56 días, además se hizo un análisis de su desarrollo con respecto al tiempo en especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm a las edades de 14, 28 y 56 días en que todo momento estuvieron sujetos a un curado estándar [99].

5.2.1.7.13 Migración de iones cloruro

La migración de iones cloruro dentro del concreto se determinó a los 56 días de edad con especímenes curados todo el tiempo de manera estándar de acuerdo a la norma Nordtest NT Build 443 [100].

6. Resultados y discusión

6.1 Agregados

Los agregados utilizados en esta investigación de origen calizo, provenientes de la mina de la empresa Industrializado de Caliza, fueron utilizadas sin modificaciones como el proveedor los procesa.

La grava cumplió con la granulometría # 67 correspondiente a la norma ASTM C33 ([tabla 7](#)) [101], en tanto la granulometría de la arena queda por fuera de la especificación de la malla # 100, siendo el límite de 0 a 10% y el análisis granulométrico reporta un 19%, quedando fuera por un 9%, además de que el porcentaje que pasa la malla # 200 según la especificación ASTM C33 es de 5% para concretos no sometidos a abrasión y el análisis granulométrico reportó un 17%, siendo un 12% por encima del límite ([tabla 7](#)).

Pero este “exceso” de polvo favorece las propiedades cohesivas del CAC, ya que para un concreto de este tipo la EFNARC recomienda un consumo de polvos entre 380 a 600 kg/m³, siendo el consumo de polvos del concreto de esta investigación de 627 kg/m³ (cementante + polvo de caliza que pasa la malla #100), quedando cerca de esta recomendación sin llegar a representar un problema debido a que los resultados de la eficiencia del cemento para la mezcla de referencia, C-R, resultó en 0.12 MPa / kg de cemento, siendo lo esperado para un concreto de este tipo de 0.10 a 1.1 MPa / kg de cementante.

Tabla 7. Análisis granulométrico: a) arena y b) grava.

a) Malla	Retenido		Pasa (%)	Desviación Estándar (%)	b) Malla	Retenido		Pasa (%)	Desviación Estándar (%)
	Parcial (%)	Acumulado (%)				Parcial (%)	Acumulado (%)		
25.0	0	0	100	0.0	9.5	0	0	100	0.0
19.0	8	8	92	0.6	No 4	0	0	100	0.0
9.5	69	77	23	0.3	No 8	15	15	85	0.1
No 4	19	96	4	1.3	No 16	30	45	55	1.3
No 8	1	96	4	1.2	No 30	19	64	36	1.8
P No 8	4	100	0	0.0	No 50	11	75	25	1.5
					No 100	6	81	19	1.3
					No 200	2	83	17	1.0
					P 200	17	100		
Módulo de finura								2.80	

Las características físicas de los agregados mostradas en la [tabla 8](#), fueron resultados típicos de los agregados calizos de la zona metropolitana de Monterrey.

Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados.

Agregado	Densidad	Desv. est.	Absorción	Desv. est.	PVSS	Desv. est.	PVVS	Desv. est.
	(g/cm ³)		(%)		(g/cm ³)		(g/cm ³)	
Arena # 4	2.61	1.10	2.24	0.07	1.72	12.7	----	----
Grava 19 mm	2.72	0.01	0.35	0.03	1.52	0.01	1.64	0.01

La compactación calculada de los agregados ([figura 17](#)), no correspondió para las propiedades de un CAC debido que al fabricar un concreto con la relación G/A de 1.17 producto de la prueba de compactación, el concreto no presentó características de un CAC principalmente en cuanto a la habilidad de paso, por lo cual y para no hacer pruebas puntuales, se estableció un método de prueba en donde para una misma mezcla, se fue modificando la relación grava / arena y a su vez fue medida la extensibilidad y su respectivo bloqueo por el método del anillo J ([tabla 9 y figura 29](#)) [71], esta serie de pruebas dio como resultado una relación G/A de 0.49. Por este nuevo método es posible conocer cuál es el rango de G/A utilizable en el que el concreto se encuentre dentro de las especificaciones con respecto al bloqueo o si se desea, medir otro(s) parámetro(s).

Tabla 9. Relaciones G/A y su respectivo bloqueo utilizadas en la prueba para definir la relación óptima.

Relación G/A	Extensibilidad (cm)	Anillo J (cm)
0.00	60.0	53.5
0.14	73.5	73.0
0.28	58.0	57.5
0.42	57.5	54.0
0.57	51.0	46.5
0.71	49.0	43.0

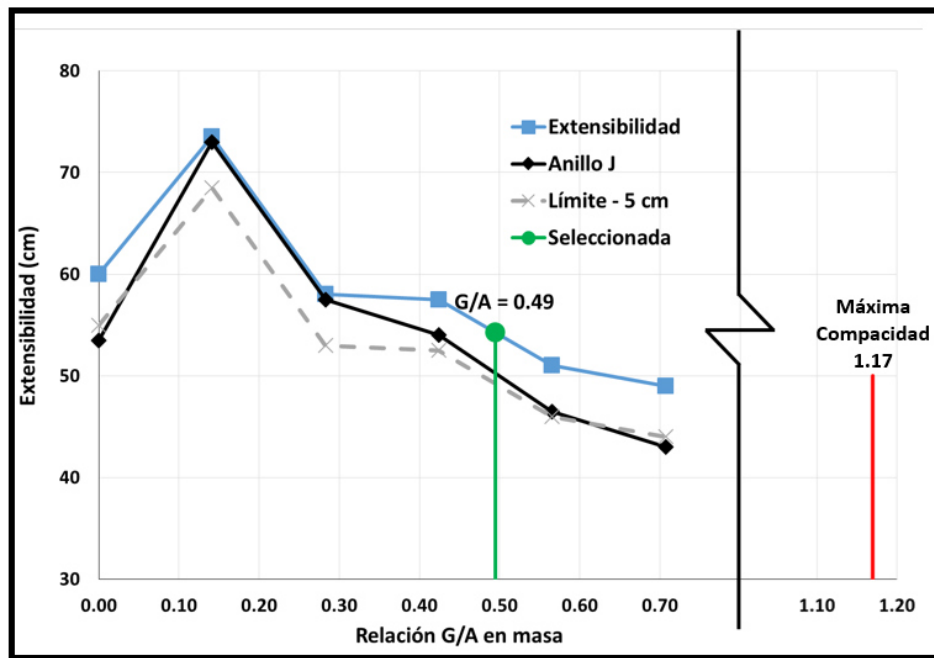


Figura 29. Comportamiento de la relación G/A para un bloqueo máximo en el anillo J de 5 cm con relación a la extensibilidad.

Para conocer la cantidad de agua que los agregados pudiesen aportar debido a que estos fueron colocados en la mezcla parcialmente secos, el agua calculada como agua de absorción no penetra dentro del agregado lo suficientemente rápido al llegar el fraguado final como para modificar las propiedades del concreto en estado fresco tales como extensibilidad, T_{50} , segregación, bloqueo y en el estado endurecido propiedades tales como resistencia y por consecuencia durabilidad. Al ser modificada la relación agua / cementante por el agua que queda libre del agua no absorbida y se integra al

agua de reacción. Este efecto además de lo anterior descrito, puede afectar la mitigación de la contracción autógena al quedar los agregados parcialmente saturados y cuando la fibra de lechuguilla, libere el líquido destinado al curado interno, este pueda ser absorbido por los agregados, haciendo menos efectivo el curado interno. Lo anterior condujo a desarrollar una prueba para determinar la velocidad de absorción de los agregados, obteniéndose como resultado que a un minuto del contacto con el agua, la arena llegó a una absorción del 48.8% y el grava a una absorción del 35.9% con respecto a la absorción que se registraron a las 24 h. Tomando el menor tiempo de fraguado final de 5.7 horas de todas las series de mezclas correspondiente a la serie C-R, tenemos que la arena a este tiempo llegó a una absorción del 93.8% de su absorción calculada a 24 horas, aportando un 6.2% del agua considerada como de absorción al agua de reacción. En el caso de la grava llegó a un nivel de saturación del 91.6%, aportando un 8.4% del agua considerada como de absorción al agua de reacción, de tal manera que la relación agua / cemento real para esta mezcla fue de 0.405.

Otro posible efecto de la velocidad de absorción que implica cambios en las propiedades en estado fresco del CAC es que los aditivos dosificados al inicio de la mezcla, sean absorbidos en parte por los agregados cuando estos están parcialmente secos y en mezclas en donde el agregado se encuentre en condición de saturación, los aditivos no sean absorbidos por los mismos agregados, lo anterior haría que la eficiencia del aditivo fuera variable y por lo tanto las características del CAC variarían de una mezcla a otra por este efecto, *(tabla 10 y figura 30)*.

Tabla 10. Velocidad de absorción de los agregados de caliza de tamaño máximo a) 4.75 mm y b) 19 mm.

a)	Tiempo (hh:mm)	Absorción (%)	b)	Tiempo (hh:mm)	Absorción (%)
	00:00	0		00:00	0
	00:01	48.8		00:01	35.9
	00:02	92.8		00:20	75.3
	00:10	93.8		01:00	82.0
	01:18	88.7		08:00	93.5
	02:00	90.4		24:00	100
	08:00	94.6			
	24:00	100			

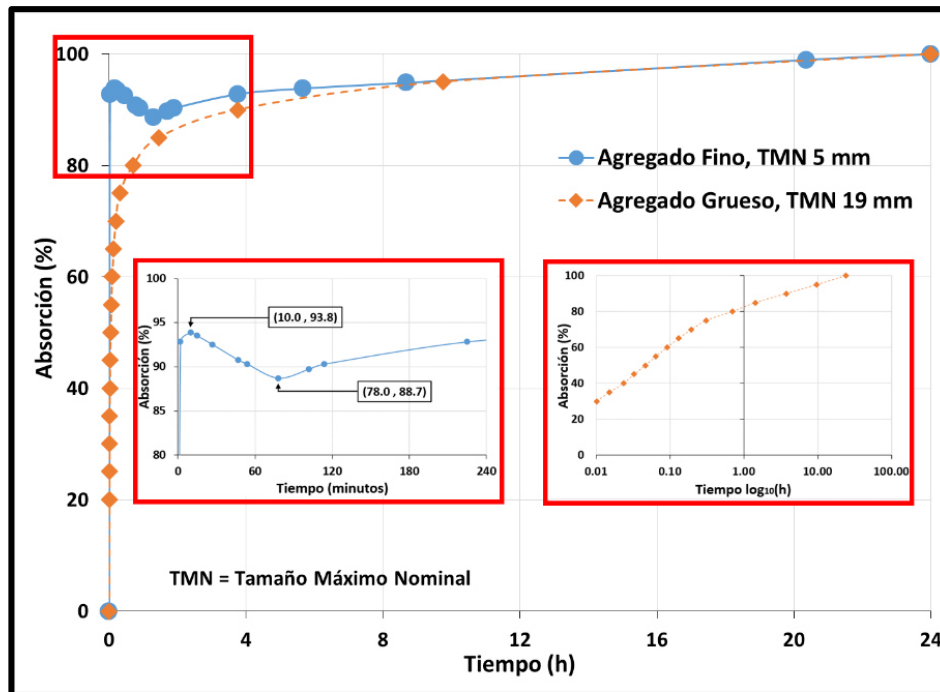


Figura 30. Velocidad de absorción de los agregados de caliza de tamaño máximo 4.75 y 19 mm.

Un fenómeno observado en la prueba de velocidad de absorción de la arena, fue la rápida absorción llegando al 93.8% a los 10 minutos de su contacto con el agua (figura 30), y una posterior desorción llegando a un 88.7% a los 78 minutos, para posteriormente

continuar incrementándose, este mismo fenómeno se observó en dos pruebas de distintas muestras.

Como punto de comparación se corrió la prueba de velocidad de absorción a un agregado ligero de pumicita, para el cuál la prueba llego a peso constante a los 33 días de su contacto con el agua (*figura 31*).

Tabla 11. Velocidad de absorción de la grava de pumicita.

Tiempo (hh:mm)	Absorción	
	peso absorbido (%)	peso material (%)
00:00	0	0
00:01	6.2	5.1
00:10	11.7	9.6
01:00	23.7	19.4
(días)	(%)	(%)
1.0	45.2	37.2
5.0	66.6	54.8
10.0	80.6	66.3
20.0	90.6	74.6
30.0	97.5	80.3
33.0	100.0	82.3

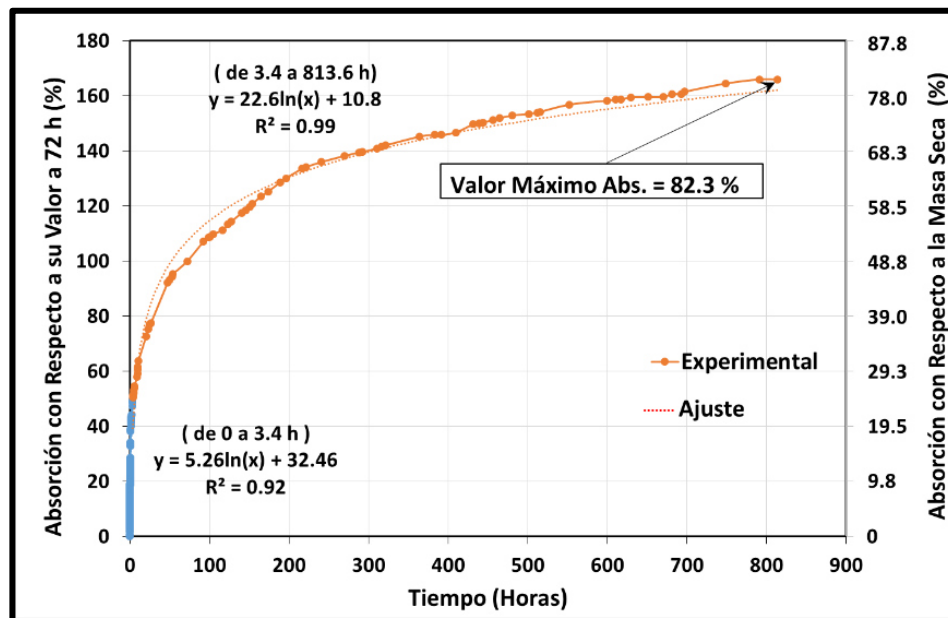


Figura 31. Comportamiento logarítmico de la velocidad de absorción.

6.2 Fibra

Un minuto después de iniciada la prueba de velocidad de absorción de la fibra, el porcentaje de absorción fue de un 71.3% con respecto a su absorción a 24 horas (*figura 32*), lo que representa un 27.5% más velocidad que la arena en el mismo período de tiempo y de un 35.4% que la grava. A una hora del contacto con el agua su absorción fue de un 81.5% con respecto a la de 24 horas.

Tabla 12. *Velocidad de absorción de la fibra de lechuguilla.*

Tiempo (hh:mm)	Absorción (%)
00:00	0.0
00:01	71.3
00:25	81.2
01:00	81.5
08:00	94.6
12:00	97.4
19:37	100

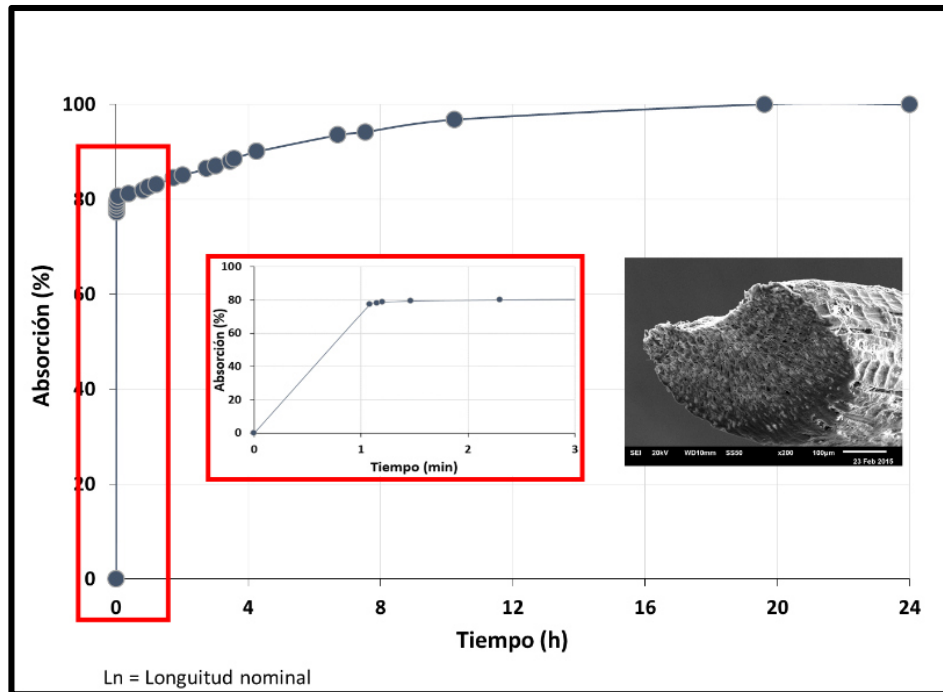


Figura 32. *Velocidad de absorción de la fibra de longitud nominal 10 mm y la velocidad de absorción de la fibra detallado a 3 minutos*

La fibra introduciendo al frasco de Chapman en condición saturada superficialmente seca (sss) presentó una densidad saturada de 1.19 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.00 g/cm^3 para dos pruebas, para una absorción del 98% obtenida con una desviación estándar de 8.2 g/cm^3 para cuatro pruebas. Al introducir la fibra en condición seca condujo a un resultado de una densidad de 1.51 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.02 g/cm^3 para dos pruebas. Con estos resultados era de esperarse que al correrse la prueba de densidad con la fibra saturada con 50% de agua y 50% de ARC, y con una absorción del 78% de esta solución con una desviación estándar de 2.2 g/cm^3 para dos pruebas, el resultado fuera inferior a la densidad sss, al quedar una parte sin saturar y por lo tanto llena de aire, sin embargo, la densidad obtenida fue de 1.23 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.01 g/cm^3 para dos pruebas, además comparando el volumen generado por la densidad en condición sss en relación con el volumen para la densidad en condición seca, se estima que la fibra se expande un 26.6%. Con lo anterior se llegó a concluir que el mecanismo de absorción de la fibra es promovida por su expansión, desplazando de manera eficiente el aire incluido dentro de la fibra, caso contrario de los agregados que el mecanismo de absorción es la fuerza capilar que introduce el líquido dentro de los poros y expulsa el aire atrapado en ellos, por lo tanto en la absorción de la fibra no se presenta el fenómeno de “rebote” que presenta la absorción de la arena. Es entendible este fenómeno por la naturaleza de la planta al ser nativas de zonas áridas que al momento de recibir agua, la aprovechan eficientemente con un mecanismo rápido de recolectar.

La velocidad de desorción de la fibra de longitud de 5 mm fue más lenta que una fibra de 10 mm, esto puede ser atribuible a la tensión superficial del agua que al momento de salir de la fibra de 10 mm lo haga más rápidamente, [\(figura 33\)](#).

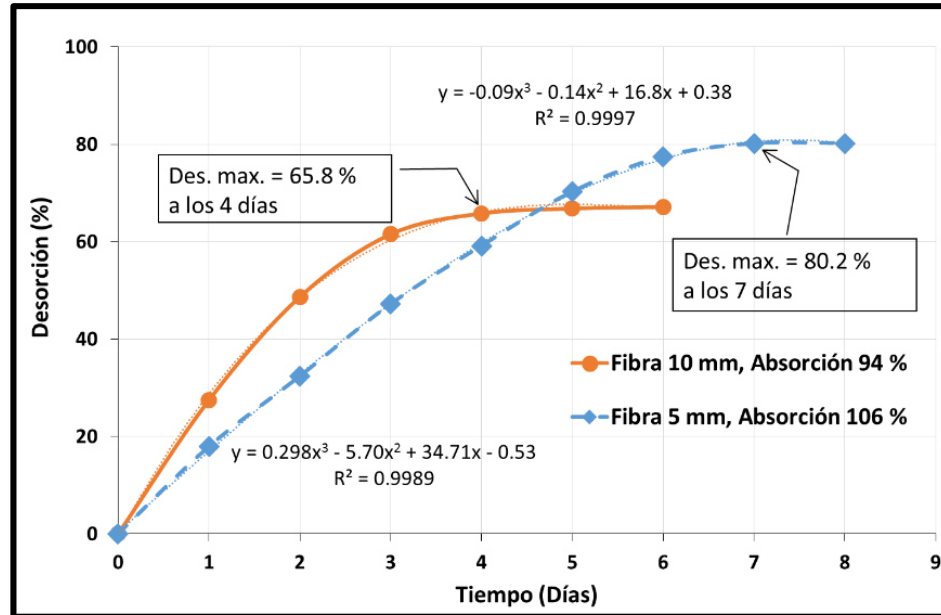


Figura 33. Desorción de la fibra de lechuguilla de 5 y 10 mm de longitud

Para conocer la efectividad de la desorción de la fibra en la mitigación de la contracción autógena, se empató el comportamiento de las contracciones autógenas en mezclas con fibra y su referencia para tener un patrón de comparación contra la velocidad de desorción para las series C-R, C-R-C; D-20, D-20-C; E-30, E-30-C; F-40, F-40-C y G-HS, G-HS-C (figuras de la 34 a la 38). De este análisis se encontró que la fibra al tiempo de dejar de desorver, la pendiente de la gráfica de contracción autógena disminuyó para todas las mezclas excepto para la mezcla G-HS-C, indicando con esto la necesidad de más fibra para poder mitigar la contracción autógena para este tipo de concreto.

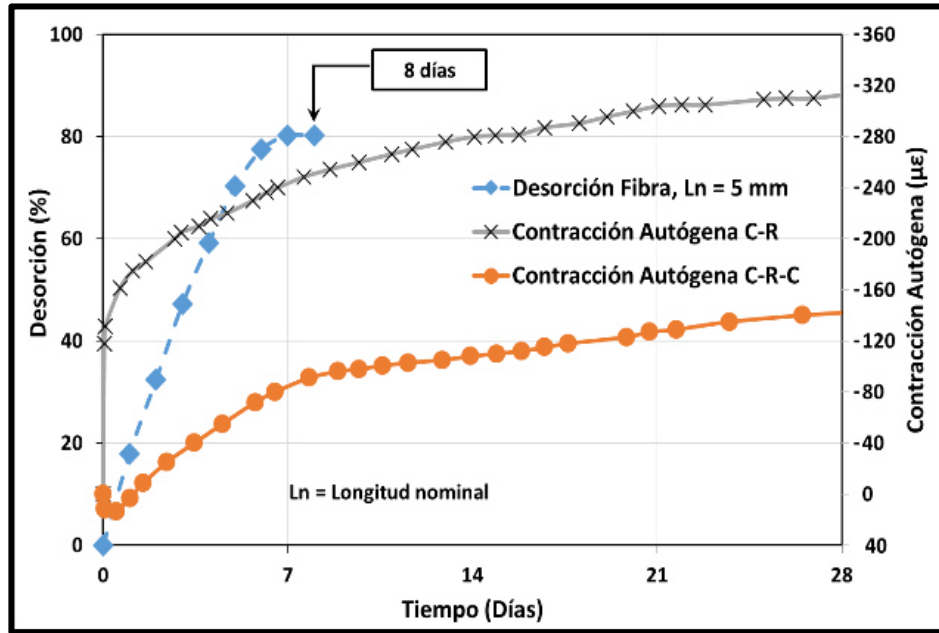


Figura 34. Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas C-R y C-R-C.

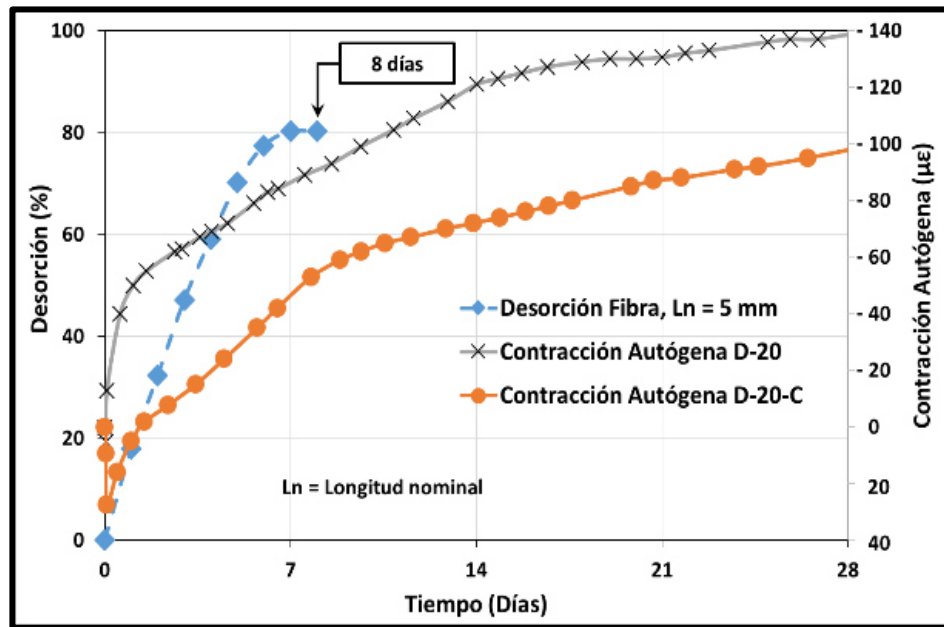


Figura 35. Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas D-20 y D-20-C.

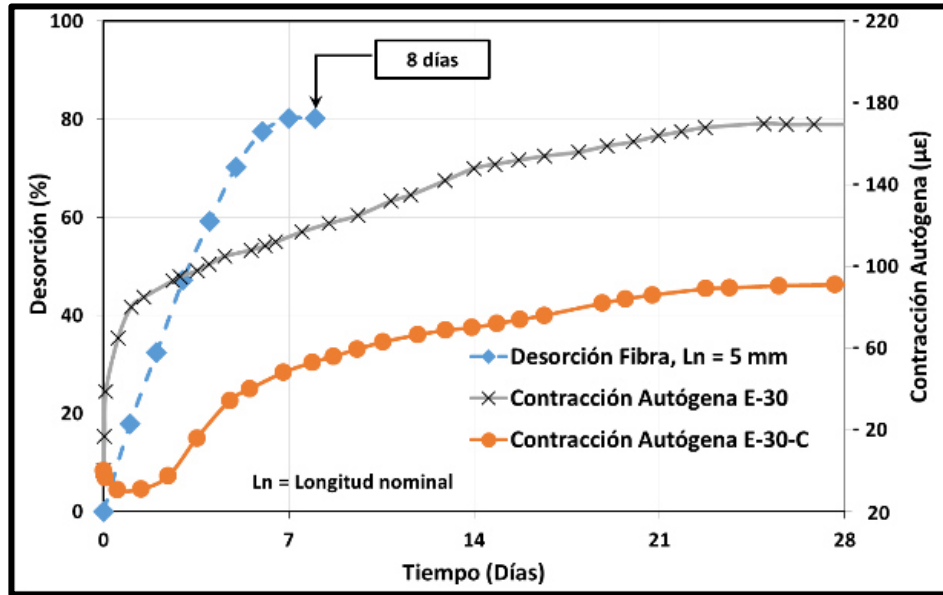


Figura 36. Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas E-30 y E-30-C.

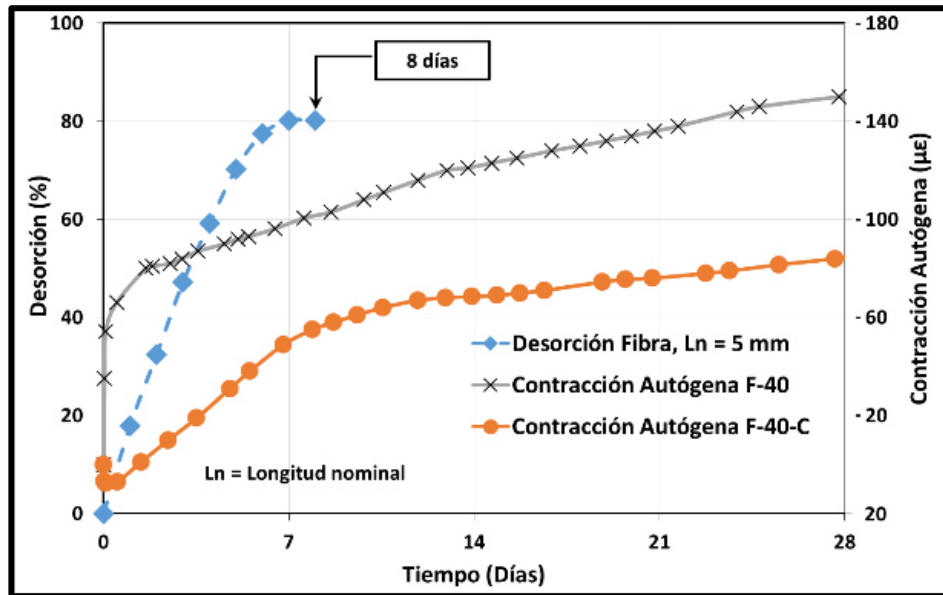


Figura 37. Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas F-40 y F-40-C.

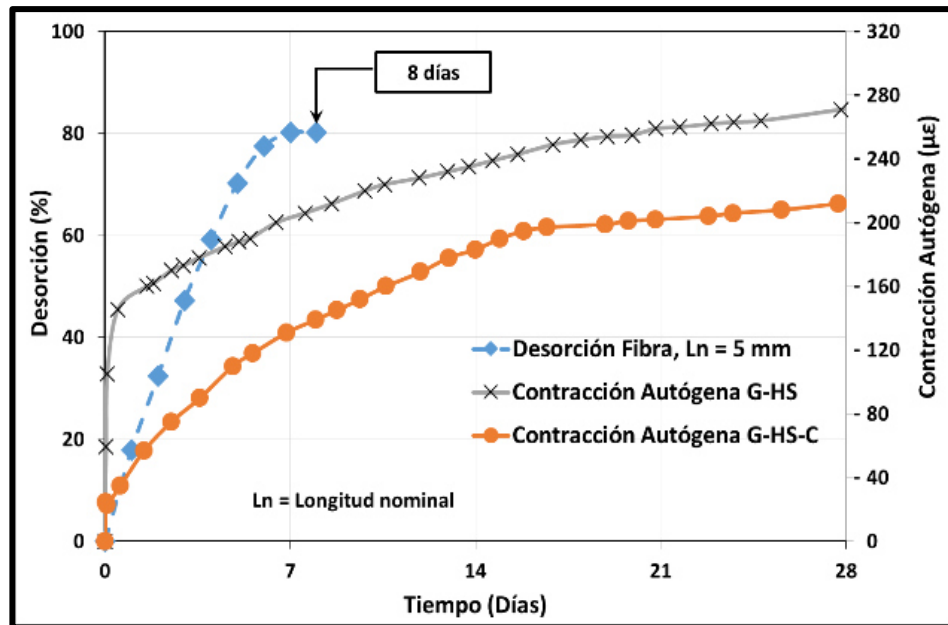


Figura 38. Velocidad de desorción de la fibra vs contracción autógena, mezclas G-HS y G-HS-C.

El contenido óptimo de fibra fue obtenido mediante la fabricación de morteros con fibras de 10 mm y volúmenes de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0%. Seleccionándose el volumen de fibra que no afecte en más de un 15% en la resistencia a la compresión a 28 días (tabla 13), de tal manera que se seleccionó un volumen del 1.0% al presentar resultados de resistencia a la compresión de un 13.3% menor que la referencia, en contraparte el contenido de un 1.5% presentó una reducción en la resistencia a la compresión de un 20.2% que la referencia. En cuanto a la fluidez esta aumentó para todos los casos, esto puede ser atribuible a la forma tubular de la fibra que provoca que el mortero fluya sin obstáculos, por lo tanto la fluidez no se vio perjudicada.

Tabla 13. Serie para definir el contenido óptimo de fibra en morteros estándar mediante la resistencia a la compresión en cubos a las edades de 3,7 y 28 días.

Serie	Clave	Resistencia a la Compresión (MPa)									Fluidez por Mezcla	
		3 días	Diferencia*	Des. est.	7 días	Diferencia*	Des. est.	28 días	Diferencia*	Des. est.	Diferencia*	(%)
A	MRV	34.3	----	0.7	37.6	----	0.9	43.3	----	0.8	110.0	----
	V0.5	29.8	-13	0.6	34.4	-9	0.3	42.0	-3	1.4	136.5	24.1
	V1.0	27.4	-20	0.8	32.1	-15	0.9	37.6	-13	1.9	145.0	31.8
	V1.5	25.8	-25	0.7	31.8	-15	0.4	34.6	-20	0.7	143.0	30.0
	V2.0	23.2	-32	0.7	27.8	-26	0.2	32.9	-24	0.9	147.0	33.6

* Diferencia en % con respecto a la referencia (MRV).

Con el volumen de 1.0% fibra, se determinó la longitud óptima de la fibra en pruebas a la compresión en morteros con longitudes de fibras de 5, 10 y 20 mm. De los resultados obtenidos fue seleccionada la longitud de 5 mm, al tener un 8% menos resistencia que la referencia, que aunque el resto de los resultados cumplen con el límite de resistencia especificada, 4 y 7% menos para la fibra de 10 y 20 mm respectivamente, fue seleccionada para lograr mayor dispersión en la mezcla cementante, y con ello promover un mejor curado interno (tabla 14).

Tabla 14. Serie para definir la longitud óptima de fibra en morteros estándar.

Serie	Clave	Resistencia a la Compresión (MPa)									Fluidez por Mezcla	
		3 días	Diferencia*	Des. est.	7 días	Diferencia*	Des. est.	28 días	Diferencia*	Des. est.	Diferencia*	(%)
B	MRL	34.3	----	0.7	37.6	----	0.9	43.3	----	0.8	110.0	----
	1-5	30.0	-12	2.1	36.1	-4	0.8	40.0	-8	1.9	128.0	16.4
	1-10	28.7	-16	1.0	32.0	-15	1.3	41.5	-4	2.1	126.0	14.5
	1-20	30.9	-10	0.4	32.4	-14	1.6	40.2	-7	1.7	126.0	14.5

* Diferencia en % con respecto a la referencia (MRL).

La distribución de la fibra en la matriz cementante del CAC medida en los cilindros para las mezclas con fibra, C-R-C, C-R-CL, D-20-C, E-30-C, F-40-C y G-HS-C, fue de 1.44 filamentos / cm², con una desviación estándar de 0.07 filamentos / cm² (tabla 15), lo que se puede interpretar que la distribución de la fibra se encuentra entre 1.23 a 1.65 filamentos / cm² con un nivel de confianza del 99.7%. Teniendo que el agua de curado interno puede trasladarse a 5 mm desde su punto de desorción a los 3 días de edad [102] y tomando en cuenta que cada fibra tiene dos puntos de desorción, uno para cada

extremo, deducimos que el área de cobertura por fibra será de 2.0 cm², por lo tanto la cobertura por las 1.44 fibras será de 2.88 cm². Según la prueba de desorción a los 3 días el agua desorvida fue de 47.2%.

Tabla 15. Distribución de la fibra dentro del concreto endurecido.

Serie	Clave	Distribución (fibras/cm ²)	Desv. est.
C	R-C	1.48	0.02
	R-C-L	1.40	0.12
D	20-C	1.32	0.18
E	30-C	1.54	0.02
F	40-C	1.38	0.05
G	HS-C	1.50	0.04
Promedio		1.44	0.07

La estimación del diámetro de la fibra sin ser cortada, calculado de manera estadística para el extremo inferior, media y extremo superior, resultó con 272, 221 y 152 μm respectivamente, siendo el extremo inferior la que está junto a la parte de la planta conocida como cogollo, debido a que el diámetro de la fibra depende del tamaño de la hoja de la cual se obtiene y a que la morfología de la fibra el diámetro es menor en su parte inferior, por estas razones la desviación estándar de la medición del diámetro es muy alta, 78.4 μm, de tal forma que el promedio general se encuentra en 215 μm con un rango de 41 a 521 μm (*tabla 16*).

La longitud promedio se medido de 1000 filamentos tomadas al azar dando como resultado un valor promedio de 5.01 mm, con rango de variación de 2.5 mm como valor mínimo y un valor máximo de 9.1 mm, y una desviación estándar de 1.0 mm (*tabla 16*), de tal forma que el 68% de la muestra de las fibras se encuentran en 4.01 a 6.01 mm.

Para estimar el peso unitario de las fibras fueron pesadas 1000 filamentos, resultando en 0.604 mg/fibra. Con la dosificación de 6010 g de fibra / m³ utilizada en los diseños

de mezcla, se estima que el número de fibras por metro cúbico de concreto es de aproximadamente 9'950,331.

Tabla 16. Estadística de la medición del diámetro y la longitud de la fibra.

	Diámetro (μm)				Longitud (mm)
	Inferior	Medio	Superior	General	
Promedio	272	221	152	215	5.01
Desv. estándar	69.4	58.5	54.1	78.4	1.0
Máximo	521	457	330		9.1
Mínimo	127	91	41		2.5
Tamaño muestra	367	367	367	1101	1000

Para una dosificación de fibra de 1.0% en volumen, la dosificación por metro cúbico fue de 6.0 kg/m³ de fibra seca y conociendo el dato de que por planta se pueden obtener en promedio 60.0 g de fibra seca [53], entonces es necesario la explotación de 100 plantas para fabricar un metro cúbico de concreto si se destina toda la producción para fabricar la fibra para el curado interno y de 250 plantas si se destina la fibra de subproceso que corresponde aproximadamente a un 40% de la producción según dato proporcionado por el personal técnico de producción de la empresa la Ixtlera Santa Catarina S.A. de C.V. Según la norma NOM-059-SEMARNAT, sobre la protección de especies en riesgo de extinción [103], no existe restricción de explotación de la especie Agave lechuguilla Torrey al momento de publicación de la norma y actualizada en el portal de CONABIO [104], debido a que no se encuentra en riesgo de extinción.

Para comparar las dos fórmulas para calcular la cantidad de agua externa (agua para mitigar la contracción autógena) propuestas por Dale Bentz [80] y Ole Mejlhede Jensen [61], se muestra la comparación de la contracción autógena a 28 días, obtenida al adicionar la fibra, mezcla C-R-C y mezcla C-R-CL, en relación a la contracción autógena a la misma edad para la mezcla de referencia sin algún elemento de mitigación de

contracción, mezcla C-R, contra la cantidad de agua externa resultado de las fórmulas propuestas por Bentz (*ecuación 7*) y Jensen (*ecuación 8*).

- Fórmula propuesta por Bentz:

$$M_{LWA} = \frac{C_f \times CS \times \alpha_{max}}{S \times W_{LWA}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

$M_{LWA} = M_{fib}$ = Masa de fibra necesaria en condición seca por unidad de concreto (kg).

C_f = Contenido de material cementante para la mezcla de concreto (kg).

CS = Contracción química del material cementante cuando se complete el 100% de la hidratación (kg de agua / kg de cementante).

α_{max} = Máximo grado de hidratación.

S = Grado de saturación de la fibra expresado en función del valor de saturado superficialmente seco (de 0 a 1.0).

$W_{LWA} = W_{fib}$ = Masa de agua liberada por la fibra al pasar de la condición de húmeda superficialmente seca al equilibrio de la masa a una humedad relativa de 94%, expresado como una fracción de la masa seca al horno (kg).

$$M_{fib} = \frac{(400)(0.056)(1)}{(1)(0.80)} = 28 \text{ kg de fibra seca}$$

Agua de curado interno propuesta por la fórmula de Bentz (ACB)

$$ACB = M_{fib} \times Abs_{fib} \times Des_{fib} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

M_{fib} = Masa de la fibra seca adicionada a la mezcla (kg).

Abs_{fib} = Absorción de la fibra (%).

Des_{fib} = Máximo porcentaje de desorción de la fibra (%).

$$ACB = 28 \times 98/100 \times 80.2/100$$

$$ACB = 22.0 \text{ kg}$$

- Fórmula propuesta por Jensen:

$$(w/c) + (w/c)_e = 0.42 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

(w/c) = Relación agua / cemento de la mezcla.

$(w/c)_e$ = Relación agua / cemento en función del agua de curado interno (agua externa).

$$w_e(ACJ) = (0.42 - 0.40)(400) = 8 \text{ kg/m}^3 \quad \text{ACJ} = \text{Agua de curado interno propuesta por Jensen}$$

- El agua de curado interno aportada por la fibra (ACF) para el consumo utilizado por metro cúbico de 6.0 kg se calcula conforme a la [ecuación 10](#).

$$ACF = M_{fib} \times Abs_{fib} \times Des_{fib} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$ACF = 6.0 \times 98/100 \times 80.2/100 = 4.7 \text{ kg/m}^3$$

Si consideramos que el cálculo del agua de curado interno para las fórmulas propuestas por Bentz y Jensen el nivel de hidratación considerado es igual a 1 ($\alpha_{max} = 1$), entonces se calculará el nivel de hidratación alcanzado por la fibra tomando en cuenta el resultado del agua liberada por la misma fibra y el agua de curado interno calculada de cada fórmula ([ecuación 11](#)):

$$\alpha_{hid} = ACF/AC \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

α_{hid} = Nivel de hidratación logrado por la fibra comparada con la fórmula que corresponda.

ACF= Agua de curado interno aportado por la fibra (kg)

AC= Agua de curado propuesto por la fórmula correspondiente (kg)

Nivel de hidratación según la fórmula de Jensen

$$\alpha_{Jensen} = \frac{4.7}{8} = 0.59$$

Nivel de hidratación según la fórmula de Bentz

$$\alpha_{Bentz} = \frac{4.7}{22} = 0.21$$

Los anteriores valores serán comparados contra el grado de hidratación considerando que si la contracción autógena medida a los 28 días (máxima contracción por lo tanto máxima hidratación) es igual a cero el grado de hidratación será considerado como 1,

para tal caso se calculará el grado de hidratación medido en las mezclas C-R-C y C-R-CL con respecto a la mezcla de referencia C-R:

$$\alpha_{28} = 1 - \frac{CA_{CI}}{CA_R} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

α_{28} = Grado de hidratación alcanzado a 28 días por el curado interno.

CA_{CI} = Contracción autógena de la mezcla con curado interno a 28 días de edad ($\mu\epsilon$).

CA_R = Contracción autógena de la mezcla de referencia a 28 días de edad ($\mu\epsilon$).

Grado de hidratación de la fibra natural

$$\alpha_{C-R-C} = 1 - \frac{142.1}{312.7} = 0.55$$

Grado de hidratación de la fibra lavada

$$\alpha_{C-R-CL} = 1 - \frac{160.2}{312.7} = 0.49$$

De lo anterior se observa que la estimación por la fórmula de Jensen se encuentra 6.8% por encima del nivel de hidratación observado para la mezcla C-R-C y en 16.9% para la mezcla C-R-CL. Para la estimación de Bentz, se encuentra por debajo del nivel de hidratación observado en un 161.9% para la mezcla C-R-C y en un 133.3% de la mezcla C-R-CL. Las presentes fórmulas y deducciones son un método propuesto para evaluar el grado en que las fórmulas de Bentz y Jensen logran calcular el agua requerida para mitigar las contracciones autógenas, por lo tanto para evaluar el presente método es necesaria una investigación propia con diferentes grados de hidratación y diferentes materiales para mitigar las contracciones autógenas.

Para poder colocar el efecto del ARC en términos equivalentes a hidratación del agua (α_{ARC}), se calculó la equivalencia del aditivo con la [ecuación 13](#).

$$\alpha_{ARC} = 1 - \frac{CA_{ARC}}{CA_R} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

α_{ARC} = Grado de hidratación equivalente logrado por el aditivo reductor de la contracción.

CA_{ARC} = Contracción autógena de la mezcla con ARC a 28 días de edad ($\mu\epsilon$).

CA_R = Contracción autógena de la mezcla de referencia a 28 días de edad ($\mu\epsilon$).

$$\alpha_{ARC} = 1 - \frac{99.2}{312.7} = 0.68$$

Tomando en cuenta el anterior valor se determina la equivalencia a cantidad de fibra seca según la fórmula propuesta de Bentz:

$$M_{fib} = \frac{C_f \times CS \times \alpha_{ARC}}{S \times W_{fib}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$M_{fib} = \frac{(400)(0.056)(0.68)}{(1)(0.80)} = 19.0 \text{ kg de fibra seca equivalente}$$

Y con la ecuación 10 se determina el agua de curado interno equivalente.

$$ACF = 19.0 \times 98/100 \times 80.2/100 = 14.9 \text{ kg/m}^3$$

La equivalencia de la cantidad de agua proporcionada según la fórmula de Jensen es la siguiente:

$$(w/c) + (w/c)_e (1/\alpha_{ARC}) = 0.42 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$w_e = (0.42 - 0.40)(400)(0.68) = 5.4 \text{ L de agua equivalente}$$

El valor de la hidratación equivalente α_{ARC} puede ser utilizado para poder introducir el ARC con otro agente de curado interno, como puede ser un agregado ligero, polímero superabsorbente o la fibra de lechuguilla, de esta manera es posible proporcionar las propiedades de cada agente al concreto, conociendo el nivel de hidratación que dará cada uno de ellos por separado, de tal forma que el grado de hidratación combinado (α_{com}) se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\alpha_{com} = \alpha_{ac} + \alpha_{ARC} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

α_{com} = grado de hidratación combinado

α_{ac} = grado de hidratación del agente de curado interno

α_{ARC} = grado de hidratación equivalente del ARC

6.3 Cementantes

La densidad de los cementantes determinados por el método ASTM C188 condujo a los resultados presentados en la [tabla 17](#).

Tabla 17. Densidades de los cementantes determinadas por duplicado

Cementante	Densidad (g/cm ³)	Desv. est.
Cemento CPO-40	3.08	0.000
Ceniza volante	1.98	0.014
Humo de sílice	2.23	0.000

La composición química de las fases mineralógicas constitutivas del cemento portland ordinario (CPO 40), la ceniza volante sin cribar (CV) y el humo de sílice (HS) se muestran en la [tabla 18](#).

Tabla 18. Composición química del cemento portland ordinario, ceniza volante y humo de sílice.

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
CV	67.48	23.94	4.63	1.76	1.16	---	1.14	0.99	0.94	0.3	0.04
HS	94.93	0.76	0.05	0.41	0.36	---	---	0.81	---	---	---

Las pruebas de contracción química presentaron los resultados de la [tabla 19](#) y su comportamiento se muestra en la [figura 39](#).

Tabla 19. Contracciones químicas de los cementantes (ml/100 g-cm), determinadas por duplicado.

Cementante	1 día	Desv. est.	3 días	Desv. est.	7 días	Desv. est.	28 días	Desv. est.
CPO-40	-2.64	3.0E-02	-3.97	2.0E-02	-4.60	3.6E-03	-5.62	4.7E-02
CPO-40 + 20% CV	-2.48	2.0E-02	-3.62	6.0E-02	-4.38	1.4E-01	-5.68	1.3E-01
CPO-40 + 30% CV	-2.57	1.8E-01	-3.58	1.9E-01	-4.39	2.0E-01	-6.01	6.8E-02
CPO-40 + 40% CV	-2.17	7.0E-02	-3.20	3.8E-02	-4.12	1.3E-01	-6.02	1.4E-01
CPO-40 + 5% HS	-2.94	2.2E-02	-4.54	1.6E-01	-5.69	3.2E-01	-7.06	3.4E-01

cm = cementante

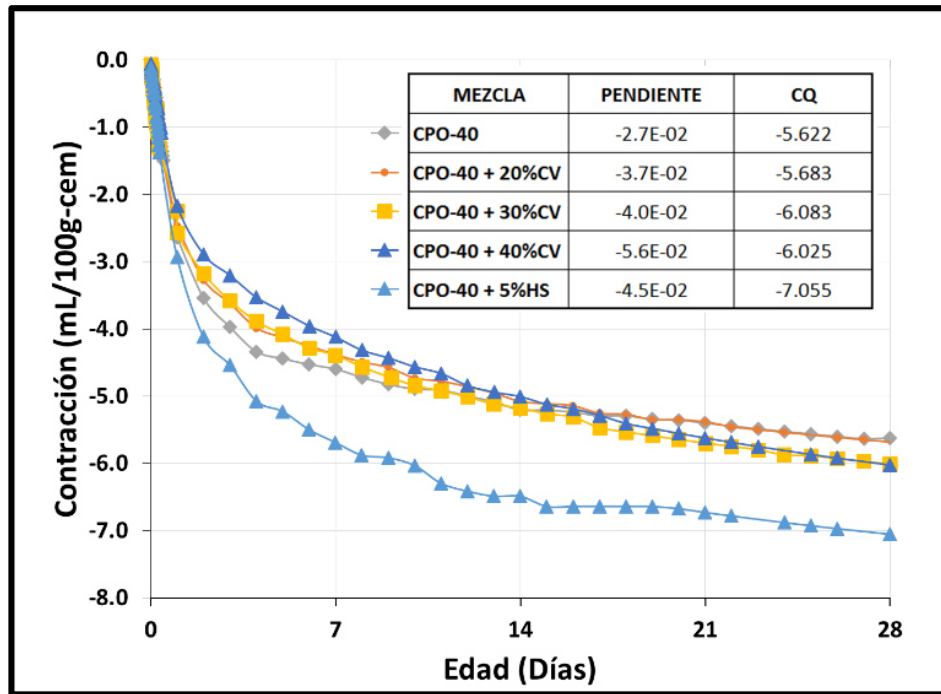


Figura 39. Contracciones químicas de los cementantes.

El cálculo de la contracción química considerando solamente el material puzolánico (para esta investigación la ceniza volante y el humo de sílice), fue estimada con la siguiente ecuación propuesta:

$$C_{qp} = \frac{C_{qcm} \times W_{cm} - C_{qc} \times W_c}{W_p} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Donde:

Cqp = Contracción química de la puzolana (ml/100 g)

Cqc = Contracción química del cemento (ml/100 g)

C_{qcm} = Contracción química del cementante (cemento más puzolana) (ml/100 g)

W_p = Relación de la puzolana con respecto al peso del cementante (g/g)

W_c = Relación del cemento con respecto al peso del cementante (g/g)

W_{cm} = Peso del cementante (g)

Con la anterior fórmula se deduce las contracciones químicas de los cementantes utilizados mostrados en la [tabla 20](#).

Tabla 20. Contracciones químicas de la ceniza volante y el humo de sílice

Cementante	C_{qp} (ml/100 g)	C_{qc} (ml/100 g)	C_{qcm} (ml/100 g)	W_p (g/g)	W_c (g/g)	W_{cm} (g)
5% HS	-34.28	-5.62	-7.06	0.05	0.95	1.0
20% CV	-5.92		-5.68	0.20	0.80	
30% CV	-6.91		-6.01	0.30	0.70	
40% CV	-6.63		-6.03	0.40	0.60	
Promedio CV	-6.49					

CV = Ceniza volante; HS = Humo de sílice

Al aislar las contracciones químicas por cada cementante, es posible comparar que la contracción química de la ceniza volante es mayor en un 15.5% a la del cemento y el humo de sílice es significativamente mayor al cemento, llegando a ser de un 510 %.

Con las contracciones químicas de cada cementante se determinó el cambio volumétrico con la [ecuación 18](#).

$$V_c = W_{cm}/\gamma_c \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Donde:

V_c = Volumen del cementante (ml)

W_{cm} = Peso del cementante (g)

γ_c = Densidad del cementante (g/ml)

El cambio de volumen para 100 g de cementante debido a la contracción química se determina como se muestra a continuación:

$$V_{cqc} = C_q/V_c \times 100 \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

V_{cqc} = Reducción de volumen por contracción química (%)

C_q = Contracción química (ml/100 g-cm)

V_c = Volumen correspondientes a 100 g de cementante (ml/100 g-cm)

Sustituyendo la [ecuación 18](#) en la [ecuación 19](#), se determina la [ecuación 20](#)

$$V_{cqc} = (\gamma_c \times C_q)/W_{cm} \times 100 \quad (\text{Ecuación 20})$$

Los resultados de la reducción de volumen de cada cementante aplicando la ecuación 20 se muestran en la [tabla 21](#).

Tabla 21. Reducción de volumen por contracción química para los cementantes utilizados.

Cementante	V_{cqc} (%)	γ_c (g/ml)	C_q (ml/100 g-cm)	W_{cm} (g)
Cemento	-17.3	3.077	-5.62	100
Ceniza Volante	-12.9	1.983	-6.49	
Humo de Sílice	-76.5	2.233	-34.28	

6.4 Aditivos

Los resultados de las pruebas a los aditivos superfluidificante plastol precast plus y EUCON SRA se muestran en la [tabla 22](#).

Tabla 22. Densidad y contenidos de sólidos de los aditivos superfluidificante y reductor de la contracción.

Cementante	Densidad (g/cm ³)	Desv. est.	Sólidos* (%)	Desv. est.
Eucon SRA	0.948	0.002	----	----
Plastol plus	1.121	0.003	50.7	0.20

* Agente activo, % en masa.

6.5 Concretos

Los tiempos de fraguado fueron obtenidos para iniciar la medición de las contracciones autógenas al llegar el fraguado final. De sus resultados se observa un retardo en los tiempos de fraguado para las mezclas con ARC, desde un 7% para las mezclas D-20-S a un 23% en la mezcla F-40-S, y en el caso de la mezcla con humo de sílice, G-HS-S, prácticamente el fraguado fue similar al de su referencia, mezcla G-HS.

En el caso de la mezcla E-30-C, el uso de la fibra de lechuguilla provocó un retraso en el fraguado final de hasta un 114%. Para evaluar su efecto en la disminución del retardo, se fabricó una mezcla con fibra lavada, C-R-CL, la cual condujo a una disminución de un 76% en el fraguado final con respecto de la mezcla con fibra sin lavado C-R-C.

La adición de la fibra dio como resultado una completa disminución de la contracción autógena hasta el primer día, llegando a presentar expansiones para todas las mezclas con excepción de la mezcla con humo de sílice, GHS-C y la mezcla con fibra lavada C-R-CL. Llegando a reducciones de las contracciones autógenas hasta un 313% para la mezcla D-20-C a las dos horas de iniciar la medición de las contracciones. A los 28 días, la reducción de la contracción llegó a ser desde un 54.6% para la mezcla C-R-C (*figura 42*), y hasta un 21.6% para la mezcla G-HS-C (*figura 46*).

La adición del ARC llevó a reducciones de la contracción autógena para todas las series, llegando a ser de un 37% para la serie G y hasta un 68% para la serie C.

Tabla 23. Tiempos de fraguado inicial y final para todas las mezclas de concreto.

Serie	Clave	Inicial (horas)	Final (horas)
C	R	4.0	5.7
	R-S	5.0	6.6
	R-C	8.4	10.6
	R-C-L	4.4	6.3
	20	4.6	6.3
D	20-S	4.8	6.7
	20-C	8.0	10.4
	30	4.0	6.2
E	30-S	5.3	7.4
	30-C	10.0	13.2
	40	4.0	6.2
F	40-S	5.1	7.6
	40-C	9.5	12.8
	HS	4.0	6.1
G	HS-S	4.0	5.8
	HS-C	5.8	8.4

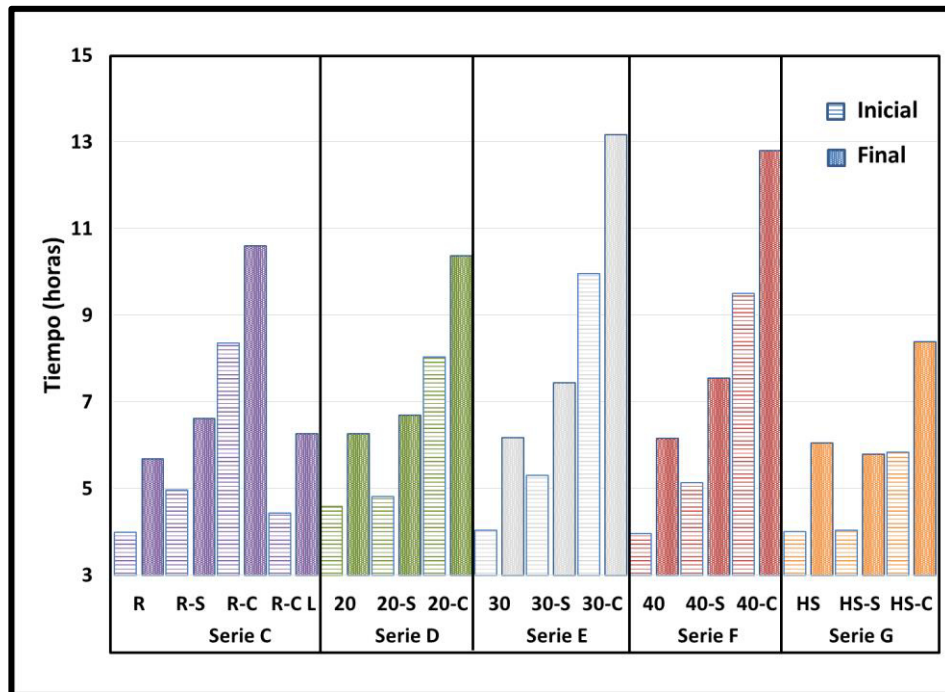


Figura 40. Tiempos de fraguado para cada serie.

Debido al lavado de la fibra para determinar su efecto en el concreto, se pudo observar que a diferencia de la fibra sin lavar, a edades tempranas las probetas presentaron contracciones, de lo anterior se deduce que el efecto de retardo de fraguado, en este caso provocado por la fibra, ayuda a disminuir las contracciones autógenas. El efecto de expansión atribuible al retardo de fraguado, se presentó también en las mezclas con ARC. El efecto expansivo no se presentó tanto para la mezcla G-HS-S, con ARC, y para la mezcla con fibra, G-HS-C, debido a que para estas mezclas, el retardo de fraguado no es tan significativo. Se observa que para el caso de las mezclas con ARC, el efecto de expansión por retardo de fraguado es más sensible que el provocado por la fibra, debido a que con menos porcentaje de retardo de fraguado, se presentan expansiones en mayor proporción que los que originó la fibra.

Se esperaba que la adición del humo de sílice, mezcla G-HS, superara la contracción autógena de la mezcla C-R fabricada con cemento debido a que la contracción química del humo de sílice fue un 25.5% mayor que la del cemento (*figura 39*), mientras que la presentada en la prueba de contracción autógena fue de un 13% mayor la del cemento que la del humo de sílice (*figura 41*), esto pudiera atribuírsele a que el humo de sílice originó mayor contracción química como cementante suplementario por su alta reactividad desde edades muy tempranas. En la contracción autógena ya no se percibe este impacto ya que después del fraguado final lo que origina este cambio volumétrico es la auto-deseccación. Una mayor reactividad a edades muy tempranas consume agua por lo que la cantidad para la auto-deseccación resulta disminuida.

El comportamiento de la ceniza volante condujo a una reducción en la contracción autógena para todas las mezclas fabricadas con este cementante (*figura 41*), el comportamiento para las contracciones a edades tempranas puede ser atribuible al retraso de fraguado (*figura 40*) [26], y a edades avanzadas al grado de hidratación de la

ceniza volante, manifestado en el desarrollo de la resistencia a la compresión (figura 47) [105], de tal manera que la reducción llega a ser desde un 45.8% a un 52.0% para las mezclas E-30 y F-40 respectivamente.

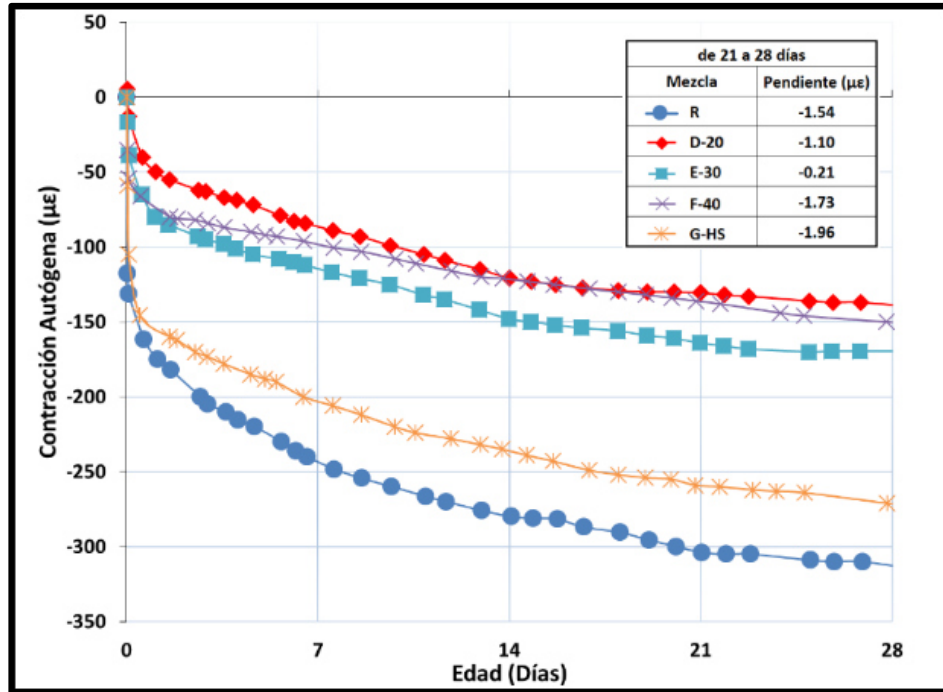


Figura 41. Contracciones autógenas para los diferentes cementantes utilizados.

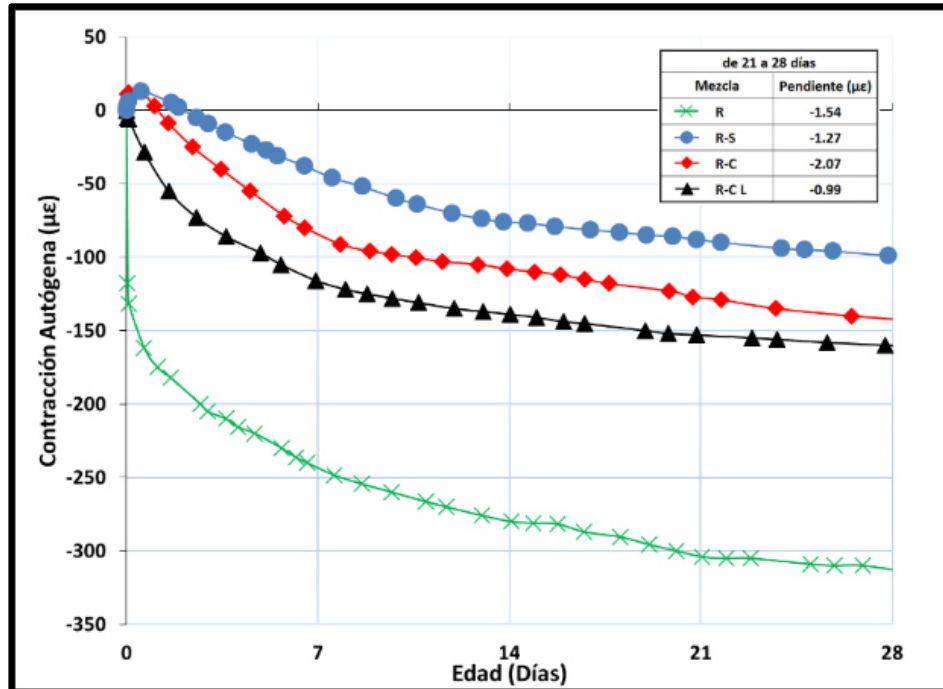


Figura 42. Contracciones autógenas serie C.

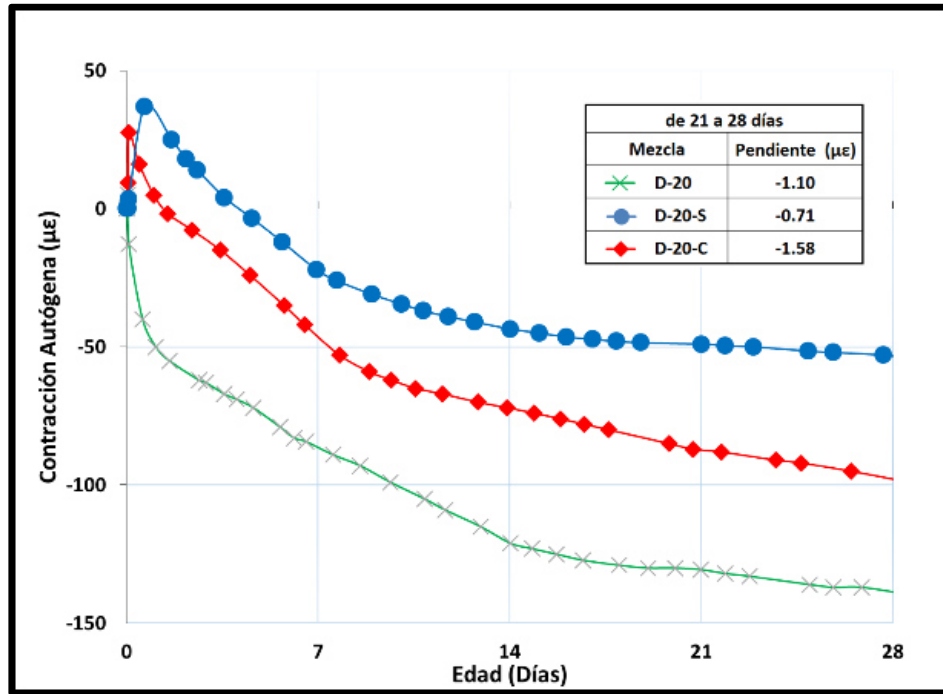


Figura 43. Contracciones autógenas serie D.

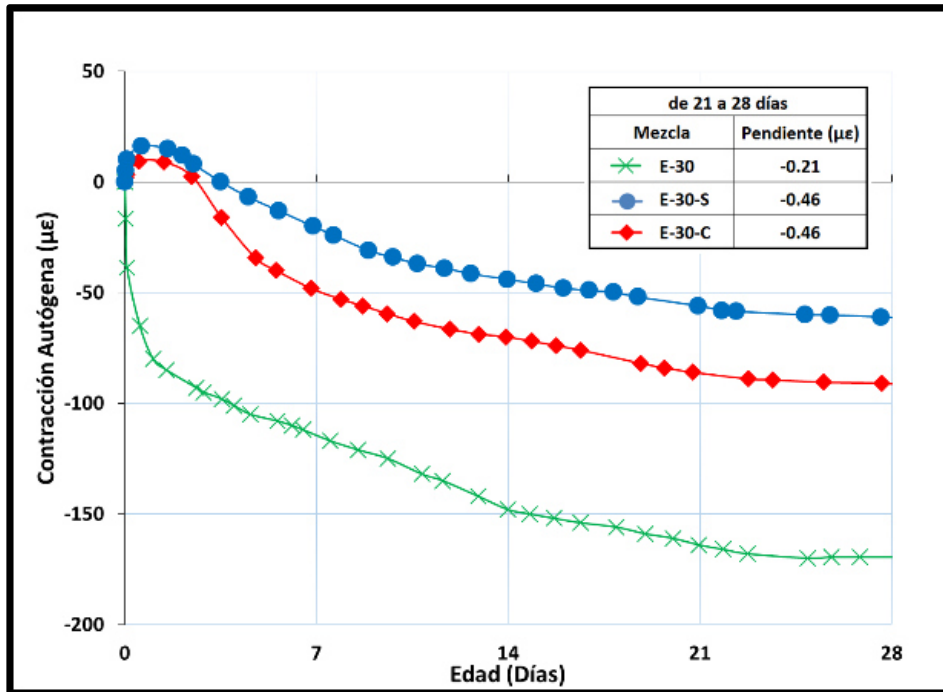


Figura 44. Contracciones autógenas serie E.

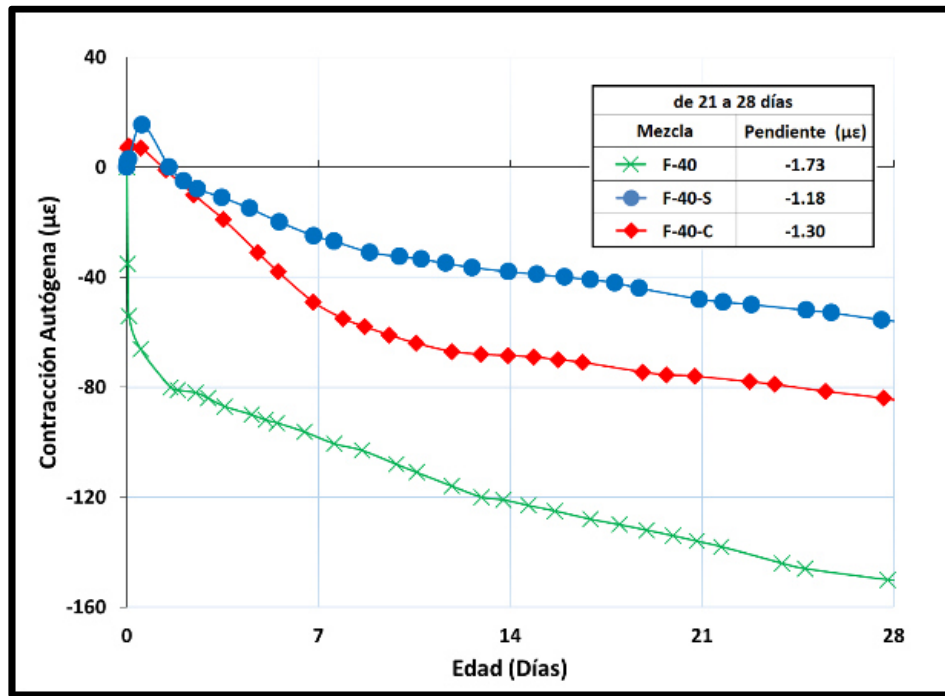


Figura 45. Contracciones autógenas serie F.

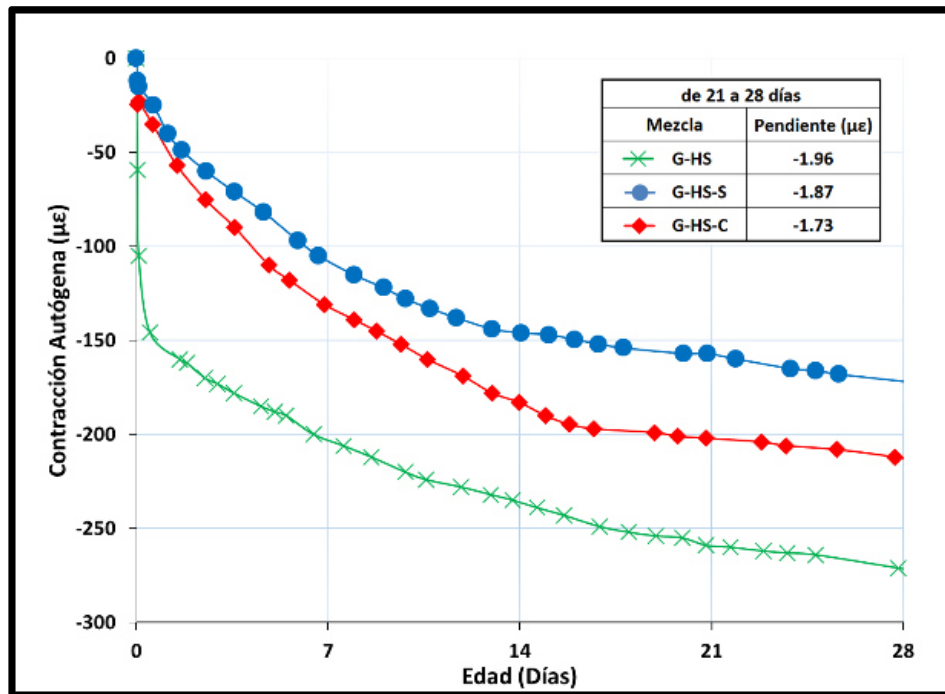


Figura 46. Contracciones autógenas serie G.

En la [tabla 24](#) se presentan los resultados de las diferentes pruebas que se le hicieron al concreto en estado fresco. En relación al contenido de aire atrapado podemos observar que en prácticamente todos los casos, la incorporación del aditivo reductor de la contracción redujo el contenido de aire en un rango de 0.5 a 2.3%.

La incorporación de la fibra (sin lavar) originó en todos los casos incrementos en el contenido de aire que van de 0.9 a 2.9 % y el lavado de la fibra ayudó a disminuir el incremento a un valor de 0.8 %.

La incorporación de la ceniza volante originó variabilidad en el contenido de aire en un rango de $\pm 0.7\%$.

En lo que respecta al peso volumétrico del concreto fresco podemos observar que en la mayoría de los casos (series C, D, E y F), el aditivo reductor de la contracción originó un incremento en el peso volumétrico, lo cual es congruente con el contenido de aire ya que para los mayores incrementos en peso volumétrico los contenidos de aire fueron menores.

Para todas las series de concreto reportadas en la [tabla 24](#), la sustitución del 1% del volumen del agregado por fibra condujo a disminuciones en el peso volumétrico que oscilaron entre 31 y 125 kg/m³, debido a que la adición de la fibra condujo a incrementos en el contenido de aire, reduciendo el peso volumétrico del concreto.

La reducción del peso volumétrico para la mezcla con la fibra lavada (C-R-CL) fue menor que para la mezcla con la fibra sin lavar (C-R-C), (2368 < 2278 kg/m³) lo cual también es congruente con el contenido de aire, 3.0% < 5.1% respectivamente.

Como se puede observar en la [tabla 24](#), los parámetros de autocompactabilidad T₅₀, extensibilidad y anillo J no pudieron ser medidos para las mezclas de la serie G, ya que estas mezclas no presentaron consistencia fluida. Con excepción de las mezclas de la

serie C, las mezclas con ARC para las series D, E y F presentaron una reducción del T_{50} , lo que indica una mezcla menos cohesiva o menos viscosa.

Tabla 24. Propiedades en estado fresco de todas las mezclas de concreto.

Serie	Clave	Aire (%)	T50 (s)	PV (kg/m ³)	Extensib. (cm)	Anillo J (cm)	Revenimiento (cm)	Est. Visual.	Temp. (°C)	Col. Segreg. (%)
C	R	2.2	5.0	2403	61.0	56.0	----	0	22.0	0
	R-S	0.3	5.2	2446	72.5	63.5	----	0	22.0	----
	R-C	5.1	7.5	2278	60.0	50.0	----	0	22.0	----
	R-C-L	3.0	5.3	2368	61.8	56.8	----	0	22.0	----
D	20	1.5	5.2	2377	62.5	60.5	----	0	22.0	----
	20-S	0.8	3.3	2386	67.5	63.0	----	0	21.0	----
	20-C	4.1	19.3	2294	52.5	40.0	----	0	22.5	----
E	30	1.8	7.1	2340	57.5	48.0	----	0	21.5	----
	30-S	1.9	3.7	2342	70.0	64.0	----	1	22.0	----
	30-C	4.2	10.0	2289	68.0	66.0	----	0	22.0	----
F	40	2.8	17.6	2296	50.5	41.0	----	0	21.5	----
	40-S	1.0	7.3	2326	61.5	55.0	----	0	21.5	----
	40-C	3.7	33.2	2265	51.5	40.0	----	0	21.0	----
G	HS	2.3	----	2386	42.4	37.4	----	0	19.5	----
	HS-S	1.8	----	2383	36.5	----	25.5	----	21.0	----
	HS-C	4.8	----	2314	----	----	13.0	----	21.0	----

Debido al tipo de cemento utilizado, CPO 40, la ganancia de resistencia a edades tempranas fue significativa, esto puede ser comprobado mediante los resultados a la compresión de los morteros estándar ([tabla 13](#)), en donde los resultados a la edad de 3 días del mortero de referencia (MRV), representa un 79.2% al resultado de 28 días, similar a la ganancia medida en el concreto de referencia (C-R) que es de un 85.0% ([tabla 25](#)).

Tomando como parámetro la resistencia a la compresión a los 91 días, se observa que la adición de fibra provoca disminuciones de resistencia de hasta un 6.6% para la mezcla D-20-C y de un 11.1% para esta misma mezcla a los 28 días. El efecto de la disminución a edades tempranas que llega a ser de hasta un 37.3% para la mezcla E-30-C, ensayados a un día de edad, es atribuible al retardo de fraguado que llegó a ser significativo ([figura 40](#)).

Analizando esta influencia en la mezcla con la fibra lavada, donde la recuperación de la resistencia a un día de edad entre las mezclas C-R-C y C-R-CL fue de un 9.0%, debido a que al lavar la fibra el tiempo de fraguado se corrigió, y a edades posteriores la diferencia no fue considerable. De igual manera, la pérdida de resistencia por la adición del ARC llegó a ser de hasta un 9.7% para la mezcla G-HS-S y de un 18.3% para la mezcla C-R-S a 3 días de edad. A la edad de un día, el efecto del retardo de fraguado provocó disminuciones de resistencia de hasta un 34.3% para la mezcla C-R-S (tabla 25).

Tabla 25. Resistencia a la compresión para todas las mezclas de concreto, ensayos por triplicado.

Serie	Clave	Resistencia a la Compresión (MPa)											
		1 d	s	3 d	s	7 d	s	28 d	s	56 d	s	91 d	s
C	R	29.4	1.8	41.9	3.2	43.7	2.0	49.2	1.9	55.6	2.2	56.1	0.8
	R-S	19.3	0.2	34.2	2.6	37.0	1.5	42.9	4.3	49.5	2.1	52.7	1.7
	R-C	22.1	0.7	38.4	0.4	42.9	0.7	47.0	0.8	50.5	0.7	52.8	0.9
	R-C-L	24.7	0.2	39.2	1.6	42.9	3.7	48.8	5.5	52.0	0.4	53.1	2.5
D	20	22.5	0.9	37.3	0.7	37.7	3.9	47.5	0.5	51.2	1.4	55.8	2.3
	20-S	15.6	0.2	35.0	1.8	39.7	4.6	44.2	4.6	45.9	2.4	50.6	5.9
	20-C	14.7	0.7	36.3	2.3	38.8	1.7	42.2	2.7	47.4	2.0	52.1	3.3
E	30	17.4	0.9	33.2	2.1	37.3	1.7	39.5	1.5	45.6	3.2	50.3	4.4
	30-S	17.5	0.7	31.1	2.4	34.0	0.9	41.4	0.7	44.8	2.4	47.6	1.6
	30-C	10.9	0.1	34.4	2.3	36.3	1.7	41.8	1.0	44.4	2.3	50.5	4.4
F	40	14.4	0.1	29.4	1.6	34.3	1.3	40.0	0.4	42.7	0.4	45.8	0.9
	40-S	14.3	0.6	28.7	0.3	31.6	1.3	37.3	0.8	41.8	1.1	42.4	5.0
	40-C	11.1	0.2	27.0	0.6	31.4	1.3	37.0	0.7	42.3	2.2	45.6	4.0
G	HS	27.3	0.7	40.9	1.0	43.3	1.3	50.2	1.0	53.4	2.2	56.9	3.2
	HS-S	22.9	0.9	38.9	8.8	38.8	3.4	46.4	3.4	46.3	1.9	51.3	2.6
	HS-C	28.8	0.6	36.7	1.0	45.1	2.0	49.4	0.5	52.5	2.4	53.9	4.7

d = días, s = desviación estándar

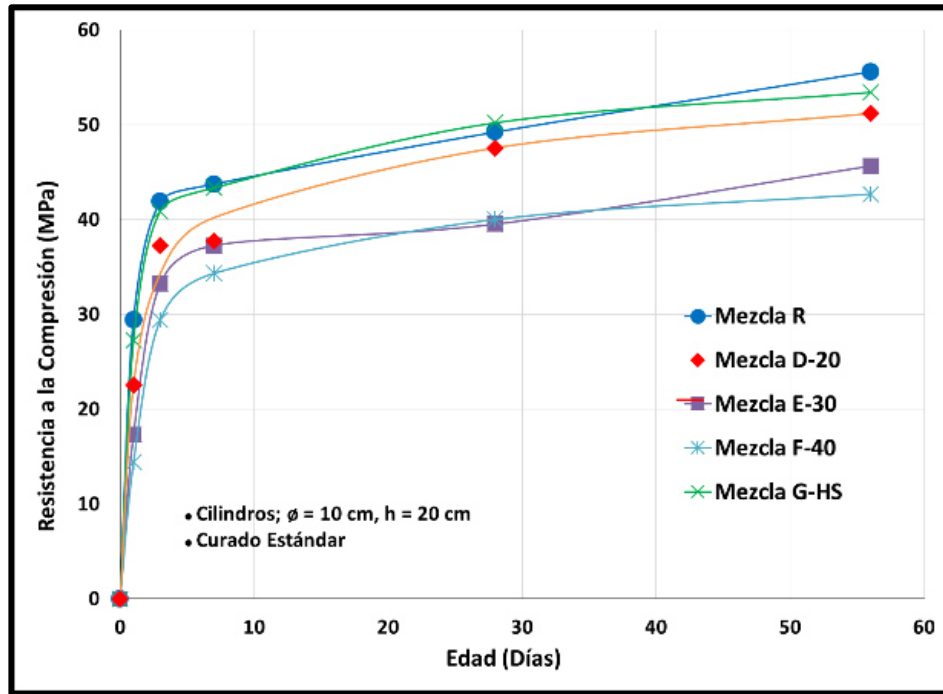


Figura 47. Resistencia a la compresión para los diferentes cementantes utilizados.

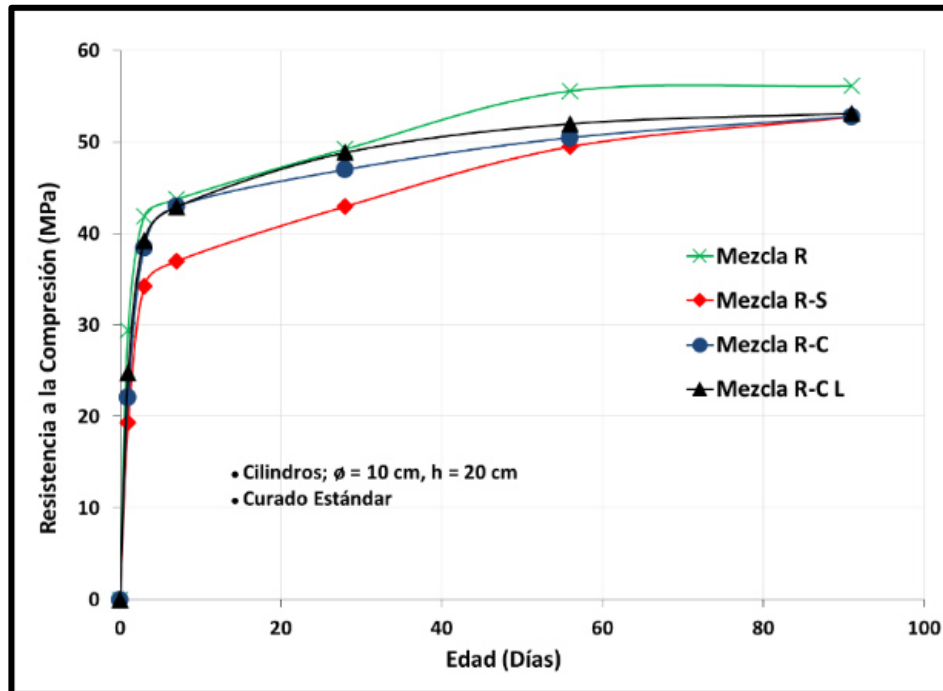


Figura 48. Resistencia a la compresión serie C.

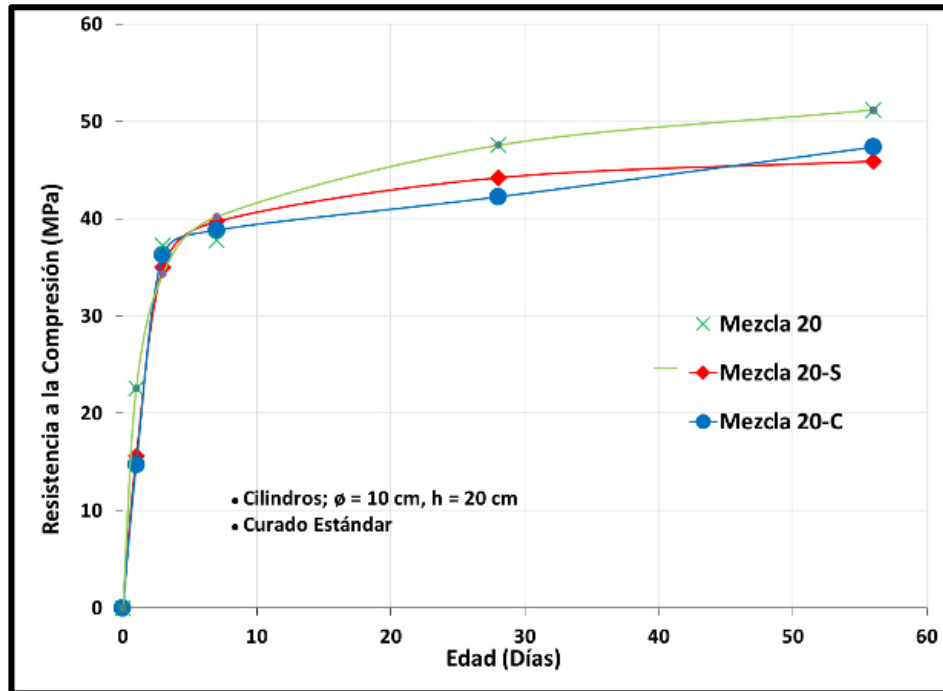


Figura 49. Resistencia a la compresión serie D.

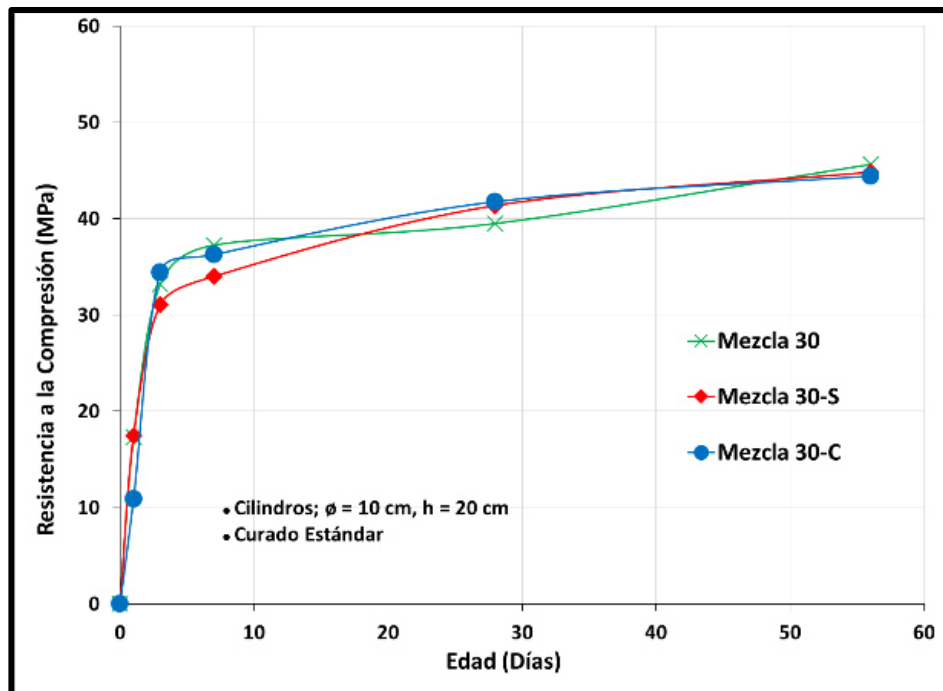


Figura 50. Resistencia a la compresión serie E.

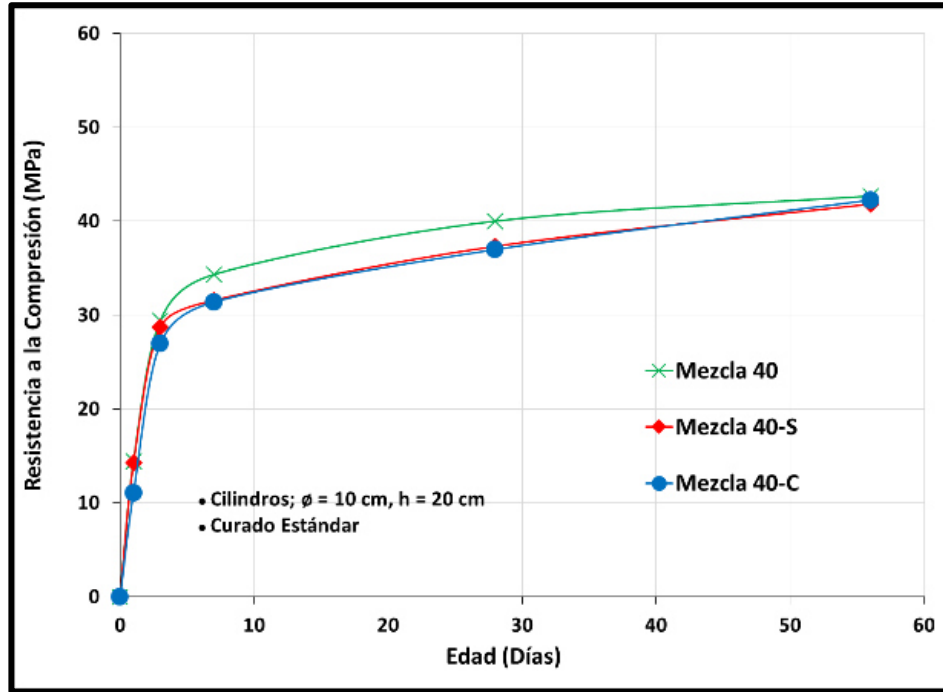


Figura 51. Resistencia a la compresión serie F.

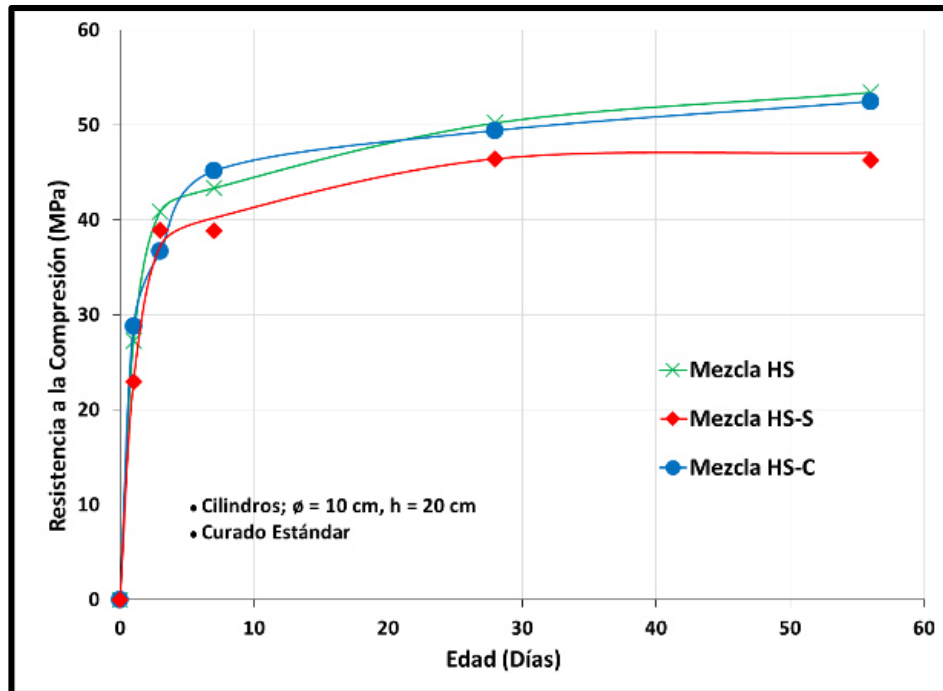


Figura 52. Resistencia a la compresión serie G.

Para el módulo de elasticidad, *tabla 26, figura 53 y figura 54*, el comportamiento en general de la adición de la fibra es la disminución tanto para edades a 28 como a 91 días, oscilando entre disminuciones del 11.8% para la mezcla C-R-C a 28 días hasta un 3.1% para la mezcla G-HS-C a 91 días, sin embargo, el efecto del lavado de la fibra, mezcla C-R-CL, llevo a un decremento de un 3.5% a 28 días y a un 6.4% a 91 días, con respecto a la mezcla sin la fibra lavada, C-R-C.

A diferencia de la mezcla sin humo de sílice, la adición de ARC tendió a aumentar el módulo de elasticidad de manera poco significativa a la edad de 28 días, variando de un 1.6% para la mezcla E-30-S a 0.01% en la mezcla C-R-S. En el caso de la mezcla con el humo de sílice, G-HS-S, presentó una disminución de un 5.4%, caso contrario fue el comportamiento del módulo de elasticidad a 91 días, donde a excepción de la mezcla D-20-S donde el módulo de elasticidad se incrementó en un 2.0% y la serie G-HS-S, que su incremento fue de 3.8%, el resto de las mezclas presentaron una disminución desde un 2.0% para la mezcla C-R-S a un 0.7% para la mezcla F-40-S.

Tabla 26. Módulo de elasticidad para todas las mezclas de concreto a 28 y 91 días.

Serie	Clave	Módulo de Elasticidad (MPa)			
		28	s	91	s
C	R	42.4	0.67	43.7	3.06
	R-S	42.4	1.42	42.8	1.58
	R-C	37.4	1.22	39.1	2.10
	R-C-L	38.9	0.31	42.0	0.49
D	20	40.1	1.15	40.8	0.72
	20-S	40.5	1.47	41.6	3.28
	20-C	37.9	1.26	38.1	1.80
E	30	38.3	0.66	41.2	0.50
	30-S	38.9	0.59	40.6	3.17
	30-C	35.4	0.70	37.5	1.29
F	40	37.0	1.87	39.0	0.95
	40-S	37.2	1.03	38.7	1.37
	40-C	35.5	0.22	36.4	0.94
G	HS	43.1	3.03	38.7	4.65
	HS-S	40.8	0.64	40.2	1.43
	HS-C	39.4	2.28	37.5	0.49

d = días, s = desviación estándar

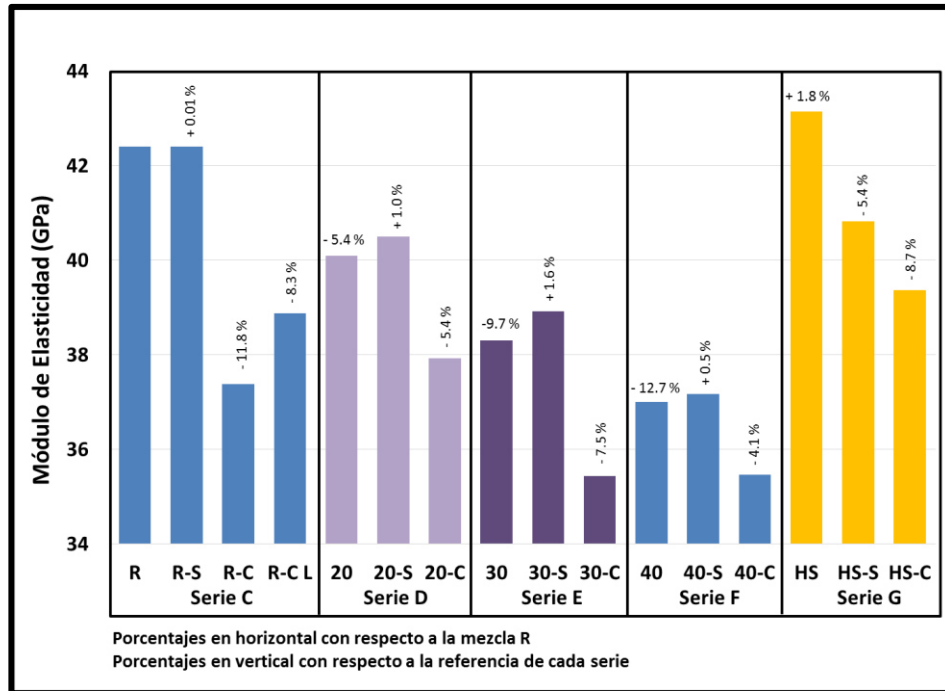


Figura 53. Comportamiento del módulo de elasticidad a 28 días.

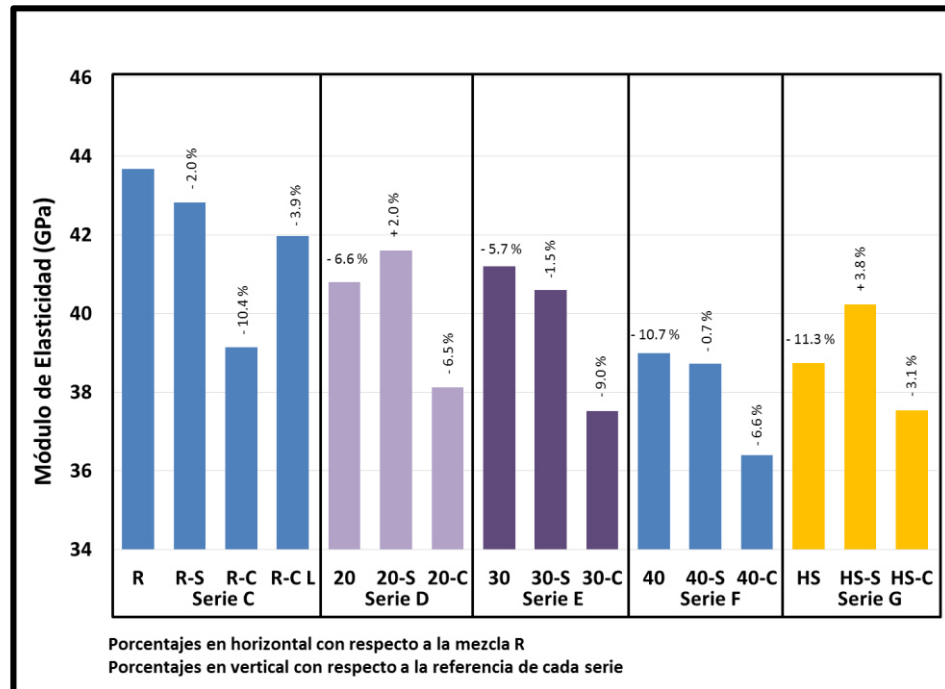


Figura 54. Comportamiento del módulo de elasticidad a 91 días.

Tomando como referencia la contracciones por secado a los 91 días indicadas en la [tabla 27](#) y [figura 56](#) a la [figura 60](#), la adición de la fibra tiene la tendencia a incrementar las contracciones por secado, llegando a registrar incrementos de hasta un 35.6% para la mezcla F-40-C, con excepción de la mezcla C-R-C, en donde se registraron contracciones menores a la referencia de un 9.7%. El efecto del lavado de la fibra, mezcla C-R-CL, favoreció a disminuir las contracciones en un 3.9% con respecto a la mezcla con la fibra natural, mezcla C-R-C.

El efecto de la adición del ARC originó en todas las mezclas reducciones en las contracciones por secado desde un 36.8% para la mezcla G-HS-S hasta un 56.3% para la mezcla C-R-S.

La adición de ceniza volante condujo a reducciones de hasta un 35.9% para la mezcla F-40 y de un 30.1% para la mezcla G-HS con respecto a la mezcla de referencia C-R ([figura 55](#)).

Tabla 27. Registro de contracciones por secado, promedio de tres mediciones.

Serie	Clave	Curado		Secado (μm)											
		7 d	s	4 d	s	7 d	s	14 d	s	28 d	s	56 d	s	91 d	s
C	R	-81	0.82	-136	0.82	-213	0.82	-302	0.82	-400	0.82	-467	0.82	-541	0.82
	R-S	0	0.39	-40	0.39	-70	0.39	-90	0.39	-171	0.39	-215	0.39	-236	0.39
	R-C	20	1.10	-120	1.10	-170	1.10	-312	1.10	-354	1.10	-465	1.09	-488	1.09
	R-C-L	16	0.53	-126	0.52	-152	0.52	-294	0.52	-328	0.52	-423	0.52	-467	0.52
D	20	63	0.13	-34	0.13	-110	0.12	-165	0.12	-250	0.13	-310	0.12	-404	0.12
	20-S	80	0.18	-10	0.18	-30	0.18	-50	0.18	-157	0.18	-169	0.18	-181	0.18
	20-C	20	0.54	-120	0.54	-192	0.54	-262	0.54	-360	0.54	-454	0.54	-488	0.54
E	30	37	0.60	-92	0.60	-131	0.60	-173	0.60	-250	0.60	-320	0.60	-381	0.60
	30-S	30	0.37	-30	0.37	-30	0.37	-52	0.37	-113	0.37	-155	0.37	-197	0.37
	30-C	50	0.52	-147	0.52	-210	0.52	-223	0.52	-333	0.52	-449	0.52	-451	0.51
F	40	26	0.19	-58	0.19	-108	0.19	-130	0.19	-241	0.19	-276	0.19	-346	0.19
	40-S	10	0.41	-30	0.41	-50	0.41	-73	0.41	-115	0.41	-178	0.41	-210	0.41
	40-C	-10	0.51	-176	0.52	-173	0.51	-241	0.52	-383	0.51	-446	0.51	-470	0.52
G	HS	10	0.80	-90	0.80	-130	0.80	-194	0.80	-265	0.80	-386	0.80	-394	0.80
	HS-S	26	0.20	-39	0.20	-55	0.20	-118	0.20	-123	0.20	-189	0.20	-239	0.20
	HS-C	24	0.64	-150	0.65	-199	0.65	-223	0.64	-310	0.65	-420	0.65	-462	0.65

d = días, s = desviación estándar

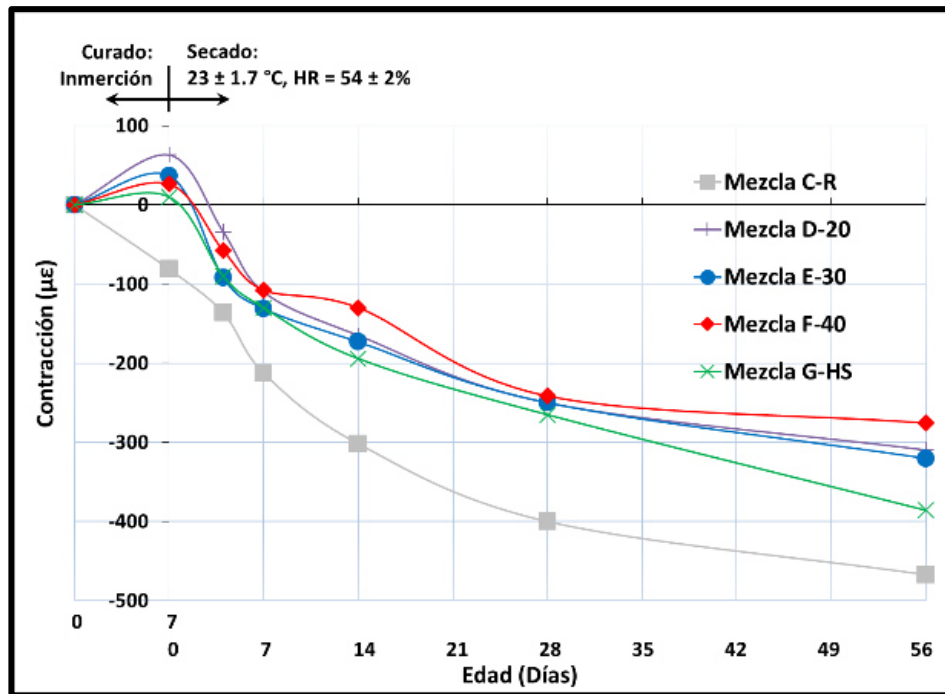


Figura 55. Contracción por secado para los diferentes cementantes utilizados.

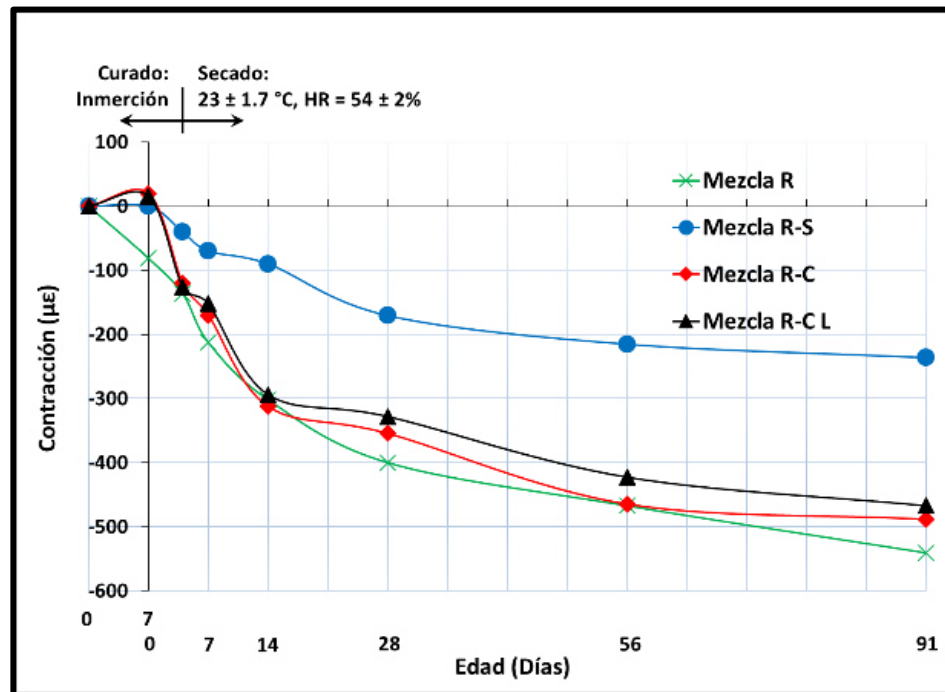


Figura 56. Contracción por secado serie C.

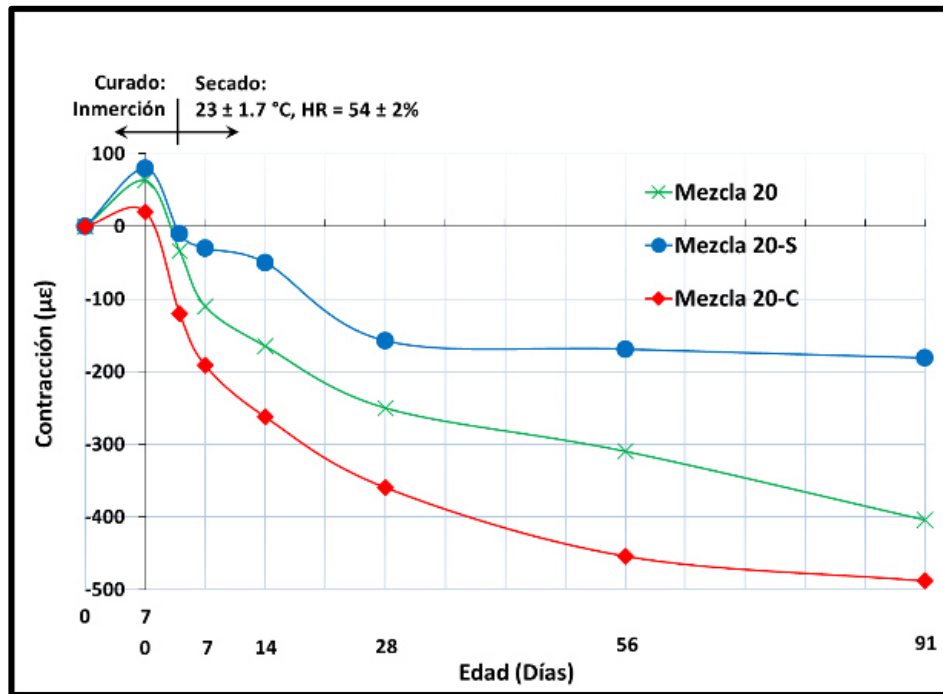


Figura 57. Contracción por secado serie D.

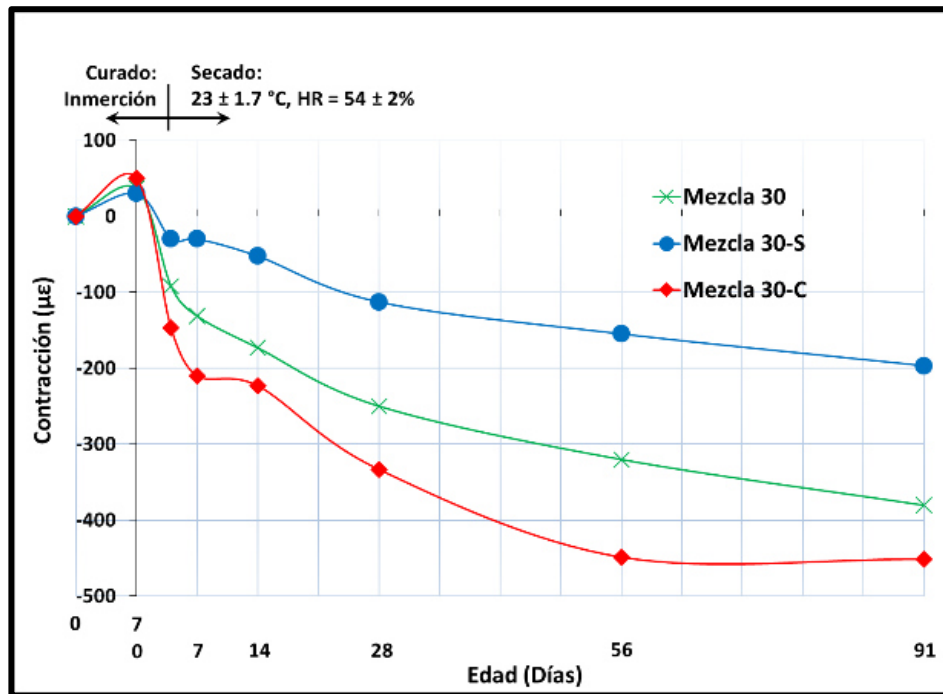


Figura 58. Contracción por secado serie E.

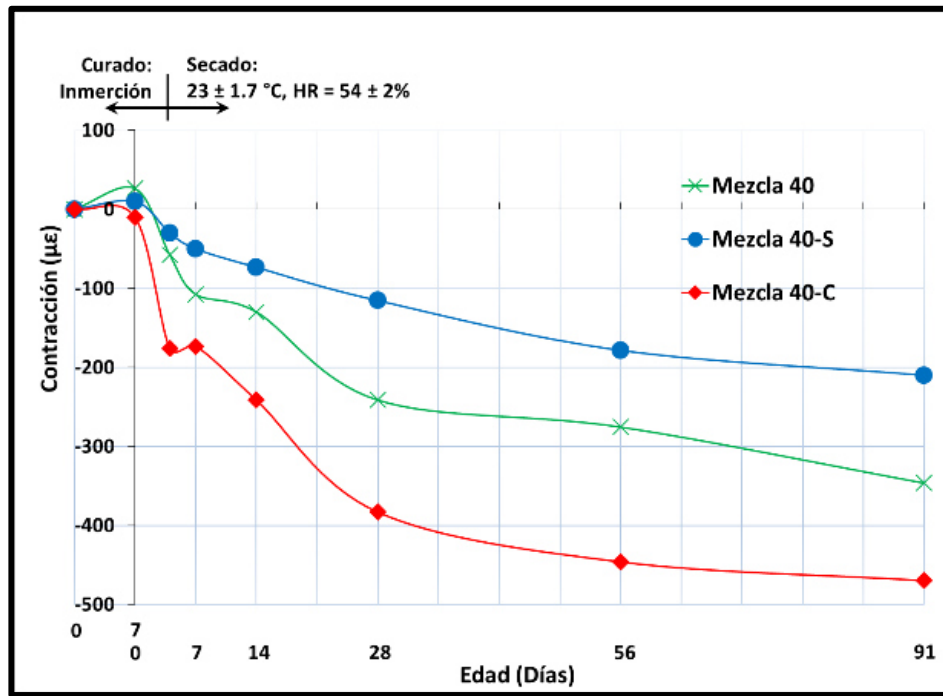


Figura 59. Contracción por secado serie F.

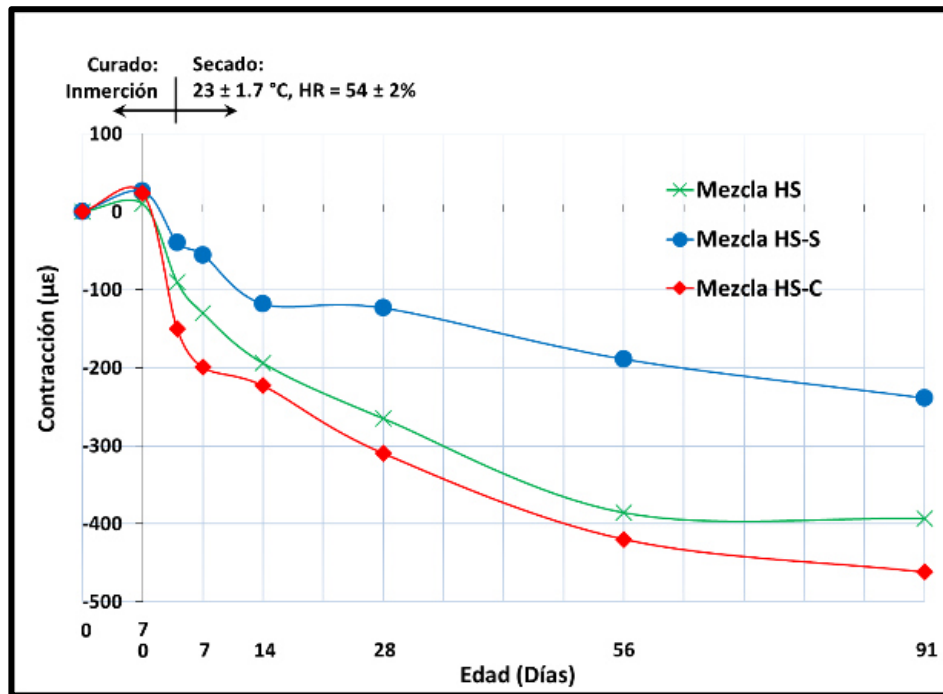


Figura 60. Contracción por secado serie G.

Según la [tabla 28](#) la medición de la resistividad eléctrica a los 56 días comparando los resultados contra los de sus respectivas referencias, indica que la adición de la fibra da como resultado la baja de resistividad para las mezclas C-R-C (-5.1%), C-R-CL (-10.4%), D-20-C (-8.8%) y la E-30-C (-12.4%), en tanto la serie F-40-C presentó resultados superiores, en un 18.9%. La mezcla G-HS-C, no presentó cambios significativos.

Tabla 28. Desarrollo de la resistividad eléctrica para diferentes edades y todas las mezclas.

Serie	Clave	Resistividad Eléctrica (kΩ-cm)					
		14 d	s	28 d	s	56 d	s
C	R	11	0.69	12	0.68	12	0.78
	R-S	13	1.57	14	1.75	15	2.04
	R-C	10	0.42	10	0.58	12	0.65
	R-C-L	9	0.42	10	0.67	11	0.77
D	20	9	0.39	12	0.43	18	0.61
	20-S	11	0.80	15	1.13	23	1.83
	20-C	9	0.41	11	0.43	16	0.63
E	30	9	0.38	14	0.57	24	1.06
	30-S	11	0.51	19	0.74	26	2.00
	30-C	9	0.52	14	0.83	21	1.20
F	40	10	0.97	14	0.51	21	0.99
	40-S	10	0.28	16	0.60	26	0.82
	40-C	8	0.34	15	0.68	25	1.02
G	HS	14	0.70	19	0.69	19	0.78
	HS-S	18	0.69	22	0.68	22	0.78
	HS-C	16	1.08	17	1.05	19	0.57

d = días, s = desviación estándar

Analizando la [figura 61](#), la mezcla de referencia R-C sin adiciones, indicó una permeabilidad a los iones cloruro en el límite entre alta y moderada según la norma AASHTO TP 95 [99], la sustitución del 20% de ceniza, mezcla D-20 y el 5% de humo de sílice, mezcla G-HS, provocó que la resistividad aumentara un 46.1% y 58.8% respectivamente, pasando a una resistividad moderada. El sustituir un 30% de ceniza

volante, condujo a tener una difusión baja, para el caso de la sustitución de un 40% de ceniza volante, mezcla F-40, condujo a la mezcla al límite de difusión entre moderada y alta.

Analizando las [figura 63](#) a la [figura 67](#), la adición del ARC condujo en general a un aumento en la resistividad de un 14.3% para le mezcla G-HS-S hasta un 27.2% para la mezcla D-20-S, quedando en la categoría de difusión baja, las mezclas D-20-S, E-30-S, F-40-S y G-HS-S, y en moderada la mezcla C-R-S.

Comparando las mezclas de referencia a la edad de 56 días C-R, D-20, E-30, F-40 y G-HS, se aprecia un máximo en el comportamiento de la resistividad para la mezcla E-30 y con una tendencia a continuar aumentando con el tiempo. Por el contrario, la mezcla con humo de sílice, G-HS, a edades tempranas de 14 y 28 días, la resistividad fue la más alta de las 5 mezclas, pero para la edad de 56 días no se presentó un incremento considerable con tendencia a no continuar incrementándose ([figura 62](#)).

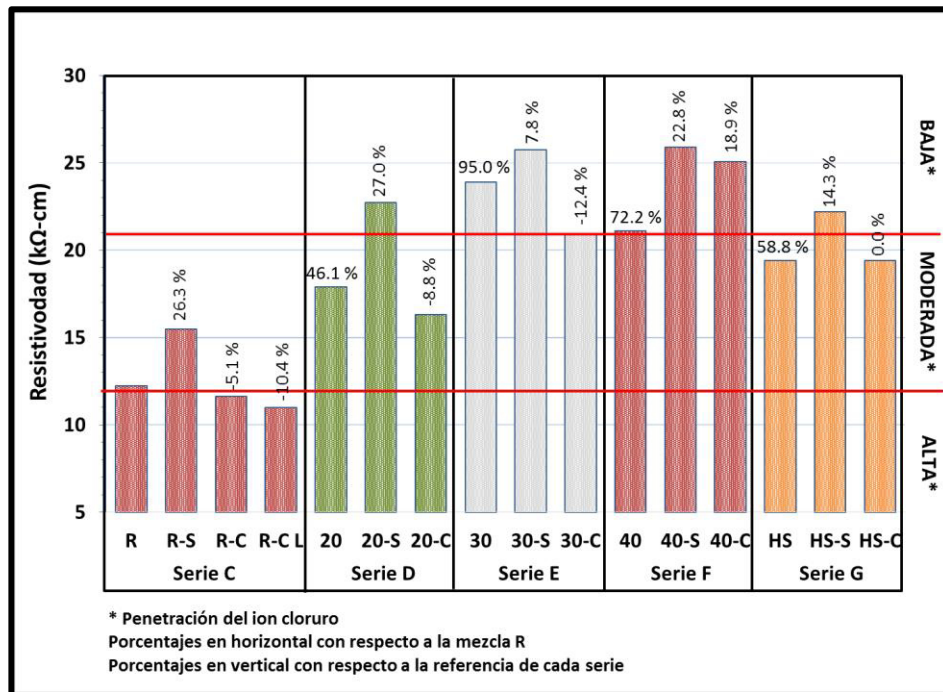


Figura 61. Comportamiento de la resistividad eléctrica para todas las series.

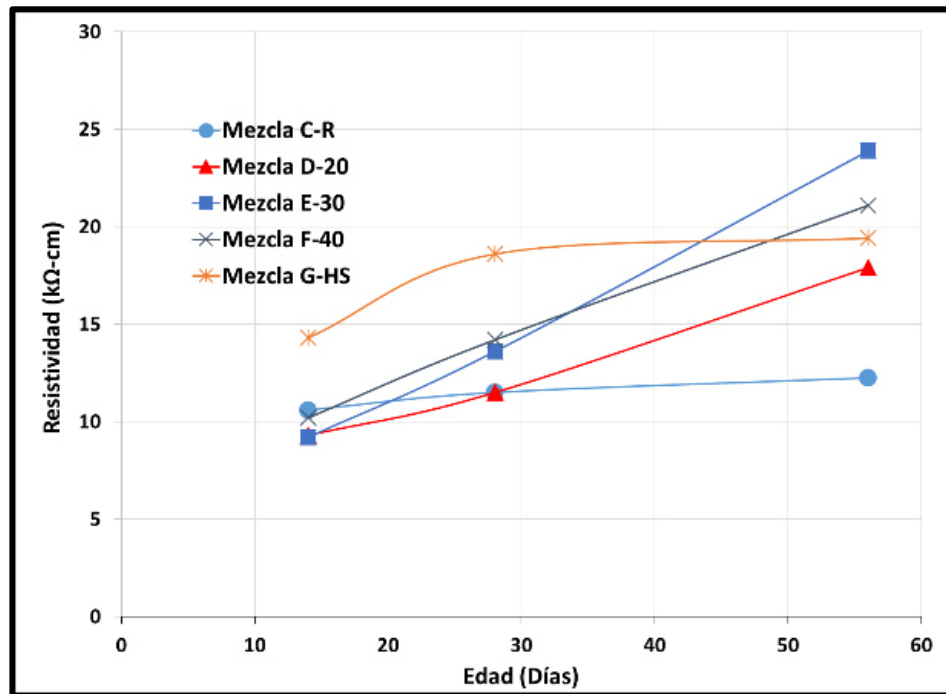


Figura 62. Influencia de los cementantes y la edad en la resistividad eléctrica.

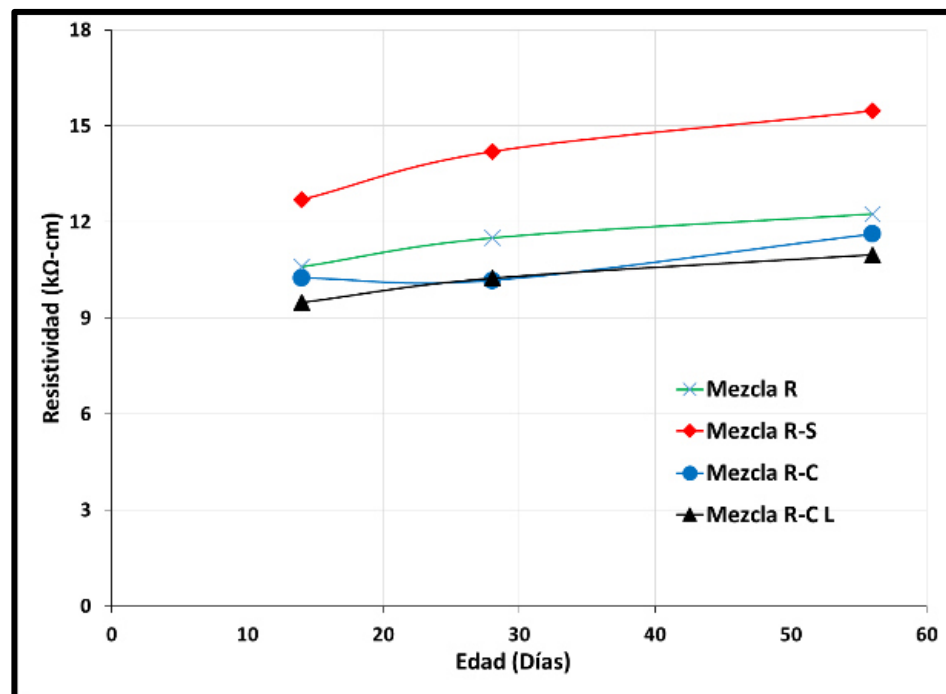


Figura 63. Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie C.

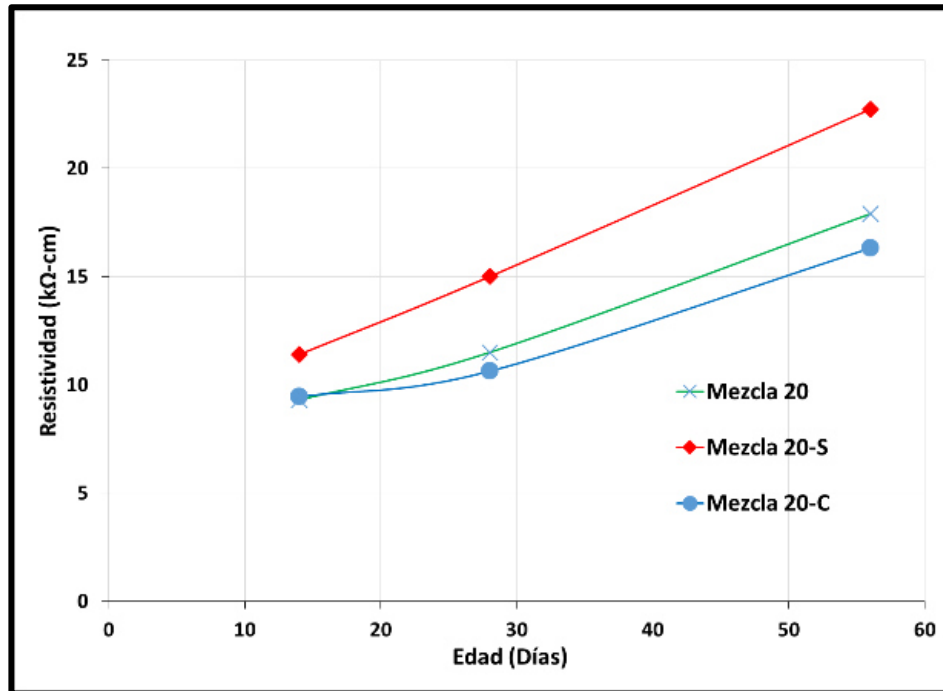


Figura 64. Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie D.

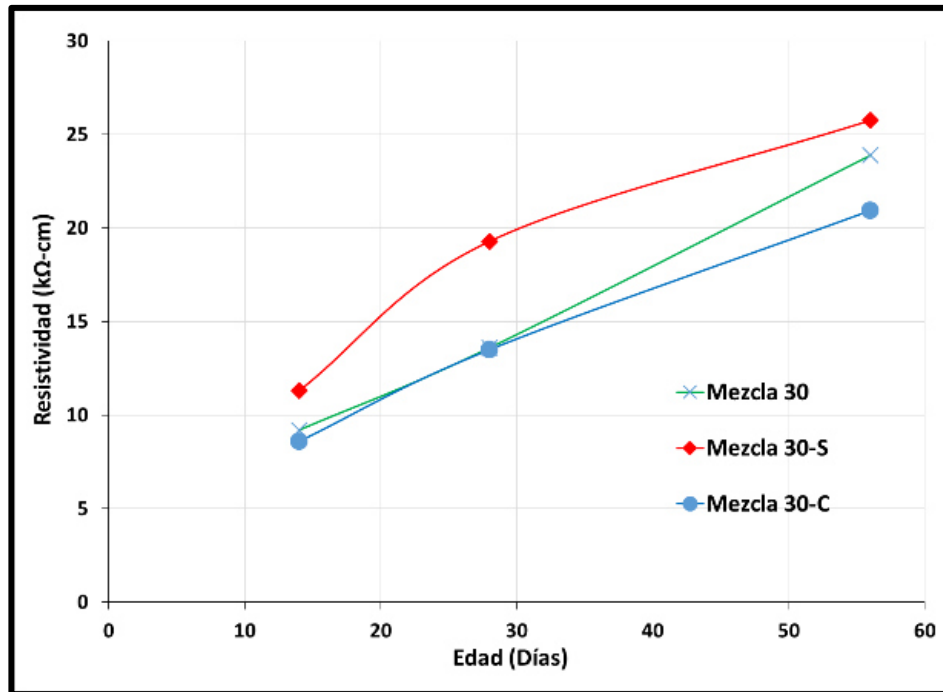


Figura 65. Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie E.

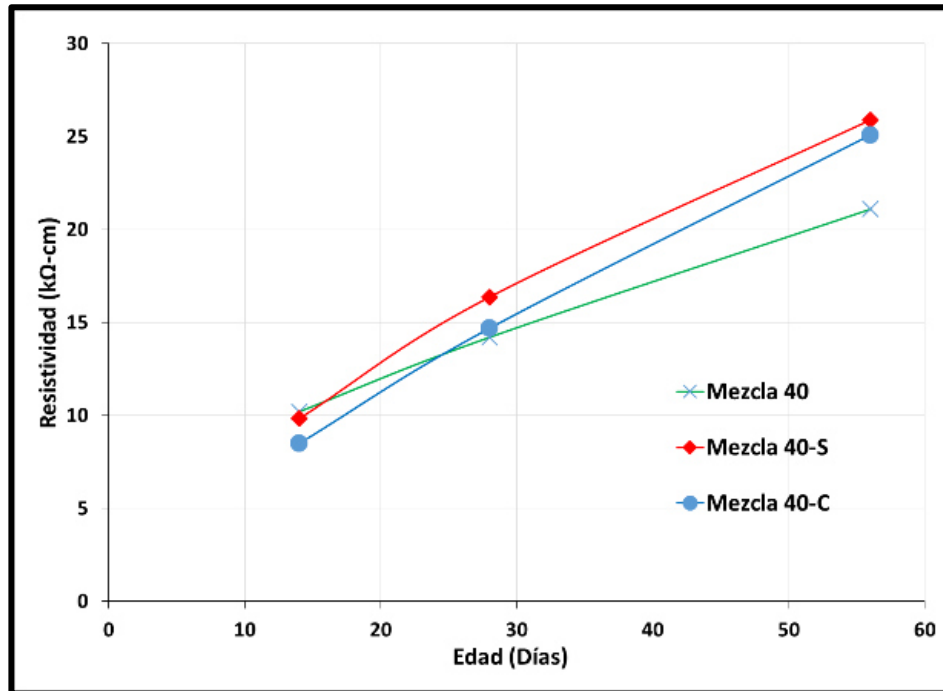


Figura 66. Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie F.

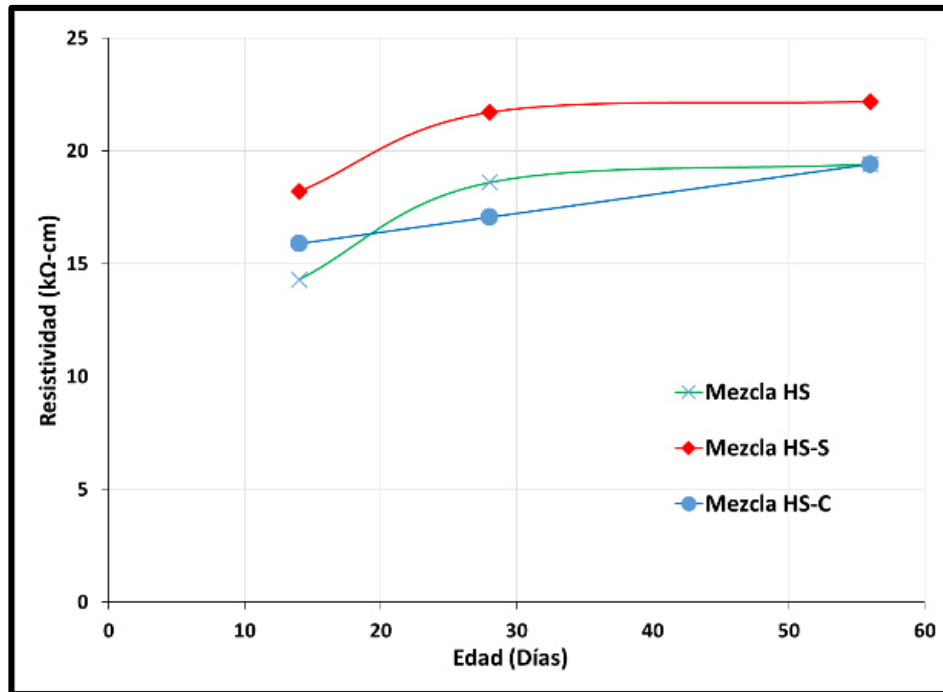


Figura 67. Influencia de la edad en la resistividad eléctrica, serie G.

Para las adiciones de ceniza volante y humo de sílice, la difusión de iones cloruro se vio disminuida con respecto a la mezcla de referencia, C-R, *tabla 29* y *figura 68*, y en el caso de las mezclas con los métodos de mitigación de la contracción autógena, fibra y ARC, se presentaron disminuciones para estas mezclas, con la única excepción de la mezcla con la fibra lavada C-R-CL al incrementar la difusión en un 9.3% con respecto a su referencia, la adición de la fibra condujo a disminuciones marginales de un 0.4% para la mezcla D-20-C, hasta una reducción de un 1.8% para la mezcla F-40-C. La adición del ARC condujo a reducciones desde un 11.8% para la mezcla C-R-S hasta reducciones de un 33.3% para la mezcla F-40-S. Para la mezcla con un 30% de ceniza volante, E-30, se encontró un valor mínimo de difusión en comparación con la mezclas con 20 y 40% de ceniza volante, coincidiendo este comportamiento con el que se presentó en la medición de resistividad eléctrica.

Tabla 29. Difusión de iones cloruro para todas las mezclas, promedio de tres mediciones.

Serie	Clave	Difusión (x10 ⁻¹² m ² /s)	s
C	R	11.2	0.31
	R-S	8.9	0.71
	R-C	9.9	0.62
	R-C-L	12.3	0.39
D	20	8.5	0.71
	20-S	6.4	0.25
	20-C	8.5	0.75
E	30	7.5	0.13
	30-S	6.1	0.43
	30-C	7.0	0.26
F	40	8.0	0.27
	40-S	5.4	0.10
	40-C	7.1	0.14
G	HS	7.9	0.21
	HS-S	6.1	0.35
	HS-C	7.2	0.40

s = desviación estándar

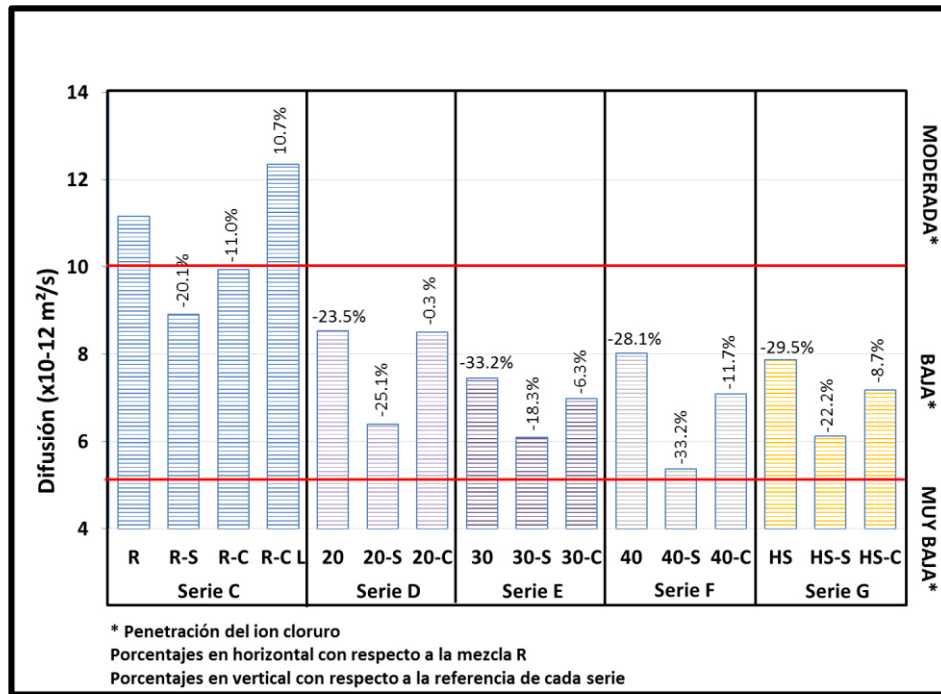


Figura 68. Difusión de iones cloruro para todas las mezclas.

La [figura 69](#) compara la clasificación que da la norma AASHTO TP 95 [99] y la clasificación que propone Nilsson [106] para la difusión de los iones cloruro, catalogando las mezclas investigadas. La clasificación que hace la norma AASHTO la cataloga de manera conservadora debido a que los ensayos denominados como Alta difusión, la clasificación de Nilsson se encuentra denominada como Moderada, de igual manera, la clasificación de Moderada se clasifica por Nilsson como Baja. La coincidencia se da al catalogar la penetración de los iones cloruro como Baja por la norma AASHTO coincide con la clasificación de la difusión propuesta por Nilsson. Solo la mezcla de referencia C-R, coincidió con la clasificación moderada por ambos métodos.

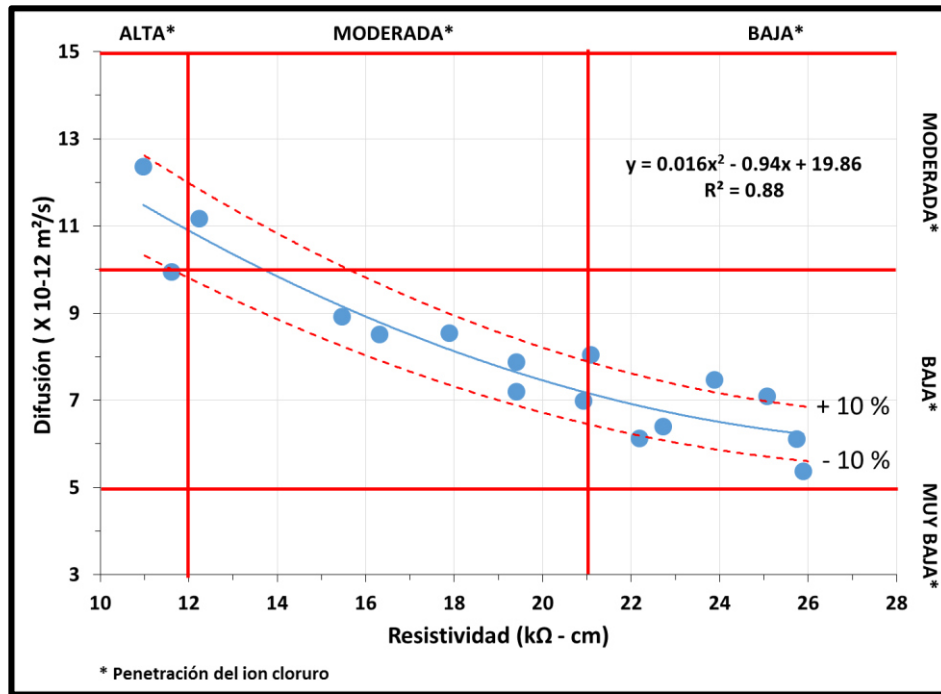


Figura 69. Correlación entre difusión de iones cloruro y la resistividad eléctrica, y la clasificación propuesta por AASHTO TP 95 y Nilsson para la penetración de iones cloruro.

Analizando el comportamiento de la correlación entre la difusión de los iones cloruro y la resistividad eléctrica (figura 70), agrupando las mezclas por tipo de mitigador de la contracción autógena y las mezclas de referencia, es posible definir una tendencia clara con un coeficiente de correlación de 0.954 para las mezclas con ARC, de 0.967 para las mezclas con fibra y un coeficiente de correlación de 0.985 para las mezclas sin mitigador de la contracción autógena (mezclas de referencia). A diferencia de la correlación de todas las mezclas sin distinción de algún tipo (figura 69), la correlación llega a ser del 0.88, lo anterior define que la migración de iones cloruro dependerá del tipo de solución que contenga el poro, generando cada tipo de curado interno diferentes microestructuras con porosidades capilares que reducen de manera distinta las propiedades de transporte [1].

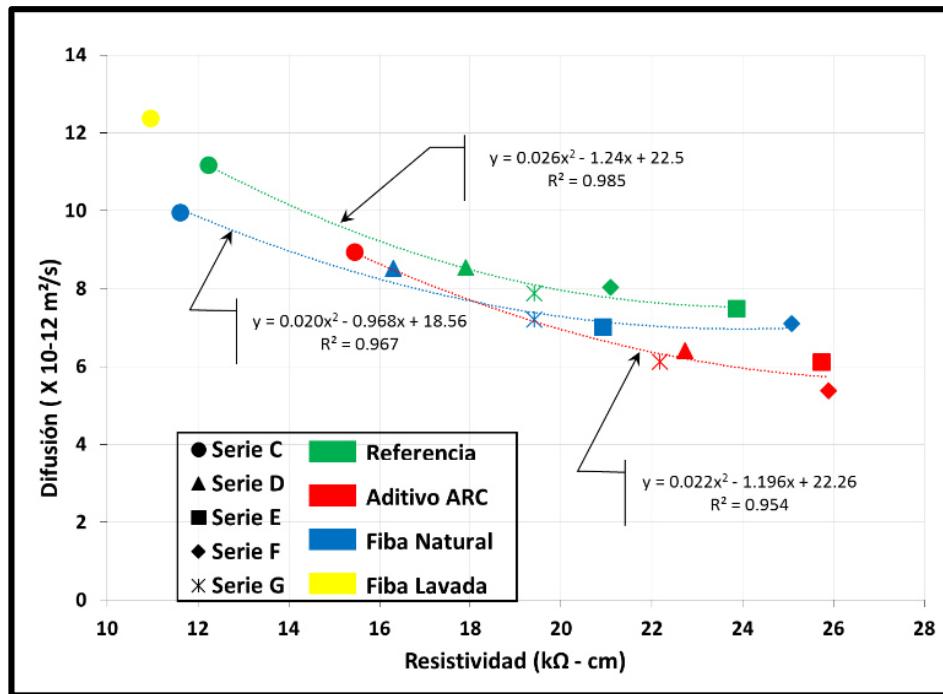


Figura 70. Correlación entre la difusión y resistividad eléctrica en base al tipo de mitigador de la contracción autógena.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

En base al análisis de las variables de estudio y los resultados obtenidos del programa experimental planteado para esta investigación se desprenden las conclusiones que se presentan a continuación:

1. Los resultados confirman que la hipótesis es verdadera en lo que respecta al beneficio de la fibra con la mitigación de la contracción autógena, más no así en lo que respecta a la contracción por secado.
2. La fibra de lechuguilla, como agente para la implementación del curado interno en concretos de alto comportamiento contribuye a mitigar de manera significativa la retracción autógena (hasta un 54.6% a los 28 días).
3. El aditivo reductor de la contracción (ARC) fue la tecnología evaluada que resultó más efectiva para la mitigación de la contracción autógena y de la contracción por secado con reducciones máximas de 68 y 56% respectivamente.
4. Se estableció una metodología analítica mediante las fórmulas de Bentz o Jensen para estimar la cantidad de agua necesaria para reducir la contracción autógena de manera similar a las reducciones originadas por el aditivo reductor de la contracción (ARC).
5. El curado interno implementado mediante la fibra de lechuguilla no tuvo efecto positivo o adverso en la contracción por secado para el concreto sin adiciones (C-R-C).
6. En conjunto con la ceniza volante, el curado interno implementado mediante la fibra de lechuguilla condujo en todos los casos a mayores contracciones por secado.

7. La fibra de lechuguilla condujo a retardos significativos en los tiempos de fraguado. Estos retardos son minimizados cuando se utiliza fibra lavada.
8. Se estableció un procedimiento analítico para deducir la contracción química y la contracción volumétrica de cada cementante en una mezcla de cementantes.
9. La ceniza volante condujo a reducciones en la contracción autógena de hasta 52%, en la contracción por secado de un 13.6% y de la difusión de iones cloruro de 33%.
10. Mediante los resultados de densidad y absorción se dedujo que el mecanismo de absorción de la fibra es habilitada por su expansión calculada en un 26.6%.
11. Se propone un método diferente a los actualmente existentes, para determinar la tasa de absorción de los agregados y la fibra.
12. Teniendo como variables de estudio la relación grava / arena y el bloqueo en el anillo J, se propone un método para establecer las proporciones de un concreto auto-compactable que satisfaga las propiedades ingenieriles especificadas para el concreto en estado fresco.
13. Tanto la microsílíce (HS) como la ceniza volante incrementa la resistividad eléctrica y en todos los casos, la ceniza volante promete una mejora conforme al tiempo, más no así el microsílíce.
14. Como una tendencia general, podemos concluir que el curado interno con fibra natural de lechuguilla no tuvo efecto significativo en la resistividad eléctrica, más si el aditivo reductor de la contracción, el cual prácticamente en todos los casos presentó resistividad mayores.
15. La ceniza volante originó una reducción en la difusión de los iones cloruro entre 23.5 y 33.2% para sustituciones entre 20 y 40%. El humo de sílice presentó una reducción de 29.5%.

16. El curado interno con fibra de lechuguilla redujo la difusión de iones cloruro en 11.0% para la mezcla de referencia y en conjunto con la ceniza volante condujo a reducciones de 0.3, 6.3 y 11.7% para las sustituciones de 20, 30 y 40% respectivamente.
17. El aditivo reductor de la contracción fue el que condujo a las mayores reducciones de la difusión de iones cloruro.
18. La microsílíce originó una reducción de permeabilidad a los iones cloruro de 29.5%, esta disminución fue mayor en conjunto la fibra en un 35.6% y mucho mayor en conjunto con el aditivo reductor de la contracción en un 45.2%.

7.2 Recomendaciones

1. Para controlar mejor las propiedades de los CAC, es conveniente el que los agregados se encuentren saturados para evitar que el aditivo superfluidificante y/o el aditivo retardante / fluidificante sea en parte absorbido por los agregados, además que el agua libre que aún no sea absorbida por los agregados intervenga en la fluidez del CAC.
2. Lavar la fibra para evitar retardos de fraguado considerables que hagan inoperable el concreto fabricado para uso industrial.
3. Secar la fibra al momento de almacenarla para evitar deterioro por actividad orgánica.
4. Para su mejor distribución en la mezcla el ARC diluirlos en el agua de mezcla antes de integrarlos al resto de los materiales y la fibra dosificarla con la mezcladora en marcha.

4.2.1 Trabajos futuros

1. Para validar las fórmulas de propuestas por Bentz y Jensen mediante el método aquí propuesto, se recomienda trabajar con relaciones agua / cemento de 0.37

a 0.41 con variaciones de 0.01 y con diferentes niveles de hidratación (agua de curado interno) preferentemente con un agente de curado interno que no induzca muchas variaciones en los resultados y solo con cemento portlan para evitar variaciones debido a la calidad de alguna puzolana incluida.

2. Validar la fórmula para calcular la hidratación equivalente del ARC para diferentes porcentajes de aditivo, diferentes consumos de cemento y porcentajes de puzolana.
3. Ampliar a otros parámetros para la determinación de la calidad del CAC en estado fresco para el método propuesto de determinar los límites de sus características (T_{50} , tiempo cono V, columna de segregación).
4. Generar pruebas con el ARC junto con la fibra de lechuguilla u otro agente de curado interno para sumar la mitigación de ambos agentes de curado interno.
5. Caracterizar la velocidad de absorción para diferentes tipos de agregados con diferentes granulometrías.

Glosario

A

Acaule

adj. Bot. Dicho de una planta de tallo tan corto que parece que no lo tiene [107].

Agave

Del latín científico Agave, este del latín Agāve, y este del griego Ἀγανή Agaué 'Ágave', madre del rey tebano Penteo, al cual despedazó en compañía de otras bacantes. Pita. [107]

Nombre dado tradicionalmente que significa lechuga pequeña, también conocida como maguey del cerro o pita [39]

Agregado

Un material granular tal como arena, grava, roca triturada, concreto basé cemento hidráulico o escoria de fundición de acero, que se usa con un medio cementante hidráulico para producir ya sea mortero o concreto [5].

Arquímedes de Siracusa

Nació en el 287 a. C. en Siracusa, Sicilia, Italia. Fue capaz de demostrar que el volumen de una esfera es dos tercios del volumen del cilindro que la circunscribe. Además, en mecánica, definió la ley de la palanca y es reconocido como el inventor de la polea compuesta. En Egipto inventó el 'tornillo sin fin' para elevar el agua de nivel. Famoso por el descubrimiento de la ley de la hidrostática, también llamado principio de Arquímedes, que establece que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una pérdida de peso igual al peso del volumen del fluido que desaloja. <http://www.buscabiografias.com/>

C

Capacidad de llenado

La capacidad del concreto autocompactable para fluir y rellenar completamente todos los espacios dentro del encofrado, por su propio peso [3].

Capacidad de paso

La capacidad del concreto autocompactable para fluir a través de las armaduras sin segregación ni bloqueos [3].

Cemento portland

un cemento hidráulico producido mediante la pulverización de clinker de cemento portland y por lo general con la adición de sulfato de calcio para el control del fraguado [5].

Ceniza volante

Residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón molido o en polvo y que es transportado por los gases de combustión desde la zona de combustión al sistema de eliminación de partículas. [5].

Cogollo

Conjunto de hojas tiernas que se encuentran rodeando las zonas de crecimiento terminal, siendo este la parte aprovechable para la obtención de ixtles o algunos otros productos [48].

Concreto de alto comportamiento

Concreto que cumple combinaciones especiales de desempeño y requerimientos de uniformidad que no pueden ser alcanzados rutinariamente usando constituyentes convencionales y mezclas normales, colocado y prácticas de curado. [5].

Curado

las medidas adoptadas para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla de cemento recién colocado para permitir la hidratación del cemento hidráulico y (en su caso) las reacciones puzolánicas a producirse de modo que las propiedades potenciales de la mezcla se puede desarrollar [5].

Curado interno

Proceso por el que la hidratación del cemento continúa debido a la disponibilidad de agua interna que no es parte del agua de mezclado [5].

E**Envés**

Cara inferior de la hoja, opuesta al haz. [107].

F**Feozem**

Del griego phaeo, pardo y del ruso zemljá, tierra. Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas [108].

Fluvisol

Del latín fluvius, río. Literalmente, suelo de río. Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta [108].

H**Haz**

Cara superior de la hoja, normalmente más brillante y lisa, y con nervadura menos patente que en la cara inferior o envés. [107].

Humo de sílice

Sílice no cristalina muy fina producida en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio elemental o aleaciones que contienen silicio. [5].

L**Lanceolada**

adj. Bot. Dicho de una hoja o de sus lóbulos, De forma semejante al hierro de la lanza. [107].

lechuguilla

Nombre dado tradicionalmente que significa lechuga pequeña, también conocida como maguey del cerro o pita [39]

P**Polvo**

Material con un tamaño de partícula inferior a 0,125 mm., incluyendo el cemento, la adición y la aportación de las arenas [3].

R**Regosol**

Del griego reghos, manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen [108].

Resistencia a la segregación

La capacidad del concreto autocompactable para mantener homogénea su composición durante el transporte y la puesta en obra [3].

Rosetófilo

Propio de plantas con hojas en roseta [37].

S**Superplastificante**

Ingrediente reductor del agua capaz de producir una gran reducción de agua o una gran fluidez sin provocar un retraso indebido del fraguado ni la incorporación de aire en el mortero o concreto [5].

X**Xerosol**

Del griego xeros

seco. Literalmente, suelo seco. Se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México [108]. ·

Y**Yute**

Materia textil que se obtiene de la corteza interior de una planta de la familia de las tiliáceas [107]. ·

Bibliografía

- (1) ACI Committee 237. (2007). ACI 237R-07 –Self-Consolidating Concrete. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- (2) Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 3-17.
- (3) EFNARC. (2002). Guidelines for self-compacting concrete. UK: EFNARC.
- (4) Gagne, R., Pigeon, M., & Aïtcin, P. (1989). Deicer salt scaling resistance of high performance concrete. Paul Klieger; Symposium on performance of concrete SP-122 (págs. 29-44). ACI.
- (5) ACI Committee 116. (2013). ACI 116; Terminología del cemento y el concreto. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- (6) Ernst, F. (2000). Tesis: Investigación en Concreto Autocompactable. Eindhoven, Países Bajos: Universidad Tecnológica de Eindhoven, Facultad de Arquitectura.
- (7) Gram, H., & Piiparinen, P. (1999). Properties of SCC—Especially Early Age and Long Term Shrinkage and Salt Frost Resistance. En Å. Skarendahl, & Ö. Petersson, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (págs. 211-225). Estocolmo, Suecia: RILEM.
- (8) Sonebi, M., & Bartos, P. (1999). Hardened SCC and its Bond with Reinforcement. En Å. Skarendahl, & Ö. Petersson, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (págs. 275-289). Estocolmo, Suecia: RILEM.
- (9) Zhu, W., & Bartos, P. (2003). Permeation Properties of Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, número 6, Junio, 921-926.
- (10) Bennenck, W. (2002). SCC in the Daily Precast Concrete. *La tecnología del concreto y los prefabricados*, vol. 34, número 4.
- (11) Persson, B. (1999). Creep, Shrinkage and Elastic Modulus. En Å. Skarendahl, & Ö. Petersson, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (págs. 239-250). Estocolmo, Suecia: RILEM.
- (12) American Society Testing Materials , Committee C01. (2009). ASTM C 150; Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (13) Daczko, J. A., & Attiogbe, E. K. (2003). Self-Consolidating Concrete, A Technology for the 21st Century. *Structural Engineer*, 22-25.
- (14) Fang, W., Jianxiong, C., Changhui, Y., Fang, W., Jianxiong, C., & Changhui, Y. (1999). Studies of Self-Compacting High Performance Concrete with High Volume Mineral Additives. En Å. Skarendahl, & Ö. Petersson, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (págs. 569-578). Estocolmo, Suecia: RILEM.
- (15) Hayakawa, M., Matsuoka, Y., & Shindoh, T. (1993). Development & application of super workable concrete. Rilem; International workshop on special concretes (págs. 173-180). Paisley, Escosia: E & FN Spon.

- (16) Instituto de Investigaciones de Estudios Avanzados del IPN. (2006). Tesis en opción al título de Doctor; Caracterización molecular de fructanos en agaves *Dasylirocn spp.* Identificación de fructosyl transferasa y su expresión en *Pichia pectoris*. Guanajuato, México: Cinvestav.
- (17) Okamura, H., & Ozawa, K. (1995). Mix design for self-compacting concrete. Concrete library of Japanese society of civil engineers vol 25, 107-120.
- (18) Hibino, M., Okuma, M., & Ozawa, K. (1998). Role of viscosity agent in self-compactability of fresh concrete. Structural engineering & construction: Tradición present and future, 1313-1318.
- (19) ACI Committee 308. (2008). ACI 308R-01 - Guide to Curing Concrete. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- (20) Powers, T., & Brownyard, T. (1947). Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of the American Concrete Institute, 252-267.
- (21) Taylor, H. (1997). Cement Chemistry, 2a edición. Londres, Inglaterra: Thomas Telford.
- (22) Neville, A. (1996). Properties of Concrete, 4th edition. Londres, Inglaterra: Pearson.
- (23) Bentz, D. P. (1997). Three dimensional computer simulation of portland cement hydration and microstructure development. Journal of the American Ceramic Society, volumen 80, número 1, 3-21.
- (24) Bentz, D. P., & Weiss, W. J. (2011). Internal curing: a 2010 state-of-the-art review. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology.
- (25) Portland Cement Association (PCA). (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Skokie, Illinois, USA: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).
- (26) Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. Finlandia: Technical Research Centre of Finland.
- (27) Silbey, R., Albery, R., & Bawendi, M. (2005). Physical chemistry. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- (28) Shah, S. P., Weiss, W. J., & Yang, W. (1998). Shrinkage Cracking--Can It Be Prevented? Concrete International, volumen 20, número 4., 51-55.
- (29) Bentz, D., Geiker, M., & Hansen, K. (2001). Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. Cement and concrete research volumen 31, número 7, 1075-1085.
- (30) Emory, W. H. (1859). Report on the United States and Mexican boundary survey, vol. II. Washington: Nicholson, printer, made under the direction of the secretary of the Interior.
- (31) Rodríguez, F. (1985). Les Chichimèques (p. 239). cd. de México: CEMCA.
- (32) Valdes, C. (1995). La gente del mezquite. cd. de México: CIESAS-INI.
- (33) Dahlgren, R., Clifford, H., & Yeo, P. (2012). The families of the monocotyledons. Structure, evolution and taxonomy. Nueva York. EEUU: Springer Science & Business Media.
- (34) Reyes, A. (1992). Tesis de maestría: Estudio florístico de la cierra de Monte Grande, municipio de Charcas, S.L.P., México. cd. de México: Colegio de Posgrados: Centro de Botánica, Chapingo.
- (35) Freeman, C. &. (1985). Aspects of the Reproductive Biology of Agave lechuguilla Torr. Desert Plants vol. 7, num 2., 75-80.

- (36) Berlanga, R., González, R., & Franco, L. (1992). Metodología para la evaluación y manejo de lechuguilla en condición natural. Folleto técnico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, SARH, número 1, 21.
- (37) Rzedowki, J. (1978). La vegetación de México. Cd. de México: Limusa.
- (38) Alderete, E., & Aguirre, J. (1982). Diferenciación de sitios y condición de agostaderos del noreste del estado de Zacatecas. Revista Chapingo, 35-36, 53-58.
- (39) Reyes, A., Aguirre, J., & Peña, C. (2000). Biología y aprovechamiento de Agave lechuguilla Torrey. Boletín de la Sociedad Botánica de México, número 67, 75-88.
- (40) Aguilar, C., Zolla, A., & Zolla, C. (1982). Plantas tóxicas de México. cd. de México: Unidad de Investigación Biomédica en Medicina Tradicional y Herbolaria, Instituto Mexicano del Seguro Social.
- (41) García, A., & Sicilia, A. (1984). El mercado mundial de las fibras duras. Mérida, Yucatán, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- (42) Nieto, C. (1983). La lechuguilla. Xalapa, Veracruz, México: Instituto Nacional de Investigación sobre Recursos Bióticos.
- (43) Belmares, H., Castillo, J., & Barrera, A. (1979). Natural Hard Fibers of the North American Continent. Statistical Correlations of Physical and Mechanical Properties of Lechuguilla (Agave lechuguilla) Fibers. Textile Reserch Journal, vol 49, 619-622.
- (44) McLaughlin, S., & Schuck, S. (1985). Fibre properties of several species of Agavaceae from the Southwestern United States and Northern Mexico. Economic Botany, vol. 45, 480-486.
- (45) Juárez, C. (2002). Concreto base cemento Portland reforzado con fibras naturales (Agave lechuguilla). San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México: Facultad de Ingeniería Civil, UANL.
- (46) Nobel, P. (1998). Los incomparables agaves y cactus. cd. de México: Trillas.
- (47) Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1996). Procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de cogollos (NOM-008-SEMARNAT-1996). cd. de México: SEMARNAT.
- (48) Orozco, M., Nava, R., Armijo, R., & Gasto, J. (1977). Investigación silvoagropecuaria de las zonas áridas de México. Monografía Técnico-Científica. Monografía Técnico-Científica, vol. 3, 182-265.
- (49) González, A., & Scheffel, A. (1964). Las zonas áridas del centro y norte de México. cd. de México: Instituto Mexicano de los Recursos Naturales Renovables.
- (50) Belmares, H., Barrera, A., Castillo, E., & Monjaras, M. (1985). 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 (págs. 231-242). San Cristobal de las Casas, Chiapas, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- (51) Dewey, L. (1965). Fibras vegetales y su producción en América. cd. de México: Agencia para el Desarrollo Nacional.
- (52) Castillo, D., Berlanga, R., & Cano, A. (2005). Recolección, extracción y uso de la fibra de lechuguilla (agave lechuguilla torr.) en el estado de Coahuila. Punicación especial, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, número 6, 6.
- (53) Blando, J., & Baca, S. (2001). Determinación del potencial productivo de la lechuguilla (Agave lechuguilla Torr) en el municipio de San Juan de Guadalupe. Revista Chapingo, 100-105.

- (54) Robert, M., & Hutchinson, P. (1986). On the Structure of the Roman Pantheon. *Art Bulletin*, vol. 68, 24-34.
- (55) Presley, G. (2006). Pumice, pumicite, and volcanic cinder. En J. E. Kogel, N. C. Trivedi, J. M. Barker, & S. T. Krukowski, *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. 7th edition (págs. 743-753). Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- (56) Klieger, P. (1957). Early High Strength Concrete for Prestressing. *Proceedings World Conference on Prestressed Concrete*, A5-1 to A5-14.
- (57) Philleo, R. (1991). Concrete Science and Reality. En J. Skalny, & S. Mindess, *Materials Science of Concrete II* (págs. 1-8). Westerville, OH, USA: American Ceramic Society.
- (58) Weber, S., & Reinhardt, H. (1995). 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* (págs. 662-671). Sandefjord, Norway: Norwegian Concrete Association.
- (59) Van Breugel, K., & de Vries, H. (1998). 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* (págs. 365-382). Sherbrooke, Quebec, Canada: University of Sherbrooke.
- (60) Bentur, A., Igarishi, S., & Kovler, K. (1999). Control of Autogenous Stresses and Cracking in High Strength Concretes. En *Proceedings of the 5th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete* (págs. 1017-1026). Sandefjord, Norway: Norwegian Concrete Association.
- (61) Jensen, O., & Hansen, P. (2001). Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, número 4, 647-654.
- (62) Jensen, O., & Hansen, P. (2002). Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations. *Cement and Concrete Research*, vol. 32, número 6, 973-978.
- (63) Mohr, B., Premenko, L., Nanko, H., & Kurtis, K. (2005). 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* (págs. 229-244). Gaithersburg, Maryland, USA: Lund Institute of Technology, Lund University.
- (64) Villareal, V. (2008). Internal Curing - Real World Ready Mix Production and Applications: A Practical Approach to Lightweight Modified Concrete. En D. Bentz, & B. Mohr, *ACI SP-256; Internal Curing of High-Performance Concrete: Laboratory and Field Experiences* (págs. 45-56). Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- (65) Durán, A. (2007). Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b Concrete. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México: Facultad de Ingeniería Civil, UANL.
- (66) Ozawa, M., & Morimoto, H. (2012). 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* (págs. 1-12). Toronto, Ontario, Canada: ACI.
- (67) Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE). (2014). *NMX-C-414-ONNCCE-2014; Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*. cd. de México: ONNCCE.

- (68) American Society Testing Materials, Committee C09. (2008). ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (69) American Society Testing Materials, Committee C09. (2010). ASTM C494. Standard specification for chemical admixtures for concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (70) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C1611; Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (71) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C1621; Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (72) Ribeiro, A. B., Carrajola, A., & Goncalves, A. (2003). Effectiveness of shrinkage-Reducing admixtures on different concrete mixtures. En A. C. (ACI), Special Publication, 217 (págs. 299-311). Farmington Hills, Michigan, USA: ACI.
- (73) Naik, T., Chun, Y. M., & Kraus, R. N. (2006). Reducing shrinkage cracking of structural concrete through the use of admixtures. Milwaukee, Wisconsin, USA.: University of Wisconsin-Milwaukee.
- (74) American Society Testing Materials, Committee C09. (2007). ASTM C127; Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (75) American Society Testing Materials, Committee C09. (2007). ASTM C128; Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (76) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C29; Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (77) American Society Testing Materials, Committee C09. (2006). ASTM C136; Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (78) American Society Testing Materials, Committee C09. (1997). ASTM C566; Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying. Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (79) Douglas, N. W. (1987). The rate of absorption of aggregates. Cement, concrete and aggregates, vol 9, número 2, ASTM, 154-158.
- (80) American Society Testing Materials, Committee C09. (2012). ASTM C1761; Standard specification for lightweight aggregate for internal curing of concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (81) Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2008). Estadística aplicada a los negocios y la economía, decimotercera edición. cd. de México: McGraw-Hill.
- (82) Bentz, D. P., Lura, P., & Roberts, J. W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. Concrete International, vol. 27, número 2, 35-40.
- (83) Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of research of the national bureau of standards, vol 81, número 1, 89-96.
- (84) American Society Testing Materials, Committee C01. (2006). ASTM C309; Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement Pastes and mortars of plastic consistency. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (85) American Society Testing Materials, Committee C01. (2008). ASTM C109; Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). West Conshohocken, PA, USA: ASTM.

- (86) American Society Testing Materials, Committee C01. (2007). ASTM C1608; Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (87) American Society Testing Materials, Committee C01. (2009). ASTM C188; Standard test method for density of hydraulic cement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (88) American Society Testing Materials, Committee C09. (2008). ASTM C403; Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (89) American Society Testing Materials. (2009). ASTM C1698; Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (90) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C231; Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method1. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (91) American Society Testing Materials, Committee C09. (2006). ASTM C1610; Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (92) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C138; Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (93) American Society Testing Materials, Committee C09. (2010). ASTM C143; Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (94) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C192; Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (95) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C39; Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (96) American Society Testing Materials, Committee C09. (2009). ASTM C617; Standard practice for capping cylindrical concrete specimens1. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (97) American Society Testing Materials, Committee C09. (2002). ASTM C469; Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (98) American Society Testing Materials, Committee C09. (2008). ASTM C157; Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (99) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2011). AASHTO TP 95; Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, D.C.: AASHTO.
- (100) NORDTEST. (1995). NT Build 443; Accelerated chloride penetration. Espoo, Finland: NORDTEST.
- (101) American Society Testing Materials, Committee C09. (2008). ASTM C33; Standard specification for concrete aggregates. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- (102) Bentz, D. P., Koenders, E. A., Mönnig, S., Reinhardt, H. W., K., V. B., & Ye, G. (2007). Materials science-based models in support of internal water curing. En K. Kovler, & O. Jensen, Report rep041 : Internal curing of concrete - state of the art (págs. 29-43). RILEM Committee 196-ICC.

- (103) Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). NOM-059-SEMARNAT; Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. cd. de México: SEMARNAT.
- (104) CONABIO. (25 de mayo de 2016). Naturalista. Obtenido de mayo: <http://naturalista.conabio.gob.mx>
- (105) Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., & Saito, T. (2005). Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, número 35, 473–482.
- (106) Nilsson, L., Ngo, M., & GjØrv, O. (1998). High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. En O. GjØrv, K. Sakai, & N. Banthia, *Concrete under severe conditions: environment and loading*, volumen 2 (págs. 1193-1198). TromsØ, Noruega: E & FN Spon.
- (107) Real Academia Española. (2016). Diccionario de la lengua Española. Obtenido de <http://www.rae.es/>
- (108) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2004). *Guía para la Interpretación de Cartografía*. Aguascalientes, Aguascalientes, México: INEGI.

Resumen autobiográfico

Rogelio Dávila Pompermayer

Profesor de la Unidad de Aprendizaje de Tecnología del Concreto en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León de donde egresó en 1992. Cuenta con 9 años acumulados de experiencia en actividades de enseñanza sobre pruebas de laboratorio a nivel licenciatura, y en trabajos de investigación referentes a la tecnología del concreto en temas como altos consumos de ceniza volante, diseño de concretos de alto comportamiento y concretos auto - consolidantes, entre otros. En la iniciativa privada participo en el diseño de mezclas de concreto hidráulico y concreto asfáltico, fue responsable de la certificación de la unidad de plantas concreteras en el sistema ISO 9001 e ISO 14001 para empresas como CEMEX división concretos y división agregados, ha tenido a su cargo el diseño y la administración de herramientas electrónicas para el desempeño del sistema de calidad y medición de indicadores del negocio, así como la instalación y puesta en marcha de dos plantas de concreto hidráulico y una planta de concreto asfáltico, teniendo también a su cargo la administración y la operación de estas plantas incluyendo el manejo de personal compras y mantenimiento de equipo e infraestructura en las empresas COMPAS CONCRETOS y PAVIMENTACIONES COMPAS Y COMPAÑÍA.

Registro CVU del CONACYT: 581047.