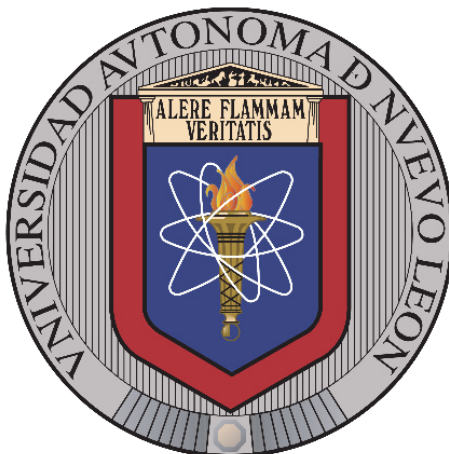


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE
REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS COMO MATERIAL
PARA APLICACIÓN ESTRUCTURAL**

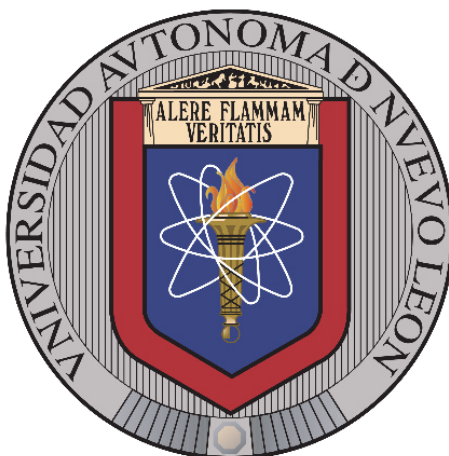
POR
JOSÉ VIDAL GONZÁLEZ AVIÑA

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

OCTUBRE 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**Comportamiento del concreto autocompactable reforzado con
fibras sintéticas como material para aplicación estructural**

Por:

José Vidal González Aviña

Director de tesis:

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Universidad Autónoma de Nuevo León

Co-Director de tesis:

Dr. José Antonio Rodríguez Rodríguez
Universidad Autónoma de Zacatecas

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

Octubre 2019



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
COORDINADOR ACADÉMICO DE LA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Mendoza Rangel:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas como material para aplicación estructural"**, que presenta el **ING. JOSÉ VIDAL GONZÁLEZ AVIÑA**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 18 de Octubre de 2019.

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

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 20 de septiembre de 2019

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Asesor



**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO**



CODIGO: FOR-SEP-01: Revisión 03

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels. 81 1442 4400 ext. 4448 | 81 8329 4000 ext. 7316 y 7234
<http://fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

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

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"Comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas como material para aplicación estructural"**, que presenta el **ING. JOSÉ VIDAL GONZÁLEZ AVIÑA**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 18 de Octubre de 2019.

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

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 20 de septiembre de 2019


DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
Evaluador



**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO**



CODIGO: FOR-SEP-01: Revisión 03

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels. 81 1442 4400 ext. 4448 | 81 8329 4000 ext. 7316 y 7234
<http://fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



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



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **“Comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas como material para aplicación estructural”**, que presenta el **ING. JOSÉ VIDAL GONZÁLEZ AVIÑA**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 18 de Octubre de 2019.

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

Atentamente

Zacatecas, Zac. a 20 de septiembre de 2019

DR. JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

Evaluador

c.c.p. Archivo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios, porque me dio el don de la perseverancia para alcanzar la meta.

A mis padres, Pedro González Rivera y Nidia Aviña Saucedo, por sus consejos y su apoyo incondicional. Quienes me enseñaron a luchar para lograr lo que solo con esfuerzo se alcanza. Estaré eternamente agradecido por el impulso invaluable que me han dado.

A mis hermanos, Pedro y Edher González, por sus palabras de aliento y por estar en los momentos más importantes de mi vida. Este logro también es de ustedes.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por haberme permitido formarme en ella y darme la oportunidad de crecer profesionalmente.

A mis asesores, Dr. César Antonio Juárez Alvarado y Dr. José Antonio Rodríguez Rodríguez. Por su apoyo, enseñanza, colaboración y confianza. Que fueron piezas claves en la culminación de esta etapa.

A Emilio Benavidez y Jesús Niño, alumnos de la FIC que ofrecieron su ayuda para sacar adelante la etapa experimental referente a este proyecto.

A los alumnos del verano científico Sergio Mendoza, Luis Reyes y Kimberly Nava por la dedicación y empeño en las tareas asignadas.

Al Ing. Filiberto Marín, asesor técnico de la marca Eucomex, por el donativo del aditivo superplastificante y las fibras.

A Cemex, por el generoso donativo del cemento utilizado en esta investigación.

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

DEDICATORIA

A mis padres, por mostrarme el camino hacia la superación.

A mis hermanos, por estar conmigo y ser un apoyo constante.

A mi familia y amigos, por permitirme aprender más de la vida a su lado.

CONTENIDO

Contenido	viii
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xii
Nomenclatura	xiv
Resumen	xv

Capítulo	Página
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Concreto Autocompactable Fibroreforzado (CAF).....	3
1.1.2 Características del CAF.....	4
1.1.2.1 Propiedades de la matriz.....	4
1.1.2.2 Propiedades de las fibras.....	8
1.1.3 Propiedades en estado fresco del CAF.....	11
1.1.4 Propiedades en estado endurecido del CAF.....	13
1.1.4.1 Ensayos de compresión.....	14
1.1.4.2 Ensayos de flexión.....	14
1.1.4.3 Ensayos de cortante directo.....	16
1.1.5 Dispersión del refuerzo de fibras.....	18
1.1.6 Modelos de comportamiento mecánico.....	19
1.1.7 Aplicaciones del CAF en la construcción.....	21
1.2 Ámbito de la investigación.....	24
1.2.1 Justificación.....	24
1.2.2 Hipótesis.....	25
1.2.3 Objetivos.....	25
1.2.3.1 Objetivo general.....	25
1.2.3.2 Objetivos específicos.....	25
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	27
2.1 Diseño de experimentos.....	27
2.2 Caracterización de los materiales.....	29
2.2.1 Cemento Portland.....	29
2.2.1.1 Densidad.....	29
2.2.1.2 Composición química.....	30
2.2.2 Agregados.....	30
2.2.2.1 Agregado grueso.....	30

2.2.2.2	Agregado fino.....	31
2.2.3	Aditivo químico.....	32
2.2.3.1	Densidad.....	32
2.2.3.2	Contenido de sólidos.....	33
2.2.4	Fibras de refuerzo.....	33
2.3	Diseño de mezclas.....	33
2.3.1	Mezcla de referencia.....	34
2.3.1.1	Optimización de la pasta.....	35
2.3.1.2	Optimización del esqueleto granular.....	37
2.3.2	Mezclas de CAF.....	38
2.4	Comportamiento en estado fresco.....	41
2.4.1	Procedimiento de mezclado.....	42
2.4.2	Ensayo del flujo de revenimiento.....	42
2.4.3	Ensayo de la caja en L.....	44
2.4.4	Ensayo de la columna de segregación.....	45
2.5	Comportamiento en estado endurecido.....	46
2.5.1	Elaboración de especímenes.....	47
2.5.2	Ensayo a compresión.....	48
2.5.3	Ensayo a flexión.....	49
2.5.4	Ensayo a cortante directo.....	51
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
3.1	Caracterización de los materiales.....	54
3.1.1	Cemento Portland.....	54
3.1.1.1	Densidad.....	54
3.1.1.2	Composición química.....	54
3.1.2	Agregados.....	55
3.1.2.1	Distribución granulométrica.....	55
3.1.2.2	Densidad y absorción.....	57
3.1.3	Aditivo químico.....	57
3.1.4	Fibras de refuerzo.....	58
3.2	Diseño de mezclas.....	59
3.2.1	Mezcla de referencia.....	59
3.2.1.1	Optimización de la pasta.....	59
3.2.1.2	Optimización del esqueleto granular.....	64
3.2.2	Mezcla de CAF.....	69
3.2.2.1	Esqueleto sólido.....	69
3.3	Comportamiento en estado fresco.....	74
3.3.1	Ensayo del flujo de revenimiento.....	74
3.3.2	Ensayo de la caja en L.....	76
3.3.3	Ensayo de la columna de segregación.....	78
3.4	Comportamiento en estado endurecido.....	80
3.4.1	Ensayo a compresión.....	80
3.4.1.1	Curvas esfuerzo – deformación.....	83
3.4.1.2	Energía de fractura.....	85
3.4.2	Ensayo a flexión.....	86

3.4.2.1	Curvas esfuerzo – deflexión.....	86
3.4.2.2	Resistencia residual a flexión.....	90
3.4.2.3	Influencia de las fibras.....	93
3.4.3	Ensayo a cortante directo.....	97
3.4.3.1	Curvas esfuerzo – desplazamiento.....	97
3.4.3.2	Energía de fractura.....	102
3.4.3.3	Influencia de las fibras.....	103
3.5	Modelos de comportamiento mecánico.....	107
3.5.1	Modelo analítico a flexión.....	107
3.5.2	Modelo analítico a cortante directo.....	121
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
4.1	Conclusiones.....	133
4.2	Recomendaciones.....	135
	REFERENCIAS.....	137
	NORMATIVA.....	146
	RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de las fibras [25].....	11
Tabla 2. Métodos de ensayo en estado fresco del CAF [26]	12
Tabla 3. Propiedades apropiadas para diferentes aplicaciones [29].....	13
Tabla 4. Ensayos para evaluar la distribución de las fibras	19
Tabla 5. Aplicaciones estructurales del CAF	23
Tabla 6. Valores del índice de estabilidad visual	43
Tabla 7. Composición química del cemento	55
Tabla 8. Densidad y absorción de los agregados	57
Tabla 9. Propiedades físicas de las fibras de P y PP.....	59
Tabla 10. Propiedades de las pastas con variación del SP/C.....	60
Tabla 11. Parámetros en el diseño de la mezcla de referencia	65
Tabla 12. Propiedades en estado fresco de la mezcla de referencia.....	66
Tabla 13. Parámetros antes del ajuste del esqueleto granular	70
Tabla 14. Parámetros después del ajuste del esqueleto granular	71
Tabla 15. Proporcionamiento de las mezclas de CAF	72
Tabla 16. Coeficiente de determinación de las diferentes mezclas	73
Tabla 17. Comportamiento del ensayo del flujo de revenimiento.....	74
Tabla 18. Comportamiento del ensayo de la caja en L	77
Tabla 19. Comportamiento de la prueba de columna de segregación.....	79
Tabla 20. Propiedades del comportamiento a compresión del CAF	81
Tabla 21. Energía de fractura del CAF a compresión	85
Tabla 22. Parámetros de resistencia residual del comportamiento $f - \text{CMOD}$..	92
Tabla 23. Resistencia al cortante directo de las diferentes mezclas	100
Tabla 24. Ajuste de la energía de fractura entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $f - \text{CMOD}$	121
Tabla 25. Parámetros de ajuste entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $\tau - \Delta$	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forma de las fibras: (a) monofilamentada y (b) empaquetada	9
Figura 2. Configuración del ensayo a flexión: (a) en tres puntos, (b) en tres puntos con muesca y (c) en cuatro puntos	15
Figura 3. Propagación del agrietamiento por cortante en elementos de construcción: (a) cojinete de viga y (b) ménsula	17
Figura 4. Configuración del ensayo de cortante directo: (a) FIP standard, (b) JSCE – SF6 y (c) empuje tipo Z.....	18
Figura 5. Mapa experimental	28
Figura 6. Diagrama de flujo del diseño de la mezcla de referencia.....	35
Figura 7. Configuración del mini – cono de revenimiento	36
Figura 8. Metodología para el diseño del CAF: (a) composición de la primera fase y (b) recubrimiento promedio de la matriz	39
Figura 9. Diagrama de flujo del diseño de las mezclas de CAF	41
Figura 10. Ensayo del flujo de revenimiento	43
Figura 11. Ensayo de la caja en L.....	45
Figura 12. Ensayo de la columna de segregación	46
Figura 13. Ensayo a compresión: a) vista general y b) instalación de los LVDTs en el espécimen.....	48
Figura 14. Configuración del ensayo a flexión	50
Figura 15. Superficie de fractura del ensayo a flexión	51
Figura 16. Configuración del ensayo a cortante directo	52
Figura 17. Distribución granulométrica del agregado grueso.....	56
Figura 18. Distribución granulométrica del agregado fino	56
Figura 19. Morfología de la fibra: (a) P y (b) PP.....	58
Figura 20. Compatibilidad del cemento – superplastificante	61
Figura 21. Consistencia de las pastas con variación del SP/C: (a) 0.2%, (b) 0.3%, (c) 0.4% y (c) 0.6%	62
Figura 22. Dosificación óptima del aditivo SP	63
Figura 23. Flujo de revenimiento de las mezclas: a) M-04, b) M-05 y c) M-06 .	67
Figura 24. Efecto del t_{cm} con la variación del factor de fibra	71
Figura 25. Comparación del empaquetamiento de la distribución de las diferentes mezclas con el modelo A&A mod.....	73
Figura 26. Efecto del factor de fibra en el flujo de revenimiento	75
Figura 27. Flujo de revenimiento de las mezclas: a) Referencia, b) M-1.0P y c) M-1.0PP	76
Figura 28. Prueba de caja en L.....	77
Figura 29. Relación entre h_2/h_1 y el factor de fibra.....	78
Figura 30. Prueba de columna de segregación: (a) geometría de la prueba, (b) separación de la muestra y (c) obtención del agregado grueso y las fibras	79

Figura 31. Relación entre el porcentaje de segregación y el factor de fibra	80
Figura 32. Variación de la relación CAF/CAC con el factor de fibra.....	83
Figura 33. Comportamiento a compresión de las diferentes mezclas.....	84
Figura 34. Comportamiento $f - \delta$ de las diferentes mezclas	87
Figura 35. Variación de la energía de fractura con el volumen de fibras	90
Figura 36. Comportamiento $f - \text{CMOD}$ de las diferentes mezclas.....	91
Figura 37. Relación entre la resistencia residual $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$	93
Figura 38. Distribución de las fibras sobre la superficie de fractura.....	94
Figura 39. Refuerzo extraído del ensayo a flexión: (a) fibra de polipropileno (P) y (b) fibra de polipropileno/polietileno (PP)	94
Figura 40. Relación entre la cantidad total de fibras y la resistencia residual normalizada: (a) $f_{R,1}/f_L$, (b) $f_{R,2}/f_L$, (c) $f_{R,3}/f_L$ y (d) $f_{R,4}/f_L$	96
Figura 41. Comportamiento $\tau - \Delta$ de las diferentes mezclas	98
Figura 42. Propagación del agrietamiento en cortante directo: (a) espécimen sin grietas, (b) formación de microgrietas diagonales, (c) coalescencia de microgrietas y (d) formación de grietas tipo wings	99
Figura 43. Mecanismo de transferencia de cortante	101
Figura 44. Mecanismo de acción dovola en las fibras	101
Figura 45. Variación de la energía de fractura con el volumen de fibras	102
Figura 46. Fractura del espécimen: (a) Distribución del refuerzo de fibras y (b) superficie de fractura	104
Figura 47. Distribución de las fibras en las secciones del espécimen	106
Figura 48. Relación entre la cantidad total de fibras y la energía de fractura .	107
Figura 49. Comportamiento del modelo analítico de $f - \text{CMOD}$	108
Figura 50. Variación de CM_1 con el volumen de fibras	110
Figura 51. Variación del C_t con el volumen de fibras	111
Figura 52. Variación de la CM_2 con el volumen de fibras	114
Figura 53. Variación con respecto al volumen de fibras de: (a) f_2 y (b) f_3	114
Figura 54. Comparación entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $f - \text{CMOD}$ en los especímenes: (a) M-0.6P, (b) M-0.6PP, (c) M-0.8P, (d) M-0.8PP, (e) M-1.0P y (f) M-1.0PP	120
Figura 55. Comportamiento del modelo analítico de $\tau - \Delta$	123
Figura 56. Variación con respecto al volumen de fibras de: (a) τ_{\max} y (b) Δ_m ..	124
Figura 57. Variación del τ_u con respecto del volumen de fibras.....	126
Figura 58. Comparación entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $\tau - \Delta$ en los especímenes: (a) M-0.6P, (b) M-0.6PP, (c) M-0.8P, (d) M-0.8PP, (e) M-1.0P y (f) M-1.0PP.....	131

NOMENCLATURA

a/c	Relación agua/cemento
ACI	Instituto Americano del Concreto
AMV	Aditivo Modificador de la Viscosidad
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CAC	Concreto Autocompactable
CAF	Concreto Autocompactable Fibroreforzado
CF	Concreto Fibroreforzado
CP	Cemento Portland
CR	Concreto Reforzado
FIP	Federación Internacional de la Precontrainte
G/A	Relación Grava/Arena
ITZ	Zona de Transición Interfacial
JSCE	Sociedad Japonesa de Ingeniería Civil
MCS	Materiales Cementantes Suplementarios
P	Polipropileno
PP	Polipropileno/Polietileno
SP	Superplastificante
SP/C	Porcentaje de agente activo de SP/ peso del cemento

RESUMEN

El concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas es un material compuesto de alto comportamiento, que complementó los continuos avances de la tecnología del concreto al responder la necesidad de una nueva categoría de materiales cementantes con propiedades mejoradas. Debido a la resistencia adicional a la abertura de grietas causada por el mecanismo de acción de las fibras, que conduce a una mejora significativa en la tenacidad a la fractura. Además, el refuerzo de fibras sintéticas ofrece grandes prestaciones por ser químicamente inertes, estables en el medio alcalino y resistentes a la corrosión. Mientras, la matriz de concreto autocompactable permite al material compuesto fluir por acción de su propio peso, resistir a la segregación y autocompactarse.

En general, este trabajo de investigación estudia el comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas, mediante la observación de la influencia de los factores que interviene en el proporcionamiento, establecidos en la compresión del mecanismo subyacente entre el diseño de la mezcla, el comportamiento en estado fresco, la distribución del refuerzo de fibras y la predicción prevista en estado endurecido. Lo anterior, con el fin de establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico, que permitan una estimación preliminar de los parámetros principales para favorecer la aplicación estructural del material compuesto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El concreto es el material más utilizado de la construcción en el mundo, debido a su versatilidad y costo. Este material a base de cemento puede conformar una variedad de formas y tamaños para cumplir con los requisitos arquitectónicos. Mientras, sus propiedades se pueden optimizar modificando su composición para cumplir con los requisitos de ingeniería. En estado endurecido, el concreto es un material destacado para resistir los esfuerzos a compresión. Sin embargo, la baja resistencia a la tensión y la poca capacidad de deformación ha acentuado la necesidad de reforzamiento.

Históricamente, el concreto se ha reforzado con barras continuas de acero que han permitido mejorar significativamente la capacidad de carga en las estructuras de concreto reforzado (CR). En donde, el concreto resiste principalmente los esfuerzos de compresión y las barras de acero los de tensión [1]. No obstante, la incompatibilidad en las deformaciones entre el concreto y las barras de acero resulta en el agrietamiento de la matriz antes de transferir cualquier carga significativa al refuerzo.

Por consiguiente, el reforzamiento con fibras en matrices cementantes ha contribuido en beneficiar el comportamiento de las estructuras. Debido a que, las fibras establecen un control en el desarrollo de las grietas, a partir de un mecanismo que les permite resistir los esfuerzos a tensión [2]. Por esta razón, el

concreto fibroreforzado (CF) es evaluado con parámetros relacionados a la capacidad de carga después de que el concreto se ha agrietado (tenacidad) [3]. Por lo que, las fibras pueden sustituir de manera parcial o total el refuerzo convencional de acero, según lo describe su capacidad de absorción de energía. En general, la efectividad de la aplicación del CF se basa en la suposición de una dispersión uniforme de las fibras dentro del elemento. Debido a que, la mala dispersión puede llevar a propiedades en estado fresco y endurecido ineficientes, disminuyendo la capacidad estructural del elemento [4]. De esta manera, los problemas relacionados con la dispersión de las fibras son un punto fundamental para el uso del CF.

En los últimos años, se ha potenciado la tecnología del CF con el uso de una matriz de concreto autocompactable (CAC). La cual, ha mostrado ser útil para la obtención de una dispersión más uniforme de las fibras, gracias a su estabilidad reológica y autocompactabilidad [5]. De tal manera, el concreto autocompactable fibroreforzado (CAF), se ha desarrollado como una nueva categoría dentro de los materiales compuestos cementantes.

Debido a sus propiedades, el CAF ha ido ganando popularidad en la industria de la construcción. Principalmente, las fibras de acero han sido las más utilizadas para su reforzamiento. Sin embargo, debido a su comportamiento a largo plazo en ambientes propicios al deterioro de las fibras, se ha limitado su utilización en aplicaciones específicas [6]. En este sentido, se está experimentando con fibras de diferente naturaleza que permitan mejorar las propiedades del concreto en diferentes entornos.

En particular, las fibras sintéticas han ofrecido grandes prestaciones por ser químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino [7]. Además, estas fibras son resistentes a la corrosión en comparación a las de acero. De este modo, en los últimos años se ha dedicado importantes esfuerzos de investigación en el desarrollo de fibras sintéticas capaces de impartir tenacidad a la matriz cementante.

En consideración al incremento en las investigaciones y las aplicaciones que se están dando del CAF por todo el mundo. Conjuntamente, con el desarrollo de las fibras sintéticas capaces de proveer tenacidad a la matriz cementante. La industria está interesada en determinar el comportamiento del material compuesto reforzado con fibras sintéticas. Lo anterior, con el fin de promover su uso como una alternativa confiable en aplicaciones estructurales.

1.1.1 Concreto Autocompactable Fibroreforzado (CAF)

El CAF es un material compuesto de alto comportamiento constituido por cemento Portland, agregados, aditivos químicos y fibras. Debido a sus propiedades intrínsecas, es capaz de fluir por acción de su propio peso, resistir a la segregación y autocompactarse (ejerciendo poca o nula acción mecánica). Por otra parte, el refuerzo de fibras proporciona una resistencia adicional al concreto, estableciendo una mejora en las propiedades mecánicas, debido a su capacidad de absorción de energía. En general, el uso de esta tecnología trae ventajas significativas, entre las principales:

- Incremento en la velocidad de construcción a través de una mayor tasa de colocación.

- Facilitación y agilización del llenado de secciones complejas o altamente reforzadas.
- Mejor uniformidad y acabado de los elementos.
- Reducción de la necesidad de fabricar, detallar y colocar el refuerzo tradicional, mediante la posibilidad de su sustitución parcial o total.

El diseño del CAF tiene como base el concepto de una suspensión óptima de un esqueleto sólido, dentro de una fase capaz de garantizar la fluidez adecuada del material [8]. El nivel de fluidez suele especificarse de acuerdo con el tipo de construcción, las condiciones de la cimbra y la geometría del elemento. Por otra parte, el tipo de fibra suele precisarse de acuerdo con el entorno de aplicación, en virtud de los mecanismos de degradación que se puedan presentar en algunas fibras. Mientras, el volumen de fibras se establece principalmente a partir de la capacidad de carga dispuesta en el comportamiento posterior al agrietamiento. Por esta razón, el diseño del CAF suele especificarse a partir de las características de sus componentes principales, permitiendo controlar la variabilidad de sus propiedades.

1.1.2 Características del CAF

Con el objetivo de simplificar el entendimiento del comportamiento del CAF, este trabajo de investigación plantea un enfoque intuitivo por dos componentes afines a las propiedades de la matriz y las fibras.

1.1.2.1 Propiedades de la matriz

La matriz cementante del CAF no es significativamente diferente a la de otros materiales a base de cemento. Particularmente, está constituida por una base de

CAC modificada por la dosificación de las fibras [9]. En estado fresco, la influencia del volumen de fibras suele evaluarse con pruebas de desempeño relacionadas al comportamiento del CAC de referencia. En estas pruebas, se determinan valores límites que permiten establecer rangos de variaciones del comportamiento dada la modificación de algún componente.

En estado endurecido, la matriz cementante está unida con las fibras a través de una zona de transición interfacial (ITZ), esta zona tiene un espesor del orden de 15 a 30 μm y su porosidad es de gran transcendencia, especialmente en el comportamiento mecánico del material compuesto [10]. Debido a que, las características de la ITZ ejercen varios efectos relacionados al enlace matriz – fibra, primordiales en el proceso de extracción de la fibra a través del interfaz. En particular, la porosidad de la ITZ está influenciada por diferentes parámetros, los más importantes son el tipo de fibra, la relación agua/cemento (a/c) y la clasificación de los agregado [11]. De esta manera, con el objetivos de simplificar el entendimiento del comportamiento de la matriz cementante, para este trabajo de investigación, los materiales se engloban en 3 grupos: polvos, agregados y aditivos químicos.

Polvos

Los polvos son materiales con tamaño máximo de 125 μm , dentro de esta clasificación se encuentra el cemento Portland (CP), los materiales cementantes suplementarios (MCS) y las adiciones minerales inertes (fillers). Los polvos son de gran importancia en el CAF, puesto que, en conjunto con el agua, los aditivos químicos y el aire conforman la pasta, la cual es responsable en gran medida de

la movilidad de la mezcla. Las propiedades físicas de los polvos como la finura, la absorción y el área superficial, influyen directamente en las propiedades en estado fresco como la estabilidad, la viscosidad, el sangrado y la trabajabilidad del CAF [12]. Por otra parte, los polvos pueden lograr una menor porosidad en la ITZ, esto debido a un proceso químico de densificación causado por compuestos formados por la reacción entre los MCS y los productos de hidratación del CP (reacción puzolánica) [13]. Así también, en un mecanismo físico los polvos inertes se pueden distribuir sobre la matriz, contribuyendo a un mayor volumen sólido y una menor porosidad en la ITZ.

Agregados

El tamaño máximo de los agregados suele especificarse de acuerdo con la concentración del refuerzo y separación de la cimbra, este es limitado a 20 mm y características como su granulometría, angulosidad, textura y forma, intervienen en las propiedades de la matriz cementante [14]. En particular, el agregado fino es parte esencial en el diseño del CAF, dado que el material considerado como polvo influye en la estabilidad de la matriz. Mientras, las partículas mayores del agregado fino contribuyen en la capacidad de paso y relleno del CAF. Dentro de este marco, los agregados deben ser seleccionados de tal manera de mejorar el comportamiento y maximizar su volumen dentro de la mezcla, ya que es de los componentes de menor costo. Por esta razón, se han propuesto ecuaciones para determinar la distribución óptima de los agregados, entre las más utilizadas es la propuesta por Andreasen and Andersen y modificada por Funk and Dinger (ecuación 1.1) [15].

$$p(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (1.1)$$

Donde:

$p(d)$ = Función de distribución acumulada del tamaño de partículas

d = Diámetro de la partícula [mm]

d_{\max} = Diámetro máximo de las partículas en la mezcla [mm]

d_{\min} = Diámetro mínimo de las partículas en la mezcla [mm]

q = Factor de calibración [–]

En general, la ecuación 1.1 conduce a mezclas con un mayor volumen de sólidos, formadas por la combinación de cantidades óptimas de partículas de diferentes tamaños. De tal manera, la ecuación 1.1 es adecuada para caracterizar la distribución granulométrica formada por una región de polvos, agregados gruesos y finos, y otras partículas. Donde, los valores más bajos del factor de calibración proporcionan un mejor ajuste en curvas con mayor cantidad de fracciones finas. En investigaciones recientes, se ha encontrado diferentes factores de calibración, mostrando $q = 0.25$ para la distribución de los agregados y cementantes en un CAC y $q = 0.5$ para la optimización de la curva formada por los agregados y las fibras de acero en un CAF [16].

Aditivos químicos

Dentro de las principales formas de diseño del CAF, los aditivos comúnmente utilizados son el superplastificante (SP) y el aditivo modificador de la viscosidad (AMV). Sin embargo, el SP es una parte esencial en el diseño del CAF, ya que permite obtener la fluidez característica del material [17]. Mientras, el AMV es

usado para reducir la segregación y sangrado, compensando la falta de polvos en la mezcla.

Particularmente, el mecanismo de acción del SP establece una repulsión electrostática entre las partículas aglomeradas de cemento – agua, permitiendo que el agua libre se distribuya sobre la mezcla, favoreciendo a la fluidez de la pasta de cemento. Sin embargo, la efectividad del SP para fluidificar las mezclas de concreto y mantener la trabajabilidad, está influenciada por la compatibilidad con el cemento, la temperatura ambiente y la relación de agua – volumen de polvos (V_w/V_p) [18]. Por esta razón, es importante seleccionar los materiales adecuados que permitan proveer el desempeño previsto en la matriz cementante.

1.1.2.2 Propiedades de las fibras

Existe una amplia gama de fibras de diferentes propiedades físicas y químicas que son utilizadas para el refuerzo de matrices a base de cemento. En general, el mecanismo de acción de las fibras se establece cuando los esfuerzos externos se transfieren desde la matriz, mediante el puenteo de las fibras sobre las partes agrietadas. Durante este proceso, las fibras pueden proporcionar tres tipos de interacción con la matriz cementante: adhesión física y química, fricción y anclaje mecánico. Particularmente, la adhesión física y química, y la fricción son enlaces relativamente débiles, a causa de la naturaleza diferente entre la matriz y la fibra. Mientras, el anclaje mecánico tiene una mayor contribución en la capacidad de carga, causado por las deformaciones en la superficie y/o la geometría de la fibra. De tal manera que, las características como la composición, forma, longitud,

diámetro y volumen de dosificación influyen en el comportamiento mecánico del material compuesto.

De acuerdo con su forma, las fibras se pueden clasificar en monofilamentadas o empaquetadas [19]. La estructura de las fibras monofilamentadas está formada por diferentes deformaciones en la superficie o en la geometría (Figura 1a). Por otro lado, las fibras empaquetadas se componen por un conjunto de filamentos que se deforman principalmente durante el mezclado (Figura 1b). Estas características influyen principalmente en la interacción con la matriz cementante y son parte fundamental dentro del proceso de acción del refuerzo de fibras.

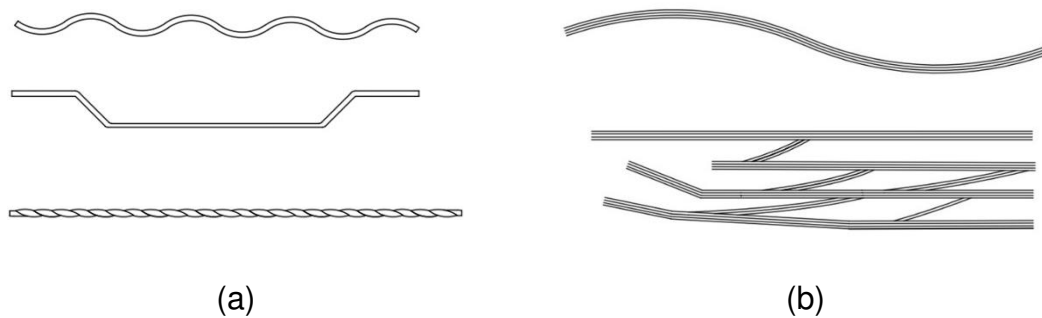


Figura 1. Forma de las fibras: (a) monofilamentada y (b) empaquetada

Con el fin de establecer un criterio con las características que son consideradas más importantes del refuerzo de fibras [20]. Se ha establecido una relación formada por las particularidades geométricas de la fibra, denominada como relación de aspecto (longitud/diámetro, l_f/d_f). Que a su vez se ha relacionado con el volumen de dosificación de fibras (V_f), en lo que se ha nombrado factor de fibra ($V_f l_f/d_f$). De tal manera, el factor de fibra permite comparar diferentes fibras de acuerdo con su rendimiento en las propiedades del CAF.

Hasta el momento, las fibras de acero han sido las más utilizadas para mejorar las propiedades mecánicas del CAF [21,22]. Se ha informado el uso de diferentes formas (rectas, en forma de gancho y entrelazadas) con longitudes entre 5 a 60 mm y con relación de aspecto de 30 a más de 100 [23]. Sin embargo, debido a su durabilidad, se ha limitado su utilización en ciertas aplicaciones. De esta manera, en los últimos años se ha perfeccionado fibras de diferente naturaleza, que permitan mejorar el comportamiento del material compuesto.

En particular, las fibras sintéticas han mostrado una variedad de características de acuerdo con su naturaleza, las más comunes se muestran en la Tabla 1. Donde, se ha informado el uso de fibras con longitudes de 25 a 54 mm, principalmente para reducir la segregación y soportar los esfuerzos de tensión causados por los cambios volumétricos del concreto [24]. Sin embargo, los problemas asociados a la baja adherencia matriz – fibra llevaron al desarrollo de la tecnología referente a este material. En los últimos años, se ha mostrado una nueva generación de fibras sintéticas monofilamentadas con diferentes geometrías y deformaciones en la superficie. Asimismo, se han desarrollado fibras empaquetadas capaces de fibrilar durante el mezclado, debido a la combinación de dos o más polímeros incompatibles. Todo lo anterior, para proporcionar un mejor anclaje mecánico con la matriz cementante, beneficiando la respuesta mecánica del CAF.

Tabla 1. Propiedades de las fibras [25]

Tipo de fibra	Densidad [-]	Diámetro [μm]	Resistencia a tensión [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
Acero	7.80	100 - 1000	500 - 2600	210
Acrílico	1.18	5.17	200 - 1000	17 - 19
Aramida	1.44	10 - 12	2000 - 3100	62 - 120
Carbón	1.90	8 - 9	1800 - 2600	230 - 380
Nylon	1.14	23	1000	5.2
Poliéster	1.38	10 - 80	280 - 1200	10 - 18
Polietileno	0.96	25 - 1000	80 - 600	5
Polipropileno	0.90	20 - 200	450 - 700	3.5 - 5.2

1.1.3 Propiedades en estado fresco del CAF

El comportamiento del CAF en estado fresco es caracterizado principalmente por su capacidad de llenado y paso, y resistencia a la segregación. Estas características permiten describir la facilidad con la que concreto puede colocarse, compactarse y darse algún acabado. En general, se han establecido métodos estandarizados con el propósito de verificar el desempeño de la mezcla (Tabla 2). Donde, las condiciones de llenado permiten evaluar la capacidad del CAF para fluir y llenar completamente todos los espacios de la cimbra bajo su propio peso, por lo que, puede ser una forma cualitativa para valorar la resistencia inicial del flujo. Por otro lado, la capacidad de paso es una forma práctica de exponer el comportamiento del CAF bajo las condiciones de aplicación, ya que es una medida directa de la capacidad de fluir a través del refuerzo sin segregación ni bloqueo. Así también, es de gran importancia la resistencia a la segregación de la mezcla durante el transporte y el puesto en obra.

Tabla 2. Métodos de ensayo en estado fresco del CAF [26]

Ensayo	Categoría	Características
Flujo de revenimiento	Flujo libre	Capacidad de relleno
Índice de estabilidad visual (VSI)	Condición estática	Resistencia a la segregación
t_{50}	Flujo libre	Capacidad de relleno
Anillo J	Flujo confinado	Capacidad de paso
Caja en L	Flujo confinado	Capacidad de paso y relleno
Columna de segregación	Flujo confinado	Resistencia a la segregación

Hasta ahora, los métodos estandarizados del CAF son adecuaciones de las normativas para la producción y uso del CAC. En los cuales, los procedimientos son proporcionados a la influencia del refuerzo de fibras [27]. Como en el caso del embudo V, donde la abertura del equipo es proporcional a la longitud de la fibra. En el ensayo de la caja en L, el espaciamiento entre el refuerzo deber ser más grande que las dimensiones de la fibra [28]. De manera que, los ajustes en los procedimientos permiten asegurar las mediciones de las propiedades en estado fresco de forma adecuada.

Con el objetivo de facilitar el diseño del CAF, se han establecido limites en las propiedades en estado fresco de acuerdo con las condiciones de aplicación (Tabla 3). Donde, el diseñador de mezclas evalúa las características de un elemento a partir de tres niveles: bajo, medio y alto. De tal manera, las áreas oscuras son características potencialmente problemáticas y deben de evitarse. Mientras, las áreas blancas son propiedades que deben de elegirse. En particular, estas consideraciones permiten el diseño del CAF con las propiedades mínimas que reduzcan la inestabilidad y optimicen su rendimiento.

Tabla 3. Propiedades apropiadas para diferentes aplicaciones [29]

Características del elemento	Nivel	Flujo de revenimiento [mm]			t_{50} [s]			Caja en L (h_2/h_1) [s]			Embudo V [s]		
		<560	560 a 660	>660	<3	3 a 5	>5	<75	75 a 90	>90	<6	6 a 10	>10
Nivel de refuerzo	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Complejidad de la cimbra	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Profundidad del elemento	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Importancia del acabado superficial	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Longitud del elemento	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Espesor del muro	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Contenido del agregado grueso	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Energía de colocación	Bajo												
	Medio												
	Alto												

1.1.4 Propiedades en estado endurecido del CAF

El comportamiento en estado endurecido del CAF depende principalmente de las características como la geometría del espécimen, y la dosificación, resistencia y dispersión de las fibras, asimismo del enlace matriz – fibra y la orientación de las fibras con respecto al esfuerzo aplicado [30]. En general, la obtención de las

propiedades mecánicas del CAF en estado endurecido permite simplificar el desempeño del material en función de la aplicación estructural prevista.

1.1.4.1 Ensayos de compresión

Los procedimientos para la obtención del comportamiento a compresión usados para el concreto sin fibras pueden ser empelados para el CAF. Generalmente, se utilizan especímenes cilíndricos con una relación altura – diámetro (2:1). Debido a que, el uso de especímenes cúbicos es propenso a la alineación de las fibras, lo que puede modificar el mecanismo de control del agrietamiento, en comparación al obtenido por especímenes cilíndricos.

El ensayo a compresión es una forma directa de obtener la curva característica de esfuerzo – deformación. Durante el ensayo se puede subdividir en dos etapas; la respuesta pre – agrietamiento y post – agrietamiento [31]. En una primera etapa, hasta la deformación correspondiente a la resistencia máxima, la distribución de esfuerzos y deformaciones puede ser predicha por la mecánica continua. Sin embargo, más allá de la resistencia máxima, la fusión de microgrietas internas en macrogrietas y la influencia de la distribución de las fibras, establecen un comportamiento posterior al agrietamiento.

1.1.4.2 Ensayos de flexión

Las pruebas a flexión es una forma de evaluar el comportamiento mecánico y las propiedades de fractura del CAF en la propagación de grieta en modo I [32]. Con respecto a la configuración de la carga y la redistribución de esfuerzos, se establecen tres enfoques diferentes: la prueba de flexión en tres puntos (ASTM 293) (Figura 2a); las pruebas de flexión en tres puntos con muesca (EN 14651 y

RILEM TC 162-TDF) (Figura 2b) y las pruebas de flexión en cuatro puntos (ASTM C1609 y JSCE-SF4) (Figura 2c).

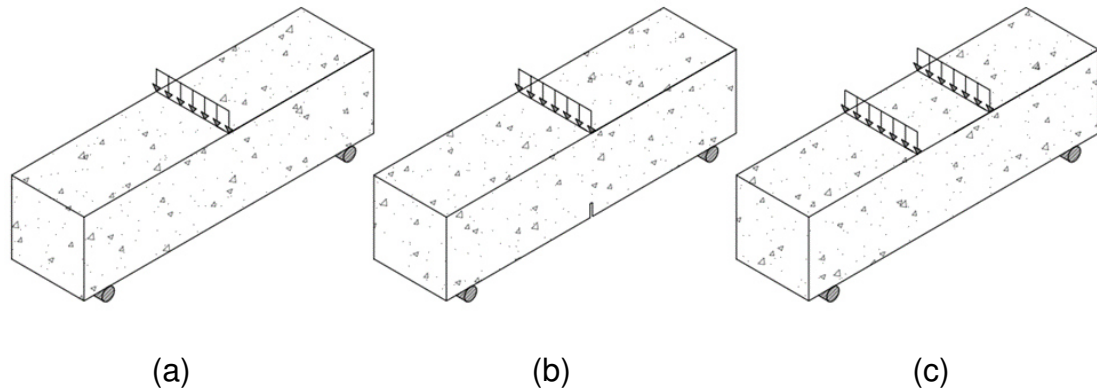


Figura 2. Configuración del ensayo a flexión: (a) en tres puntos, (b) en tres puntos con muesca y (c) en cuatro puntos

En las pruebas de flexión sin muesca, se pueden formar una o más grietas a lo largo del claro libre. Por lo tanto, es una forma cuestionable para correlacionar los resultados [33]. No obstante, la prueba de flexión de tres puntos con muesca permite someter al tramo medio al momento de flexión máximo, debido a que la presencia de la muesca en la sección cargada promueve la localización de las grietas, permitiendo establecer un análisis eficaz en la respuesta posterior al agrietamiento del CAF.

Generalmente, los procedimientos de fabricación de los especímenes de CF se establecen dentro de los estándares relacionados al ensayo, de tal manera de evitar cualquier alineamiento preferencial de las fibras, que pueda afectar la respuesta del material [34]. En el caso del CAF, los especímenes se fabrican lo más cercano posible a la aplicación prevista. Lo anterior, con el fin de aumentar la semejanza de la orientación y distribución de las fibras.

1.1.4.3 Ensayos de cortante directo

El ensayo a corte directo es una forma de caracterizar el comportamiento mecánico y las propiedades de fractura del CAF en propagación de grieta en modo II [35]. Particularmente, muchos de los problemas asociados con las conexiones en edificios prefabricados son causados por la interfaz de corte directo, que se encuentra en detalles como: cojinetes de vigas (Figura 3a) y ménsulas (Figura 3b). De tal manera, este tipo de patología se debe considerar si existe una transferencia de corte a través de un plano de falla dado, como en una grieta existente o potencial, un interfaz entre diferentes materiales o entre dos estructuras de concreto de diferentes edades [36]. Debido a que, las cargas aplicadas de corte en dichas juntas pueden dar lugar al agrietamiento y es posible que los esfuerzos de corte causen un tipo de falla de planos deslizantes bien definidos.

Entre los métodos que existen para evaluar la resistencia y tenacidad al corte, son el método Federation Internationale de la Precontrainte (FIP standard) (Figura 4a), el método Japanese Society of Civil Engineering (JSCE – SF6) (Figura 4b) y el espécimen de empuje tipo Z (Figura 4c). El ensayo de empuje tipo Z se ha utilizado ampliamente tanto para CR y CF, con diferentes dimensiones en las secciones, sin embargo, se ha observado que más allá del agrietamiento las condiciones de esfuerzo se desvían del cortante puro [37]. Asimismo, el método FIP sujeta al espécimen a cargas de corte, las cuales forman un plano de falla que puede minimizar la aparición de un momento flexionante [38]. Por otra parte, el método JSCE permite sujetar a cargas

paralelas al espécimen, estableciendo dos planos de falla. En particular, el mecanismo de falla por cortante directo causa la localización de grietas a lo largo del plano de corte, seguidamente de una capacidad residual debido al puenteo de los agregados y las fibras con la matriz, para posteriormente deslizarse de manera libre sobre los planos de falla [38,39].

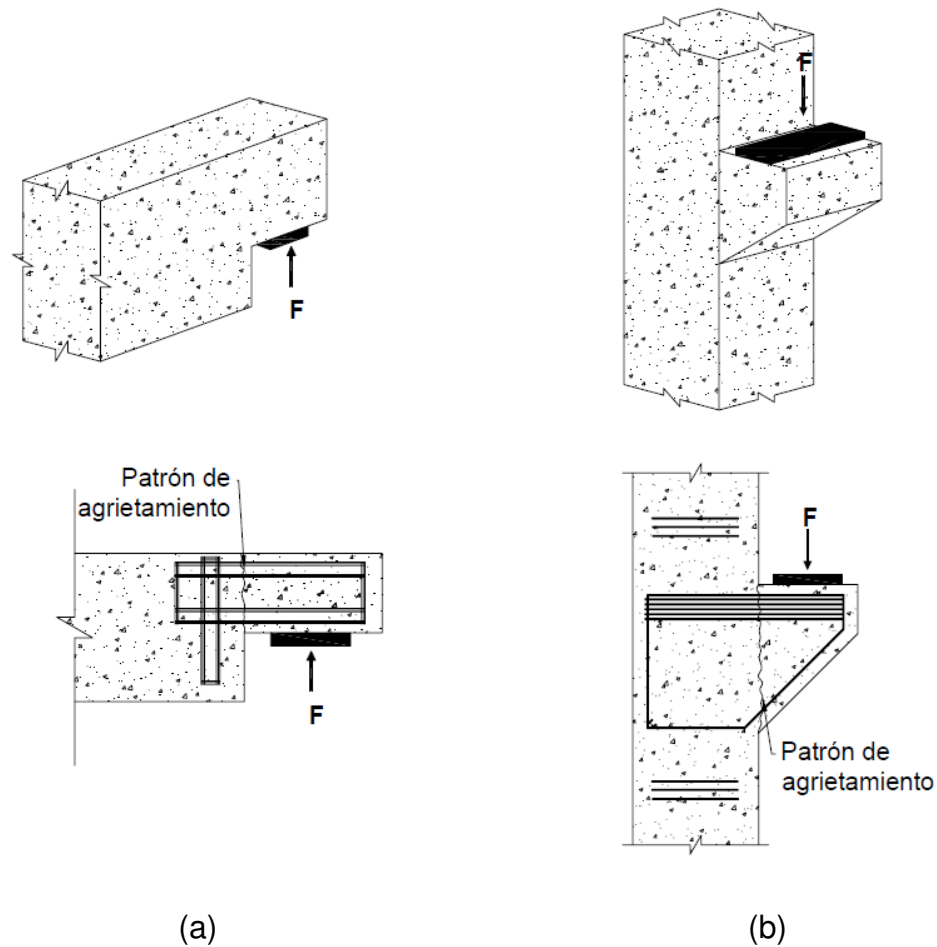


Figura 3. Propagación del agrietamiento por cortante en elementos de construcción: (a) cojinete de viga y (b) ménsula

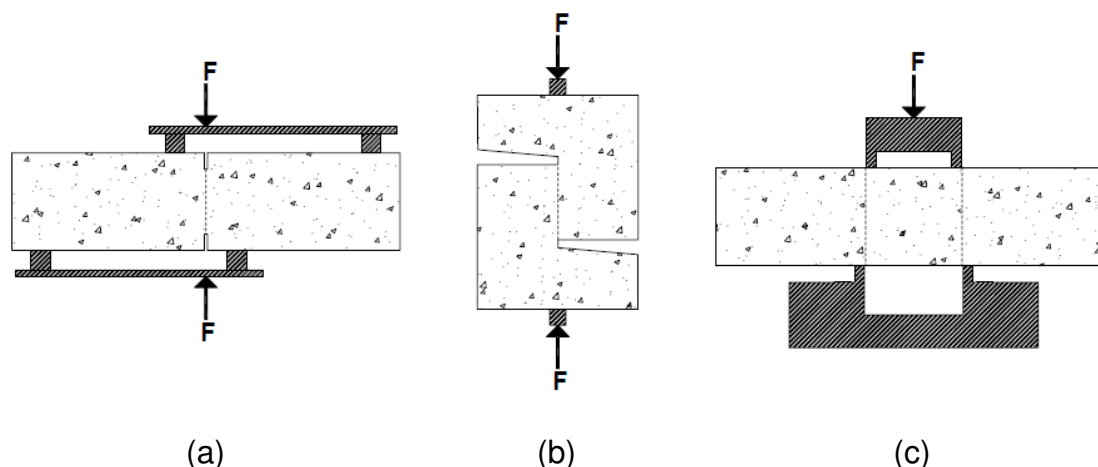


Figura 4. Configuración del ensayo de cortante directo: (a) FIP standard, (b) JSCE – SF6 y (c) empuje tipo Z

1.1.5 Dispersión del refuerzo de fibras

La dispersión de las fibras dentro de un elemento estructural es decisiva para lograr las propiedades deseadas. Debido a que, la mala dispersión causa zonas con aglomeración de fibras que limitan su comportamiento en estado fresco. Asimismo, las áreas con dosis reducidas de fibras son vulnerables a mecanismos que afectan el rendimiento de la tenacidad del elemento estructural [4]. La distribución correcta de las fibras se logra a través de consideraciones en el diseño de mezcla, así como en procesos correctos de colocación y compactación. La principal ventaja del CAF es la eliminación de la vibración para colocar el concreto, lo que da como resultado mayor estabilidad de la dispersión de las fibras sobre el elemento estructural [40]. En general, las pruebas para verificar el contenido, la distribución y la orientación de las fibras se engloban en pruebas destructivas y no destructivas (Tabla 4).

Tabla 4. Ensayos para evaluar la distribución de las fibras

Ensayos	Tipo	Características
Destructivos	Mecánicos	Proporciona información indirecta al contenido y dispersión de las fibras.
No destructivos	Estado fresco	Aporta información sobre el contenido de fibras.
	Rayos X	Proporciona visualización de la orientación de las fibras.
	Métodos eléctricos	Suministra información sobre la concentración y orientación de las fibras.
	Métodos magnéticos	Muestra información sobre la concentración y orientación de las fibras.

En particular, los métodos destructivos se han utilizado para verificar mediante ensayos mecánicos el contenido real y la dispersión de las fibras [41]. En estos métodos, se realizan muestreos sobre algún elemento estructural para posteriormente ser ensayos con metodologías que permitan cuantificar la tenacidad a la fractura en diferentes zonas. Adicionalmente, las muestras suelen seccionarse para cuantificar las fibras expuestas. Lo anterior, con el fin de verificar la distribución de las fibras sobre el elemento estructural.

1.1.6 Modelos de comportamiento mecánico

La gran variedad de parámetros y fenómenos que afectan la respuesta del CAF hacen que el modelado de las propiedades mecánicas del material sea una tarea particularmente compleja. Debido a lo anterior, no existe una ley constitutiva que describa el comportamiento en general del CAF. Por lo que, las investigaciones recientes han consistido en proponer ecuaciones confiables que ayuden en el

diseño de las estructuras. Entre las diversas propuestas, están las relaciones esfuerzo – abertura de grieta ($\sigma - \omega$), esfuerzo – deformación ($\sigma - \varepsilon$) y los análisis inversos y directos. Donde, cada ley constitutiva tiene principales características y criterios asociados a las metodologías de modelado.

Las relaciones $\sigma - \omega$ se basan en suponer la existencia de una zona cohesiva en el proceso de fractura del concreto, en el que se pueden transferir esfuerzos sobre la grieta [42]. Mientras, el método $\sigma - \varepsilon$ se fundamenta en la identificación de un ancho de grieta y su longitud característica estructural correspondiente [43]. Por otro lado, el enfoque inverso consiste en procedimientos iterativos que se ajusta a los datos experimentales para obtener los parámetros que definan la curva constitutiva, ya sea a través de un método $\sigma - \omega$ o $\sigma - \varepsilon$. En el enfoque directo, los parámetros que caracterizan la curva constitutiva se definen a través de valores experimentales o a través de las propiedades de los componentes.

Asimismo, se han propuesto modelos con base a funciones que caracterizan la respuesta del CAF [44]. Donde, debido a la naturaleza del CAF se han considerado varios tipos de respuestas del material, que son definidas en términos de los parámetros de entrada. A pesar del sentido de los parámetros involucrados en este tipo de modelos, su procedimiento es muy interesante de implementar siempre que los cálculos puedan aplicarse fácilmente.

1.1.7 Aplicaciones en la construcción

En el diseño de matrices reforzados con fibras, las propiedades utilizadas en los cálculos son basados en el comportamiento del material compuesto . Por esta razón, la tenacidad es designada como parámetro principal para determinar su comportamiento y capacidad de carga correspondiente [45]. Otro aspecto importante, es la durabilidad, ya que puede limitar el tipo de fibra en ciertas aplicaciones, debido al mecanismo de degradación que se pueda presentar en diferentes entornos. Por lo anterior, se han presentado un contiguo de información y recomendaciones basadas en datos de pruebas disponibles, informes técnicos y experiencias sobre la aplicación de la tecnología de matrices reforzadas con fibras [21,22]. En general, esta información se ha centrado en la construcción de pisos y prefabricados.

En pisos, las fibras pueden otorgarle las propiedades al material compuesto para soportar problemas relacionados a los cambios volumétricos, exposiciones ambientales (congelación – deshielo y reacción álcali – sílice), así como la concentración de esfuerzos. En particular, el refuerzo de fibras se ha utilizado en pisos industriales y comerciales, y carreteras [21]. Donde, el diseño está basado en las ecuaciones empíricas de Westergaard, según el ACI 360R, las cuales tienen en cuenta el módulo de la subrasante y la resistencia a la flexión del material compuesto. De esta forma, las losas pueden ser reforzadas por barras de acero, malla de ingeniería o refuerzo de fibras. De manera que, cualquier tipo de refuerzo permite el control en el agrietamiento y establece un soporte en la capacidad de carga posterior al agrietamiento.

En los últimos años, se ha reportado el uso de fibras para el control del agrietamiento en pisos [46,47], en los cuales se ha utilizado refuerzo de fibras con dosificaciones de 10 a 12 kg/m³ y 1.8 a 2.4 kg/m³ para fibras acero y sintéticas, respectivamente. Por otra parte, el refuerzo de fibras ha incrementado el momento flexionante con dosificaciones de 10 a 36 kg/m³ y 1.8 a 4.5 kg/m³ para fibras de acero y sintéticas, respectivamente. De esta manera, la dosificación específica es determinada en función del momento de flexión requerido por las cargas aplicadas y las propiedades de las subrasante.

El uso de fibras en elementos prefabricados ha sido una opción popular, debido a que la geometría de los elementos puede estar conformado por secciones delgadas, lo que colocar las barras de acero o malla de ingeniería puede llevar mucho tiempo y ser un desafío constructivo. Hasta el momento, se han construido una variedad de elementos que van desde segmentos de túneles, tuberías, tanques sépticos, vigas para la estabilización de taludes y paneles de fachadas. Donde, las fibras han reforzado de manera parcial o total a la matriz cementante [5]. En general, la mayoría de las aplicaciones han sido con fibras de acero (Tabla 5). Sin embargo, la selección del tipo de fibra puede ser una opción de acuerdo con los requisitos de diseño. En consecuencia, la capacidad estructural y cualquier otro requisito de comportamiento debe ser considerado al momento de seleccionar el refuerzo de fibras.

Tabla 5. Aplicaciones estructurales del CAF

Elemento	Cemento		a/mc	Resistencia a la compresión [MPa]	Tipo de fibra
	Tipo	Cantidad [kg/m³]			
Viga doble T	I	385.0	0.40	49.7	Acero
Sección circular de edificio	I	445.0	0.40	42.0	Acero
Elemento de techo	I	400.0	0.40	75.8	Acero
Segmento de túnel	III	382.0	0.47	66.4	Acero
Elemento de recubrimiento	I	489.0	0.40	73.0	Acero
Elemento de recubrimiento	II	400.0	0.55	42.5	Acero
Segmento de túnel	I	280.0	0.34	49.0	Polipropileno
Viga postensada	I	400.0	0.49	49.2	Acero
Panel de fachada	I	359.4	0.27	60.0	Acero
Sistema de techo	I	401.7	0.30	60.0	Acero
Segmento de túnel	-	-	-	50.0	Acero
Segmento de túnel	-	534.0	0.38	45.5	Acero
Tanque séptico	-	374.0	0.42	45.5	Polipropileno
Segmento de túnel	-	-	-	35.0	Acero
Segmento de túnel	I	400.0	0.33	50.0	Acero

1.2 Ámbito de la investigación

1.2.1 Justificación

El concreto autocompactable fibroreforzado (CAF) es un material compuesto con un potencial de desarrollo en el ámbito de la construcción, debido a que provee importantes ventajas técnicas en comparación al concreto convencional. Comúnmente, se ha utilizado fibras de acero para el reforzamiento del CAF, en virtud de su rendimiento estructural. Sin embargo, la vida de servicio de los elementos reforzados con fibras de acero ha sido limitado por ser susceptible a cambios en las propiedades mecánicas, en función de los procesos de deterioro causado por la naturaleza del refuerzo.

En los últimos años, se ha dedicado importantes esfuerzos en el desarrollo de fibras sintéticas con grado estructural, capaces de proveer tenacidad al concreto. Este perfeccionamiento, ha ido acompañado de un creciente interés del sector de la industria en determinar las propiedades, limitaciones y campos de aplicación que podría tener el material compuesto.

Por lo tanto, es necesario realizar una caracterización del comportamiento del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas, que permita observar la influencia de los factores que intervienen en el proporcionamiento, establecidos en la comprensión del mecanismo subyacente entre el diseño de la mezcla, el comportamiento en estado fresco, la distribución del refuerzo de fibras y la predicción prevista en estado endurecido. De tal manera de establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico, que permitan una estimación preliminar de los parámetros principales del material compuesto.

1.2.2 Hipótesis

La adición de fibras sintéticas como refuerzo del concreto autocompactable incrementará el desempeño en la tenacidad a la fractura en función del volumen y tipo de fibra sintética, considerando la influencia de las propiedades en estado fresco y la distribución de las fibras, permitiendo establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico para favorecer la aplicación estructural del material compuesto.

1.2.3 Objetivos

1.2.3.1 Objetivo general

Analizar el desempeño con respecto a la tenacidad a la fractura del concreto autocompactable con variaciones en el tipo y volumen de refuerzo de fibras sintéticas, considerando la influencia de las propiedades en estado fresco y la distribución de las fibras, para establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico del material compuesto.

1.2.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar seis mezclas de CAF con base a una metodología con referencia a una matriz de CAC optimizada para el reforzamiento de diferentes volúmenes y tipos de fibras sintéticas.
- Determinar la influencia del refuerzo de fibras sintéticas para cada mezcla de CAF mediante pruebas características a la capacidad de paso y relleno, y resistencia a la segregación.

- Determinar la relación entre el refuerzo de fibras sintéticas y la tenacidad a la fractura mediante el comportamiento a compresión, flexión y cortante directo del CAF.
- Establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico del CAF en flexión y cortante directo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

De acuerdo con los objetivos de la investigación, el programa experimental fue orientado fundamentalmente a investigar la contribución de las fibras sintéticas como refuerzo del concreto autocompactable, determinado en la comprensión del mecanismo entre el diseño de mezcla, el comportamiento en estado fresco y endurecido, así como la influencia de la distribución de las fibras, con el fin de establecer modelos analíticos del comportamiento mecánico del material compuesto. De tal forma, el trabajo experimental se dividió en 5 etapas, las cuales fueron: 1) Caracterización de los materiales. 2) Diseño de mezclas del CAF. 3) Comportamiento en estado fresco del CAF. 4) Comportamiento en estado endurecido del CAF.

2.1 Diseño de experimentos

El desarrollo experimental contempló dos variables referentes al refuerzo de fibras: tipo y volumen de dosificación. Para ello, se diseñó un CAF con una metodología relativa a un matriz de CAC con fluidez clase SF1 (550 – 650 mm) reforzado con fibras sintéticas monofilamentadas de polipropileno (P) y empaquetadas de polipropileno/polietileno (PP). Por otra parte, el volumen de dosificación de las fibras fue de 0.6, 0.8 y 1.0% con respecto al volumen total de la mezcla. Las pruebas realizadas para la determinación de sus propiedades en estado fresco fueron: flujo de revenimiento, caja en L y columna de segregación. Por otro lado, las propiedades en estado endurecido estudiadas fueron:

comportamiento a compresión, flexión y cortante directo a la edad de 28 días. Asimismo, la influencia de la distribución del refuerzo de fibras se determinó en elementos prismáticos sujetos a flexión y cortante directo a la edad de 28 días. Tomando en cuenta las mezclas de referencia y las variaciones en el tipo y volumen de las fibras sintéticas, un total de 7 mezclas diferentes fueron realizadas (Figura 5). Las series fueron designadas por Referencia, 0.6P, 0.8P, 1.0P, 0.6PP, 0.8PP y 1.0PP, donde los números representan el volumen de fibras y las letras el tipo de fibra.

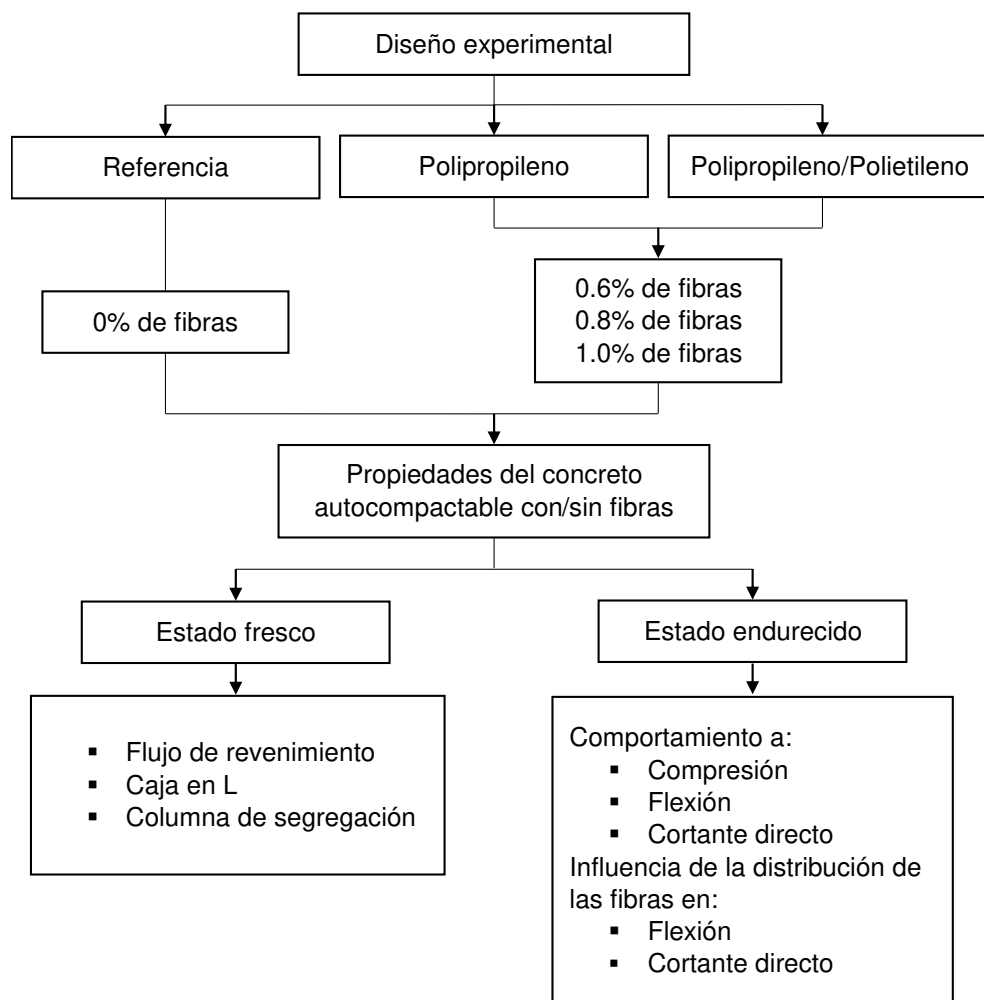


Figura 5. Mapa experimental

2.2 Caracterización de los materiales

Los materiales de esta investigación fueron seleccionados de acuerdo con la contribución en el comportamiento del CAF, así como también, por ser materiales disponibles en la región donde se realizó la investigación. La caracterización física de los materiales se efectuó de acuerdo con los requisitos paramétricos para el diseño de mezclas. Mientras, la caracterización química se realizó para establecer un criterio de rendimiento del CAF con futuras investigaciones.

2.2.1 Cemento Portland

El cemento Portland ordinario utilizado en este proyecto de investigación fue de la clase resistente 40 R, denominado como CPO 40R y especificado por la normativa NMX-C-414-ONNCCE. En particular, la composición química del CPO resulta significativa en la compatibilidad con el aditivo SP [51], por lo que es importante considerar el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) y trióxido de azufre (SO_3) que permitan establecer un criterio de comparación del rendimiento CAF con futuras investigaciones. Por otra parte, la densidad del cemento es un parámetro transcendental debido a su relación con el diseño de mezclas.

2.2.1.1 Densidad

Para la evaluación de la densidad del cemento, se realizó el muestreo de acuerdo con lo descrito en la normativa ASTM C188. Mientras, la prueba se efectuó con un picnómetro automatizado marca Quantachrome, que emplea un gas inerte y su funcionamiento está basado en el principio de desplazamiento de fluidos de Arquímedes y la ley de expansión de gas de Boyle. Debido a que, la densidad es una propiedad física fundamental en el diseño y control de las mezclas.

2.2.1.2 Composición química

La composición química del cemento se determinó por medio de Fluorescencia de rayos X (XRF), esta prueba se realizó en un equipo marca PANalytical modelo Epsilon3-XL. El resultado determinado por los principales compuestos del cemento a base de óxidos, fueron utilizados para determinar la composición potencial de las fases por medio de las hipótesis establecidas en las ecuaciones de Bogue.

2.2.2 Agregados

2.2.2.1 Agregado grueso

El agregado grueso se define como material granular obtenido de forma natural o por trituración de rocas, que es retenido por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), de acuerdo con la especificación ASTM C125. El material triturado se obtuvo de una cantera de caliza ubicada en la región de Nuevo León con un tamaño máximo nominal de 19 mm, según el proveedor. De acuerdo con su naturaleza, el agregado grueso tiene una morfología de partícula angulosa y elongada, dicha característica influye principalmente en la capacidad de paso y relleno, al incrementar la resistencia interna debido al bloqueo y fricción entre las partículas, lo que limita las propiedades en estado fresco del CAF [21, 52]. De tal manera, con el fin obtener propiedades aceptables, se redujo el tamaño máximo mediante tamizado manual a 12.5 mm. Por consiguiente, se determinó la densidad, absorción y distribución granulométrica para definir la cantidad de agregados en la mezcla.

Densidad y Absorción

La densidad y absorción del agregado grueso se determinó de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma ASTM C127. Estas propiedades, se evaluaron en el material con tamaño máximo de 12.5 mm.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica del agregado grueso se determinó conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM C136. El material caracterizado fue el constituido por partículas con tamaño máximo de 12.5 mm.

2.2.2.2 Agregado fino

De acuerdo con la ASTM C125, el agregado fino se define como el material granular obtenido de forma natural o por trituración de rocas que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y es retenido por el tamiz de 150 μ m (No. 100). El agregado fino se obtuvo del trituramiento de caliza ubicada en la región de Nuevo León, el tamaño máximo nominal de acuerdo con el proveedor fue de 4.75 mm. A causa del proceso de trituramiento, el agregado fino tiene cantidades significativas de polvos, lo que resulta en partículas de mayor área superficial que le confieren mayor deformabilidad, viscosidad y estabilidad a la mezcla [53, 54]. De tal forma, el agregado fino fue caracterizado por la densidad, absorción y distribución granulométrica.

Densidad y Absorción

De acuerdo con los procedimientos descritos en la ASTM C128, se determinó la densidad y absorción del agregado fino. El agregado fino se caracterizó tomando en cuenta la cantidad de polvo de caliza.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica del agregado fino se determinó conforme a los procedimientos descritos en la norma ASTM C136. Adicionalmente, se determinó la distribución del tamaño de partículas del polvo de caliza (partículas menores a las 150 μm), mediante la difracción de rayo láser. Lo anterior, con el fin de completar la curva granulométrica del material.

2.2.3 Aditivo químico

El aditivo utilizado fue un superplastificante (SP) con agentes dispersantes a base de polycarboxilato, considerado como un reductor de agua de alto rango de acuerdo con la norma ASTM C494. En particular, el aditivo superplastificante fue utilizado para compensar la demanda de agua al incrementar la cantidad de polvos y/o agregado fino para producir una consistencia dada. Para su proporcionamiento, se determinaron los parámetros de densidad y contenido de sólidos.

2.2.3.1 Densidad

La densidad del aditivo SP se obtuvo dividiendo el peso de 100 ml de aditivo SP dentro de un matraz lleno hasta la marca de aforo.

2.2.3.2 Contenido de sólidos

El contenido de sólidos se obtuvo calentando una muestra de 100 gr de aditivo SP a 105 °C hasta llegar a masa constante. Posteriormente, se calculó el contenido de sólidos dividiendo el peso del residuo sólido entre el peso inicial de la muestra. Además, se realizó una comparación de acuerdo con los requerimientos físicos establecidos en la norma ASTM C494. El resultado fue utilizado para el cálculo del agua de reacción.

2.2.4 Fibras de refuerzo

Los refuerzos utilizados fueron fibras empaquetadas de polipropileno/polietileno (Tuf Strand SF, EUCOMEX) y fibras monofilamentadas de polipropileno (MasterFiber MAC Matrix, BASF) que cumplen con la norma de especificación ASTM C1116. Para establecer un criterio de comparación entre las fibras, se realizaron micrografías de la morfología, mediante la microscopia electrónica de barrido (SEM). Mientras, las propiedades físicas para su dosificación se obtuvieron de las fichas técnicas provistas por los proveedores.

2.3 Diseño de mezclas

La metodología de diseño inició con la selección de los parámetros comúnmente utilizados para la elaboración del CAF en la industria e investigación (Tabla 5 del Capítulo 1). Conforme a lo anterior, se estableció un consumo de cemento de 475 kg/m³ y una relación agua/cemento (a/c) de 0.40. Posteriormente, se elaboró un CAC de referencia donde las características del comportamiento en estado fresco estuvieran dentro de los rangos establecidos en las especificaciones de diseño [14,26]. Por último, se planteó una metodología para el diseño del CAF a

partir de la referencia de CAC y la influencia de las fibras en cada una de las mezclas.

2.3.1 Mezcla de referencia

El diseño de la mezcla de referencia se ordenó en una sucesión de pasos dentro de un diagrama de flujo condicionado a las propiedades en estado fresco previstas (Figura 6). Donde, el diagrama de flujo estuvo formado por dos etapas paralelas de optimización de los componentes, hasta una condicionante establecida por las propiedades en estado fresco definidas. Por lo anterior, se seleccionó un nivel de fluidez SF1 (550 – 650 mm), determinado por la clasificación de consistencia del flujo de revenimiento, la cual es apropiada para losas, pisos, cimentaciones y revestimiento de túneles [55]. Así también, se definió las propiedades de paso y resistencia a la segregación a partir de las pruebas de la caja en L y columna de segregación, respectivamente. Los rangos apropiados de las propiedades de paso y resistencia a la segregación quedaron definidos a valores especificados para la producción y el uso del CAC [15, 56]. De tal manera, la optimización del esqueleto granular permitió ajustar las interacciones de acuerdo con la condicionante definida por valores especificados.

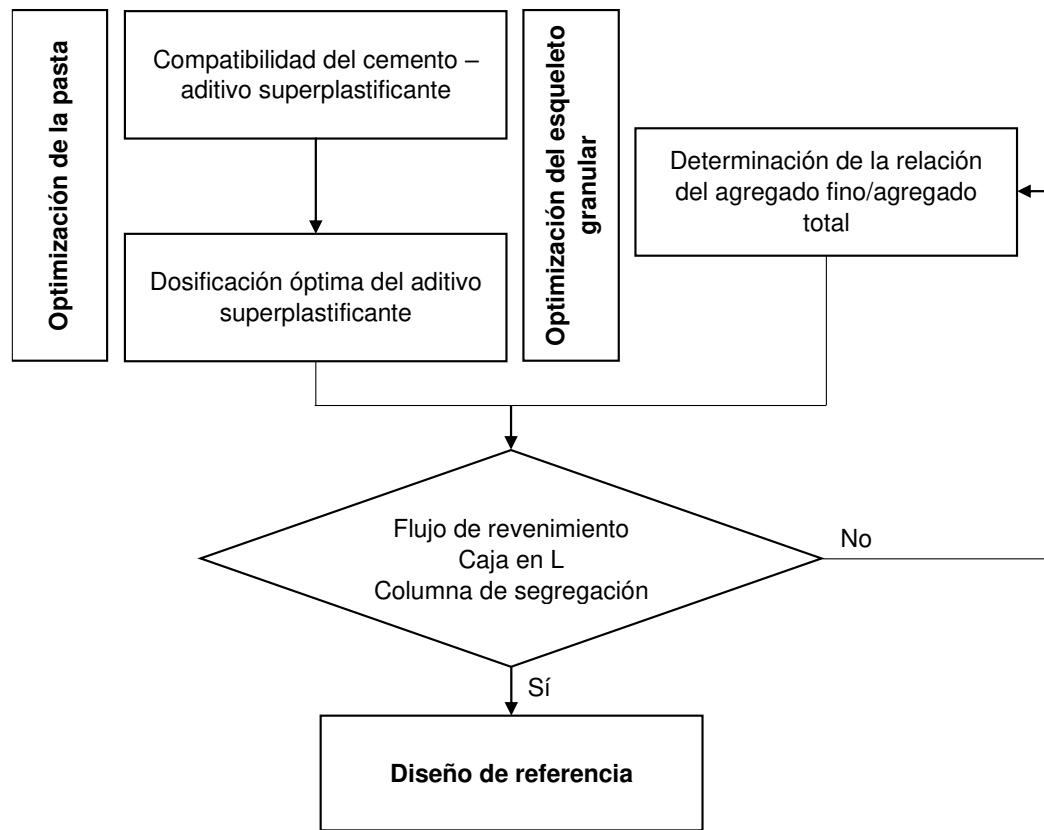


Figura 6. Diagrama de flujo del diseño de la mezcla de referencia

2.3.1.1 Optimización de la pasta

La optimización de la pasta se hizo a partir de los parámetros relacionados a la dosificación óptima del aditivo SP. Esta metodología, se basó en la medición de la consistencia en pastas, para diferentes dosificaciones de SP y tiempos después del mezclado, usando el mini – cono de revenimiento (Figura 7). La metodología se efectuó con una relación a/c de 0.40 y un porcentaje de agente activo de SP con relación al peso del cemento (SP/C) de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.6%.

Mientras, los tiempos de evaluación fueron a 5, 30 y 60 minutos después del mezclado.

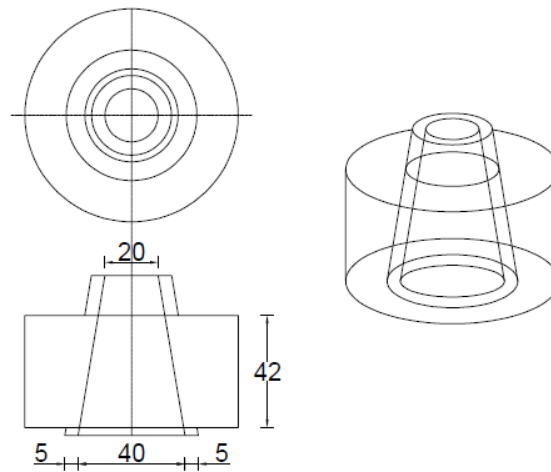


Figura 7. Configuración del mini – cono de revenimiento

En general, el procedimiento usado fue el siguiente: se colocó el mini – cono de revenimiento en una superficie plana y libre vibraciones. En seguida, fueron pesados los materiales de acuerdo con el proporcionamiento de las diferentes pastas. Para el mezclado de las pastas se hizo de acuerdo con el procedimiento descrito en la ASTM C305. Seguidamente, se colocó la pasta con el uso de un cucharón en el mini – cono de revenimiento hasta la marca de volumen determinado, para posteriormente enrasar el sobrante con el uso de una espátula. Por último, se levantó el molde en un tiempo promedio de 3 segundos para registrar el promedio del diámetro de dos ejes perpendiculares, después haberse consolidado la pasta. Este procedimiento, se realizó para cada una de las pastas en un periodo de 5, 30 y 60 minutos después del mezclado.

En general, esta metodología permitió observar el grado de compatibilidad entre el cemento y el aditivo SP, mediante la medición de la permanencia de la consistencia de las pastas con relación a la variación en el tiempo [57]. Por otro lado, para determinar la cantidad óptima del aditivo SP, se graficaron los resultados de tal forma de observar la pérdida de extensibilidad de las pastas en los tiempos de 5 y 60 minutos después del mezclado. A causa de que, es el tiempo que se requiere que un concreto sea más trabajable con el propósito de su colocación, compactación y acabado. De tal forma, permitió determinar en cual adición extra de SP, la extensibilidad no incrementaba, siempre y cuando la pasta no presentara segregación o sangrado.

2.3.1.2 Optimización del esqueleto granular

La determinación de la cantidad óptima de agregados se efectuó con la variación de la relación en masa entre el agregado grueso y agregado fino (G/A) en mezclas de CAC. Conforme a diferentes experiencias técnicas y guías para la producción del CAC, la relación volumétrica del agregado grueso y el volumen total suele ser del 28 al 35% por volumen de la mezcla [26]. Por lo tanto, se realizaron mezclas con relación G/A de 0.4, 0.5 y 0.6. Posteriormente, las combinaciones fueron evaluadas en mezclas de CAC con las pruebas de flujo de revenimiento, caja en L y columna de segregación, de acuerdo con la norma ASTM C1611, EN 12350 y ASTM C1610, respectivamente. De tal manera, los valores fueron contrastados con los rangos establecidos en las especificaciones y guías de diseño del CAC [14,26]. Lo anterior, con el fin de seleccionar una

relación G/A adecuada para obtener las propiedades en estado fresco dentro de los rangos definidos.

2.3.2 Mezclas de CAF

Para el proporcionamiento del CAF, se seleccionaron las fibras de P y PP, por ser fibras sintéticas relativamente similares en sus propiedades físicas y químicas. Sin embargo, la particularidad en su morfología las hace distintas en su interacción y comportamiento con la matriz cementante. Por otra parte, el volumen de fibras fue definido por ser dosificaciones promedio suministradas para la contribución en la absorción de energía de falla en el CF, elaborado en la industria y en otras investigaciones [48,49]. En consecuencia, el volumen de fibras seleccionado fue de 0.6, 0.8 y 1.0% con respecto al volumen total de la mezcla.

El diseño del CAF se estableció de acuerdo con la metodología propuesta por Voigt [50] y modificada por Khayat [9], donde se realiza una reducción del agregado grueso proporcional a la adición del refuerzo de fibras. En este método, el material compuesto se considera que está formado por dos fases. Donde, la primera fase está constituida por el agregado grueso y las fibras, mientras, la segunda fase por el cemento, agua, agregado fino, aire y aditivo químico. Debido a lo cual, las propiedades del concreto se relacionan entonces con el recubrimiento promedio de la matriz (t_{cm}) formada por la segunda fase, que envuelve a los componentes de la primera fase. Es decir, bajo el supuesto de compactación máxima, la composición de la primera fase contiene un cierto volumen de vacíos que depende del volumen, la distribución y la forma del

agregado grueso y las fibras (Figura 8a). Por consiguiente, si ahora se agrega un cierto volumen de matriz (segunda fase), la metodología asume que la matriz llena el volumen de vacíos y el exceso se utiliza para cubrir la superficie de la primer fase (Figura 8b), dadas estas suposiciones se puede especificar el recubrimiento promedio de la matriz (ecuación 2.1).

$$t_{cm} = \frac{\text{Volumen excedente de la matriz}}{\text{Area superficial total de las fibras y la grava}} \quad (2.1)$$

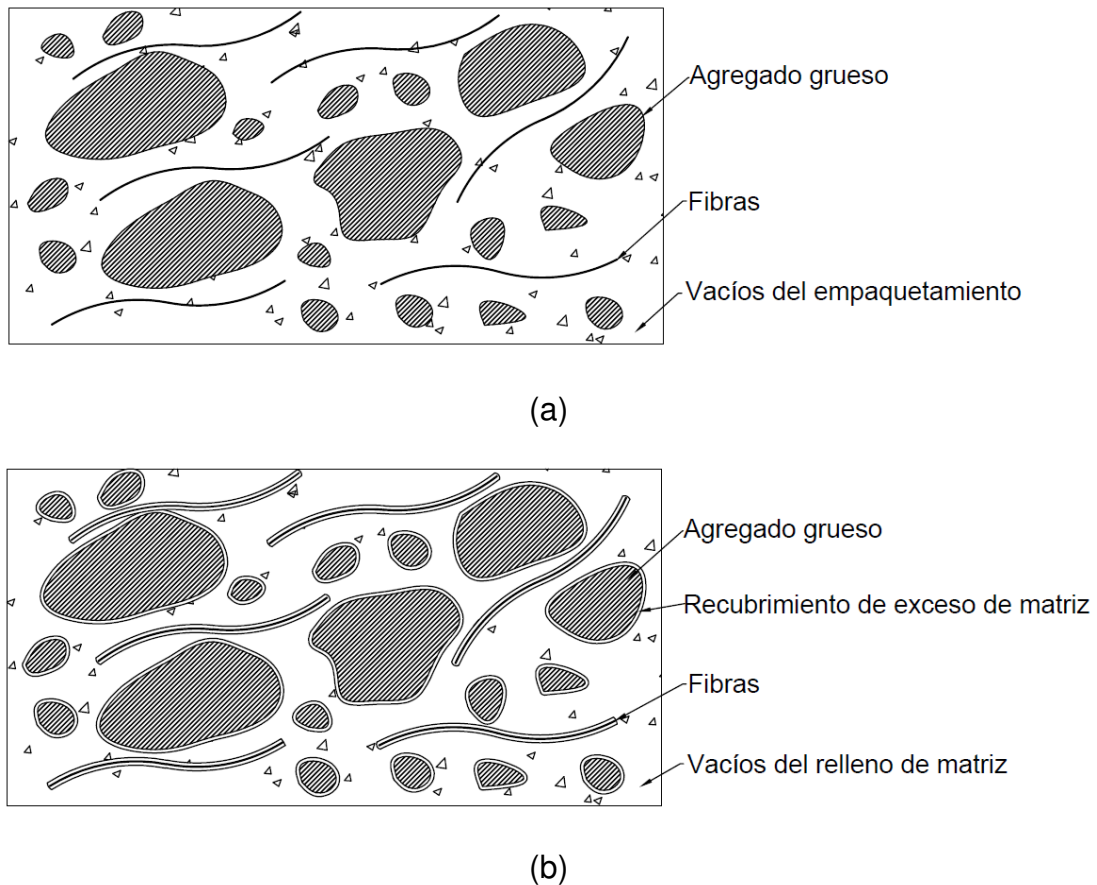


Figura 8. Metodología para el diseño del CAF: (a) composición de la primera fase y (b) recubrimiento promedio de la matriz

De acuerdo con lo anterior, el volumen excedente de la matriz depende del total de la segunda fase y el contenido de vacíos formado en la interacción de los componentes de la primera fase. Por lo cual, el recubrimiento promedio de la matriz se puede calcular como (ecuación 2.2) [9]:

$$t_{cm} = \frac{V_c - V_g - V_f - V_v}{A_g + A_f} \quad (2.2)$$

Donde:

t_{cm} = Recubrimiento promedio de matriz en las fibras y el agregado grueso

V_c = Volumen total de concreto [m³]

V_g = Volumen de agregado grueso [m³]

V_f = Volumen de fibras [m³]

V_v = Volumen de vacíos [m³]

A_g = Área superficial del agregado grueso [m²]

A_f = Área superficial de las fibras [m²]

Los volúmenes del agregado grueso y las fibras fueron derivados de las proporciones de la mezcla de referencia y el nivel de dosificación de fibras, respectivamente. Mientras, el volumen de vacíos fue determinado por medio de una variación del procedimiento del peso volumétrico, descrito en la norma ASTM C29, donde se combinaron los diferentes volúmenes de dosificación de fibras con el volumen de agregados grueso, posteriormente con las propiedades físicas de los materiales se estimó la cantidad de vacíos para cada mezcla. No obstante, en el caso de no obtener un desempeño satisfactorio en las propiedades en estado fresco del CAF, se consideró un rediseño a partir del ajuste en las proporciones del agregado fino y la dosificación del superplastificante, dados los

intervalos de optimización de la pasta y el esqueleto granular de la mezcla de referencia. De manera que, el diseño de mezclas de CAF se estableció a partir del diagrama de flujo (Figura 9).

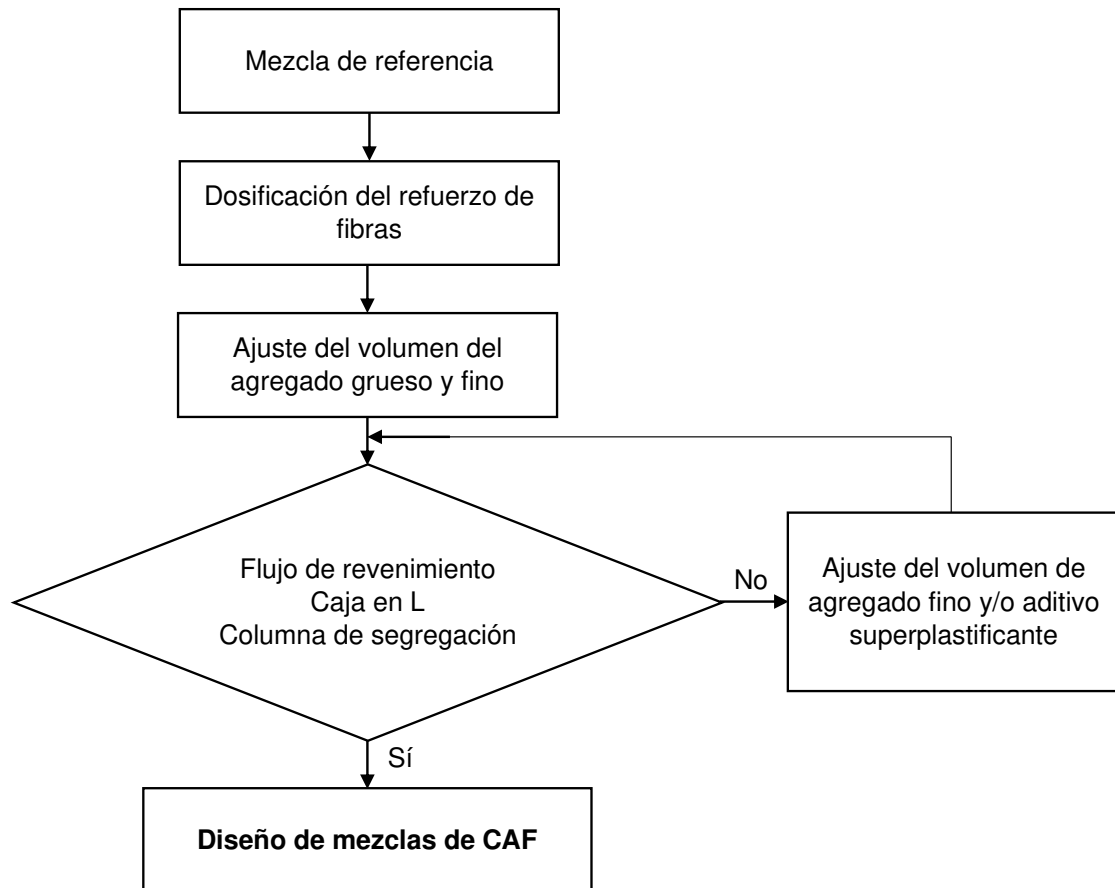


Figura 9. Diagrama de flujo del diseño de las mezclas de CAF

2.4 Comportamiento en estado fresco del CAF

El objetivo de esta etapa experimental fue la caracterización de las mezclas mediante pruebas referentes a la capacidad de paso y relleno, y resistencia a la segregación estática. Definido lo anterior, se obtuvieron relaciones con los

parámetros principales entre el refuerzo de fibras y el comportamiento de cada mezcla.

2.4.1 Procedimiento de mezclado

Las mezclas se realizaron en un laboratorio con ambiente controlado en una mezcladora de contraflujo marca Eirich con capacidad de 45 litros. Los materiales fueron mezclados con el siguiente orden: los agregados se homogenizaron con el agua para alcanzar el estado saturado superficialmente seco por aproximadamente un minuto. Posteriormente, se añadió el cemento y en seguida el agua de reacción con el aditivo SP, para mezclar por tres minutos y detener por tres más la mezcladora. Después, se agregaron las fibras lentamente para evitar el bloqueo con la mezcla y el proceso de mezclado continuo hasta que se alcanzó la homogeneidad apropiada. Por último, se midieron las propiedades de trabajabilidad con un protocolo experimental, donde los procesos de ejecución y tiempos en que estas se desarrollaron podrían ser comparables entre cada una de las mezclas. De acuerdo con esta metodología, se realizaron dos batchadas para medir las propiedades en estado fresco para cada una de las mezclas.

2.4.2 Ensayo del flujo de revenimiento

El ensayo del flujo de revenimiento es una evaluación de la capacidad del flujo horizontal en ausencia de obstrucciones [65]. El ensayo se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C1611. Donde, se involucra el llenado del cono de Abrams con concreto, levantarlo y dejar que el concreto se consolide para posteriormente tomar el promedio de dos diámetros medidos perpendicularmente entre sí de la propagación resultante (Figura 10). En

paralelo, se mide el tiempo en que tarda el flujo en llegar a un diámetro de 500 mm desde el momento en que se levanta el cono por primera vez (t_{50}). Así también, se realiza un examen visual de la dispersión del flujo para evaluar de forma cualitativa la presencia de exudación y segregación de la mezcla, definido los valores del índice de estabilidad visual (VSI) (Tabla 6). Adicionalmente, en las mezclas de CAF se realizó una revisión visual de la homogeneidad de las fibras en la mezcla.

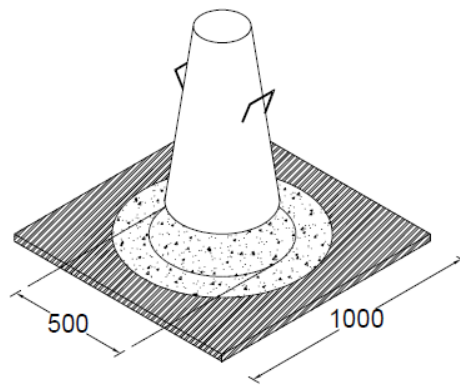


Figura 10. Ensayo del flujo de revenimiento

Tabla 6. Valores del índice de estabilidad visual

Valor	Característica	Criterio
0	Altamente estable	No hay evidencias de segregación o sangrado.
1	Estable	No hay evidencia de segregación y se observa sangrado leve.
2	Inestable	Un ligero halo de mortero ≤ 10 mm y/o pila de agregados en la masa de concreto.
3	Altamente inestable	Claramente segregados por evidencia de un halo de mortero grande > 10 mm y/o una gran pila de agregados en el centro de la masa de concreto.

La prueba del flujo de revenimiento permitió la comparación del flujo lateral y la capacidad de relleno para las diferentes mezclas. Fundamentalmente, el nivel de

extensibilidad del flujo de revenimiento fue usado para evaluar la consistencia de las mezclas. Mientras, el tiempo t_{50} fue una evaluación cualitativa para medir el grado de viscosidad, donde t_{50} menores a 2 segundos es típico en mezclas de baja viscosidad y superiores a 5 segundos de alta viscosidad. Por último, el VSI permitió clasificar visualmente la calidad de las mezclas, donde la clasificación de VSI de 0 o 1 es una indicación de que la mezcla de CAC es estable y es adecuada para el uso previsto, por el contrario, una clasificación de VSI de 2 o 3 indica un posible potencial de segregación y debe tomarse medidas o ajustes en la mezcla para garantizar su estabilidad.

2.4.3 Ensayo de la caja en L

La caja en L es una prueba para evaluar la capacidad de paso de las mezclas en un flujo restringido y a través de obstáculos [66]. El ensayo se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma EN 12350. En esta prueba, el aparato consiste en una caja de sección rectangular en forma de L, con una sección vertical y horizontal, separada por una puerta móvil (Figura 11). La sección vertical se llena de mezcla y luego la puerta se levanta para permitir que la mezcla fluya hacia la sección horizontal. Cuando el flujo se ha detenido, la altura al final de la sección horizontal (H_2) se expresa como una comparación de la que queda en la sección vertical (H_1).

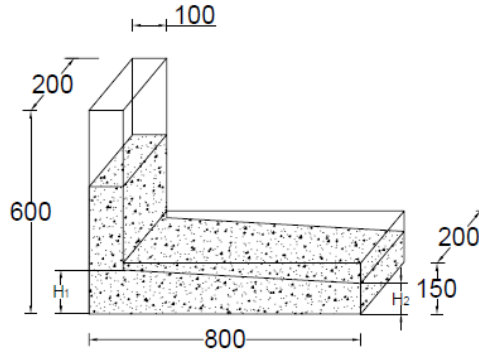


Figura 11. Ensayo de la caja en L

La relación mínima de altura en la sección horizontal con respecto a la sección vertical se considera que es 0.8 en CAC. Por otra parte, si la mezcla fluye y se consolida completamente horizontal, la relación será igual 1.0. Por lo tanto, cuanto más cerca sea esta relación a 1.0, mejor será la capacidad de paso de la mezcla.

2.4.4 Ensayo de la columna de segregación

La prueba de columna de segregación es un método para evaluar la resistencia a la segregación de las mezclas en estado estático [67]. El ensayo se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C1611. En esta prueba, el CAF se coloca dentro de un molde cilíndrico vertical (formado por tres partes) sin compactar o ejercer vibración alguna y se deja reposar durante 15 minutos (Figura 12). El concreto de la primer y última parte de la columna es recuperado y lavado a través de un tamiz con una abertura de 4.75 mm para recuperar el agregado grueso. El material recuperado es pesado en condición saturada superficialmente seca y posteriormente se calcula el porcentaje de segregación (ecuación 2.3).

$$S = \frac{2(CA_B - CA_T)}{CA_B + CA_T} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

S = Porcentaje de segregación

CA_T = Masa del agregado grueso en la parte superior de la columna [kg]

CA_B = Masa del agregado grueso en la parte inferior de la columna [kg]

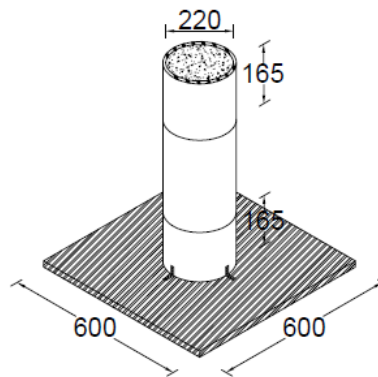


Figura 12. Ensayo de la columna de segregación

El objetivo de este método fue proporcionar mezclas idóneas para una aplicación o proyecto específico, por lo que, aun no se ha establecido un valor específico para determinar si una mezcla tiene una segregación considerable, sin embargo, generalmente se considera aceptable si el porcentaje de segregación es inferior al 10%.

2.5 Comportamiento en estado endurecido del CAF

El objetivo de esta etapa experimental es determinar la relación entre el refuerzo de fibras sintéticas y los ensayos mecánicos de compresión, flexión y cortante

directo, mediante el comportamiento en la tenacidad a la fractura para cada uno de los especímenes.

2.5.1 Elaboración de especímenes

Con respecto a la forma y geometría, se elaboraron dos tipos de especímenes, cilindros de 100 x 200 mm y vigas de 150 x 150 x 600 mm. Para la experimentación, se fabricaron un total de seis cilindros y cuatro vigas para cada una de las mezclas. Los especímenes fueron colados en una capa para evitar la reorientación de las fibras. Después del colado, los especímenes se curaron con un recubrimiento polimérico para garantizar que no existiera pérdida de la humedad. Después del día de curado, las muestras se desmoldearon y se llevaron al cuarto húmedo con una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa no menor a 95% y se mantuvieron allí hasta el día del ensayo. Las condiciones para el curado de las muestras fueron las descritas en la normativa ASTM C192. El día anterior al ensayo, las muestras se sacaron del cuarto de curado para su preparación. Los cilindros fueron cabeceados de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C617. Mientras, las vigas les fueron cortada una muesca transversal al centro de la longitud del elemento prismático. Por otra parte, los especímenes de cortante directo se obtuvieron de las muestras utilizadas para flexión, lo que permitió aumentar la semejanza de la orientación y distribución de las fibras [51]. Adicionalmente, los especímenes de cortante directo les fueron cortadas dos muescas sobre la sección transversal, con el fin de definir los planos de falla del ensayo.

2.5.2 Ensayo a compresión

El comportamiento a compresión se obtuvo en cilindros sometidos a una carga axial de compresión a la edad de 28 días. El ensayo fue controlado por desplazamiento mediante un transductor diferencial de variación lineal (LVDT) de la maquina universal Instron con capacidad de 6000 kN. La configuración de esta prueba es descrita en la Figura 13a, donde se montaron dos LVDTs con un desplazamiento máximo de 11 mm en un compresómetro, formando un ángulo de 180° grados entre ellos (Figura 13b). La información fue adquirida con un cDAQ-9188 de la marca National Instrument con una velocidad de almacenamiento de 10 Hz.

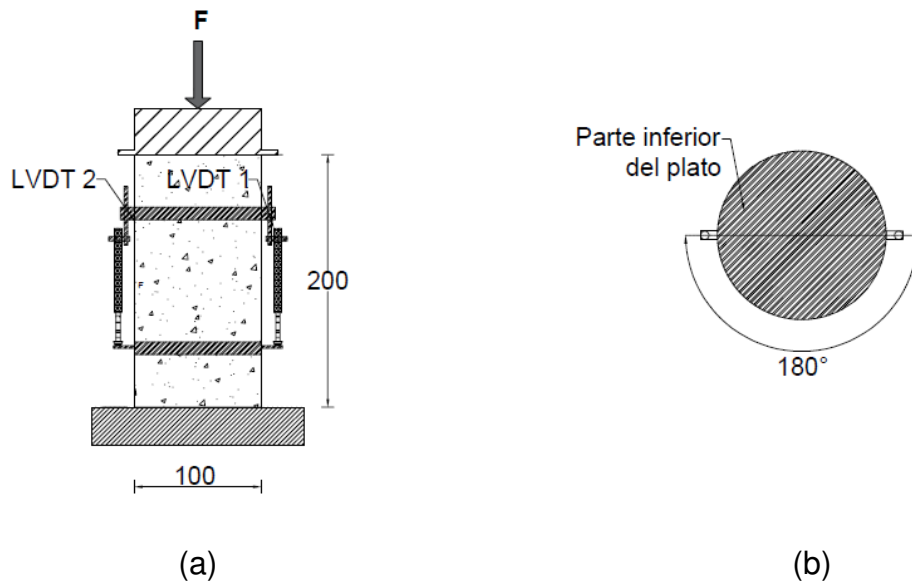


Figura 13. Ensayo a compresión: a) vista general y b) instalación de los LVDTs en el espécimen.

El promedio del desplazamiento de los dos LVDTs fue considerado como el desplazamiento del espécimen. Mientras, la carga fue tomada directamente de

la celda de carga de la maquina universal. Finalmente, se calculó el esfuerzo a compresión a partir de la ecuación 2.4 y se correlacionó con su respectiva deformación unitaria en la curva de comportamiento a compresión.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo a compresión

F = Carga aplicada [N]

A = Area de la sección transversal [mm²]

La metodología fue consistente con la especificación del RILEM TC 148-SSC, según la cual recomienda una tasa de deformación de $1 \pm 0.1 \mu\text{m/s}$ para garantizar la estabilidad del ensayo.

2.5.3 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión en vigas se realizó de acuerdo con las recomendaciones de la norma EN 14651 a la edad de 28 días. Los especímenes utilizados en la prueba de flexión de tres puntos fueron vigas con una longitud de 600 mm y una sección transversal de 150 x 150 mm. Para promover la localización del agrietamiento al centro del espécimen, fue hecha una muesca de 5 mm de ancho y 25 mm de profundidad a lo largo de la base. La configuración del ensayo constó de un sistema de soporte de rodillos de acero con un diámetro de 30 mm, que sostienen la viga con una longitud libre de 500 mm, como se muestra en la Figura 14. En dirección transversal, los dos rodillos tenían un movimiento levemente diferente, uno de los cuales podía girar alrededor de su punto medio y el otro estaba fijo.

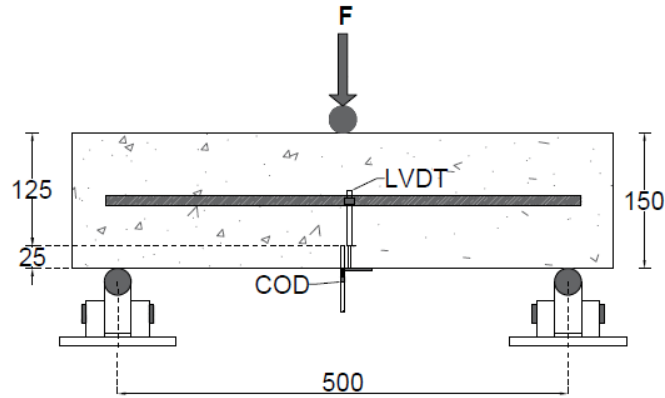


Figura 14. Configuración del ensayo a flexión

Las deformaciones de la viga se midieron con el uso de un LVDT con desplazamiento de 52 mm y un extensómetro en forma de clip (COD) con desplazamiento de 40 mm. Por otro lado, el nivel de carga se determinó con una celda de carga con capacidad de 10 toneladas. De tal manera, la deflexión de la viga se midió con el LVDT colocado con un marco rígido al centro de la viga, el cual estaba apoyado de una placa de acero situada en la parte inferior de la viga. Mientras, el desplazamiento de la abertura de la boca de la grieta (CMOD) se midió mediante el COD posicionado en la parte inicial de la muesca. Por otro lado, los niveles de carga se midieron con la celda de carga colocada en la parte superior de la configuración del ensayo. De tal manera, el esfuerzo a flexión se calculó a partir de la ecuación 2.5.

$$f = \frac{3Fl}{2bh_{sp}^2} \quad (2.5)$$

Donde:

f = Esfuerzo a flexión

F = Carga aplicada [N]

l = Longitud libre [mm]

b = Base de la sección transversal [mm]

h_{sp} = Altura efectiva [mm]

La información fue adquirida con un cDAQ-9188 de la marca National Instrument con una velocidad de almacenamiento de 10 Hz. El ensayo se controló por desplazamiento con una tasa constante de 1 $\mu\text{m/s}$, en una configuración de ensayo que finalizaba hasta los 4 mm de lectura del COD. Después del ensayo, las fibras expuestas en las dos caras de la superficie de fractura fueron contadas (Figura 15). Posteriormente, se determinó la influencia de las fibras en las resistencia residuales para cada uno de los especímenes.

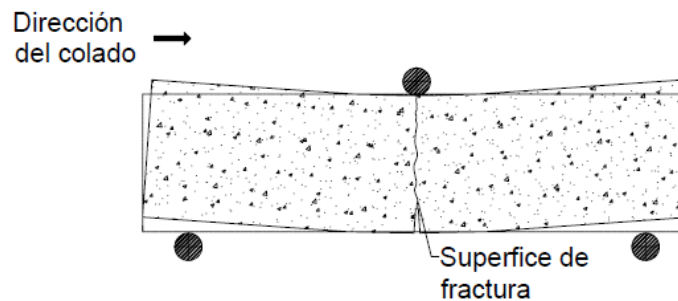


Figura 15. Superficie de fractura del ensayo a flexión

2.5.4 Ensayo a cortante directo

El ensayo a cortante directo se hizo de acuerdo con la configuración del espécimen descrito en la norma JSCE – SF6 a la edad de 28 días. Los especímenes se obtuvieron a partir de las muestras utilizadas en el ensayo de flexión en tres puntos con muesca, lo que permitió aumentar la semejanza de la orientación y distribución de las fibras en los especímenes utilizados en las

pruebas [52]. Las dimensiones de los especímenes utilizados en la prueba de cortante directo fueron vigas con una longitud aproximadamente de 300 mm y una sección transversal de 150 x 150 mm. Para promover la localización de los dos planos de falla, se cortaron dos muescas con un ancho de 5 mm y una profundidad de 40 mm sobre toda la sección transversal de la viga, como se muestra en la Figura 16. La configuración del ensayo constó de dos apoyos de 15 mm de ancho, lo suficientemente rígidos para darle soporte al espécimen, mientras, el impulsor tenía un ancho de 150 mm, lo adecuado para definir los planos de falla durante el ensayo.

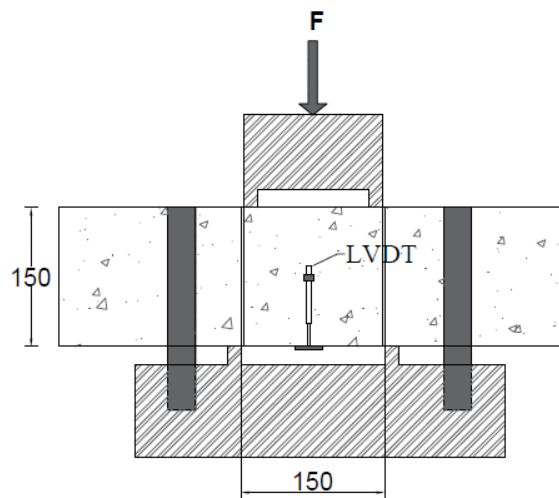


Figura 16. Configuración del ensayo a cortante directo

El desplazamiento de los planos de falla se midió con un LVDT con desplazamiento de 52 mm, soportado por una placa de acero colocada al centro del bloque de falla. En cambio, el nivel de carga se determinó con una celda de carga con capacidad de 10 toneladas, posicionada en la parte superior de la configuración del ensayo. De tal manera, el esfuerzo a cortante directo se calculó a partir de la ecuación 2.6.

$$\tau = \frac{F}{2bh} \quad (2.6)$$

Donde:

τ = Esfuerzo a flexión

F = Carga aplicada [N]

b = Base de la sección transversal [mm]

h = Altura de la sección transversal [mm]

La información fue adquirida con un cDAQ-9188 de la marca National Instrument con una velocidad de almacenamiento de 10 Hz. La velocidad del ensayo se controló por desplazamiento con una velocidad constante de 1 $\mu\text{m/s}$, de tal manera de garantizar la estabilidad del ensayo. Después del ensayo, las fibras expuestas en las caras de la superficie de fractura fueron contadas. De tal manera, se obtuvieron dos superficies de fractura por cada parte del espécimen. Posteriormente, se relacionaron el número de fibras expuestas con las propiedades de trabajabilidad de las mezclas de CAF. Asimismo, se comparó la influencia de las fibras en la energía de fractura para cada uno de los especímenes.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los materiales

3.1.1 Cemento Portland

3.1.1.1 Densidad

La densidad del CPO 40R fue de 3.03 gr/cm³. En general, la densidad puede variar entre 3.10 a 3.25 gr/cm³, con un promedio de 3.15 gr/cm³ para el cemento Portland convencional, asimismo, puede ir de 2.90 a 3.15 gr/cm³ para cementos adicionados con MCS o con mayor finura [27]. De acuerdo con su especificación, el CPO 40R es un cemento con resistencia a edades tempranas (reacción de hidratación acelerada), el cual está influenciado principalmente por su finura, debido a que su composición principal está formada por clinker y yeso. En consecuencia, se deduce la baja atribución de algún otro material en la densidad del CPO 40R.

3.1.1.2 Composición química

La composición química del CPO 40R se presenta en la Tabla 7. De acuerdo con la especificación de la norma NMX-C-414-ONNCCE, el CPO 40R presenta un excedente de 4.197% de SO₃ probablemente por la adición de yeso que se hace durante la molienda para regular su fraguado [57]. Por otro lado, al hacer la comparativa con la norma de especificación ASTM C150, el contenido Al₂O₃ y Fe₂O₃ se encuentra dentro de los requeridos en la composición química de los diferentes tipos de cementos.

Tabla 7. Composición química del cemento

Material	Composición [%]								
	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	SO₃	K₂O	MgO	SrO	Otros
CPO 40R	51.394	34.357	2.982	1.258	8.197	1.056	0.708	0.046	0.002

3.1.2 Agregados grueso y finos

3.1.2.1 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica se presenta en la Figura 17 y Figura 18 para el agregado grueso y fino, respectivamente. Conforme a la norma de especificación ASTM C33, las curvas granulométricas del agregado fino y grueso cumplieron en su mayoría con los requerimientos de distribución. De tal manera, se puede considerar que ambos materiales pueden minimizar la cantidad de pasta necesaria para una trabajabilidad específica en un concreto convencional [70]. Sin embargo, debido a la influencia de los demás materiales utilizados en la fabricación del CAF, la trabajabilidad se vio afectada adicionalmente por las fibras y la fase fluida de la mezcla.

En la granulometría del agregado fino determinada por el método de tamizado, puede observarse que cerca del 14.3% del material pasa por el tamiz No. 100 (150 μ m). Mientras, la distribución granulométrica combinada del agregado fino (método por tamizado y difracción de rayo láser), mostró que la cantidad de material que pasa el umbral de las 125 μ m, fue cerca del 14.1%. En consecuencia, el 14.1% del peso del agregado fino fue considerado como polvo de caliza y tomado en cuenta como parte de la pasta en el diseño de mezclas.

Lo anterior, debido a que el polvo de caliza tiene la capacidad de compensar la reducción de la viscosidad causada por el uso del SP.

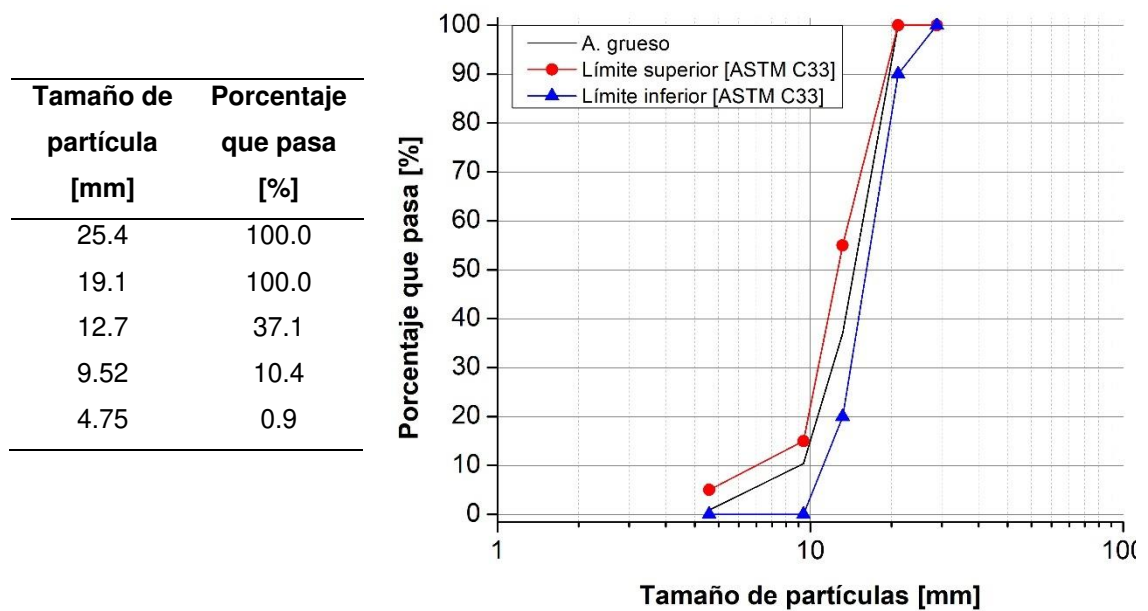


Figura 17. Distribución granulométrica del agregado grueso

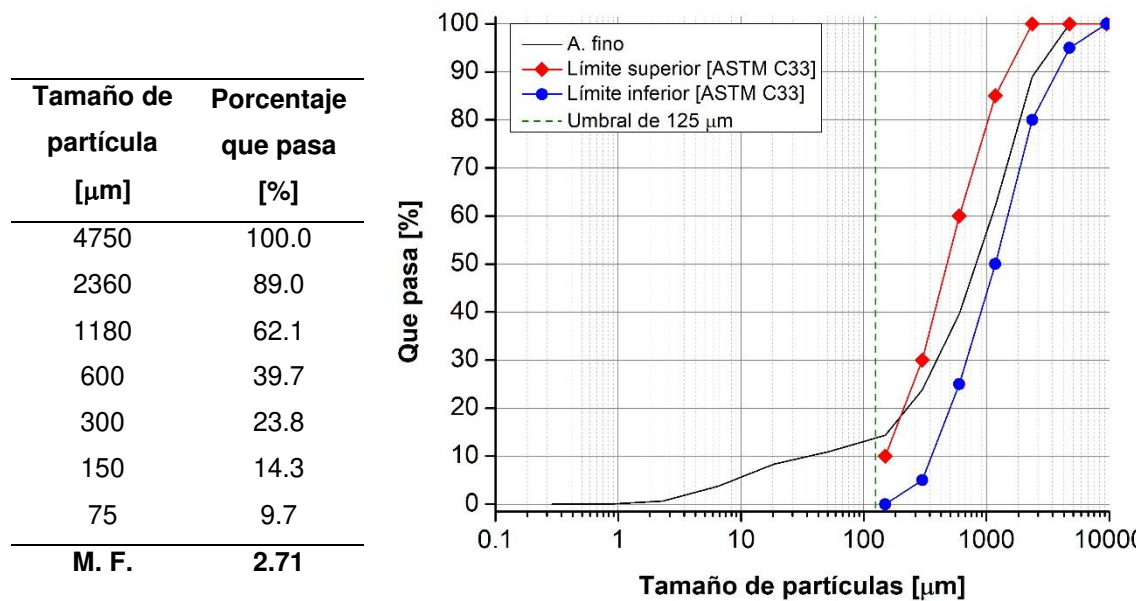


Figura 18. Distribución granulométrica del agregado fino

3.1.2.2 Densidad y absorción

La densidad y absorción de los agregados utilizados para la fabricación de las mezclas se presenta en la Tabla 8. En comparación a investigaciones realizadas con agregados de caliza de la región [53,54], se observó un valor mayor en la densidad del agregado grueso, principalmente causado por la disminución del tamaño máximo del material, que permitió favorecer el acomodo de las partículas en un volumen determinado. Así también, se observó un incremento en la absorción del agregado fino originado por la mayor cantidad de polvo de caliza en la distribución granulométrica, dado que el polvo de caliza absorbe más agua por su mayor área superficial en comparación a partículas más gruesas.

Tabla 8. Densidad y absorción de los agregados

Muestra	Densidad [gr/cm³]	Absorción [%]
A. grueso	2.59	0.72
A. fino	2.71	1.82

3.1.3 Aditivo químico

El aditivo SP de nombre Plastol Precast Plus de la compañía EUCOMEX utilizado en esta investigación tiene una densidad de 1.11 gr/cm³, lo cual es congruente con la información provista por el proveedor. Por otra parte, el contenido de agente activo fue de 44% en masa, con lo cual el 56% restantes se consideró en el diseño de mezcla como parte del agua de reacción.

3.1.4 Fibras de refuerzo

Las morfología de las fibras se muestran en la Figura 19a y Figura 19b para la fibra monofilamentada de polipropileno (P) y la fibra empaquetada de polipropileno/polietileno (PP), respectivamente. De acuerdo con la Figura 19a, se pudo observar un patrón de deformaciones en la superficie longitudinal de la fibra de P, lo que favorece en la interacción con la matriz cementante [72]. Por otra parte, la morfología de la fibra de PP(Figura 19b) mostró estar constituida por un conjunto de filamentos, de tal manera, que le permitan tener una mejor interacción con la matriz al separarse los filamentos durante el mezclado [73].

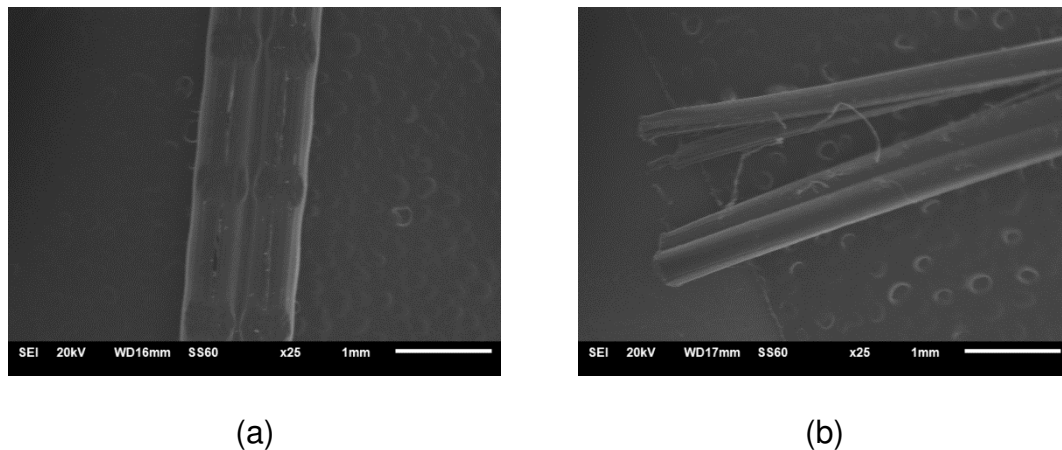


Figura 19. Morfología de la fibra: (a) P y (b) PP

De acuerdo con los proveedores, las propiedades físicas de las fibras son las que se muestran en la Tabla 9. En comparación con las demás fibras sintéticas (Tabla 1 del capítulo 1), las fibras de P y PP tienen un bajo módulo de elasticidad causado principalmente por su composición. Debido a que, las fibras de P y PP están constituidas por polímeros termoplásticos, los cuales están formados por moléculas unidas entre sí por cadenas flexibles con estructuras o con ciertas

ramificaciones, por lo cual las convierte en cadenas menos rígidas en comparación de estructuras bien definidas de termoestables o elastómeros [74]. Asimismo, se puede observar que las fibras de P y PP tienen menor densidad, a causa de la menor densificación de las cadenas que forman las moléculas de las fibras. Por otra parte, las fibras de P y PP muestran diámetros inferiores a las demás fibras sintéticas, de manera que la interacción matriz – fibra se mejora al incrementar el área superficial en contacto con la matriz cementante, aunado a las morfología específica de cada fibra.

Tabla 9. Propiedades físicas de las fibras de P y PP

Fibra	Densidad [-]	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Relación de aspecto [l_f/d_f]	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
P	0.91	54	0.77	70	585	3.5-5.6
PP	0.92	51	0.69	74	600-650	9.5

3.2 Diseño de mezclas

3.2.1 Mezcla de referencia

3.2.1.1 Optimización de la pasta

En el diseño de la mezcla de referencia, se evaluó la trabajabilidad y consistencia de las pastas en función del tiempo y la dosificación del aditivo SP. Lo anterior, con el fin de estudiar los efectos de la compatibilidad entre el cemento – aditivo SP y la dosificación óptima del SP. Los resultados presentados en la Tabla 10, muestran el comportamiento de las pastas elaboradas con variación del SP/C y una a/c de 0.40.

Tabla 10. Propiedades de las pastas con variación del SP/C

SP/C [%]	Cemento [gr]	Aditivo [gr]	Extensibilidad [mm]		
			5 minutos	30 minutos	60 minutos
0.2	600	3.0	10.9	9.9	9.6
0.3		4.7	11.3	10.7	9.8
0.4		6.1	13.2	12.9	12.2
0.6		9.6	15.2	13.8	13.4

Compatibilidad cemento – superplastificante

Conforme a los resultados de la Tabla 10, se estableció en la Figura 20 la relación entre el área formada por la extensibilidad de las pastas y los tiempos de ensayo. Es evidente según los resultados anteriores, que las áreas están influenciadas por el SP/C, debido a que incrementaron en función del aumento del SP/C. De acuerdo con Marchon [55], el efecto del SP en la trabajabilidad proviene de la inducción de fuerzas repulsivas, que reducen las fuerzas de atracción entre las partículas de cemento. Por esta razón, el efecto del SP en las pastas depende de su dosificación, naturaleza y estructura molecular. Por lo cual, se intuye la influencia del nivel de dosificación en el comportamiento de las diferentes pastas. Asimismo, en la Figura 20 se observó un patrón de comportamiento, donde el área de extensibilidad disminuyó con relación al tiempo de ensayo. Lo anterior, debido a que la trabajabilidad está influenciada por la velocidad de disolución, nucleación y/o crecimiento de las fases del cemento. Por lo cual, se atribuye que la pérdida de la trabajabilidad proviene del crecimiento de las fases durante el proceso de hidratación del cemento.

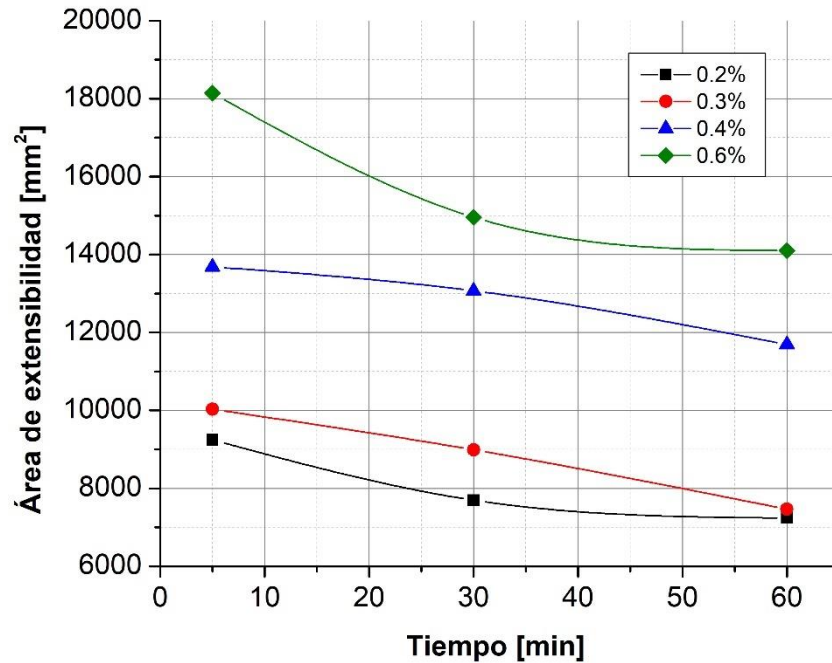


Figura 20. Compatibilidad del cemento – superplastificante

En particular, las pastas con relaciones de 0.2 – 0.3% del SP/C tuvieron menor extensibilidad, además, presentaron una consistencia rígida sin rastros de sangrado ni aglomeraciones de partículas de cemento (Figura 21a y Figura 21b). Por otro lado, los incrementos pequeños en el rango de 0.4 – 0.6% resultaron en un aumento significativo en la extensibilidad, siendo las pastas con relación de 0.4% las que presentaron un equilibrio entre la extensibilidad y estabilidad en la consistencia (Figura 21c). Debido a que, las pastas con valores superiores a los 18,000 mm² presentaron pérdida en la consistencia, causada por la segregación y sangrado (Figura 21d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21. Consistencia de las pastas con variación del SP/C: (a) 0.2%, (b) 0.3%, (c) 0.4% y (d) 0.6%

En lo concerniente, puede decirse que es un indicio positivo mantener la relación del SP/C de 0.4, debido a que resultó en un equilibrio entre el rendimiento de la extensibilidad, estabilidad y permanencia de la consistencia de la pasta. Lo anterior puede explicarse según Halim [56], como la cantidad de moléculas de polímeros provenientes del SP, que reduce la fuerza interparticular del cemento,

proporcionando la fluidez adecuada sin presentar rastros de segregación ni sangrado.

Dosificación óptima de SP

De acuerdo con los resultados de la Tabla 10, se estableció en Figura 22 el área formada por la extensibilidad de las pastas con la variación del SP/C, con el fin de determinar la cantidad óptima de aditivo SP. De tal forma, se observó la pérdida de extensibilidad en los tiempos de 5, 30 y 60 minutos después del mezclado, el cual es el tiempo requerido para que un concreto sea trabajable con el propósito de su colocación, compactación y acabado.

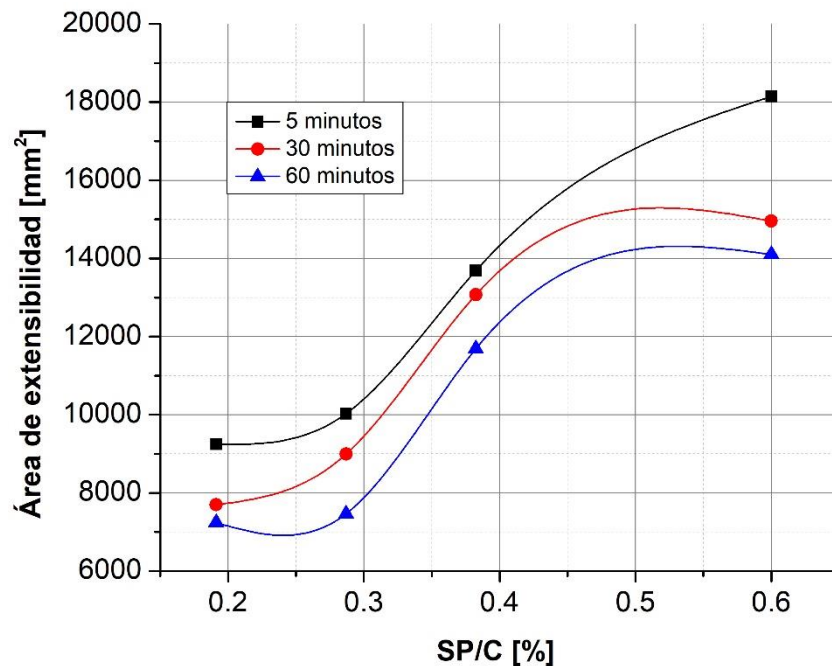


Figura 22. Dosificación óptima del aditivo SP

En general, el punto óptimo de dosificación del SP se pudo percibir como un punto de inflexión en las curvas, debido a que es la variación más grande de la

extensibilidad con relación del SP/C. De esta manera, se observó que la dosis óptima del SP puede estar entre un rango de 0.35 – 0.45% del SP/C, lo que equivale a 5.6 – 7.2 ml de SP por kg de cemento. De tal manera, la dosificación óptima del aditivo SP permitió proporcionar la máxima fluidez de la pasta, dado que cualquier adición de SP fuera de este rango tendrá un efecto mínimo.

3.2.1.2 Optimización del esqueleto granular

De acuerdo con Han [57], el diseño adecuado de la mezcla de un CAC no solo puede obtenerse a partir de una pasta con altas propiedades de extensibilidad, sino que también, debe tener en cuenta la influencia de los agregados. Lo anterior, debido a que se debe asegurar una suspensión uniforme de las partículas durante el transporte y colocación. Por esta razón, con el fin de determinar la combinación de agregados que proporcionen las propiedades en estado fresco adecuadas a las especificaciones para el uso del CAC [14,26], se elaboraron mezclas de CAC con relaciones entre el agregado grueso y fino (G/A) de 0.4, 0.5 y 0.6 en peso, denotadas como M-04, M-05 y M-06, respectivamente. La dosificación de aditivo SP se hizo en su proporción más baja dentro del rango de dosificación óptima (5.6 ml de SP por kg de cemento).

En la Tabla 11, se presentan los principales parámetros de las mezclas utilizadas para el diseño de las referencias de CAC, asimismo, se muestran los valores recomendados por las guías para la elaboración del CAC. Particularmente, se observó que los parámetros relacionados a la cantidad de polvos en la mezcla: la relación del volumen de agua – volumen de polvos (V_w/V_p) y la cantidad de pasta, se encuentran dentro de los valores recomendados, siendo la relación G/A menor

la que proporcionó mayor cantidad de polvos, debido a la adición mayor de polvo de caliza. Por otro lado, los parámetros concernientes al agregado grueso y fino se encontraron superiores a los valores recomendados. Sin embargo, la condición anterior favorece a las mezclas a disminuir la posibilidad de colisión o contacto entre los componentes, beneficiando directamente a la capacidad de paso del CAF.

Tabla 11. Parámetros en el diseño de la mezcla de referencia

Parámetros		M-04	M-05	M-06	Valores recomendados	
					ACI 237[14]	EFNARC[26]
G/A	[kg/kg]	0.40	0.50	0.60	-	-
a/c	[kg/kg]	0.40	0.40	0.40	0.32 - 0.45	-
V _w /V _p	[m ³ /m ³]	0.86	0.88	0.90	-	0.85 – 1.10
Polvos	[kg/m ³]	643.06	632.06	621.97	-	350 – 650
Agua	[l/m ³]	191.03	191.03	191.03	-	150 – 210
Pasta	[%/m ³]	37.76	37.72	37.68	34 – 40	30 – 38
A. fino	[% del peso total del agregado]	0.71	0.67	0.63	-	48 – 55
Mortero	[%/m ³]	81.28	78.24	75.60	68 – 72	-
A. grueso	[%/m ³]	18.47	21.50	24.15	28 – 32	27 – 36

Conforme a las mezclas propuestas, en la Tabla 12 se muestra su comportamiento en los ensayos en estado fresco. De manera general, la mezcla con relación G/A de 0.5 exhibió una capacidad de paso y relleno, y resistencia a la segregación conforme a lo recomendado por las guías para la producción del CAC [14,26]. No obstante, con el fin de explicar el desempeño de cada mezcla con relación a sus principales parámetros, a continuación, se muestra la variación de cada una de ellas en los ensayos del flujo de revenimiento, la caja en L y la columna de segregación.

Tabla 12. Propiedades en estado fresco de la mezcla de referencia

Mezcla	G/A [kg/kg]	Flujo de revenimiento			Caja en L	Columna de segregación
		d_{prom} [mm]	t_{50} [s]	VSI	h_2/h_1 [mm/mm]	S [%]
M-04	0.4	605	4.2	2	0.8	11.6
M-05	0.5	630	2.1	0	1.0	14.0
M-06	0.6	660	1.5	3	1.0	16.2

Ensayo del flujo de revenimiento

En el flujo de revenimiento, el comportamiento de las mezclas fue influenciado principalmente por la cantidad de polvos en la mezcla, debido a que la extensibilidad promedio se disminuyó conforme la cantidad de polvos se incrementaba. Lo anterior, en virtud del aumento de la cantidad de polvo de caliza en la mezcla causado por la disminución de la relación G/A. Debido a que, el polvo de caliza demanda más agua por su área superficial y le confiere mayor rigidez a la mezcla.

En particular, la mezcla M-04 mostró una aglomeración del agregado grueso sobre toda la extensión del flujo de revenimiento (Figura 23a). Mientras, la mezcla M-05 se estableció como un CAC con una dispersión homogénea de las partículas, asimismo, mostró nulas señales de segregación y/o sangrado derivadas de la estabilidad conferida por la proporción del polvo de caliza (Figura 23b). En el caso de la mezcla M-06, el aumento de la relación G/A y la correspondiente disminución del polvo de caliza ocasionó una segregación severa, la cual propicio que el mortero fluyera hacia los extremos y las partículas más gruesas quedaran al centro del flujo (Figura 23c).

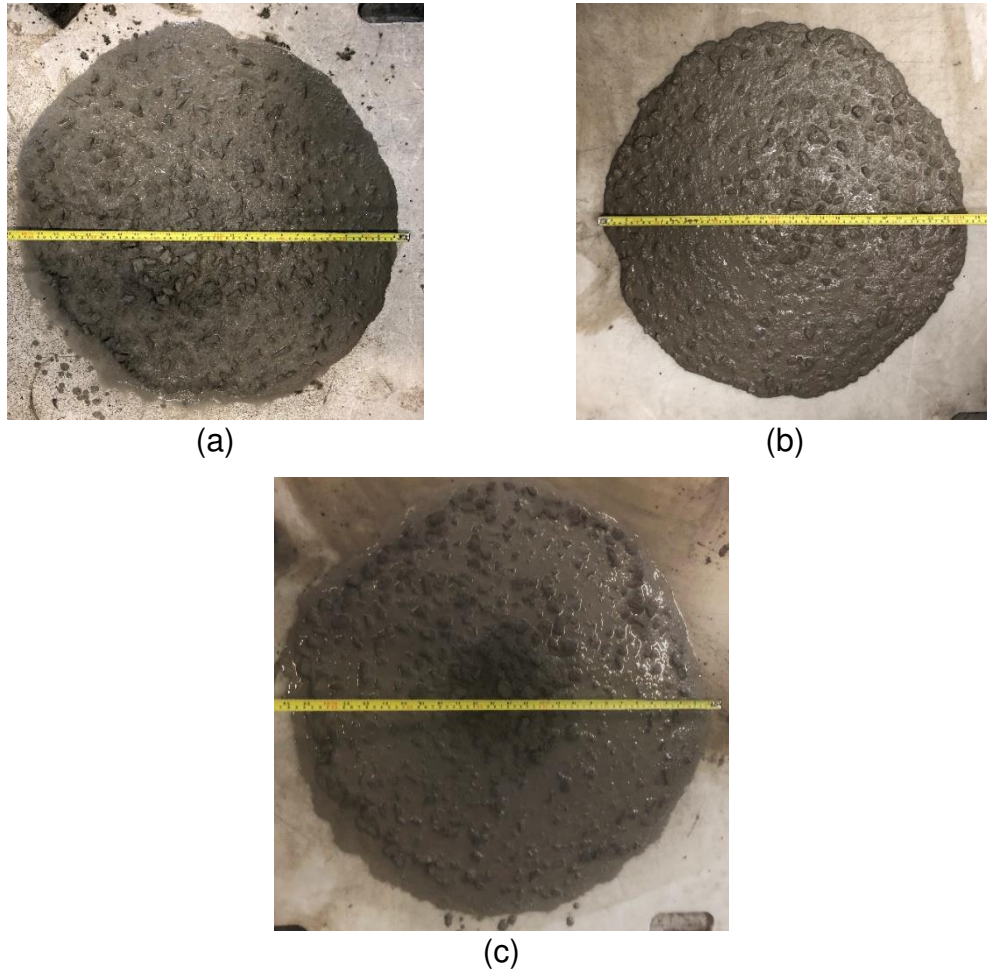


Figura 23. Flujo de revenimiento de las mezclas: a) M-04, b) M-05 y c) M-06

Como se muestra en la [Tabla 12](#), la relación G/A tiene un papel importante en el tiempo de propagación del CAC durante la prueba del flujo de revenimiento (t_{50}). En la mezcla M-04, se obtuvo un t_{50} más alto con relación a las demás combinaciones, debido a la mayor rigidez de la mezcla. Por otro lado, el contenido de polvos de la mezcla M-05 le confirió estabilidad a la mezcla para tener una suspensión de partículas y fluidez adecuadas. En la mezcla M-06, el aumento del

polvo de caliza ocasionó una disminución en el t_{50} , sin embargo, la mezcla presentaba una consistencia inestable.

Ensayo de la caja en L

La capacidad de paso se midió con la relación (H_2/H_1) entre las alturas del flujo en las posiciones determinadas. De acuerdo con los resultados, se muestra que la capacidad de paso está influenciada por la cantidad de polvos en la mezcla. Lo anterior, debido a que al incrementar la relación G/A se obtuvo menor cantidad de polvo de caliza, lo que propició mayor cantidad de agua disponible para lubricar las partículas, favoreciendo la trabajabilidad de la mezcla [58]. Particularmente, la mezcla M-04 mostró menor capacidad de paso en comparación con las demás mezclas, dado que al disminuir el agua disponible aumenta la fricción entre las partículas, lo que redujo la fluidez del CAC. Por otra parte, la relación G/A para la mezcla M-05 le confirió la estabilidad para tener una capacidad de paso adecuada, conforme con las guías para la producción del CAC [14,26]. Por último, la mezcla M-06 presentó una alta capacidad de paso, sin embargo, la baja cantidad de polvos provocó una inestabilidad en la mezcla, mostrando la aglomeración de los agregados en la parte inferior de la caja.

Ensayo de la columna de segregación

La prueba de columna de segregación se utilizó para medir la estabilidad del CAC en condiciones estáticas. De acuerdo con los resultados, la segregación aumentó conforme la relación G/A aumentaba, principalmente debido a la disminución del polvo de caliza en la mezclas. En vista de que, al disminuir la cantidad de polvo en la mezcla, el agua disponible se incrementa, lo que disminuye la densidad de

la pasta, reduciendo la capacidad de suspensión del agregado [59]. En particular, la cantidad de polvo de caliza en la mezcla M-04 pudo contribuir a la estabilidad de la mezcla al detener la sedimentación de las partículas. En cambio, como resultado de la modificación de la cantidad de polvos derivados del aumento de la relación G/A en las mezclas M-05 y M-06, condujo a un aumento en el porcentaje de segregación, a causa de que no existía la cantidad suficiente de polvos que mantuviera en suspensión a las partículas de los agregados.

3.2.2 Mezclas de CAF

De acuerdo con Ferrara [5], la adición de las fibras en una matriz de concreto afecta su comportamiento en estado fresco, debido en su mayoría a la gran área superficial de las fibras y la fricción inducida entre ellas y/o con los agregados. De esta manera, el rendimiento aceptable del CAF en estado fresco no puede obtenerse simplemente incorporando el refuerzo de fibras en la matriz de CAC. Por esta razón, se realizó un ajuste en la composición del esqueleto granular a partir del recubrimiento de mortero equivalente (t_{cm}) para las diferentes mezclas de CAF.

3.2.2.1 Esqueleto sólido

En la Tabla 13, puede observarse los parámetros antes del ajuste del esqueleto granular. Donde, el volumen del agregado grueso (V_g) y fino (V_s) se obtuvieron del proporcionamiento de la mezcla de referencia de CAC. Mientras, el área de las fibras (A_f) se calculó a partir del área superficial de cada fibra y su respectivo volumen de dosificación en cada mezcla. Mientras, el volumen de vacíos (V_v) se determinó mediante la combinación del agregado grueso y las fibras.

Tabla 13. Parámetros antes del ajuste del esqueleto granular

Parámetros		Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Factor de fibra	[mm/mm]	0	42	56	70	44	59	74
V_g	[m ³ /m ³]	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
V_s	[m ³ /m ³]	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
V_v	[m ³ /m ³]	0.43	0.52	0.55	0.57	0.54	0.56	0.59
A_g	[m ² /m ³]	202.64	202.64	202.64	202.64	202.64	202.64	202.64
A_f	[m ² /m ³]	0.00	31.11	30.00	51.85	34.82	46.43	58.04
t_{cm}	[mm]	1.76	1.12	1.01	0.83	1.02	0.87	0.73

De acuerdo con la Tabla 13, el t_{cm} se disminuyó de manera proporcional con el incremento del factor de fibra. Donde, la fibra de PP redujo mayormente el t_{cm} para todos los volúmenes de dosificación. Lo anterior, es causado principalmente por la mayor área superficial de la fibra de PP, la cual influye indirectamente en la colocación de las partículas del agregado, aumentado el V_v de la mezcla. De acuerdo con González [60], las fibras de mayor relación de aspecto necesitan más cantidad de fase fluida para ser envueltas y lubricadas dentro de la matriz cementante, esto principalmente por su área superficial. De esta forma, es necesario compensar la fase fluida con el incremento del factor de fibra.

De tal manera, se realizó el ajuste en el t_{cm} de las mezclas de CAF, con el fin de pretender conseguir las propiedades en estado fresco de la mezcla de referencia de CAC. En la Tabla 14, se muestra los parámetros principales después del ajuste del t_{cm} . Donde, se observa la disminución del V_g y el respectivo aumento del V_s , con el objetivo de mantener una fase capaz de envolver y lubricar al agregado grueso y las fibras. De tal modo, el t_{cm} se incrementó proporcionalmente con el aumento del factor de fibra, tras el ajuste del esqueleto granular (Figura 24). El ajuste anterior, se proporcionó de tal manera de garantizar la estabilidad,

fluidez y dispersión de las fibras. En general, el proporcionamiento para las mezclas de CAF se muestra en la Tabla 15.

Tabla 14. Parámetros después del ajuste del esqueleto granular

Parámetros		Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Factor de fibra	[mm/mm]	0	42	56	70	44	59	74
V_g	[m ³ /m ³]	0.21	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18
V_s	[m ³ /m ³]	0.42	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.44
t_{cm}	[mm]	1.76	1.26	1.21	1.02	1.18	1.05	0.93

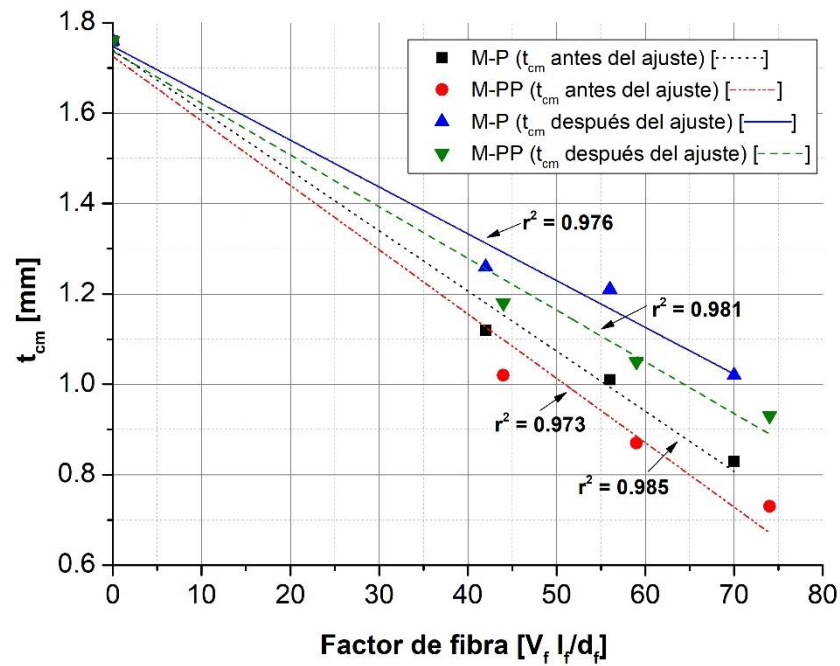


Figura 24. Efecto del t_{cm} con la variación del factor de fibra

Tabla 15. Proporcionamiento de las mezclas de CAF

Materiales			Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Cemento	[kg/m ³]	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0
Agua	[kg/m ³]	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
A. fino	[kg/m ³]	1042.3	1170.2	1187.2	1195.8	1178.4	1187.2	1204.8	
A. grueso	[kg/m ³]	557.0	503.2	486.7	478.3	494.9	486.8	469.9	
Aditivo SP	[kg/m ³]	3.0	3.0	3.1	3.1	3.0	3.1	3.2	
Tipo de fibra	[-]	-	Polipropileno			Polipropileno/Polietileno			
Volumen	[%]	-	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0	
Relación de aspecto	[mm/mm]	-	70	70	70	74	74	74	
Factor de fibra	[mm/mm]	-	42	56	70	44	59	74	
Contenido	[kg/m ³]	-	5.5	7.3	9.1	5.5	7.4	9.2	

Empaquetamiento del esqueleto sólido

A partir de la distribución del esqueleto sólido, se comparó las mezclas realizadas con el modelo teórico de máximo empaquetamiento de Andreasen y Andersen modificado (A&A mod) (Figura 25). Donde, el esqueleto sólido del CAC se estableció estar constituido por el cemento y el agregado grueso y fino. Mientras, en las mezclas de CAF se fijó adicionalmente la dosificación de las fibras. En particular, las fibras se idealizaron como una partícula esférica con un diámetro equivalente, de acuerdo con lo propuesto por Ferrara [8]. Tras la idealización, se definió el diámetro de 0.39 y 0.36 mm para la fibra de P y PP, respectivamente.

Haciendo uso del coeficiente de determinación (R^2), se estableció el valor $q = 0.15$, debido a que fue el valor que tuvo mayor ajuste entre las mezclas con el modelo de A&A mod. De acuerdo con Yu [61], los valores más altos ($q > 0.5$) conducen a mezclas más gruesas, mientras que los valores más bajos ($q < 0.25$) dan como resultado mezclas de concreto con gran cantidad de partículas finas. Brouwers [62], demostró que un rango de valores de q de 0 a 0.28 daría como

resultado un empaque óptimo. En la Tabla 16, se observó que las mezclas arrojaron un coeficiente de R^2 prácticamente similar. Además, el valor q indica que las mezclas poseen un alto grado de empaquetamiento, dando como resultado que haya más agua disponible para actuar como lubricante en estado fresco [63]. Mientras, en estado endurecido permite obtener un mayor volumen sólido y una menor porosidad.

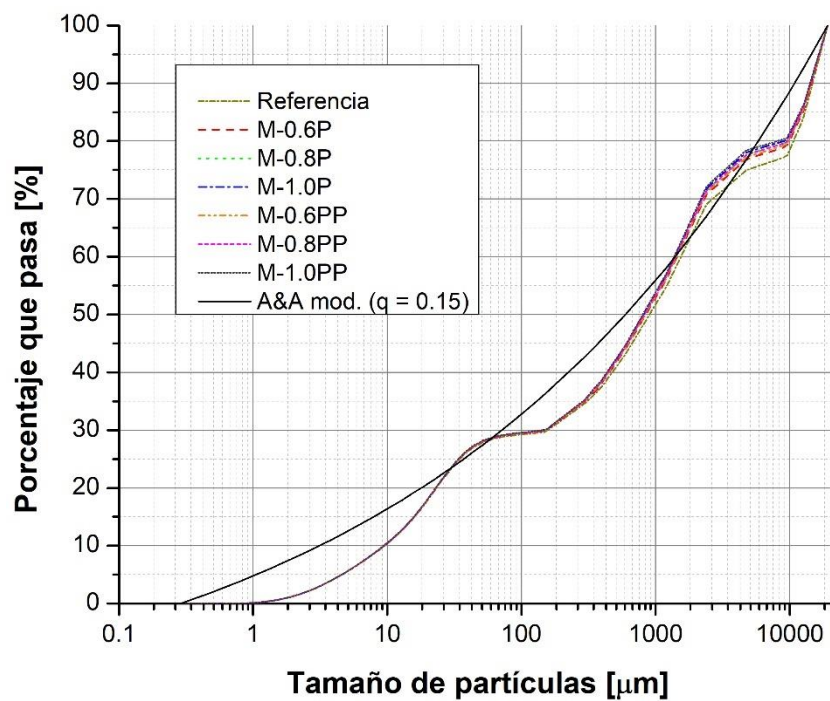


Figura 25. Comparación del empaquetamiento de la distribución de las diferentes mezclas con el modelo A&A mod.

Tabla 16. Coeficiente de determinación de las diferentes mezclas

Mezcla	Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Coeficiente R^2	0.985	0.985	0.985	0.986	0.986	0.986	0.986

3.3 Comportamiento en estado fresco

3.3.1 Ensayo del flujo de revenimiento

En la Tabla 17, se muestra la capacidad de relleno promedio para las diferentes mezclas. En general, el diámetro promedio de extensibilidad varió entre 550 a 630 mm. De manera que, las mezclas estuvieron dentro de la clasificación SF1 (550 – 650 mm), de acuerdo con las guías de especificación del CAC [64], lo cual las hace apropiadas para estructuras de concreto sin refuerzo o ligeramente reforzadas.

Tabla 17. Comportamiento del ensayo del flujo de revenimiento

Mezcla	Factor de fibra [mm/mm]	Extensibilidad [mm]	t₅₀ [s]	VSI
Referencia	0	625	2.12	0
M-0.6P	42	590	2.52	0
M-0.8P	56	575	3.12	0
M-1.0P	70	555	4.12	0
M-0.6PP	44	585	2.75	0
M-0.8PP	59	575	3.50	0
M-1.0PP	74	552	4.46	0

De acuerdo con el comportamiento, se observó que el factor de fibra influye en la extensibilidad de las mezclas (Figura 26). Según Güneyisi y Martinie [65,66], la reducción de la extensibilidad se lo atribuyen a la adicción de fibras, las cuales tienen un área superficial más grande con relación a los otros materiales. En virtud de que, las fibras requieren mayor volumen de fase fluida (pasta o mortero)

para ser envueltas y lubricadas adecuadamente para reducir la fricción entre las fibras y con los agregados.

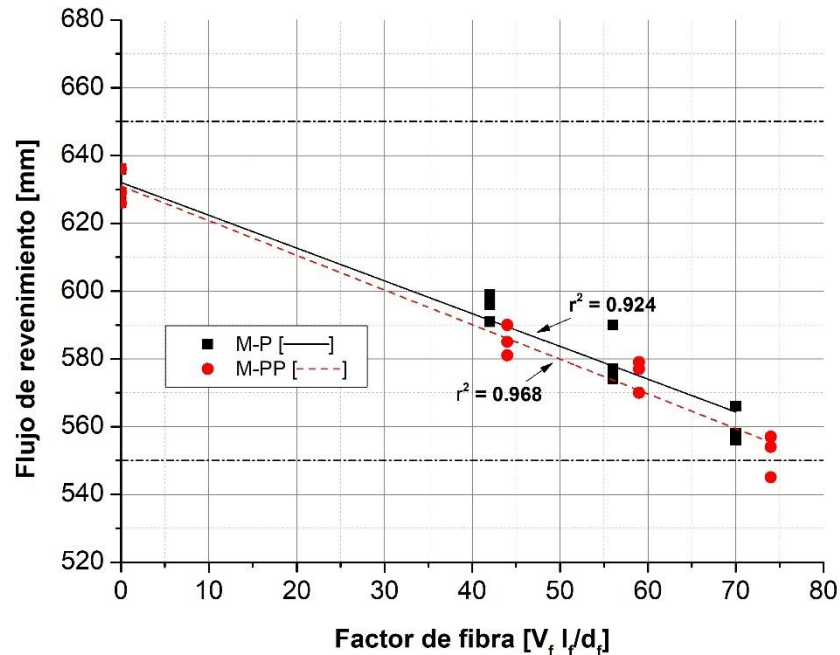


Figura 26. Efecto del factor de fibra en el flujo de revenimiento

Como se puede observar en la Figura 27, el diseño proporcionó mezclas de CAF con un VSI = 0. Asimismo, se mostró una dispersión homogénea entre las fibras, los agregados y la pasta. Mientras, el tiempo de propagación de las mezclas durante el flujo de revenimiento (t_{50}), se vio influenciado con el incremento del factor de fibra (Tabla 17), mostrando una tendencia al incrementar el t_{50} con relación al aumento del factor de fibra. De acuerdo con Irki [67], el incremento del t_{50} es una forma cualitativa de intuir el incremento de la viscosidad en la mezcla. Donde, las especificaciones para el uso del CAC establecen un rango de $t_{50} \leq 10$ s para considerar una buena capacidad de relleno, lo que permite a las mezclas autonivelarse y tener un mejor acabado superficial.

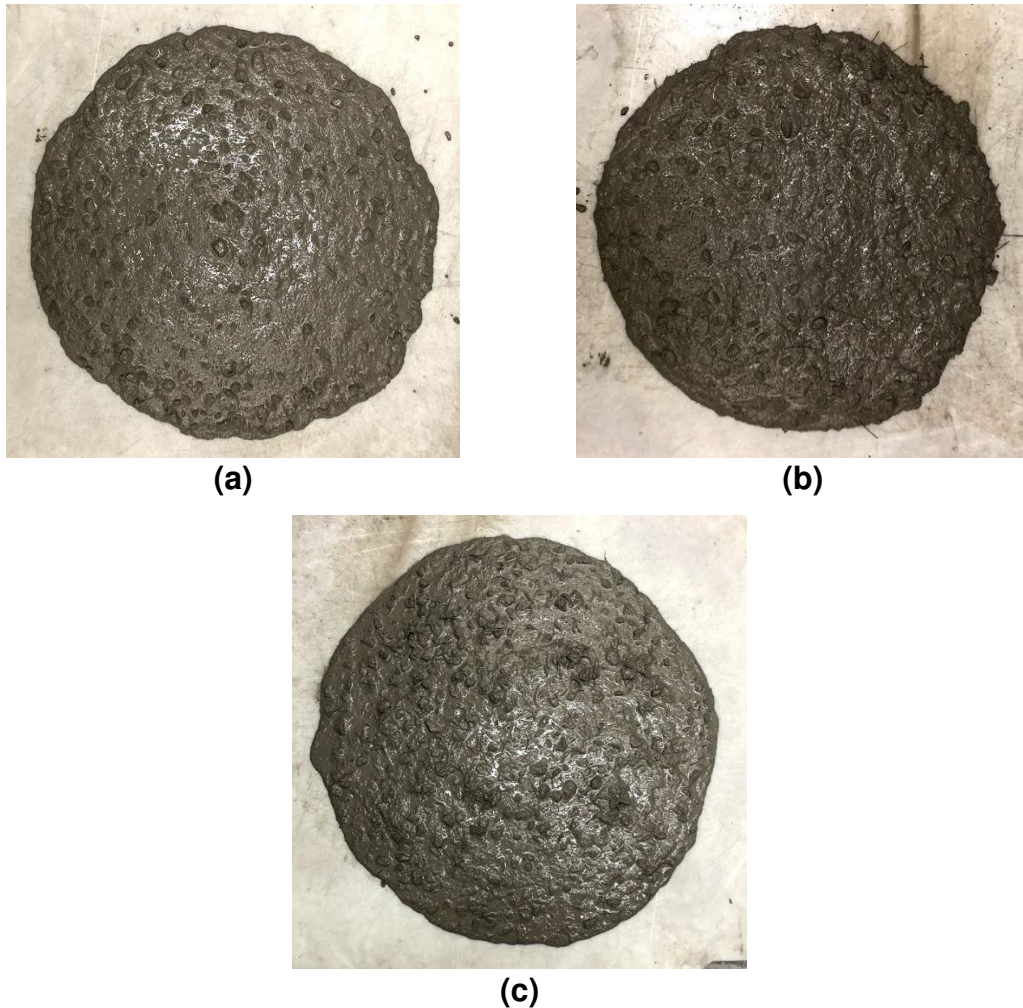


Figura 27. Flujo de revenimiento de las mezclas: a) Referencia, b) M-1.0P y c) M-1.0PP

3.3.2 Ensayo de la caja en L

La capacidad de paso de las mezclas se expresó mediante la relación promedio de la altura de las mezclas en la posición inicial y final de la caja en forma de L (h_2/h_1) (Figura 28). En la Tabla 18, se muestra la relación h_2/h_1 promedio de las diferentes mezclas. En general, la relación varió desde 1 a 0.75. De acuerdo con las guías de diseño de CAC, este valor debe estar entre 1 – 0.8 para la aplicación en general [26]. Por lo que, las mezclas por debajo de este rango (M-1.0P y M-

1.0PP) es necesario considerar la geometría del elemento y la densidad del refuerzo para tener una aplicación adecuada.



Figura 28. Prueba de caja en L

Tabla 18. Comportamiento del ensayo de la caja en L

Mezcla	Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Factor de fibra [mm/mm]	0	42	56	70	44	59	74
h_2/h_1 [mm/mm]	1.00	0.88	0.82	0.78	0.85	0.80	0.75

En general, puede observarse una tendencia a disminuir la relación h_2/h_1 conforme el factor de fibra se incrementa (Figura 29). En comparación al t_{50} de la prueba de flujo de revenimiento, se exhibió que las mezclas con altos tiempos de propagación (M-1.0P y M-1.0PP) tuvieron menor capacidad de paso. De acuerdo con Metwally [68], las mezclas de CAF ejercen una resistencia a fluir debido a la viscosidad, causada principalmente por la fricción entre las fibras y con los agregados. Por esta razón, al incrementar el factor de fibra derivado del aumento

del volumen de fibras o de la relación de aspecto, las mezclas disminuyen su capacidad de paso.

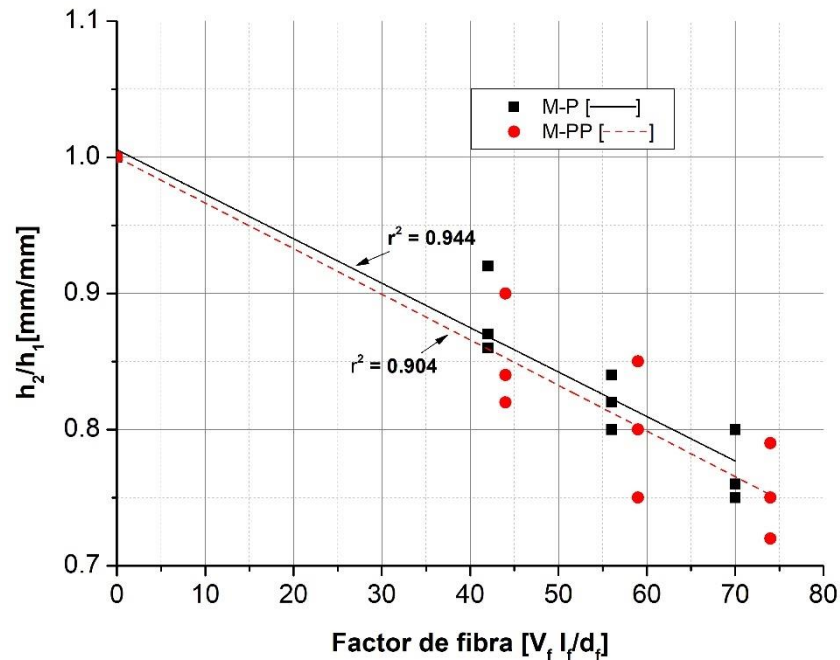


Figura 29. Relación entre h_2/h_1 y el factor de fibra

3.3.3 Ensayo de la columna de segregación

La resistencia a la segregación estática se evaluó en las diferentes mezclas (Tabla 19), esta propiedad se midió con la columna de segregación (Figura 31). En general, la segregación se estableció entre 14.0 – 7.3%. De acuerdo con especificaciones para el uso de CAC, no existe un umbral específico para determinar cuando la segregación es tolerable. Sin embargo, en el CAC se considera aceptable si el porcentaje de segregación es inferior al 10% [14]. De esta manera, los valores fuera de este rango, se deberá considerar la homogeneidad y calidad durante la colocación y después de esta.

Tabla 19. Comportamiento del ensayo de la columna de segregación

Mezcla	Referencia	M-0.6P	M-0.8P	M-1.0P	M-0.6PP	M-0.8PP	M-1.0PP
Factor de fibra [mm/mm]	0	42	56	70	44	59	74
Segregación [%]	14.0	10.3	9.4	8.5	9.7	8.8	7.3

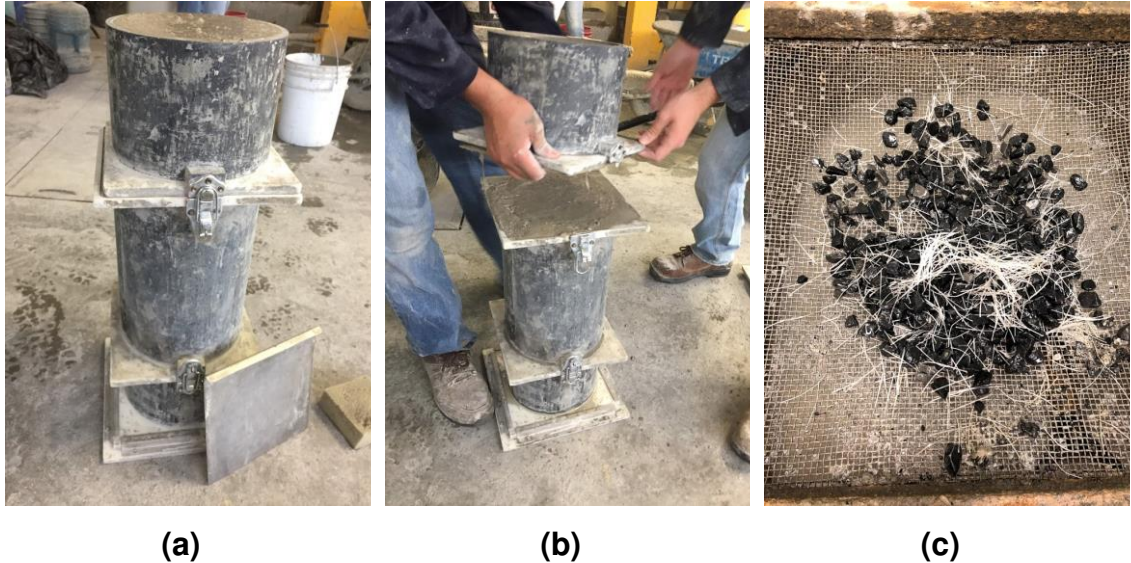


Figura 30. Prueba de columna de segregación: (a) geometría del ensayo, (b) separación de la muestra y (c) obtención del agregado grueso y las fibras

De acuerdo con los resultados, se observó una influencia del factor de fibra en la segregación de las mezclas con las fibras de P y PP (Figura 31). De acuerdo con Ramge [69], evitar la cantidad de agua libre es una de las preposiciones para reducir el riesgo de sangrado y segregación, sin embargo, se necesita un mínimo de agua libre para obtener una fluidez aceptable. Por esta razón, las mezclas con menor segregación tuvieron menor desempeño en los ensayos relacionadas a la capacidad de paso y relleno. Por lo que, se intuye que la fricción entre las fibras y con los agregados acentuó la viscosidad al incrementar el factor de fibra.

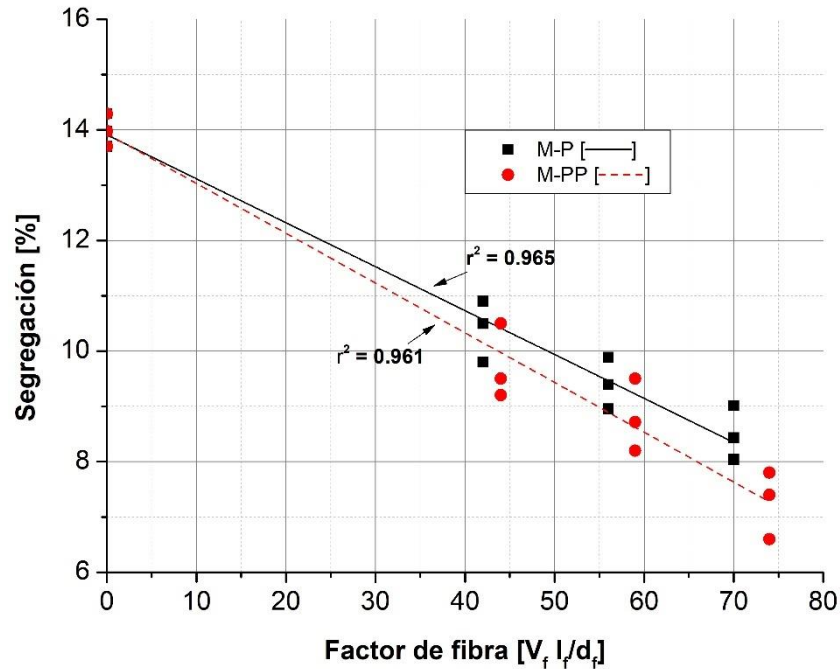


Figura 31. Relación entre el porcentaje de segregación y el factor de fibra

3.4 Pruebas en estado endurecido

3.4.1 Ensayos a compresión

El promedio de la resistencia a la compresión (f_c), el módulo de elasticidad (E_c) y su correspondiente coeficiente de variación (CV) se muestran en la Tabla 20. De acuerdo con los resultados, se mostró un aumento en la resistencia a la compresión del CAF en comparación a la referencia, observándose un incremento máximo hasta del 4.5%. Por otro lado, el módulo de elasticidad tuvo una variación con respecto a la referencia, con una disminución de hasta el 2.4% y un incremento máximo del 4.9% para los especímenes M-0.6P y M-1.0PP, respectivamente.

Tabla 20. Propiedades del comportamiento a compresión del CAF

Espécimen	Factor de fibra	f_c	CV	E_c	CV
	[mm/mm]	[MPa]	[%]	[GPa]	[%]
Referencia	0	56.2	2.2	41.2	3.2
M-0.6P	42	57.2	1.6	41.1	3.1
M-0.6PP	44	56.4	1.6	42.7	1.2
M-0.8P	56	58.5	4.5	42.6	5.8
M-0.8PP	59	57.8	3.4	41.9	7.3
M-1.0P	70	58.7	8.5	40.2	2.3
M-1.0PP	74	56.7	8.9	43.2	5.4

En general, el comportamiento a compresión no mostró una tendencia entre el incremento del factor de fibra y el aumento en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los diferentes especímenes de CAF no se redujo en comparación a la referencia. Lo anterior, puede ser explicado a partir de la metodología utilizada para el diseño de las mezclas de CAF, la cual permitió compensar la adición de las fibras con el aumento del t_{cm} . Debido a lo cual, la cantidad de agua libre disminuyó por el incremento de polvo de caliza intrínseco al ajuste del agregado fino. Lo anterior, puede ser contrastado con lo investigado por Kwan [70], quien mostró que la adición de polvo de caliza en mezclas CAC trae consigo el aumento en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, debido a la disminución del agua libre por las variaciones en la absorción del agua y el contenido de humedad del agregado.

Conforme a evidencia experimental, se ha encontrado una variabilidad en los resultados referentes al comportamiento a compresión [32,35,39]. Entre los

cuales, se establece que el volumen de dosificación de fibras no afecta la resistencia a la compresión. Mientras, otras investigaciones han propuesto varias tendencias inadecuadas al rendimiento del material. Generalmente, el factor de fibra se ha utilizado para examinar el efecto de las fibras en especímenes elaborados a partir de una referencia de CAC.

De esta manera, en la Figura 32 se puede observar la resistencia a la compresión normalizada con la variación del factor de fibra ($V_f l_f/d_f$). Donde, el valor normalizado está dado por la relación entre la resistencia máxima del CAF y la resistencia máxima de la referencia de CAC (CAF/CAC). Como se puede observar, la variación de la resistencia máxima a la compresión generalmente se encuentra dentro del rango de $\pm 20\%$. Mientras, los especímenes realizados en esta investigación tuvieron una variante de $\pm 5\%$. Según Madandoust [20], esta variabilidad puede ser explicado por la composición de la mezclas, el procedimiento de ensayo y el diseño de mezcla adoptado. De acuerdo con lo anterior, se intuye que la metodología utilizada permitió disminuir la variabilidad en la resistencia a la compresión. Debido a que, las mezclas proporcionadas de CAF son altamente dependientes a la mezcla de referencia de CAC, en virtud del ajuste realizado en el t_{cm} a partir del factor de fibra.

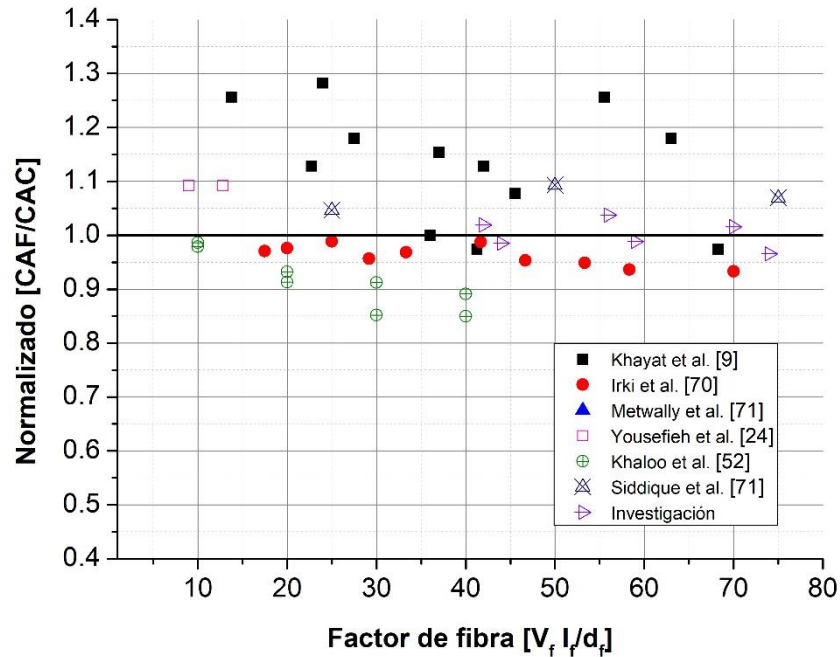


Figura 32. Variación de la relación CAF/CAC con el factor de fibra

3.4.1.1 Curvas esfuerzo – deformación

En la Figura 33, se muestran las curvas promedio de esfuerzo – deformación a compresión de cada una de las mezclas. En todas las mezclas, se observaron dos etapas durante el ensayo, la respuesta pre – agrietamiento y post – agrietamiento. En la etapa de pre – agrietamiento, se observó una región ascendente elástica lineal hasta la deformación correspondiente a la resistencia a la compresión. Sin embargo, más allá de la resistencia máxima, la dosificación de fibras estableció una influencia en la etapa post – agrietamiento. En relación a la etapa post - agrietamiento de los especímenes de CAF, Aslani [72] refirió este comportamiento como el mecanismo derivado del puenteo de las fibras una vez que la matriz se ha agrietado. De esta forma, el concreto es capaz de soportar esfuerzos posteriores a la deformación causada por el esfuerzo máximo.

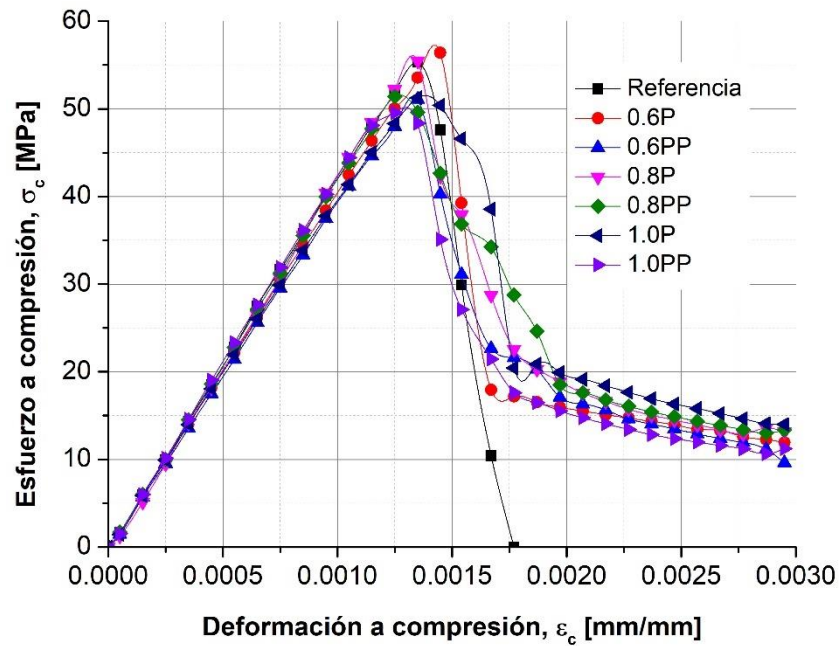


Figura 33. Comportamiento a compresión de las diferentes mezclas

De acuerdo con la Figura 33, el comportamiento de los diferentes especímenes muestra una tendencia similar hasta una deformación unitaria de 0.001. Para deformaciones mayores, el refuerzo de fibras propició un comportamiento diferente. Con lo que, se deduce la influencia del refuerzo de fibras desde la etapa pre – agrietamiento. Lo anterior está sustentado por Xu [73], quien refirió que el daño real del concreto no puede revelarse a partir de la observación a nivel macro, ya que la evolución del daño está inducido desde la formación de las microgrietas iniciales. De esta manera, se intuye que la inclusión de las fibras es lo suficiente significativo para asegurar la formación y propagación de las grietas de manera estable.

Con respecto a la diferencia entre el comportamiento de las fibras de P y PP, ambas fibras mostraron fluctuar con respecto a la referencia hasta la carga máxima. Más allá de la carga máxima, el rendimiento de cada una de las curvas no fue predecible en términos de capacidad de carga. Debido a que, la tendencia no se mantuvo constante durante la etapa de post – agrietamiento. Por esta razón, fue necesario evaluar la absorción de energía del refuerzo relativo al espécimen de referencia.

3.4.1.2 Energía de fractura

La energía de fractura (área bajo la curva de la gráfica esfuerzo – deformación a compresión) hasta la carga máxima (G_{fc}) y la energía de fractura después de la carga máxima (G_{Fc}) y su correspondiente coeficiente variación (CV) se muestra en la Tabla 21. Donde, los resultados mostraron no estar influenciados al factor de fibra, observándose un incremento máximo dado en el espécimen M-1.0P del 45.6% y 358.1% para la G_{fc} y G_{Fc} , respectivamente.

Tabla 21. Energía de fractura del CAF a compresión

Especimen	Factor de fibra	G_{fc}	G_{Fc}
	[mm/mm]	[KPa]	[KPa]
Referencia	0	38.6	9.1
M-0.6P	42	45.1	23.5
M-0.6PP	44	43.0	24.7
M-0.8P	56	41.0	31.3
M-0.8PP	59	44.5	29.7
M-1.0P	70	56.2	41.6
M-1.0PP	74	41.9	32.3

De acuerdo con lo anterior, el refuerzo de fibras propició una contribución durante la respuesta de pre – agrietamiento y post – agrietamiento. Sin embargo, la energía de fractura posterior al agrietamiento fue mayor que la obtenida antes del agrietamiento. De acuerdo con Nejadi [73], las fibras absorben más energía durante la etapa post – agrietamiento, debido al mecanismo que establece al soportar la separación de las partes agrietadas.

Particularmente, la fibra de P tuvo mayor absorción de energía posterior al agrietamiento. Sin embargo, la fibra de P tiene menor área superficial en comparación de la fibra de PP. Por esta razón, se infiere que debido a su rendimiento superior en las propiedades en estado fresco en comparación con la fibra PP, le permitió una mejor colocación dentro del espécimen. Lo anterior, condujo a una mayor probabilidad de que una fibra interceptara una grieta. De acuerdo con Neves [74], la adición deficiente de las fibras puede causar perturbaciones en la matriz, las cuales generan defectos en forma de vacíos, que provocan el comienzo en el agrietamiento. De modo que, el CAF se vuelve perceptible a disminuir su comportamiento mecánico.

3.4.2 Ensayos a flexión

3.4.2.1 Curvas esfuerzo – deflexión

En la Figura 34, se observa el promedio del comportamiento a flexión, determinado por el esfuerzo y su correspondiente deflexión ($f - \delta$). Donde, el esfuerzo máximo se estableció en 5.3 ± 0.05 MPa y una deflexión promedio de 0.11 mm para las diferentes mezclas. En particular, la variación del esfuerzo máximo se debe a la poca o nula influencia de las fibras en ese nivel de

deformación [75]. A consecuencia de que, durante las primeras etapas de la carga, la interacción entre la fibra y la matriz es de naturaleza elástica, donde las deformaciones prevalecen entre la dirección longitudinal de la fibra y del concreto para establecer una ausencia de desplazamiento relativo entre ellos.

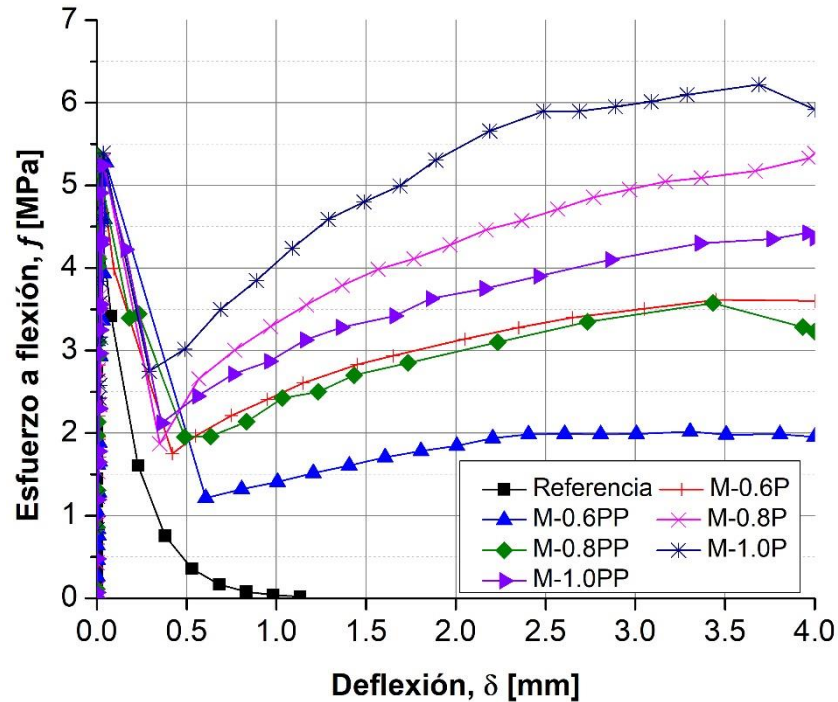


Figura 34. Comportamiento $f-\delta$ de las diferentes mezclas

De acuerdo al modelo analítico de transferencia de esfuerzo de la zona elástica propuesto por Cox [76], la eficiencia del refuerzo de fibras depende en gran medida del esfuerzo de tensión que se transfiere desde la matriz a través del cortante elástico en la interfaz matriz – fibra. Principalmente, este mecanismo está influenciado por características de la fibra (longitud, radio y módulo de elasticidad), la matriz (módulo de cortante de la matriz) y su interacción (radio de la matriz alrededor de la fibra). Sin embargo, debido a que la resistencia al

cortante elástico en la interfaz matriz – fibra no excederá la resistencia a la tensión de la fibra [77], se deduce la influencia de la resistencia máxima de la matriz cementante y/o mecanismos relacionados al control de las microfisuras (puenteo de fibras) en el esfuerzo máximo a flexión.

Conforme al comportamiento posterior al agrietamiento, los especímenes de CAF exhibieron una primera región caracterizada por la disminución del esfuerzo. Durante esta etapa, las fibras estabilizaron las grietas generadas en el primer agrietamiento y las que han comenzado a propagarse a través del espécimen [75]. Principalmente, este mecanismo de soporte se transmitió progresivamente hasta iniciar una segunda región, representada por el incremento de la deflexión con el aumento del esfuerzo (endurecimiento por deflexión). Lo anterior, debido a la acción de las fibras a través de las grietas, las cuales adquirieron las cargas a través de un proceso relacionado a la resistencia a la desunión y extracción de la interface matriz – fibra [78]. De esta manera, el comportamiento posterior al agrietamiento mostró estar influenciado por el tipo y volumen de fibras.

En particular, los especímenes reforzados con la fibra de P tuvieron mayor capacidad de esfuerzo en la región post – agrietamiento, en comparación de los realizados con la fibra de PP. Conforme a Li [79] las deformaciones en la superficie de las fibras dan como resultado un aumento del área superficial en contacto con la matriz cementante. Asimismo, conducen a interacciones mecánicas locales entre la fibra y la matriz. En consecuencia, la capacidad superior de esfuerzo de los especímenes reforzados con la fibra de P, se le puede atribuir a la mayor longitud, que le permitió obtener una transferencia de esfuerzo

más efectiva, fomentado por las diferentes deformaciones en la superficie de la fibra.

Energía de fractura

La energía de fractura a flexión (G_{Ff}), se determinó como el área debajo de la curva $f - \delta$. En la Figura 35, se muestra la correlación entre el volumen de fibras y la energía de fractura promedio de los especímenes reforzados con la fibra de P y PP, según la cual la energía de fractura tiende a aumentar linealmente con el incremento del volumen de fibras. Principalmente, este incremento se debe a que la matriz almacena la suficiente energía que, durante la extensión de las grietas, libera más energía de la que absorbe [80]. Por consiguiente, las fibras adquieren parte de la energía sobrante de la matriz mediante un mecanismo relacionado al proceso de desunión y extracción del refuerzo. Este mecanismo, permitió incrementar la energía de fractura a razón del aumento en el volumen de fibras, principalmente por la mayor área superficial de las fibras en acción en el control del agrietamiento.

Por otra parte, el incremento en el contenido de fibras de 0.6, 0.8 y 1.0% provocó un aumento del 61.4, 52.2 y 39.4% de la fibra P en comparación de la PP, respectivamente. Esta tendencia, mostró que la geometría del refuerzo P estableció mejor efectividad durante el mecanismo de desunión y extracción de las fibras que unen las grietas. Lo cual, le permitió absorber mayor cantidad de energía de la matriz agrietada.

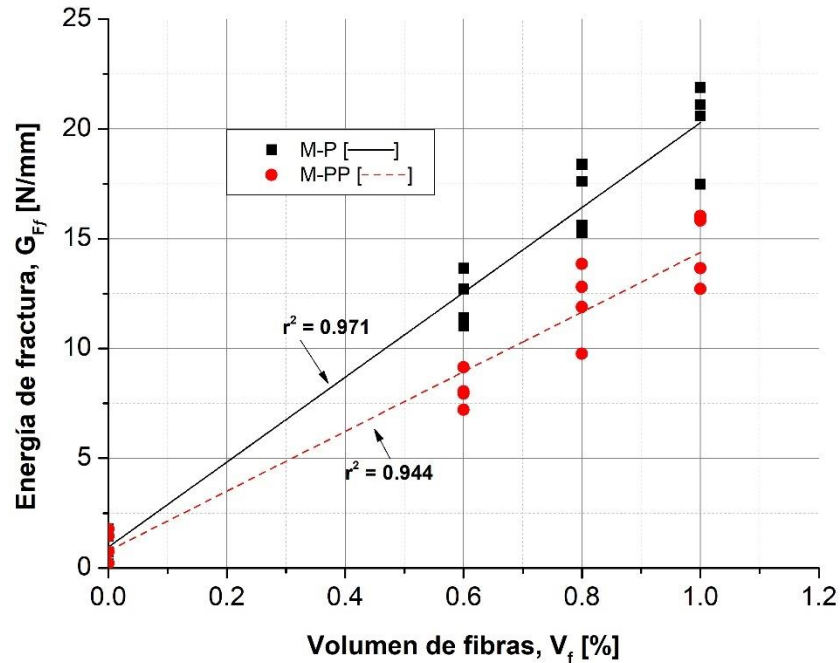


Figura 35. Variación de la energía de fractura con el volumen de fibras

3.4.2.2 Resistencia residual a flexión

En la Figura 36, se observa el promedio del comportamiento a flexión para las diferentes mezclas, determinado por el esfuerzo y la abertura de la boca de la grieta (CMOD) (f – CMOD). Particularmente, los especímenes de CAF mostraron un comportamiento elástico desde el comienzo del ensayo hasta llegar a una etapa inelástica causada por la formación de microgrietas [81]. Esta fase inelástica continuo hasta que se alcanzó la carga máxima. Posteriormente, la coalescencia de las microgrietas en macrogrietas provocó la etapa descendente en la región post – agrietamiento. Paralelamente, las fibras estabilizaron las grietas generadas en un proceso transmitido progresivamente. Seguidamente, el mecanismo de acción de las fibras propició el incremento del esfuerzo con relación al aumento del CMOD.

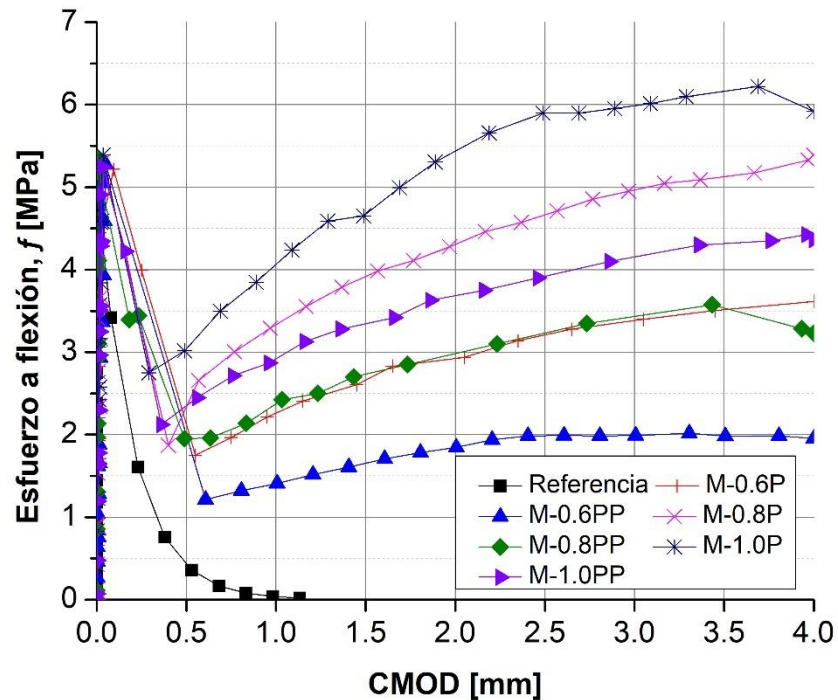


Figura 36. Comportamiento f – CMOD de las diferentes mezclas

De acuerdo con los parámetros del comportamiento a flexión descritos por la EN – 14651, el esfuerzo al inicio de la primer grieta (f_L), se precisó como el esfuerzo máximo hasta un CMOD de 0.05 mm (Limite de proporcionalidad). Mientras, la resistencia residual j – ésima ($f_{R,j}$) para $j = 1, 2, 3$ y 4 , se estableció en el CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, respectivamente. Siendo $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$ el estado de servicio y limite, correspondientemente. De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 22, la fibra de P tuvo un mejor comportamiento en todas las resistencias residuales. En cuanto al estado de servicio ($f_{R,1}$), la fibra de P expuso un incremento del 50.0, 31.6 y 7.14% en comparación de la fibra de PP para el volumen de 0.6, 0.8 y 1.0%, respectivamente. Mientras, en el estado limite ($f_{R,3}$) mostró la misma tendencia con un aumento del 65.0, 53.3 y 26.1%. Considerablemente, este comportamiento fue una medida clara del rendimiento general de la fibra. Por lo

que se establece la atribución efectiva en la interacción con la matriz, en el control de la formación y coalescencia de las grietas.

Tabla 22. Parámetros de resistencia residual del comportamiento $f - \text{CMOD}$

Espécimen	f_L	CV	$f_{R,1}$	CV	$f_{R,2}$	CV	$f_{R,3}$	CV	$f_{R,4}$	CV
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
Referencia	5.2	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-
M-0.6P	5.3	0.9	1.8	7.9	2.8	8.5	3.3	8.8	3.6	9.2
M-0.6PP	5.2	2.2	1.2	7.1	1.6	7.8	2.0	5.6	2.0	6.5
M-0.8P	5.3	0.6	2.5	4.4	3.9	4.7	4.6	5.6	5.1	8.1
M-0.8PP	5.3	1.9	1.9	10.5	2.6	9.5	3.0	8.4	3.2	9.5
M-1.0P	5.2	1.6	3.0	4.7	4.8	4.8	5.8	4.1	6.1	5.7
M-1.0PP	5.3	3.3	2.8	4.8	4.1	1.0	4.6	0.9	4.1	7.1

En cuanto al comportamiento residual de la fibra de P y PP, ambas fibras mostraron tener mayor capacidad de esfuerzo durante el estado limite en comparación con el estado de servicio, esta tendencia mayor en relación con la de otras fibras utilizadas en la industria (Figura 37). Lo anterior, es debido a la insuficiencia en el control de la formación de las microgrietas. Por lo que, se establece una capacidad de esfuerzo mínimo en pequeñas deformaciones en comparación al CAF reforzado con fibras de acero. De ahí que, el CAF con fibras de P y PP debe sufrir una mayor deformación para establecer el mecanismo de acción del refuerzo de fibras. De esta manera, se puede establecer que el refuerzo de fibras de P y PP es más efectivo durante la creación y desarrollo de las macrogrietas.

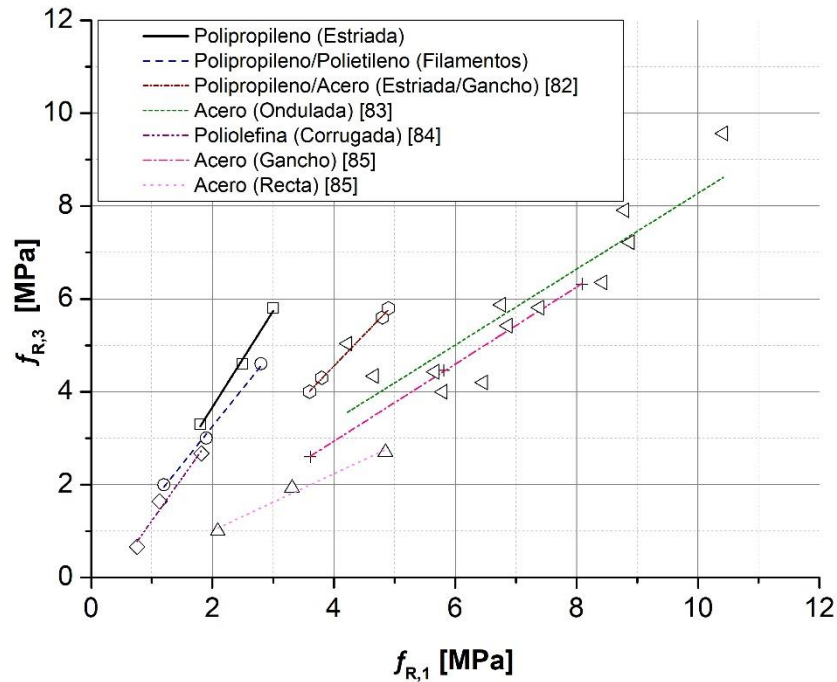


Figura 37. Relación entre la resistencia residual $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$

3.4.2.3 Influencia de las fibras

En la Figura 45, se muestra la superficie de fractura expuesta durante el ensayo a flexión. En general, la sección transversal mostró una distribución homogénea de las fibras para las diferentes mezclas. Asimismo, se observó que la mayoría de las fibras expuestas quedaban embebidas cerca de la mitad de su longitud. Donde, la mayoría de las fibras de P expusieron hendiduras que iniciaron en el borde de su longitud y se adentraron un par de milímetros dentro de la sección (Figura 39a). Mientras, la fibra de PP se separó en pequeños filamentos en su parte extraída (Figura 39b).

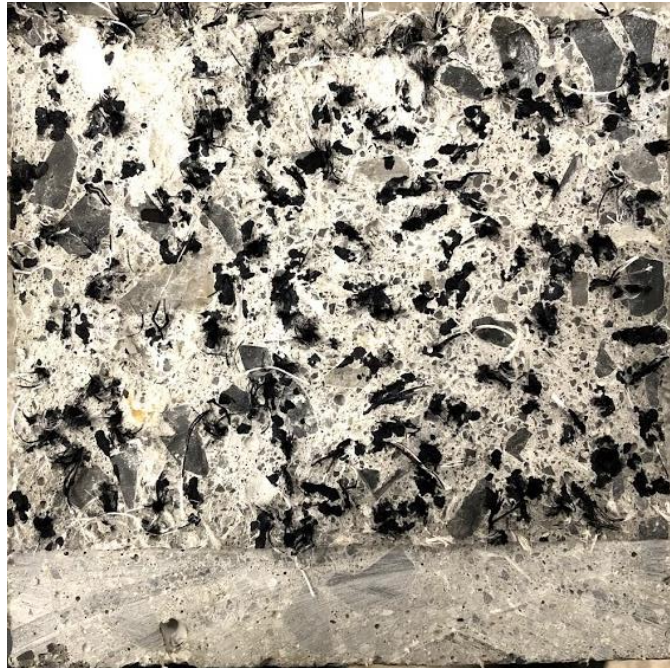
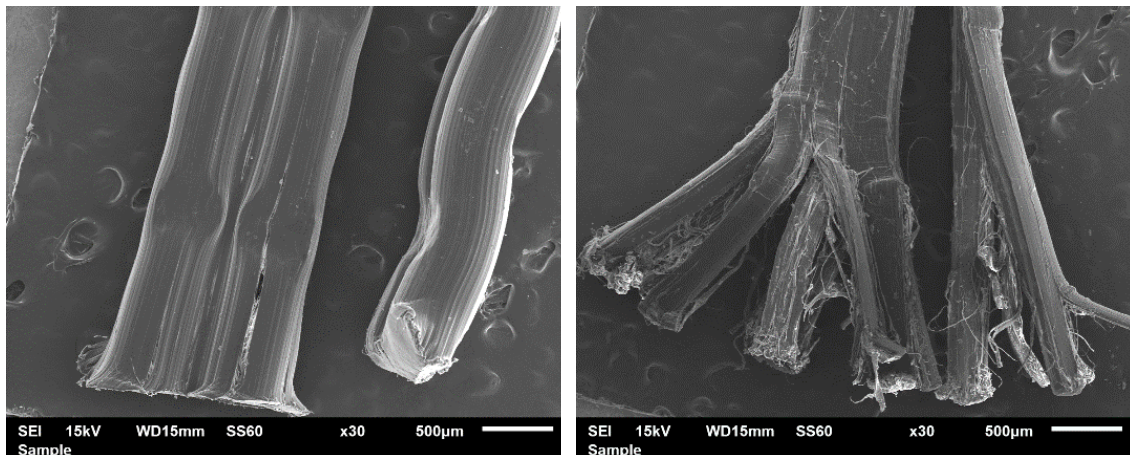


Figura 38. Distribución de las fibras sobre la superficie de fractura



(a)

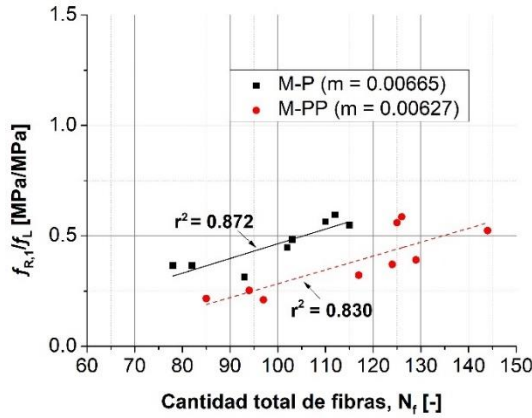
(b)

Figura 39. Refuerzo extraído del ensayo a flexión: (a) fibra de polipropileno (P) y (b) fibra de polipropileno/polietileno (PP)

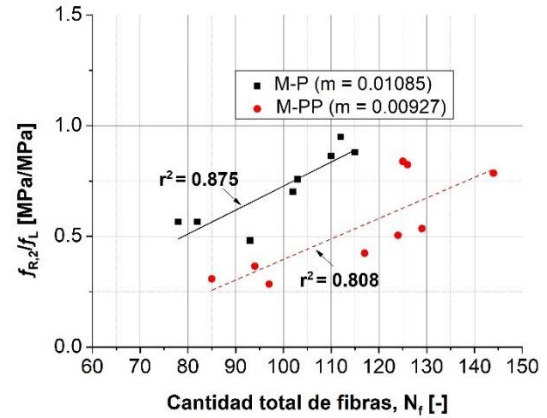
Según Macanovskis [86], las fibras se deforman por la acción de la fricción causada en la fibra durante el proceso de desunión y extracción. No obstante, Lerch [87] observó que durante el mezclado las fibras pueden sufrir daños,

caracterizados por la formación de rugosidades y raspaduras en la superficie. De esta manera, se intuye que las deformaciones en la superficie de las fibras expuestas fueron originadas por un conjunto de procesos relacionados al mezclado y la interacción mecánica de la fibra con la matriz durante su extracción.

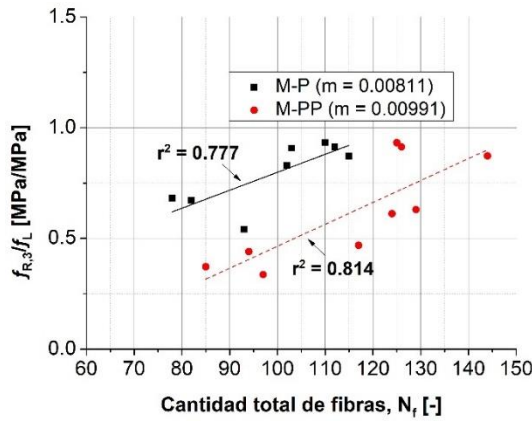
En la Figura 40, se muestra la correlación entre el número total de fibras en la superficie de fractura y la resistencia residual normalizada de las diferentes mezclas. En particular, la resistencia residual normalizada mostró una tendencia a aumentar linealmente con el número de fibras. Al comienzo del comportamiento post – agrietamiento (Figura 40a), la cantidad total de fibras no fue tan efectiva, debido a que la capacidad de esfuerzos fue menor en comparación a las demás resistencias residuales. Lo anterior, es una medida clara de la insuficiencia del refuerzo en el control de la formación de las macrogrietas. Consecutivamente, esta tendencia fue cambiando a razón del incremento en el CMOD, mostrando un incremento en la capacidad de esfuerzos con la misma cantidad total de fibras (Figura 40b y Figura 40c). Finalmente, el refuerzo de fibras estableció el mayor soporte de esfuerzo en la relación $f_{R,4}/f_L$ (Figura 40d). Lo que muestra que el mecanismo de acción de las fibras se estableció de manera más efectiva en un nivel de deformación mayor.



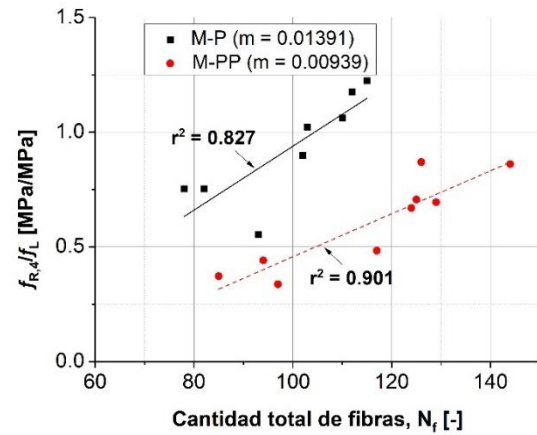
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40. Relación entre la cantidad total de fibras y la resistencia residual normalizada:
(a) $f_{R,1}/f_L$, (b) $f_{R,2}/f_L$, (c) $f_{R,3}/f_L$ y (d) $f_{R,4}/f_L$

En el caso del rendimiento específico de cada fibra, los especímenes reforzados con la fibra de PP mostraron más cantidad de fibras expuestas en la superficie de fractura. Sin embargo, las resistencias residuales normalizadas siempre se quedaron por debajo de los reforzados con la fibra de P. Si bien, la fibrilación de la fibra PP aumentó el área superficial de contacto y mejoró el anclaje mecánico con la matriz. No fue suficiente para compensar el aumento de las interacciones mecánicas locales de la fibra de P con la matriz, causado por sus múltiples

deformaciones longitudinales. De acuerdo con lo mostrado por Alberti [88], las fibras sintéticas de polipropileno pueden aumentar con un factor de 3 su resistencia de unión cuando la fibra ha sido fibrilada. Análogamente, Naaman [89] informó que las fibras sintéticas con deformaciones pueden aumentar el enlace interfacial con un factor de 7, en comparación de las fibras rectas. De tal manera, se puede establecer la influencia de las propiedades del refuerzo en el comportamiento post – agrietamiento del CAF.

3.4.3 Ensayos a cortante directo

3.4.2.1 Curvas esfuerzo – desplazamiento

En la Figura 41, se muestra el comportamiento a cortante por fricción o cortante directo, determinado por el esfuerzo y su correspondiente desplazamiento ($\tau - \Delta$). En general, los especímenes de CAF presentaron dos regiones:

Primera región

Inicialmente, se mostró un comportamiento elástico desde el comienzo del ensayo hasta llegar a una fase inelástica precedente de la carga máxima. Al comienzo de esta región, el espécimen no exhibió ninguna grieta en la superficie de los planos de falla (Figura 42a). No obstante, cerca del 80% de la resistencia máxima al cortante se establecieron microgrietas diagonales, las cuales fueron responsables del inicio del comportamiento inelástico del material (Figura 42b). Consecutivamente, al llegar a la resistencia máxima las microgrietas localizadas se convirtieron en múltiples agrietamientos, los cuales se unieron con el incremento del desplazamiento (Figura 42c).

Segunda región

Después de este momento, el esfuerzo de corte disminuyó gradualmente hasta alcanzar un valor residual principalmente influenciado por el tipo y volumen de fibras. Durante esta región, los múltiples agrietamientos diagonales cambiaron de trayectoria a una alineada con el eje de la carga (Figura 42d). Particularmente, este proceso se le conoce como la formación y propagación de las grietas tipo *wings* [90,91]. Por último, las grietas tipo wings se fusionaron debido a la distribución altamente localizadas, formando un plano de falla sobre toda la sección transversal.

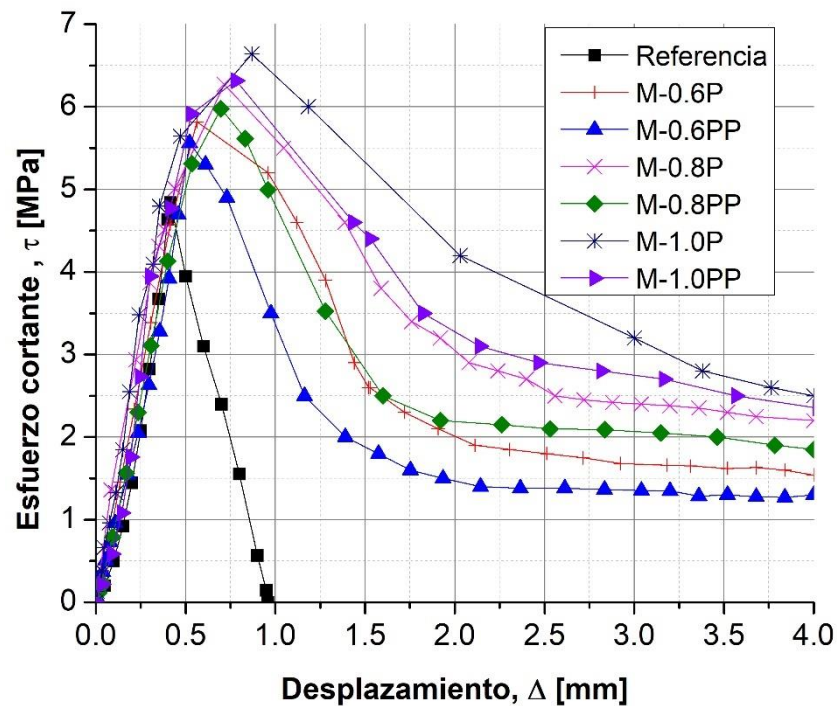


Figura 41. Comportamiento $\tau - \Delta$ de las diferentes mezclas

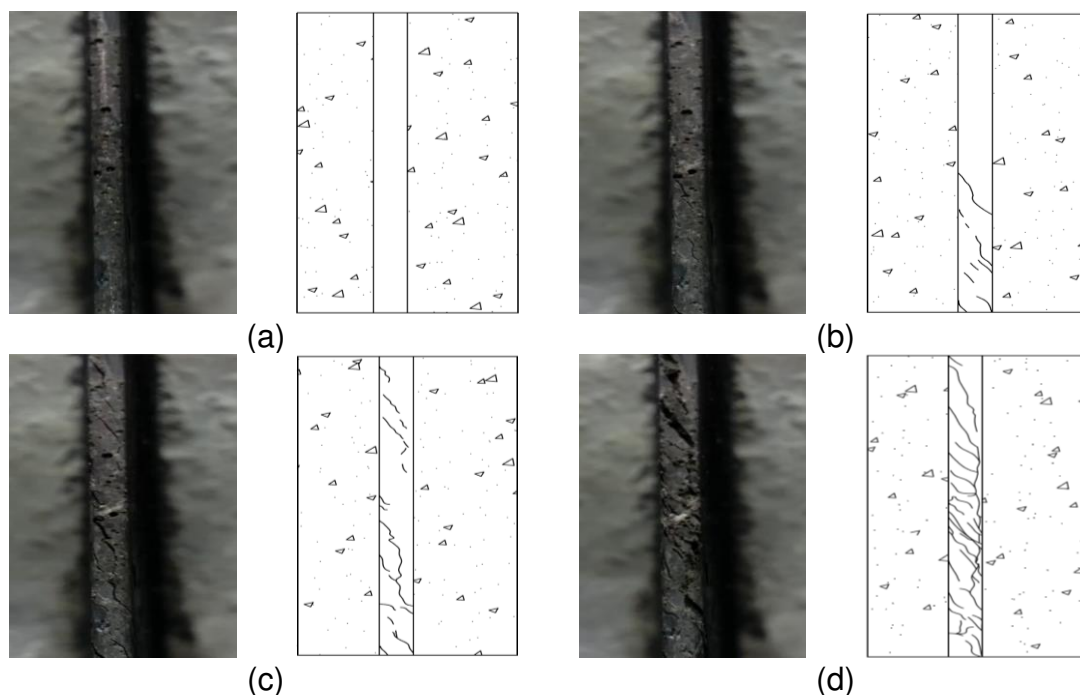


Figura 42. Propagación del agrietamiento en cortante directo: (a) espécimen sin grietas, (b) formación de microgrietas diagonales, (c) coalescencia de microgrietas y (d) formación de grietas tipo wings

Conforme al esfuerzo cortante máximo (Tabla 23), se observó una correspondencia con el tipo y volumen de fibras. Mostrándose un incremento del 20.8, 31.3 y 37.5% para los volúmenes de 0.6, 0.8 y 1.0% de la fibra de P, respectivamente. Asimismo, la fibra de PP exhibió un aumento del 16.7, 25.0 y 31.3% para los volúmenes de 0.6, 0.8 y 1.0%, correspondientemente. De acuerdo con Soetens [86], el comportamiento al cortante directo se deriva de la fricción y dilatancia entre la interfaz de corte, la adhesión y puenteo de los agregados – matriz y el mecanismo de transferencia de carga al refuerzo. No obstante, Lin [93] observó que el esfuerzo máximo a cortante directo está influenciado principalmente de la dilatancia entre la interfaz de corte, el puenteo de los agregados y la acción del refuerzo. En consecuencia, debido a la proximidad en la composición de la mezcla de referencia y la matriz cementante de los CAF, se

establece que la variación en el esfuerzo máximo está influenciada principalmente por el refuerzo de fibras y mecanismos secundarios a su acción (dilatancia entre la interfaz de corte y el puenteo de los agregados).

Tabla 23. Resistencia al cortante directo de las diferentes mezclas

Espécimen	Esfuerzo máximo	CV
	[MPa]	[%]
Referencia	4.8	2.9
M-0.6P	5.8	9.2
M-0.6PP	5.6	10.1
M-0.8P	6.3	7.3
M-0.8PP	6.0	4.3
M-1.0P	6.6	6.2
M-1.0PP	6.3	7.5

En particular, el refuerzo de fibras establece un mecanismo de extracción, donde las fibras son sometidas a tensión cuando se doblan y retuercen durante el desplazamiento del plano de falla por cortante (Figura 43) [94]. Principalmente, este mecanismo principia una acción dovela a microescala, en el que se transfiere el esfuerzo cortante desde la matriz a las fibras. Como resultado, el refuerzo se somete a una flexión local y cortante (Figura 44) [95]. Este mecanismo, es también acompañado por un confinamiento lateral proporcionado por micro – puntales de compresión, inclinados a razón de los microagrietamientos diagonales [96] (los antes observados en la Figura 42c).

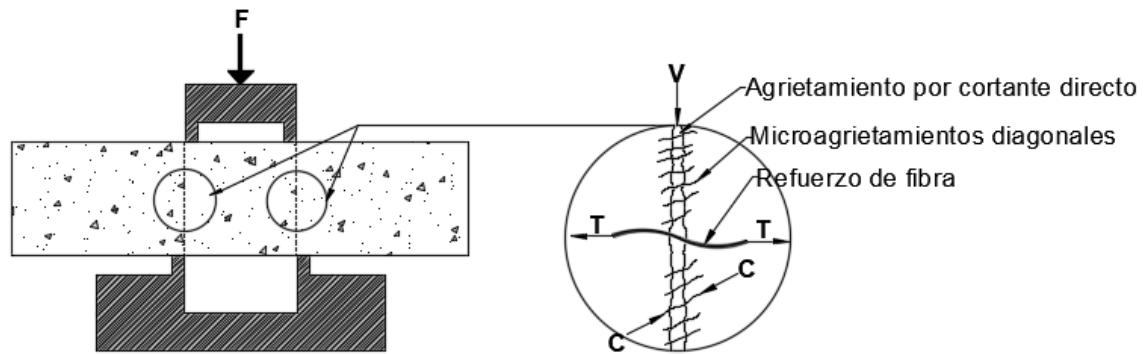


Figura 43. Mecanismo de transferencia de cortante

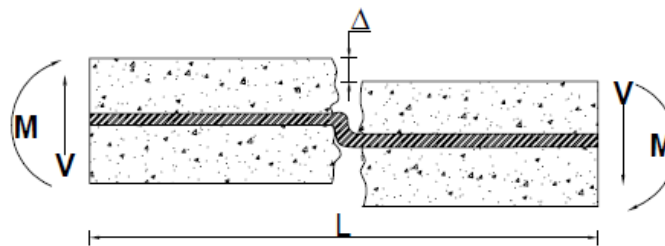


Figura 44. Mecanismo de acción dovela en las fibras

En general, los especímenes reforzados con la fibra de P aumentaron en mayor cantidad la resistencia al cortante directo en comparación a los realizados con la fibra de PP. Lo anterior, se le puede atribuir a la efectividad de las diferentes deformaciones en la superficie, que le permitió tener una transferencia de esfuerzos durante el proceso de desunión y extracción. Asimismo, el incremento en el desplazamiento del esfuerzo máximo a razón del aumento del volumen de fibras exhibió el soporte que ofrecen las fibras a la abertura de las grietas y al deslizamiento del plano de falla.

3.4.3.2 Energía de fractura

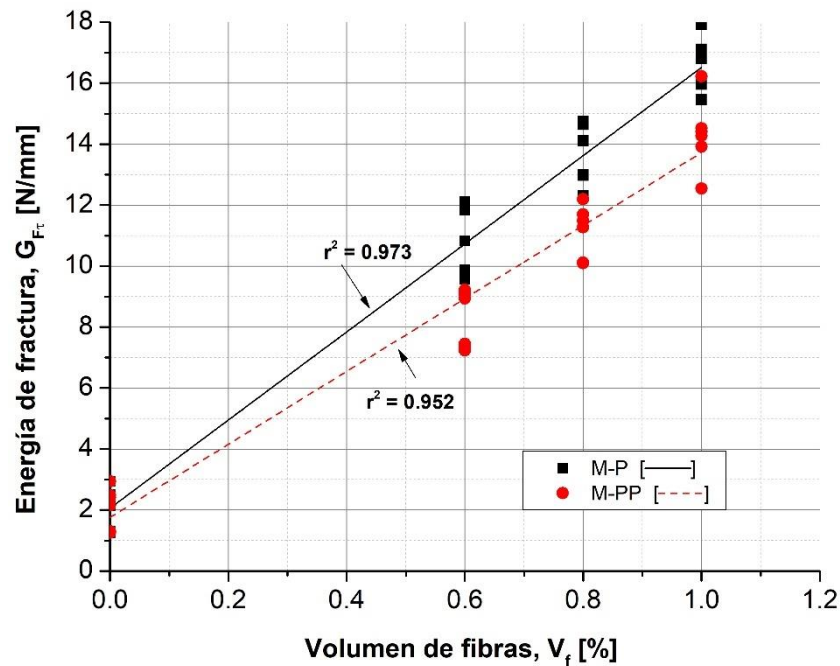


Figura 45. Variación de la energía de fractura con el volumen de fibras

Con el fin de cuantificar la efectividad del refuerzo de fibras, se determinó la energía de fractura (G_{F_c}) a partir del área debajo de la curva $\tau - \Delta$. En la Figura 45, se muestra la correlación entre el volumen de fibras y la energía de fractura de los especímenes reforzados con la fibra de P y PP. De tal forma, se mostraron incrementos máximos de 792.0 y 684.7% de los especímenes reforzados con la fibra P y PP en comparación a los de referencia, respectivamente. Este incremento se deriva a partir de la energía de deformación liberada durante la formación y extensión de las grietas en la matriz cementante. Por consiguiente, las fibras adquieren parte de la energía liberada de la matriz durante el efecto

micro – dovela, establecido en el mecanismo de resistencia a la abertura de las grietas y al deslizamiento del plano de falla.

En particular, la energía de fractura se incrementó con el aumento de la deformación en el esfuerzo máximo. Esto es muy probable debido a la acción micro – dowel de la fibra, que no se ve altamente disminuida por la acción de las grietas más grandes en la fractura del Modo II, a diferencia de la abertura de la grieta I [36]. Asimismo, se ha reportado que derivado al mecanismo de acción del refuerzo de fibras, la contribución establecidas por la fricción y dilatancia entre la interfaz de corte y la adhesión y puente de los agregados – matriz se retrasa a niveles de esfuerzo mayores [97]. Por lo que, la efectividad de las fibras en la energía de fractura se estableció como un conjunto subsecuente de mecanismos secundarios a su acción. De esta manera, la fibra P en comparación de la PP provocó el aumento del 29.8, 22.3 y 15.7% de la energía de fractura, en los volúmenes de 0.6, 0.8 y 1.0%, respectivamente. Esta tendencia se le atribuir a la efectividad del refuerzo en la resistencia de las grietas y al deslizamiento del plano de falla. Principalmente, debido a las múltiples deformaciones a lo largo de la fibra.

3.4.3.3 Influencia de las fibras

En la Figura 46, se muestra las superficies de fractura durante el ensayo a cortante directo. En general, se expuso una distribución homogénea de las fibras en la sección de fractura (Figura 46a), esta misma tendencia se exhibió en los especímenes de las diferentes mezclas. Por otra parte, debido a la resistencia de la pasta [98], la mayoría de los agregados se fracturaron de acuerdo al plano de

falla (Figura 46b). Asimismo, la mayoría de las fibras que unieron las grietas a lo largo del plano de corte se rompieron. De manera que, las secciones de las fibras expuestas mostraron deformaciones causados por los mecanismo de acción del refuerzo.

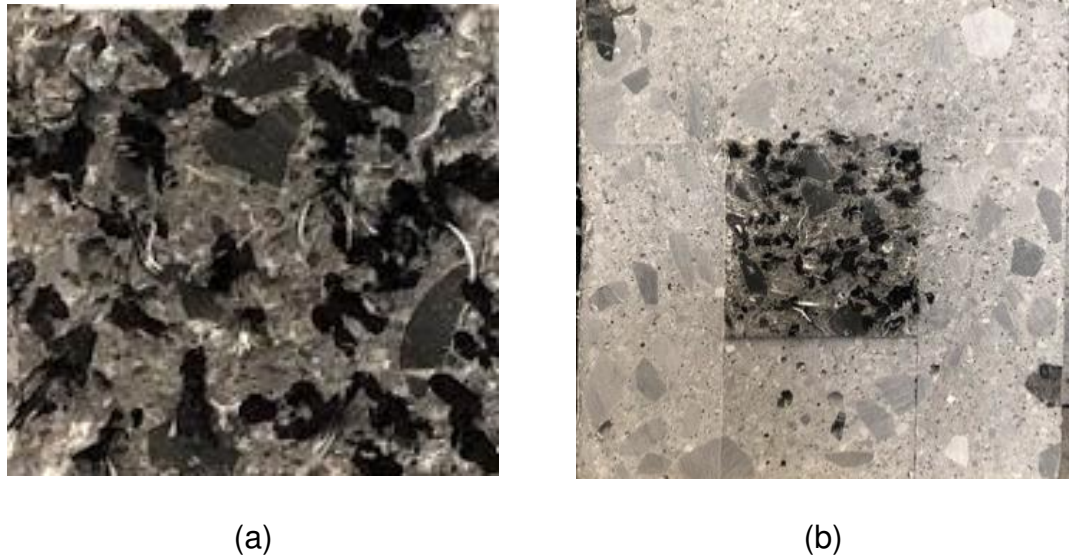


Figura 46. Fractura del espécimen: (a) Distribución del refuerzo de fibras y (b) superficie de fractura

En el caso del refuerzo de P, las fibras que no se rompieron mostraron hendiduras que iniciaron en el borde de su longitud y se adentraron un par de milímetros dentro de la sección (semejante a las mostradas a flexión). En tanto, las fibras que se rompieron se separaron en pequeños filamentos sobre la longitud extraída. En el caso general de las fibras de PP, se separaron en pequeños filamentos, debido al proceso de fibrilación derivado de la extracción y/o mezclado. De acuerdo con Gao [39], las fibras se extraen o rompen gradualmente en los especímenes sometidos a cortante directo, debido al efecto causado por la extracción de las fibras durante la abertura de las grietas. No obstante,

Boulekbache [98] mostró que en los especímenes de concreto de baja resistencia, las fibras que unen las grietas a lo largo del plano de corte son propensas a extraerse, mientras en los especímenes de resistencia media y alta, a romperse. Lo anterior, indica que la unión mejorada entre la matriz y las fibras proporcionada principalmente por la alta resistencia del concreto, el tipo de fibra y la clasificación de los agregados, estableció una transferencia de esfuerzos efectiva desde la matriz al refuerzo de fibras, durante el proceso de extracción.

Con el fin de cuantificar la distribución del refuerzo, en la Figura 47 se muestra la cantidad de fibras expuestas en cada una de las superficie de falla por cortante. Donde, se designaron cuatro secciones establecidas en los planos de falla de dos probetas de cortante directo, obtenidas de un mismo espécimen. En general, las fibras se distribuyeron uniformemente a largo de la dirección de colado del espécimen. De esta forma, las fibras expuestas en las secciones de las diferentes mezclas tuvieron una variación mínima del 7.4% y una máxima del 11.6%, presentadas en los especímenes M-0.6P y M-1.0P, respectivamente. De tal manera que, las fibras tendieron a organizarse de mejor manera sobre las secciones del espécimen en mezclas con volúmenes de fibras más pequeños. De acuerdo con Ferrara [99], este comportamiento se debe atribuir al nivel de viscosidad que le permite conducir a las fibras y orientarlas a lo largo de la dirección del flujo de colado, garantizando su dispersión razonablemente aleatoria dentro del espécimen. Asimismo, Alberti [100] observó que la variación en la distribución de las fibras sobre un espécimen, puede ser explicada por la alta concentración de fibras algunas secciones, causada por la ausencia del flujo

constante, siendo más propensos los concretos con mayor viscosidad. Por esta razón, se atribuye que el menor grado de viscosidad (evaluado cualitativamente con las pruebas en estado fresco) de las mezclas de menor volumen de fibras permitió establecer una mejor distribución de las fibras sobre el espécimen, en comparación a las demás mezclas.

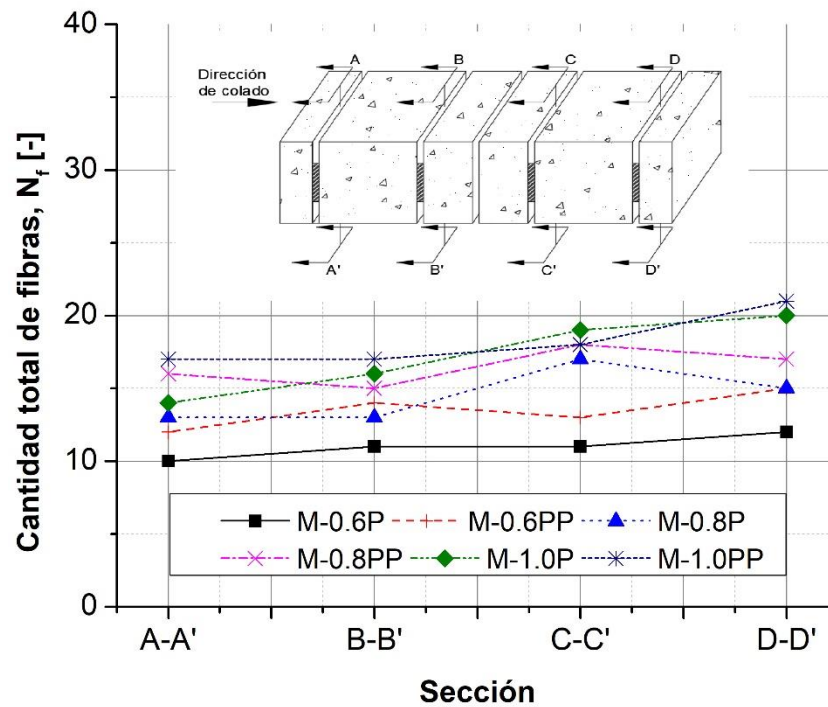


Figura 47. Distribución de las fibras en las secciones del espécimen

De acuerdo con la Figura 48, la energía de fractura aumenta linealmente con el número de fibras expuestas. Donde, la fibra de P mostró mayor rendimiento en relación con la cantidad de fibras expuestas en comparación a la fibra de PP. Lo anterior, de acuerdo con la pendiente de la línea tendencia. Considerablemente, este comportamiento fue una medida clara del rendimiento general de la fibra de

P. Por lo que se establece la atribución efectiva en la interacción con la matriz, en el control de la formación y coalescencia de las grietas.

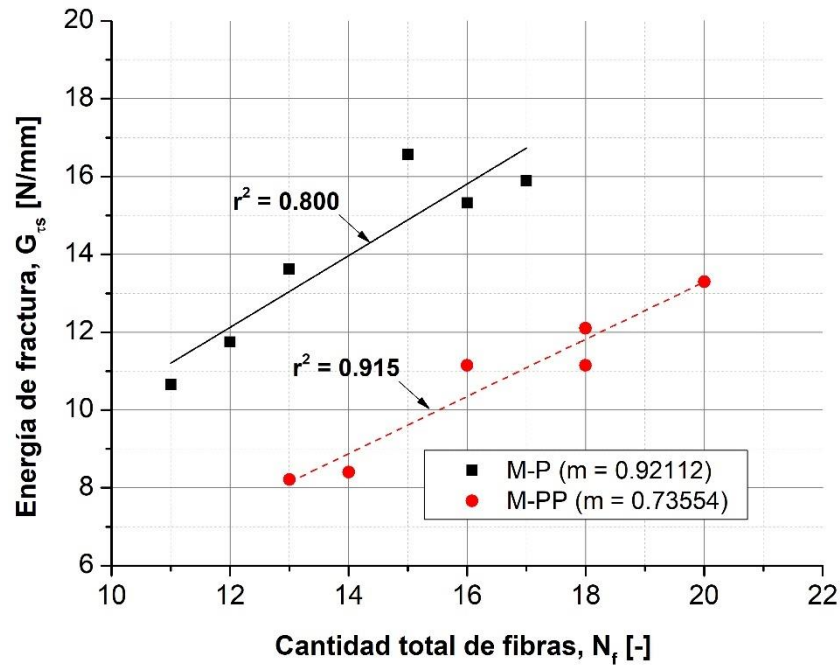


Figura 48. Relación entre la cantidad total de fibras y la energía de fractura

3.5 Modelos de comportamiento mecánico

3.5.1 Modelo analítico a flexión

Un modelo analítico del comportamiento a flexión del CAF puede ser un instrumento muy eficiente para la estimación preliminar de la fractura. A partir de la respuesta de los especímenes reforzados con la fibra de P y PP, se estableció un modelo constituido por tres regiones (Figura 49), las cuales fueron delimitadas por rangos de la abertura de la boca de la grieta (CMOD, CM) característicos. En la primera región, se precisó desde el inicio de la curva hasta el esfuerzo máximo a flexión ($0 \leq CM \leq CM_L$). Por otra parte, la segunda región se definió en la parte

descendente de la etapa posterior al agrietamiento ($CM_L \leq CM \leq CM_1$). Mientras, la tercera región se estableció en la curva ascendente derivada del mecanismo de acción del refuerzo fibras ($CM_1 \leq CM \leq CM_3$).

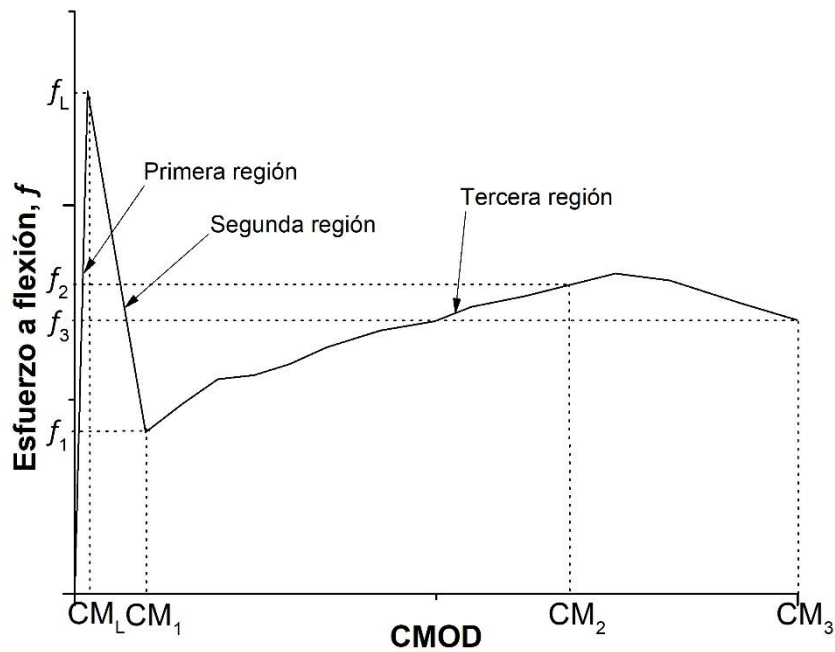


Figura 49. Comportamiento del modelo analítico de $f - CMOD$

La primera región se caracterizó por estar influenciada principalmente por la resistencia a la tensión de la matriz cementante. Debido a que, para ese nivel de deformación las fibras tuvieron poca o nula influencia [75]. En consecuencia, la función de la curva a flexión se definió a partir del esfuerzo promedio al inicio de la primer grieta (límite proporcionalidad, LOP) (f_L) y su respectivo CMOD (CM_L). De esta manera, la primera región de la curva $f - CMOD$ se pudo determinar con la ecuación 3.1.

$$f(CM) = f_L \frac{CM}{CM_L} \quad (3.1)$$

Donde:

$f(CM)$ = Función de la curva a flexión

CM = CMOD del esfuerzo a flexión [mm]

f_L = Esfuerzo de flexión en el LOP [MPa]

CM_L = CMOD en el LOP [mm]

Tomando en cuenta que, el esfuerzo f_L se estableció en promedio en 5.3 MPa y la abertura de la boca de la grieta CM_L en 0.03 mm para los diferentes especímenes, la ecuación 1 se pudo describir de forma general de la siguiente manera (ecuación 3.2):

$$f(CM) = 5.3 \frac{CM}{0.03} \quad (3.2)$$

En la segunda región, el comportamiento $f - CMOD$ estuvo influenciado principalmente por el tipo y volumen de fibras. En vista de que, el proceso pronunciado de pérdida de rigidez fue controlado por el mecanismo de refuerzo establecido por las fibras [84]. De esta manera, los valores (CM_1, f_1) se precisaron a partir de una correspondencia experimental. De acuerdo con la Figura 50, la variación de la CM_1 con respecto al incremento del volumen de fibras mostró una tendencia lineal. En la cual, los especímenes reforzados con la fibra P exhibieron valores más pequeños de la CM_1 , en comparación a los realizados con la fibra PP. Principalmente, la disminución del CM_1 fue causado por la mayor cantidad de fibras en las secciones agrietadas. Mientras, la diferencia en la CM_1 entre los

diferentes tipos de fibras fue originado por la efectividad del refuerzo durante la transferencia de esfuerzos en el proceso de desunión y comienzo de la extracción.

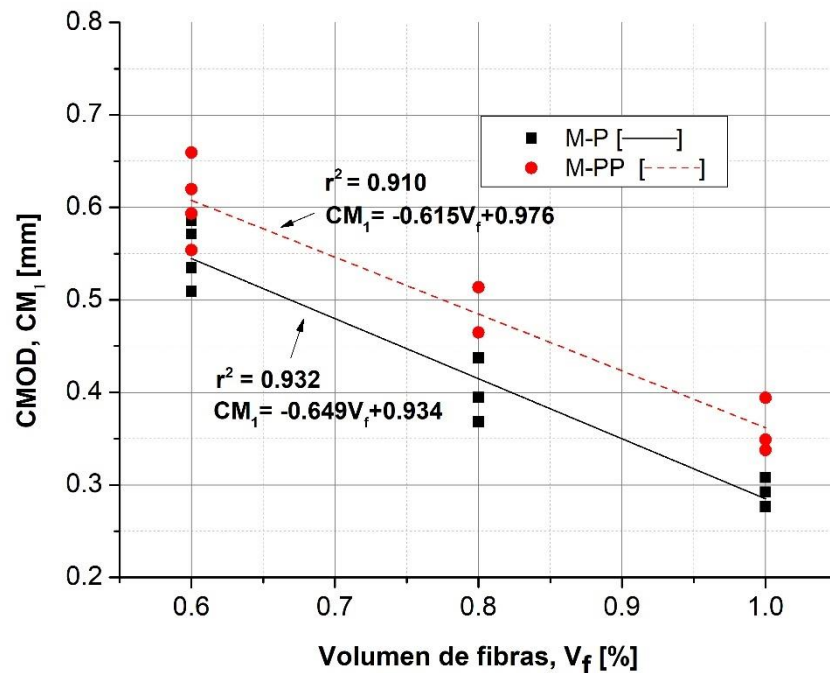


Figura 50. Variación de CM_1 con el volumen de fibras

Por otra parte, se planteó un coeficiente experimental que involucra una medida de esfuerzos durante el inicio y final de la segunda región, el cual se definió como constante de transmisión de esfuerzos (C_t) (ecuación 3.3). El C_t es una medida clara de la efectividad de las fibras en la estabilización de las grietas generadas en el inicio de la región post – agrietamiento. Debido a que, las fibras de P y PP requieren una abertura de grieta para mejorar el comportamiento post – agrietamiento [101]. De esta manera, con el fin de determinar la variación del C_t

con respecto al volumen de fibras, se precisó una correspondencia experimental mostrada en la Figura 51.

$$C_t = \frac{f_1}{f_L} \quad (3.3)$$

Donde:

C_t = Constante de transmisión de esfuerzos

f_L = Esfuerzo de flexión en el LOP [MPa]

f_1 = Esfuerzo de flexión mínimo [MPa]

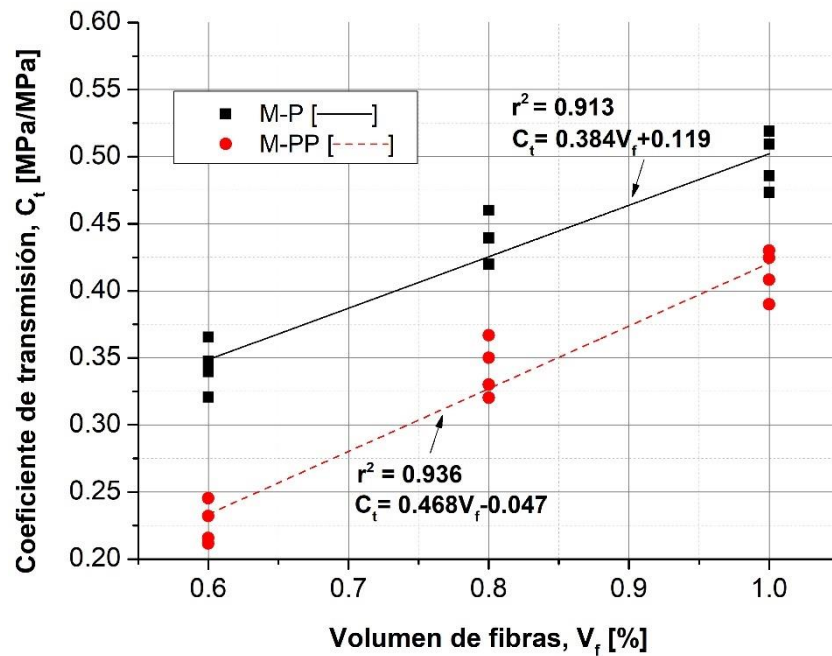


Figura 51. Variación del C_t con el volumen de fibras

Conforme a la Figura 51, se mostró que el C_t se incrementó a mayor volumen de fibras. En vista de que, la mayor cantidad de fibras localizadas en las grietas permitieron el control del agrietamiento en CMOD más pequeños. Por lo tanto, para el mismo CMOD, los especímenes reforzados con volumen de fibra altos

tuvieron una contribución en la respuesta post – agrietamiento mayor. En particular, este mecanismo fue dependiente al tipo de fibra, mostrándose valores mayores del C_t en los especímenes reforzados con la fibra P en comparación a los realizados con la PP. Lo anterior, por la efectividad de la transferencia de esfuerzos de la matriz a las fibras.

Acorde a lo anterior, la segunda región de la curva $f - \text{CMOD}$ se precisó de acuerdo con la ecuación 3.4.

$$f_L(\text{CM}) = \frac{(f_L - f_1)(\text{CM}_1 - \text{CM})}{\text{CM}_1 - \text{CM}_L} + f_1 = \frac{f_L(1 - C_t)(\text{CM}_1 - \text{CM})}{\text{CM}_1 - \text{CM}_L} + C_t f_L \quad (3.4)$$

Donde:

$f(\text{CM})$ = Función de la curva a flexión

CM = CMOD del esfuerzo a flexión [mm]

C_t = Constante de transmisión de esfuerzos [MPa/MPa]

f_L = Esfuerzo de flexión en el LOP [MPa]

CM_L = CMOD en el LOP [mm]

f_1 = Esfuerzo de flexión mínimo [MPa]

CM_1 = CMOD en el esfuerzo mínimo [mm]

Asimismo, la ecuación 4 puede ser reescrita de acuerdo con las correspondencias experimentales de la CM_1 y el C_t para cada uno de los tipos de fibras. Por lo tanto, tenemos para los especímenes reforzados con la fibra P y PP, la ecuación 3.5 y 3.6, respectivamente.

$$f_L(\text{CM}) = \frac{7.195\text{CM} - 3.136V_f\text{CM} + 5.394V_f - 7.598}{V_f - 1.393} \quad (3.5)$$

$$f_L(\text{CM}) = \frac{9.023\text{CM} - 4.033V_f\text{CM} + 5.421V_f - 8.423}{V_f - 1.538} \quad (3.6)$$

En la tercera región, el comportamiento f –CMOD se ajustó con los valores (CM_1, f_1) , (CM_2, f_2) y (CM_3, f_3) con el fin de obtener mayor precisión de la respuesta post – agrietamiento. En particular, f_2 se estableció como el esfuerzo localizado en el centroide del área bajo la curva de la tercera región, mientras que su medida de CMOD se definió como CM_2 . Por otro lado, CM_3 se limitó a 4 mm por recomendación de la normativa de ensayo, mientras que f_3 se precisó como el esfuerzo correspondiente. Lo anterior, permitió ajustar la curva mediante un punto de inflexión localizado en (CM_2, f_2) y un punto inicial y final en (CM_1, f_1) y (CM_3, f_3) , respectivamente. Con el fin de determinar la variación de (CM_2, f_2) y (CM_3, f_3) con respecto al aumento del volumen de fibras, se estableció una correspondencia experimental para CM_2 y f_2 y f_3 exhibidos en la Figura 52 y Figura 53, respectivamente.

De acuerdo con la Figura 52, la CM_2 fluctuó hacia un valor promedio de 2.407 mm, con un coeficiente de variación de 1.44% para todos los volúmenes y tipos de fibras. En consecuencia, debido a la poca variabilidad de la CM_2 y con el fin de simplificar la solución del modelo analítico, se estableció como valor constante 2.407 mm para todos los especímenes. Mientras en la Figura 53, se muestra que los esfuerzos f_2 y f_3 estuvieron influenciados en una correspondencia lineal con el volumen de fibras. En comparación, el f_2 fue menor que el f_3 en la mayoría de los especímenes, siendo el reforzado con la fibra de PP y con un volumen de

0.6% el que mostró lo contrario. Lo anterior, puede ser causado por la falla de extracción de las fibras o por la falla de estas.

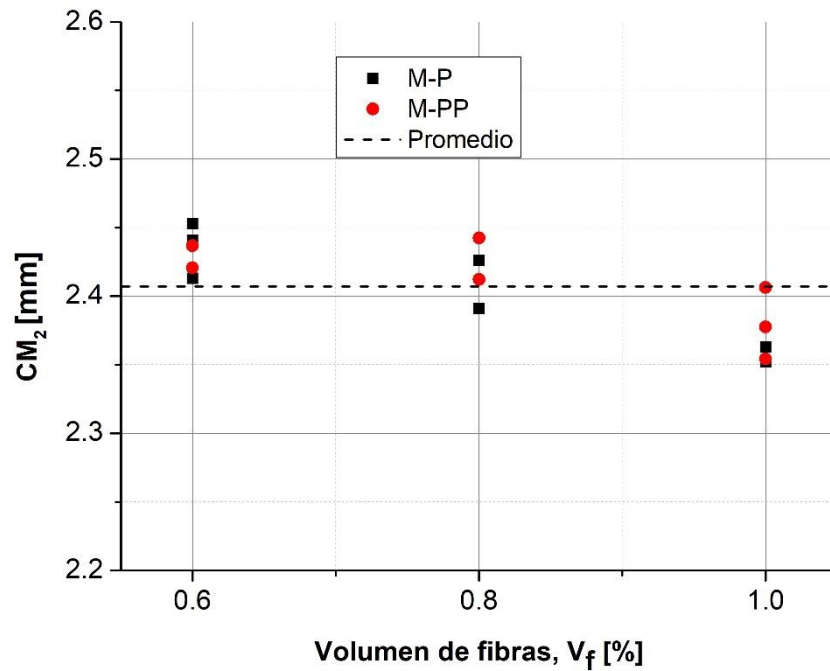


Figura 52. Variación de la CM_2 con el volumen de fibras

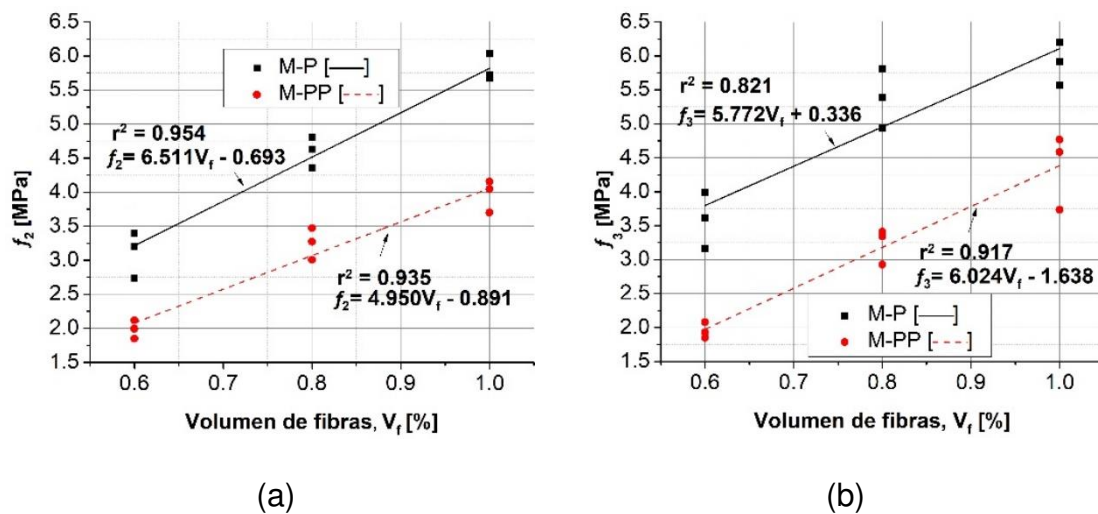


Figura 53. Variación con respecto al volumen de fibras de: (a) f_2 y (b) f_3

Como parte del ajuste de la curva de la tercera región del modelo analítico, se propusieron tres parámetros que relacionan los valores (CM_1, f_1) , (CM_2, f_2) y (CM_3, f_3) . De esta manera, tenemos las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9.

$$\alpha = \frac{(CM_1^2 + C_t^2 f_L^2)(f_3 - f_2) + (CM_2^2 + f_2^2)(C_t f_L - f_3) + (CM_3^2 + f_3^2)(f_2 - C_t f_L)}{CM_1(f_2 - f_3) + CM_2(f_3 - C_t f_L) + CM_3(C_t f_L - f_2)} \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{(CM_1 - CM_2)(CM_3^2 + f_3^2 - CM_2^2 - f_2^2) - (CM_2 - CM_3)(CM_2^2 + f_2^2 - CM_1^2 - C_t^2 f_L^2)}{CM_1(f_2 - f_3) + CM_2(f_3 - C_t f_L) + CM_3(C_t f_L - f_2)} \quad (3.8)$$

$$\gamma = -CM_3^2 - f_3^2 - \alpha CM_3 - \beta f_3 \quad (3.9)$$

Donde:

CM_1 = CMOD en el esfuerzo mínimo [mm]

C_t = Constante de transmisión de esfuerzos

f_L = Esfuerzo de flexión en el LOP [MPa]

CM_2 = CMOD en el centroide [mm]

f_2 = Esfuerzo de flexión en el centroide [MPa]

CM_3 = CMOD al final del ensayo [mm]

f_3 = Esfuerzo de flexión al final del ensayo [MPa]

De acuerdo con las ecuaciones experimentales y valores determinados para (CM_1, f_1) , (CM_2, f_2) y (CM_3, f_3) . Las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 pueden ser rescritas para cada uno de los tipos de fibras. De tal manera, tenemos que:

Fibra de P

$$\alpha = \frac{12.671V_f^3 - 23.170V_f^2 - 41.336V_f + 18.173}{0.480V_f^2 + 7.551V_f - 3.624} \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{-5.891V_f^3 - 65.260V_f^2 + 41.926V_f + 6.522}{0.480V_f^2 + 7.551V_f - 3.624} \quad (3.11)$$

$$\gamma = \frac{37.581(V_f^2 + 0.202V_f + 0.263)(V_f^2 + 3.935V_f - 3.478)}{(V_f - 0.466)(V_f + 16.210)} \quad (3.12)$$

Fibra de PP

$$\alpha = \frac{9.805V_f^3 - 14.236V_f^2 + 26.122V_f - 3.601}{0.661V_f^2 - 2.857V_f - 0.046} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{-7.248V_f^3 + 18.475V_f^2 - 1.992V_f - 8.431}{0.661V_f^2 - 2.857V_f - 0.046} \quad (3.14)$$

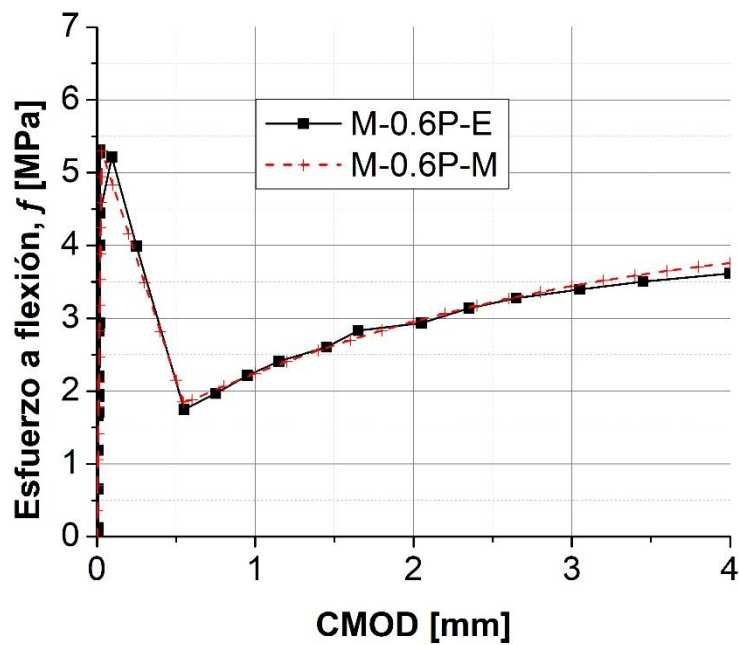
$$\gamma = \frac{29.766(V_f^2 - 2.242V_f + 1.404)(V_f^2 - 0.0786V_f + 0.053)}{(V_f - 4.338)(V_f + 0.016)} \quad (3.15)$$

De acuerdo con lo anterior, la tercera región de la curva f –CMOD se determinó de acuerdo con la ecuación 3.16.

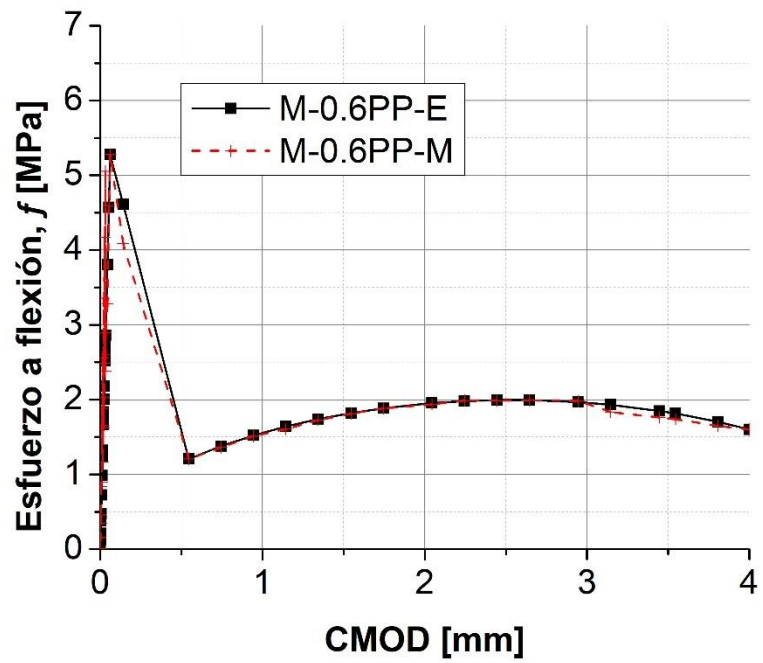
$$f_L(\text{CM}) = \sqrt{\frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{1}{4}\beta^2 - \gamma - \left(\text{CM} + \frac{\alpha}{2}\right)^2} - \frac{\beta}{2} \quad (3.16)$$

En la Figura 52 y Figura 53, se muestra el comportamiento experimental y analítico de los diferentes especímenes, indicado con E y M para la curva experimental y analítica, respectivamente. En general, se puede observar que todos los especímenes mostraron un buen ajuste durante la primera región. Mientras, en la segunda región los especímenes reforzados con 0.8% de las fibras de P y PP exhibieron un desfase en (CM_2, f_2) entre las curvas E y M. Este

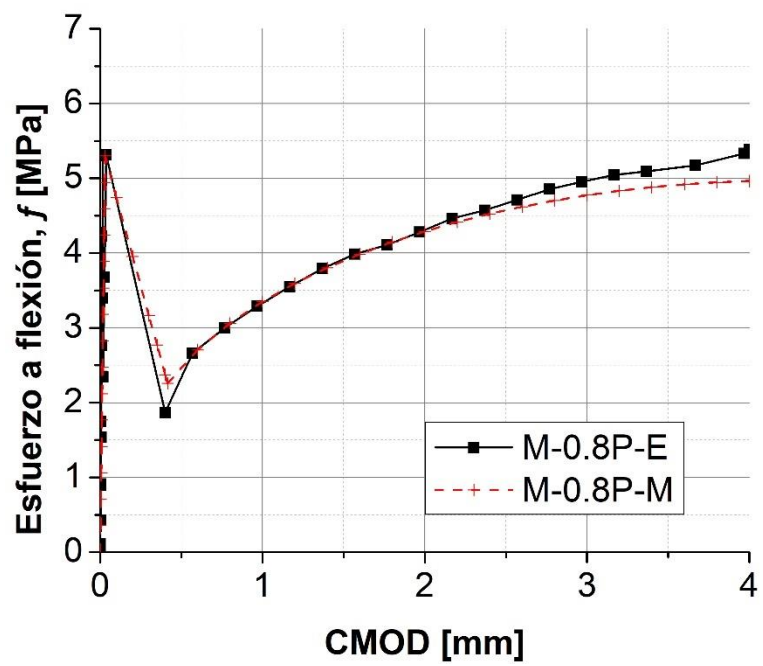
desajuste puede ser debido a la pronta recuperación al inicio de la tercera región, en comparación a los demás curvas. Asimismo, los especímenes reforzados con la fibra PP exhibieron mayor ajuste en la tercera región. Debido a que, el incremento del esfuerzo a razón del CMOD se estableció de manera más uniforme. Es decir, las curvas no mostraron alteraciones repentinas en la capacidad del esfuerzo post – agrietamiento.



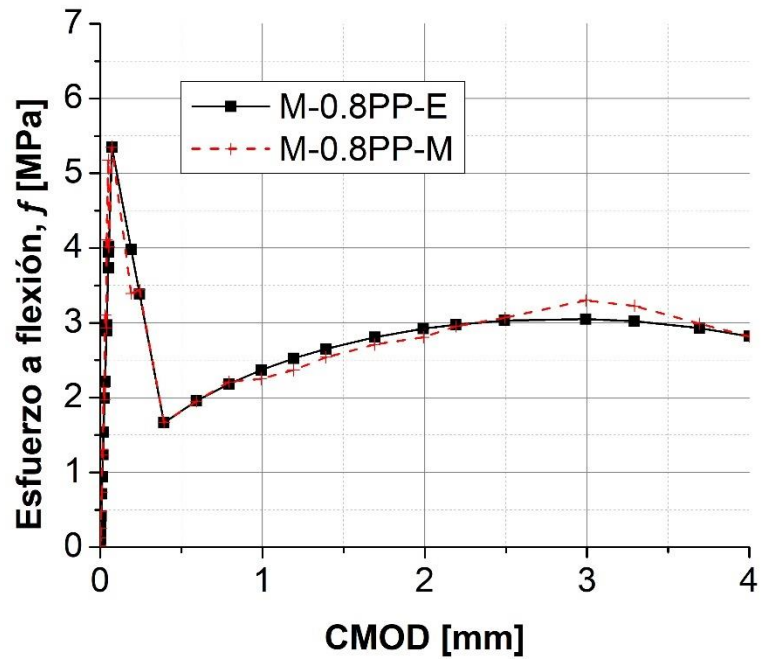
(a)



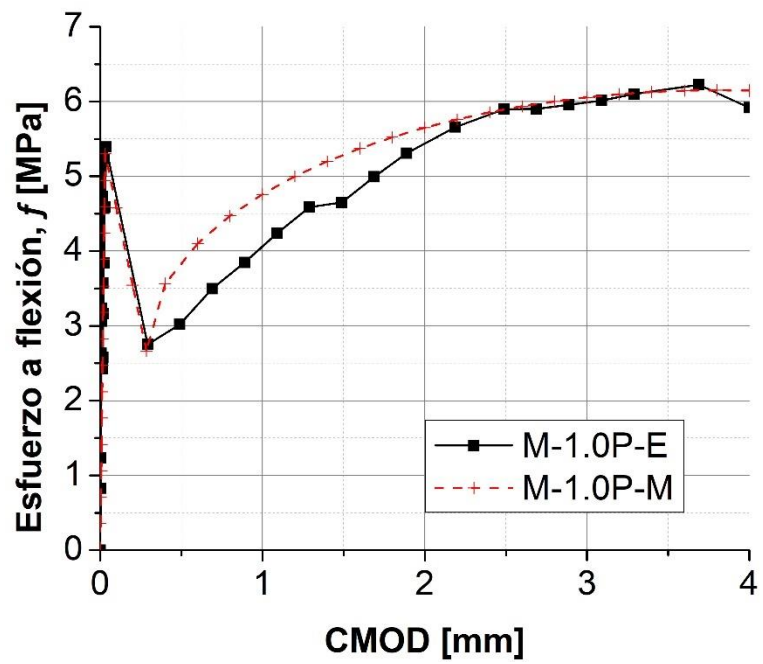
(b)



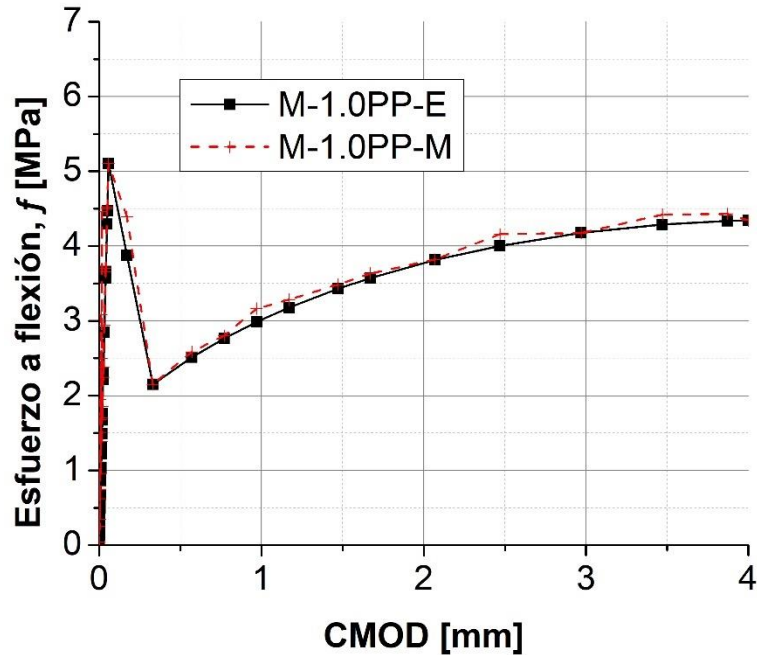
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 54. Comparación entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de f – CMOD en los especímenes: (a) M-0.6P, (b) M-0.6PP, (c) M-0.8P, (d) M-0.8PP, (e) M-1.0P y (f) M-1.0PP

Con el fin de comparar las curvas E y M, se evaluó la energía de fractura a partir del área bajo la curva de f – CMOD (Tabla 24). En general, las curvas E y M tuvieron un buen ajuste con relación a la energía de fractura. No obstante, los especímenes reforzados con la fibra de PP exhibieron mayor ajuste en comparación a los realizados con la fibra de P. Principalmente, debido a que las curvas E y M de la fibra PP tuvieron mayor correspondencia dentro de la tercera región, que es donde se adquiere mayor energía de fractura. Por otro lado, el espécimen reforzado con 1.0% de volumen de fibra de P presentó el mayor desajuste, esto se puede explicar por la diferencia en la pendiente de la curva E antes y después del punto de inflexión. Por esta razón, el ajuste de la curva M

del espécimen M-1.0P mostró solamente un buen acoplamiento dentro de los valores localizados en (CM_2, f_2) y (CM_3, f_3) .

Tabla 24. Ajuste de la energía de fractura entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de f – CMOD

Especimen	Parámetros		Energía de fractura		
	RMSE [-]	R ² [-]	Experimental [N/mm]	Analítica [N/mm]	Ajuste [%]
M-0.6P	0.30	0.97	12.2	12.3	99.4
M-0.6PP	0.40	0.96	8.1	8.5	95.4
M-0.8P	2.40	0.91	16.8	16.5	98.5
M-0.8PP	0.20	0.97	12.1	11.7	96.6
M-1.0P	3.10	0.89	20.2	21.3	94.9
M-1.0PP	0.50	0.95	14.6	15.0	97.0

El modelo analítico propuesto en esta investigación proporcionó una buena predicción del comportamiento de los diferentes especímenes. En particular, la metodología es susceptible al ajuste de acuerdo con los parámetros de entrada, permitiendo influenciar la respuesta del modelo analítico en base a condiciones como la resistencia de la matriz y el volumen y tipo de las fibras. De esta manera, el modelo analítico establece un soporte para la comprensión del comportamiento del material compuesto.

3.5.2 Modelo analítico a cortante directo

Un modelo analítico de cortante directo puede establecer una base en la comprensión del comportamiento a la fractura del CAF. A partir de la respuesta de los especímenes reforzados con la fibra de P y PP, se estableció un modelo

constituido por dos regiones (Figura 55), las cuales fueron delimitadas por el esfuerzo máximo a cortante (τ_{\max}) y su desplazamiento correspondiente (Δ_m). De esta manera, la primera región se precisó desde el inicio de la curva hasta el esfuerzo máximo a cortante ($0 \leq \Delta \leq \Delta_m$). Mientras, la segunda región se definió en la etapa posterior al agrietamiento ($\Delta_m \leq \Delta \leq \Delta_u$).

El comportamiento de la curva $\tau - \Delta$ en la primera región mostró estar influenciado por el refuerzo de fibras. Debido a que, el esfuerzo τ_{\max} y desplazamiento Δ_m incrementaron linealmente a razón del aumento en el volumen de fibras (Figura 56a y Figura 56b). En la cual, los especímenes reforzados con la fibra de P mostraron mayor capacidad de esfuerzos y desplazamiento en comparación de los realizados con la fibra PP. Lo anterior, debido a que la fibra de P propició mayor resistencia a la abertura de las grietas, lo que permitió contribuir en mecanismos secundarios de resistencia al cortante directo (dilatancia entre la interfaz de corte y el puenteo de los agregados) [97]. Por otro lado, la curva experimental $\tau - \Delta$ mostró un comportamiento lineal hasta cerca del 80% de la esfuerzo máximo a cortante directo, posteriormente, estableció una ligera curvatura hasta el esfuerzo máximo. Por esta razón, con el fin de adquirir mayor precisión a partir de una expresión simple, se propuso un comportamiento lineal a lo largo de la primera región.

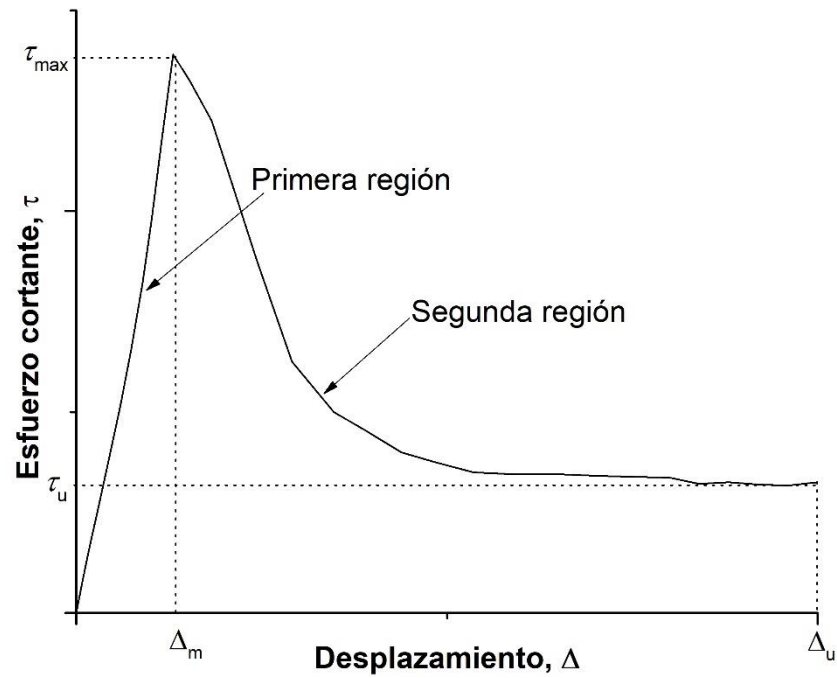
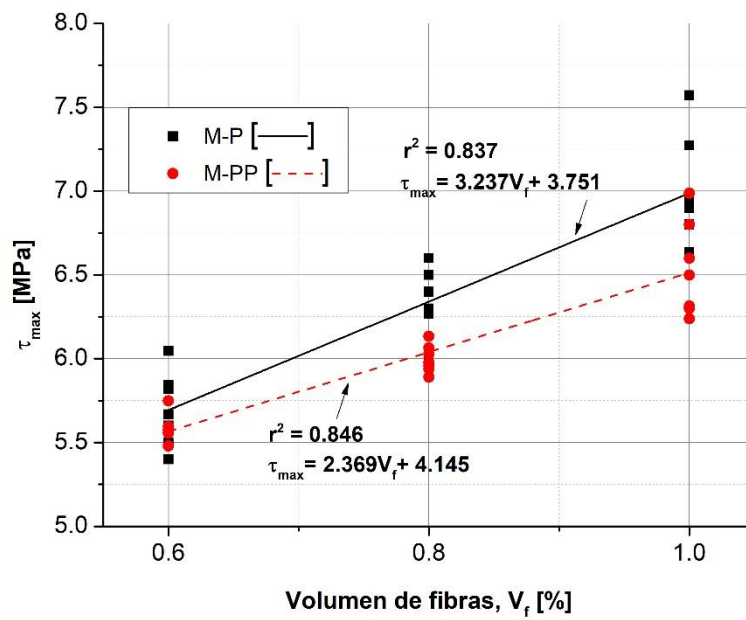
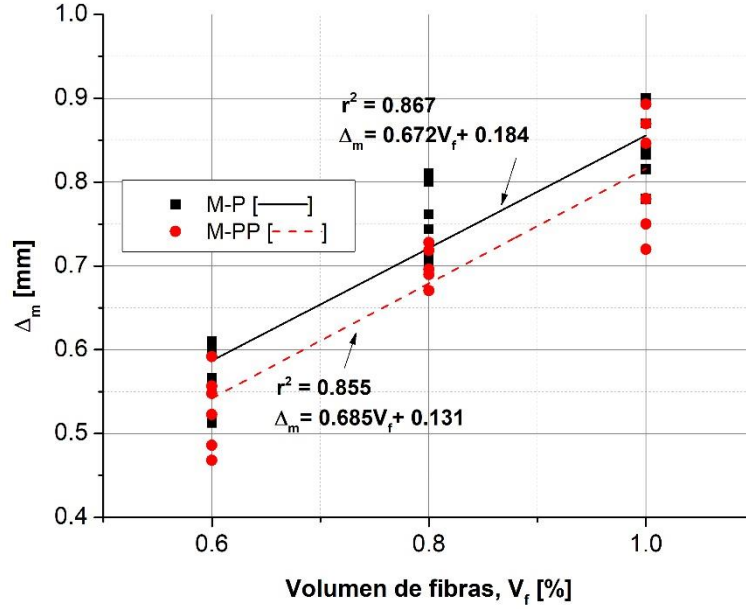


Figura 55. Comportamiento del modelo analítico de $\tau - \Delta$



(a)



(b)

Figura 56. Variación con respecto al volumen de fibras de: (a) τ_{\max} y (b) Δ_m

De esta manera, la primera región de la curva $\tau - \Delta$ pudo ser determinada de manera general a partir de la ecuación 3.17.

$$\tau(\Delta) = \tau_{\max} \frac{\Delta}{\Delta_m} \quad (3.17)$$

Donde:

$\tau(\Delta)$ = Función de la curva a cortante directo

Δ = Desplazamiento a cortante directo [mm]

τ_{\max} = Esfuerzo a cortante directo máximo [MPa]

Δ_m = Desplazamiento en el esfuerzo máximo a cortante directo [mm]

De acuerdo con la variación de τ_{\max} y Δ_m , la ecuación 3.17 se pudo escribir para los especímenes reforzados con la fibra de P y PP, como las ecuaciones 3.18 y 3.19, respectivamente.

$$\tau(\Delta) = (3.237V_f + 3.751) \frac{\Delta}{(0.672V_f + 0.184)} \quad (3.18)$$

$$\tau(\Delta) = (2.369V_f + 4.145) \frac{\Delta}{(0.685V_f + 0.131)} \quad (3.19)$$

En la segunda región, el comportamiento $\tau - \Delta$ se ajustó con los valores (Δ_m, τ_{max}) y (Δ_u, τ_u) con el objetivo de obtener una mayor precisión a partir de una expresión simple. Lo anterior, permitió ajustar la curva mediante un punto inicial y final en (Δ_m, τ_{max}) y (Δ_u, τ_u) , respectivamente. En particular, el Δ_u se estableció en 4 mm para todos los especímenes de CAF. Mientras, la variación del τ_u se determinó mediante una correspondencia experimental a razón del aumento del volumen de fibras (Figura 57). Donde, el τ_u expuesto por los especímenes de la fibra de P mostró mayor rendimiento en la capacidad de esfuerzo en comparación de la fibra de PP. Lo anterior, siendo una medida clara de la contribución efectiva de la fibra en el control del agrietamiento.

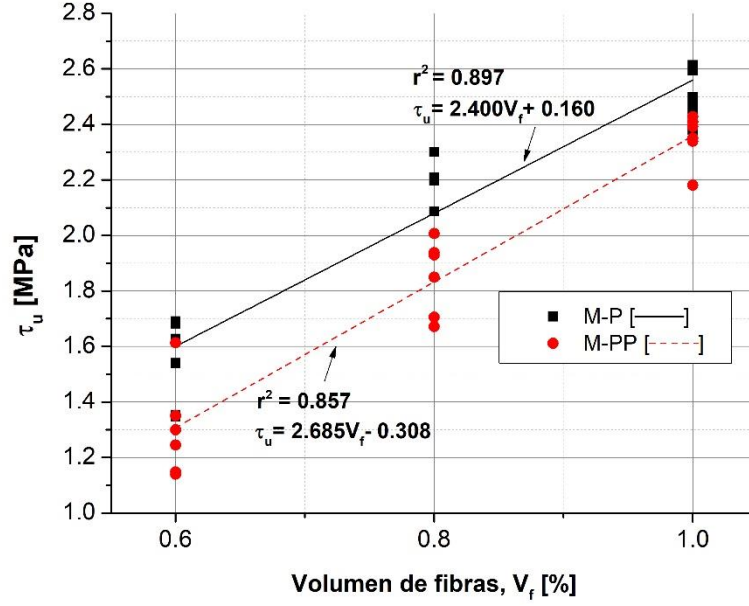


Figura 57. Variación del τ_u con respecto del volumen de fibras

Como parte del ajuste de la curva de la segunda región del modelo analítico, se propusieron dos parámetros que relacionan los valores (Δ_m, τ_{\max}) y (Δ_u, τ_u) . De esta manera, tenemos las ecuaciones 3.20 y 3.21.

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{\tau_{\max}}{\tau_u}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_m}{\Delta_u}\right)} \quad (3.20)$$

$$\kappa = e^{-\lambda \ln(\Delta_m) + \ln(\tau_{\max})} \quad (3.21)$$

En base a la variación de Δ_m , τ_{\max} y τ_u las ecuaciones 3.20 y 3.21 se pudieron escribirse de acuerdo con el comportamiento de los especímenes reforzados con la fibra de P y PP, como:

Fibra de P

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{3.237V_f + 3.751}{2.400V_f + 0.160}\right)}{\ln\left(\frac{0.672V_f + 0.184}{4}\right)} \quad (3.22)$$

$$\kappa = e^{-\lambda \ln(0.672V_f + 0.184) + \ln(3.237V_f + 3.751)} \quad (3.23)$$

Fibra de PP

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{2.369V_f + 4.145}{2.685V_f - 0.308}\right)}{\ln\left(\frac{0.685V_f + 0.131}{4}\right)} \quad (3.24)$$

$$\kappa = e^{-\lambda \ln(0.685V_f + 0.131) + \ln(2.369V_f + 4.145)} \quad (3.25)$$

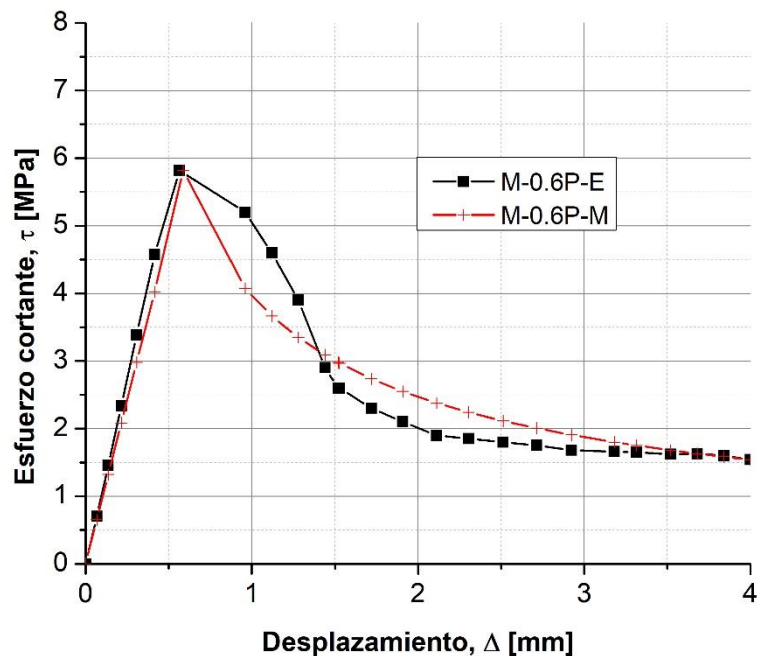
De acuerdo con lo anterior, la segunda región de la curva $\tau - \Delta$ se determinó de acuerdo con la ecuación 3.26.

$$\tau(\Delta) = \lambda \Delta^\kappa \quad (3.26)$$

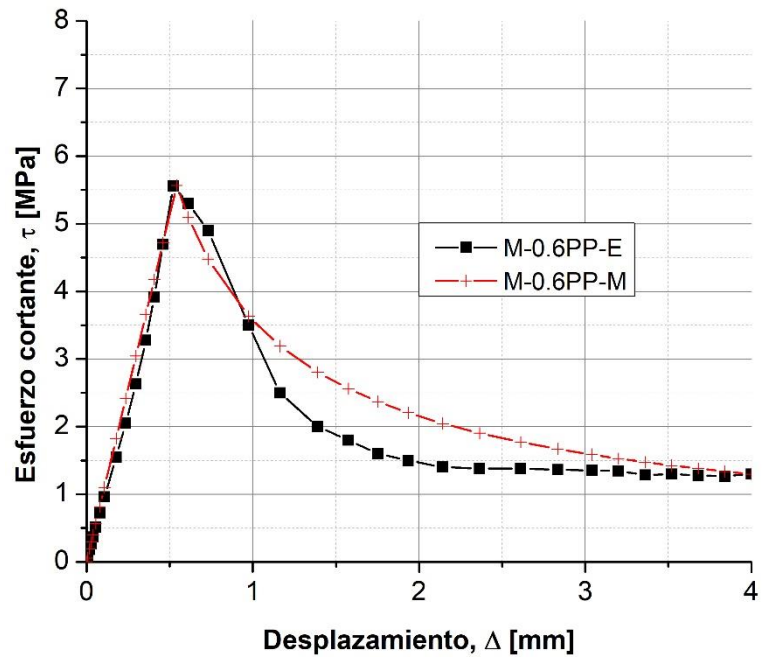
En la Figura 58, se muestra la comparación entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $\tau - \Delta$ de todos los especímenes. Durante la primera región, los especímenes M-0.6P, M-0.6PP y M-0.8PP, mostraron una mayor correspondencia con el modelo analítico. Mientras, los demás especímenes exhibieron un mayor desajuste en la curvatura precedente al esfuerzo máximo, siendo los especímenes M-1.0P y M-1.0PP los que obtuvieron menor ajuste. Lo anterior, es debido a que el incremento del volumen de fibras

propició un comportamiento no lineal más evidente hacia el esfuerzo máximo. Principalmente, este comportamiento es causado por la influencia del refuerzo de fibras en el control del inicio del agrietamiento.

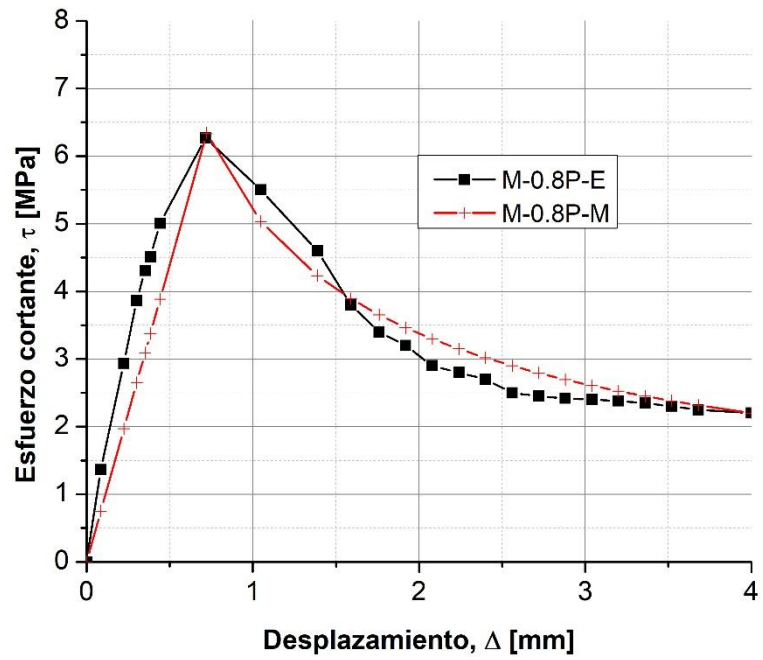
En la segunda región, el espécimen M-0.6P, M-0.6PP y M-0.8PP mostraron menor ajuste con el modelo analítico. Por un lado, la curva del modelo del M-0.6P exhibió un desajuste por la variación en la respuesta experimental, la cual mostró al comienzo, la pérdida de esfuerzo en un Intervalo corto de desplazamiento, posteriormente, un punto de inflexión dio el inicio de una etapa caracterizada por mantener casi el mismo nivel esfuerzo durante el incremento del desplazamiento. Por otra parte, la respuesta de los especímenes M-0.6PP y M-0.8PP exhibieron una mayor pérdida de esfuerzos durante el incremento del desplazamiento en comparación de la curva del modelo analítico de estos.



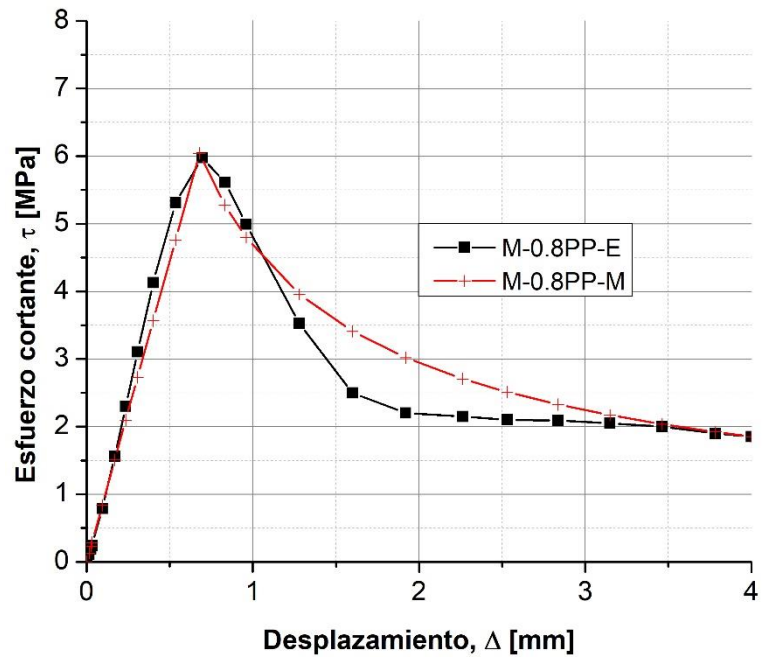
(a)



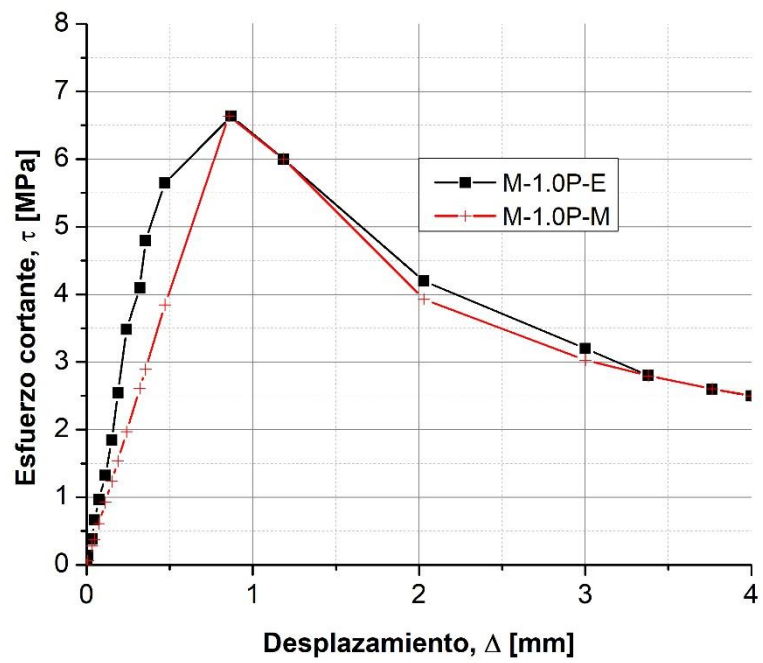
(b)



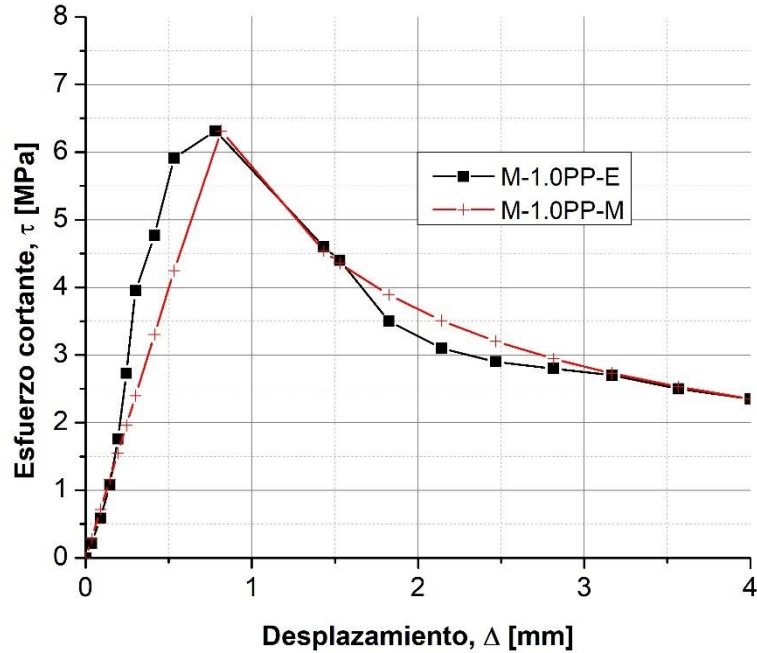
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 58. Comparación entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de τ – Δ en los especímenes: (a) M-0.6P, (b) M-0.6PP, (c) M-0.8P, (d) M-0.8PP, (e) M-1.0P y (f) M-1.0PP

En cuanto a la variación entre los valores estimados por el modelo analítico y los valores observados experimentalmente (Tabla 25), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostró que el comportamiento de los especímenes reforzados con la fibra de PP obtuvieron mayor ajuste con su respectivo modelo. Asimismo, el coeficiente de determinación (R^2) estableció la misma tendencia que la RMSE, mostrando valores dentro del rango de 0.87 – 0.96 para todos los especímenes. Mientras, el ajuste de la energía de fractura mostró ser dependiente a los valores de la RMSE y el R^2 , debido a que el área debajo la curva del modelo analítico puede ser sobrestimado y/o subestimado de acuerdo con el comportamiento experimental.

Tabla 25. Parámetros de ajuste entre el modelo analítico y el comportamiento experimental de $\tau - \Delta$

Espécimen	Parámetros		Energía de fractura		
	RMSE	R²	Experimental	Analítica	Ajuste
	[-]	[-]	[N/mm]	[N/mm]	[%]
M-0.6P	0.41	0.92	10.7	10.6	99.2
M-0.6PP	0.37	0.96	8.2	9.5	86.0
M-0.8P	0.57	0.83	13.6	13.4	98.2
M-0.8PP	0.37	0.95	11.1	12.0	92.9
M-1.0P	0.84	0.89	16.6	15.2	91.2
M-1.0PP	0.67	0.87	14.3	14.2	98.8

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos con este trabajo de investigación, las siguientes conclusiones fueron deducidas en función de la hipótesis y los objetivos propuestos:

Diseño de mezclas

1. La relación SP/C de 0.4 resultó en un equilibrio entre el rendimiento de la extensibilidad, estabilidad y permanencia de la consistencia de la pasta. Asimismo, las mezclas con G/A de 0.5 presentaron una proporción adecuada de agregados, que permitió una dispersión, fluidez y suspensión de partículas adecuadas en la mezcla de referencia de CAC.
2. La metodología que estimó la reducción del contenido de agregado grueso dado el incremento del volumen de fibras en las mezclas de CAF mostró estar influenciado por el factor de fibra. Donde, el aumento del factor de fibra propició la disminución del t_{cm} de las mezclas.

Propiedades en estado fresco

3. Las mezclas con volumen de fibras de 0.8% pueden considerarse como un límite superior para asegurar una fluidez, estabilidad y capacidad de paso del CAF, de acuerdo con las especificaciones de uso del CAC. En consecuencia, las mezclas M-1.0P y M-1.0PP es necesario considerar la

geometría del elemento y la densidad de refuerzo, para tener una aplicación adecuada.

Propiedades en estado endurecido

4. El comportamiento a compresión no mostró una tendencia entre el incremento del factor de fibra y el aumento de la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad. No obstante, la resistencia a la compresión de los especímenes de CAF no se redujo en comparación a los realizados con la mezcla de referencia de CAC. Mientras, el aumento del volumen de fibras causó un incremento en la absorción de energía en la etapa pre y post – agrietamiento.
5. La resistencia residual a flexión se vio influenciada principalmente por el tipo y volumen de fibras, siendo los especímenes reforzados con la fibra de P los que mostraron mayor capacidad de esfuerzo. Donde, la resistencia residual se incrementó de manera lineal con el número de fibras expuestas en la sección transversal de fractura.
6. La resistencia máxima a cortante directo y su respectivo desplazamiento fue influenciado por el tipo y volumen de fibras. Donde, los especímenes reforzados con la fibra P obtuvieron mayor resistencia y capacidad de deformación, en virtud del comportamiento de las fibras en el control del agrietamiento y en la contribución en los mecanismos secundarios de resistencia al cortante directo. De tal manera, se observó una relación lineal entre el número de fibras expuestas en los planos de falla y la absorción de energía del espécimen.

Modelos analíticos

7. El modelo analítico mostró ser susceptible al ajuste en la respuesta pre y post – agrietamiento de acuerdo con las variables como la resistencia de la matriz cementante, el volumen y tipo de fibras. El modelo propuesto proporcionó un ajuste entre la energía de fractura experimental y analítica en el rango de 94.9 – 99.4% en los diferentes especímenes de CAF.
8. El modelo analítico a cortante directo presentó menor ajuste durante la respuesta pre – agrietamiento, debido al comportamiento no lineal de la curva experimental. En la etapa post – agrietamiento, el modelo permitió influir en la respuesta a partir de las variables como la resistencia de la matriz cementante, el volumen y tipo de fibras. El modelo propuesto proporcionó un ajuste entre la energía de fractura experimental y analítica en el rango de 86.0 – 99.2% en los diferentes especímenes de CAF.

4.2 Recomendaciones

Con base al trabajo de investigación desarrollado y en los resultados obtenidos, se sugiere lo siguiente:

1. En el proporcionamiento de las mezclas de CAF, se sugiere el uso de algún MCS que permita mejorar las propiedades de la fase fluida. También, se recomienda reducir el TMA con el fin de disminuir el bloqueo excesivo con las fibras y disminuir el riesgo de segregación de las mezclas.
2. Como pruebas complementarias en estado fresco, se recomienda evaluar la distribución de las fibras, que permita establecer criterios de tolerancia con el fin de la optimización de las mezclas.

3. En los modelos analíticos, se sugiere un estudio paramétrico más amplio que permita definir la influencia en las propiedades de la matriz, el tipo y volumen de fibras.

REFERENCIAS

- [1] X. Gu, X. Jin, Y. Zhou, Basic Principles of Concrete Structures, in: Basic Princ. Concr. Struct., 1st ed., Springer, Shanghai, 2015: pp. 1–5. doi:10.1007/978-3-662-48565-1.
- [2] A. Bentur, S. Mindess, Cementitious composites, in: Fibre Reinf. Cem. Compos., 2nd ed., Taylor & Francis, Oxon, 2007: pp. 1–7. doi:10.1016/0010-4361(79)90446-4.
- [3] ACI Committee 544, Report on Fiber Reinforced Concrete, Farmington Hills, 2009.
- [4] M. Tabatabaeian, A. Khaloo, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 497–509. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.181.
- [5] L. Ferrara, Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, in: Mech. Prop. Self-Compacting Concr., 1st ed., Springer, 2014: p. 161. doi:10.1007/978-3-319-03245-0.
- [6] ACI Committee 544, Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete, Farmington Hills, 2010.
- [7] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 93 (2015) 180–188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105.
- [8] L. Ferrara, Y.D. Park, S.P. Shah, A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 957–971. doi:10.1016/j.cemconres.2007.03.014.
- [9] K. Khayat, F. Kassimi, P. Ghoddousi, Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete, *ACI Mater. J.* 111 (2014) 143–152. doi:10.14359/51686722.
- [10] J. Xu, B. Wang, J. Zuo, Modification effects of nanosilica on the interfacial transition zone in concrete: A multiscale approach, *Cem. Concr. Compos.* 81 (2017) 1–10. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.04.003.
- [11] L. Xu, F. Deng, Y. Chi, Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste, *Constr. Build. Mater.* 145 (2017) 619–638. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.035.
- [12] K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P.K. Mehta, A. Horvath, P.J.M. Monteiro, Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder, *Cem. Concr. Compos.* 56 (2015)

59–72. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003.

- [13] S. Palm, T. Proske, M. Rezvani, S. Hainer, C. Müller, C.A. Graubner, Cements with a high limestone content - Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete, *Constr. Build. Mater.* 119 (2016) 308–318. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.009.
- [14] ACI Committee 237, *Self-Consolidating Concrete*, Farmington Hills, 2007.
- [15] S.A.A.M. Fennis, J.C. Walraven, Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, 57 (2011) 73–102.
- [16] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 2116–2136. doi:10.1016/j.cemconres.2005.06.002.
- [17] K. Khayat, D. Feys, Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, in: K.H. Khayat, D. Feys (Eds.), *SCC2010*, Rilem, Montreal, 2010: pp. 65–77.
- [18] W. Schmidt, H.J.H. Brouwers, H. Kühne, B. Meng, Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures, *Cem. Concr. Compos.* 49 (2014) 111–126. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.004.
- [19] A.M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.* 86 (2008) 3–9. doi:10.1016/j.compstruct.2008.03.006.
- [20] R. Madandoust, M.M. Ranjbar, R. Ghavidel, S. Fatemeh Shahabi, Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Mater. Des.* 83 (2015) 284–294. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.024.
- [21] ACI Committee 544, *Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs*, Farmington Hills, 2015.
- [22] ACI Committee 544, *Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*, Farmington Hills, 2016.
- [23] ACI Committee 544, *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete*, Farmington Hills, 2008.
- [24] N. Yousefieh, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, M. Shekarchi, Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete, *Constr. Build. Mater.* 148 (2017) 833–845. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.093.
- [25] S.H. Kosmatka, M. Wilson, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 16th ed., Portland Cement Association, Illinois, 2016.
- [26] EFNARC, *Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable*, Surrey, 2003.

- [27] ACI Committee 544, Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete, Farmington Hills, 2017.
- [28] S. Grunewald, Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, Technical University of Delft, 2004. doi:uuid:07a817aa-cba1-4c93-bbed-40a5645cf0f1.
- [29] S.-D. Hwang, K. Khayat, O. Bonneau, Performance-based specifications of self-consolidating concrete used in structural applications Internal curing View project Non-destructive Testing View project SEE PROFILE, (2007) 121–129. <https://www.researchgate.net/publication/268804229>.
- [30] ACI Committee 544, Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber- Reinforced Concrete, Farmington Hills, 2017.
- [31] V. Cunha, Steel fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (from Micro-Mechanics to Composite Behaviour), University of Minho, 2010. <http://hdl.handle.net/1822/10667>.
- [32] A. Carpinteri, G. Fortese, C. Ronchei, D. Scorza, S. Vantadori, Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 91 (2017) 66–75. doi:10.1016/j.tafmec.2017.03.015.
- [33] W. Meng, Y. Yao, B. Mobasher, K. Khayat, Effects of loading rate and notch-to-depth ratio of notched beams on flexural performance of ultra-high-performance concrete, *Cem. Concr. Compos.* 83 (2017) 349–359. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.07.026.
- [34] B. Zhou, Y. Uchida, Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC, *Cem. Concr. Res.* 95 (2017) 164–177. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.017.
- [35] S. Xu, H.W. Reinhardt, Shear fracture on the basis of fracture mechanics, *Otto-Graf.* 16 (2005) 21–78. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.6390&rep=rep1&type=pdf>.
- [36] N. Banthia, F. Majdzadeh, J. Wu, V. Bindiganavile, Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear, *Cem. Concr. Compos.* 48 (2014) 91–97. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018.
- [37] F. Soltanzadeh, J.A.O. Barros, R.F.C. Santos, High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research, *Constr. Build. Mater.* 77 (2015) 94–109. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.003.
- [38] A. Khanlou, G.A. MacRae, A.N. Scott, S.J. Hicks, G.C. Clifton, Shear performance of steel fibre-reinforced concrete, *Australas. Struct. Eng. Conf.* 1 (2012) 8. doi:10.1111/joa.12446.
- [39] D. Gao, L. Zhang, M. Nokken, Mechanical behavior of recycled coarse

- aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear, *Cem. Concr. Compos.* 79 (2017) 1–8. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.01.006.
- [40] A. Conforti, G.A. Plizzari, R. Zerbino, Vibrated and self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental investigation on the fibre orientation, in: *Fibre Concr.*, 2017: pp. 1–10. doi:10.1088/1757-899X/246/1/012019.
 - [41] M. Cao, Y. Mao, M. Khan, W. Si, S. Shen, Different testing methods for assessing the synthetic fiber distribution in cement-based composites, *Constr. Build. Mater.* 184 (2018) 128–142. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.207.
 - [42] V.C. Li, H. Stang, H. Krenchel, Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete, *Mater. Struct.* 26 (1993) 486–494. doi:10.1007/BF02472808.
 - [43] R.T. 162-TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete” σ - ϵ -design method, *Mater. Struct. Constr.* 36 (2003) 560–567. doi:10.1617/14007.
 - [44] M.K. Lee, B.I.G. Barr, A four-exponential model to describe the behaviour of fibre reinforced concrete, *Mater. Struct.* 37 (2004) 464–471.
 - [45] ACI Committee 544, *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*, 2018.
 - [46] J.R. Roesler, S.A. Altoubat, D.A. Lange, K.A. Rieder, G.R. Ulreich, Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground, *ACI Mater. J.* 103 (2006) 3–10.
 - [47] L.G. Sorelli, A. Meda, G.A. Plizzari, Steel fiber concrete slabs on ground: A structural matter, *ACI Struct. J.* 103 (2006) 551–558.
 - [48] A. Conforti, G. Tiberti, G.A. Plizzari, A. Caratelli, A. Meda, Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 63 (2017) 1–11. doi:10.1016/j.tust.2016.12.005.
 - [49] D.A.S. Rambo, A. Blanco, A.D. de Figueiredo, E.R.F. dos Santos, R.D. Toledo, O. da F.M. Gomes, Study of temperature effect on macro-synthetic fiber reinforced concretes by means of Barcelona tests: An approach focused on tunnels assessment, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 443–453. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.046.
 - [50] T. Voigt, V.K. Bui, S.P. Shah, Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded-wire fabric, *ACI Mater. J.* 101 (2004) 233–241.
 - [51] H. Salehian, *Evaluation of the Performance of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete in Elevated Slab Systems; from the Material to the Structure*, Universidade do Minho, 2015.
 - [52] A. Khaloo, E.M. Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, *Constr. Build. Mater.*

- 51 (2014) 179–186. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054.
- [53] D. Gálvez, Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de Monterrey, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
 - [54] R.D. Pompermayer, Fibra natural de lechuguilla para el curado interno de concretos de alto comportamiento, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2016.
 - [55] D. Marchon, R.J. Flatt, Impact of chemical admixtures on cement hydration, Elsevier Ltd, 2015. doi:10.1016/B978-0-08-100693-1.00012-6.
 - [56] Antoni, J.G. Halim, O.C. Kusuma, D. Hardjito, Optimizing Polycarboxylate Based Superplasticizer Dosage with Different Cement Type, *Procedia Eng.* 171 (2017) 752–759. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.442.
 - [57] B. Han, L. Zhang, Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures, in: *Smart Multifunct. Concr. Towar. Sustain. Infrastructures*, Springer, Singapore, 2017: pp. 11–33.
 - [58] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M.E. Kocabağ, V. Bayram, K. Mermerdaş, Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 160–170. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092.
 - [59] H.R. Shadkam, S. Dadsetan, M. Tadayon, L.F.M. Sanchez, J.A. Zakeri, An investigation of the effects of limestone powder and Viscosity Modifying Agent in durability related parameters of self-consolidating concrete (SCC), *Constr. Build. Mater.* 156 (2017) 152–160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.165.
 - [60] J.V. González, J.A. Rodriguez, H. Badillo, C.A. Juárez, Influencia de la relación de aspecto en las propiedades mecánicas del concreto autocompactable reforzado con fibras de acero, *Soc. Mex. Ing. Estructural.* (2018) 1–11.
 - [61] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 158–171. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.033.
 - [62] H.J.H. Brouwers, Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings, *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 74 (2006). doi:10.1103/PhysRevE.74.031309.
 - [63] H. Kim, T. Koh, S. Pyo, Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 153–160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.134.
 - [64] The European Project Group, The European Guidelines for Self-

Compacting Concrete: Specification, Production and Use, Eur. Guidel. Self Compact. Concr. (2005) 63. doi:0 9539733 4 4.

- [65] E. Güneyisi, Y.R. Atewi, M.F. Hasan, Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 349–362. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.087.
- [66] L. Martinie, P. Rossi, N. Roussel, Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 226–234. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.032.
- [67] I. Irki, F. Debieb, E.H. Kadri, O. Boukendakdji, M. Bentchikou, H. Soualhi, Effect of the length and the volume fraction of wavy steel fibers on the behavior of self-compacting concrete, *J. Adhes. Sci. Technol.* 31 (2017) 735–748. doi:10.1080/01694243.2016.1231394.
- [68] M.A.A. Abd Elaty, M.F. Ghazy, Fluidity evaluation of fiber reinforced-self compacting concrete based on buoyancy law, *HBRC J.* 14 (2018) 368–378. doi:10.1016/j.hbrj.2017.04.003.
- [69] K. Saito, M. Kinoshita, H. Umehara, R. Yoshida, Properties of low-shrinkage, high-strength SCC using shrinkage-reducing admixture, blast furnace slag and limestone aggregates, 2010. doi:10.1007/978-90-481-9664-7_24.
- [70] A.K.H. Kwan, S.K. Ling, Filler technology for improving robustness and reducing cementitious paste volume of SCC, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 875–885. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.160.
- [71] R. Siddique, G. Kaur, Kunal, Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 103 (2016) 15–22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.044.
- [72] F. Aslani, S. Nejadi, Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression, *Compos. Part B Eng.* 53 (2013) 121–133. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.044.
- [73] L. Xu, B. Li, X. Ding, Y. Chi, C. Li, B. Huang, Y. Shi, Experimental Investigation on Damage Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete under Compression, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 12 (2018). doi:10.1186/s40069-018-0302-3.
- [74] R.D. Neves, J.C.O. Fernandes de Almeida, Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete, *Struct. Concr.* 6 (2005) 1–8. doi:10.1680/stco.2005.6.1.1.
- [75] N. Banthia, J.F. Trottier, Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a

proposition, *ACI Mater. J.* 92 (1995) 48–57.

- [76] H.L. Cox, The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, *Br. J. Appl. Phys.* 3 (1952) 72–79. doi:10.1088/0508-3443/3/3/302.
- [77] V.C. Li, H. Stang, Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites, *Struct. Eng. Mater.* 6 (1997) 1–20.
- [78] S. Carmona, C. Molins, A. Aguado, Correlation between bending test and Barcelona tests to determine FRC properties, *Constr. Build. Mater.* 181 (2018) 673–686. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.253.
- [79] S. Khalilpour, E. BaniAsad, M. Dehestani, A review on concrete fracture energy and effective parameters, *Cem. Concr. Res.* 120 (2019) 294–321. doi:10.1016/j.cemconres.2019.03.013.
- [80] A. Bentur, S. Mindess, Mechanics of fibre reinforced cementitious composites, in: *Fibre Reinf. Cem. Compos.*, NewYork, 2007: pp. 105–137.
- [81] G. Wardeh, E. Ghorbel, Prediction of fracture parameters and strain-softening behavior of concrete: effect of frost action, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 123–138. doi:10.1617/s11527-013-0172-8.
- [82] E. V. Sarmiento, M.R. Geiker, T. Kanstad, Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer-steel FRC, *Constr. Build. Mater.* 109 (2016) 166–176. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.005.
- [83] T. Ponikiewski, J. Katzer, X-ray computed tomography of fibre reinforced self-compacting concrete as a tool of assessing its flexural behaviour, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 2131–2140. doi:10.1617/s11527-015-0638-y.
- [84] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 55 (2014) 274–288. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024.
- [85] M. Paja, T. Ponikiewski, Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, 47 (2013) 397–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.072.
- [86] A. Macanovskis, A. Krasnikovs, O. Kononova, A. Lukasenoks, Mechanical behavior of polymeric synthetic fiber in the concrete, *Procedia Eng.* 172 (2017) 673–680. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.079.
- [87] J.O. Lerch, H.L. Bester, A.S. Van Rooyen, R. Combrinck, W.I. De Villiers, W.P. Bosho, Cement and Concrete Research The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete, (2017). doi:10.1016/j.cemconres.2017.10.010.

- [88] M.G. Alberti, Polyolefin fibre-reinforced concrete : from material behaviour to numerical and design considerations, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [89] A.E. Naaman, S.P. Shah, J.L. Throne, Proceedings of the ACI International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 6 (1984) 375–396.
- [90] K. Yoshio, C.J. J., T.T. C., L.C. K., Fracture Mechanics Approach for Failure of Concrete Shear Key. I: Theory, 119 (1993) 681–700.
- [91] C. Gehle, H.K. Kutter, Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints, 40 (2003) 687–700. doi:10.1016/S1365-1609(03)00060-1.
- [92] T. Soetens, S. Matthys, Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete, Cem. Concr. Compos. 82 (2017) 1–13. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.05.010.
- [93] F. Lin, J. Guo, Shear transfer of concrete strengthened using bolted steel plates, Constr. Build. Mater. 212 (2019) 109–120. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.220.
- [94] A.B. Sturm, P. Visintin, K. Farries, D.J. Oehlers, New testing approach for extracting the shear friction material properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, J. Mater. Civ. Eng. 30 (2018) 1–13. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002427.
- [95] Z. Guo, Strength of Member Under Shear Force, 2014. doi:10.1016/b978-0-12-800859-1.00014-1.
- [96] S.G. Hong, T. Ha, Effective capacity of diagonal strut for shear strength of reinforced concrete beams without shear reinforcement, ACI Struct. J. 109 (2012) 139–148.
- [97] F. Soltanzadeh, J.A.O. Barros, R.F.C. Santos, High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research, Constr. Build. Mater. 77 (2015) 94–109. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.003.
- [98] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete, Constr. Build. Mater. 27 (2012) 6–14. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.015.
- [99] L. Ferrara, N. Ozyurt, M. Di Prisco, High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: The role of “casting-flow induced” fibre orientation, Mater. Struct. Constr. 44 (2011) 109–128. doi:10.1617/s11527-010-9613-9.
- [100] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, V. Agrawal, Fibre distribution and orientation of macro-synthetic polyolefin fibre reinforced concrete elements, Constr. Build. Mater. 122 (2016) 505–517. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.083.

- [101] S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Y.F. Wu, I. Patnaikuni, Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 857–868. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.161.

NORMATIVA

ASTM C29/C29M, «Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate,» ASTM International, West Conshohocken, 2009.

ASTM C125, «Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates,» ASTM International, West Conshohocken, 2019.

ASTM C127, «Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate,» ASTM International, West Conshohocken, 2015.

ASTM C128, «Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate,» ASTM International, West Conshohocken, 2015.

ASTM C136, «Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,» ASTM International, West Conshohocken, 2006.

ASTM C192/C192M, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,» ASTM International, West Conshohocken, 2018.

ASTM C293/C293M, «Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading),» ASTM International, West Conshohocken, 2016.

ASTM C305, «Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,» ASTM International, West Conshohocken, 2014.

ASTM C494/C494M, «Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,» ASTM International, West Conshohocken, 2008.

ASTM C617/C617M, «Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens,» ASTM International, West Conshohocken, 2015.

ASTM C1116/C1116M, «Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete,» ASTM International, West Conshohocken, 2015.

ASTM C1609/C1609M, «Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading),» ASTM International, West Conshohocken, 2019.

ASTM C1610/C1610M, «Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique,» ASTM International, West Conshohocken, 2019.

ASTM C1611/C1611M, «Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,» ASTM International, West Conshohocken, 2018.

EN 12350-10, «Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete - L box test,» European Committee for Standardization, Brussels, 2011.

EN 14651, «Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual),» European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

NMX-C-414-ONNCCE, «Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba,» 2004.

JSCE-SF4, «Method of Test For Flexural Strength and Flexural Toughness,» Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 1984.

JSCE - SF6, «Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC),» Japanese Society of Civil Engineering, Tokyo, 1990.

ASTM C136/C136M, «Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,» ASTM International, West Conshohocken, 2014.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

José Vidal González Aviña

Candidato para obtener el Grado de Maestría en Ciencias con
Orientación a Materiales de Construcción

Campo de estudio: Materiales de construcción

Biografía: Nacido en la ciudad de Zacatecas, Zacatecas, el 19 de marzo de 1994, hijo de Pedro González Rivera y Ma. Nidia Aviña Saucedo

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, en el año 2017. Durante sus estudios de licenciatura, en el año 2016 participó en el 18° Verano de la Ciencia bajo la asesoría del Dr. Alejandro Meza de Luna en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes con el tema “Modelación del concreto reforzado con fibras”. En el año 2017, obtuvo el cuarto lugar en el Concurso Nacional de Cubos de Concreto del ACI en el XXXIII OlimpiANEIC, realizado en la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

Experiencia profesional: Técnico en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Zacatecas de enero – julio del 2017. Ha asistido al congreso “Innovación Tecnológica del Concreto” en la Universidad Autónoma de Nuevo León (julio del 2018), dentro del cual ganó el tercer lugar por el mejor contenido técnico con el poster titulado “Evaluación del concreto autocompactable reforzado con fibras sintéticas para la aplicación a elementos estructurales”. Participó como ponente en el “Congreso Nacional de Ingeniería Estructural” en la sesión técnica “Estudios experimentales de sistemas estructurales y materiales” con el tema “Influencia de la relación de aspecto en las propiedades mecánicas del concreto autocompactable reforzado con fibras de acero” (octubre del 2018). Miembro asociado del comité “544 - Fiber Reinforced Concrete” del “American Concrete Institute” desde 2018.