

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



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA RESIDUAL A  
TENSIÓN POR FLEXIÓN EN VIGAS CONCRETO FIBROREFORZADO  
MEDIANTE FIBRAS ESTRUCTURALES DE POLIPROPILENO**

**POR**

**JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR  
EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN  
Y ESTRUCTURAS**

**FEBRERO, 2017**

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



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA RESIDUAL A  
TENSIÓN POR FLEXIÓN EN VIGAS CONCRETO FIBROREFORZADO  
MEDIANTE FIBRAS ESTRUCTURALES DE POLIPROPILENO**

**POR**

**JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR  
EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN  
Y ESTRUCTURAS**

**FEBRERO, 2017**

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA RESIDUAL A TENSIÓN  
POR FLEXIÓN EN VIGAS CONCRETO FIBROREFORZADO MEDIANTE FIBRAS  
ESTRUCTURALES DE POLIPROPILENO**

---

Director

Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado

---

Co-Director

Dr. Alejandro Durán Herrera

Asesor externo

---

Dr. Joaquim António Oliveira de Barros

Fecha: Febrero de 2017

## Tabla de contenido

<b>INDICE DE FIGURAS.</b> .....	<b>5</b>
<b>INDICE DE TABLAS.</b> .....	<b>6</b>
<b>INDICE DE GRAFICAS.</b> .....	<b>7</b>
<b>TERMINOS Y ABREVIATURAS.</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>10</b>
<b>RELEVANCIA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN.</b> .....	<b>13</b>
LAS FIBRAS.....	14
CLASIFICACION DE LAS FIBRAS .....	14
FIBRAS DE ACERO. ....	15
FIBRAS DE VIDRIO. ....	16
FIBRAS NATURALES.....	17
FIBRAS SINTÉTICAS. ....	18
<b>CAPITULO 1 ANTECEDENTES.</b> .....	<b>21</b>
1.1 MARCO TEÓRICO.....	21
1.1.1 <i>REFORZAMIENTO DEL AGRIETAMIENTO POR CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN LOS FRC.</i> .....	21
1.1.2 <i>REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN LOS CONCRETOS FIBROREFORZADOS.</i> .....	23
1.2 <i>Clasificación de los modelos de fractura FRC.</i> .....	24
1.3 FENÓMENO DE FRACTURA EN UN CONCRETO FIBROREFORZADO. ....	29
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA. ....	35
1.5 JUSTIFICACIÓN. ....	37
1.6 OBJETIVO GENERAL.....	38
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	38
1.8 HIPÓTESIS.....	39
<b>CAPITULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.</b> .....	<b>40</b>
2.1 ESTAPAS DE LA INVESTIGACION.....	40
2.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	42
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS.....	44
2.3.1 <i>Cemento portland ordinario (CPO).</i> .....	44
2.4 CENIZA VOLANTE.....	45
2.5 WOLLASTONITA.....	46
2.6 AGREGADOS.....	47
2.6.1 <i>AGREGADOS FINOS.</i> .....	47
2.6.2 <i>AGREGADOS GRUESOS.</i> .....	47
2.8 DISEÑO DE LAS MEZCLAS. ....	50
2.9 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO.....	51
2.9.1 <i>TRABAJABILIDAD.</i> .....	53
2.9.2 <i>MASA VOLUMÉTRICA.</i> .....	54
2.9.3 <i>CONTENIDO DE AIRE.</i> .....	54
2.9.4 <i>TEMPERATURA.</i> .....	55
2.10 PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO.....	55
2.10.1 <i>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.</i> .....	55
2.10.2 <i>RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN.</i> .....	55
2.10.3 <i>MODULO DE ELASTICIDAD.</i> .....	59

2.11 INSTRUMENTACIÓN, ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL. ....	60
2.11.1 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO VIRTUAL. ....	60
<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....</b>	<b>62</b>
3.1 CEMENTO PORTLAND ORDINARIO. ....	62
3.2 CENIZA VOLANTE. ....	62
3.3 WOLLASTONITA.....	63
3.4 AGREGADOS. ....	64
3.4.1 AGREGADO GRUESO. ....	64
3.4.2 AGREGADO FINO. ....	65
3.5 ADITIVO. ....	66
3.6 DISEÑO DE MEZCLAS. ....	<b>67</b>
3.6.1 FIBRAS SINTÉTICAS. ....	70
3.6.2 MICROGRAFIAS DE FIBRAS. ....	71
3.6.3 PASTA. ....	72
3.7 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO FIBROREFORZADO. ....	75
3.7.1 TRABAJABILIDAD. ....	75
3.7.2 MASA VOLUMÉTRICA. ....	76
3.7.3 CONTENIDO DE AIRE. ....	77
3.7.4 TEMPERATURA. ....	78
3.8 PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO. ....	78
3.8.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	78
3.8.2 Resistencia a la tensión por flexión. ....	85
3.8.2.1 Resultados por tipo de fibra y serie en el tiempo. ....	86
3.8.2.2 Resultados por tipo de fibra y serie en sus tres edades. ....	102
3.9 Modulo de elasticidad. ....	111
3.10 Energía de fractura. ....	112
<b>CAPITULO 4. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>113</b>
<b>CAPITULO 5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>116</b>
<b>APENDICE 1. PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE MATRICES DEL EXPERIMENTO(VIGA).....</b>	<b>122</b>

## Indice de figuras.

Figura 1. Elementos del Concreto.	11
Figura 2. Principales componentes del Concreto.	11
Figura 3. Factores gobernantes que intervienen en la calidad de una resistencia del concreto [3].	12
Figura 4. Algunos tipos de fibra: a) doble gancho 2D; b) torcida; c) lisa.	13
Figura 5. Clasificación de fibras [7].	15
Figura 6. Geometría de las fibras de acero [7].	16
Figura 7. Diámetro Equivalente del peso específico de la fibra sintética [7].	19
Figura 8. Cuatro propuestos niveles de reforzamiento del FRC [16].	23
Figura 9. Modos de Falla [20].	25
Figura 10. Modelo de la grieta ficticia MFNLE [21].	26
Figura 11. Modelos de aproximación de de la grieta ficticia [21].	27
Figura 12. Comportamiento de los materiales compuestos de FRC [16].	28
Figura 13. Fenomeno de puenteo de las fibras y proceso de fractura [22]	30
Figura 14. Modos de Falla de la Fibra en una Matriz Cementante [30].	30
Figura 15. Procedimientos para la obtención de un modelo de tension [22]	32
Figura 16. Vista axial de la matriz cementante con fibra de polipropileno [45].	36
Figura 17. Etapas del Programa Experimental SNFRC.	40
Figura 18. Esquema general de la metodología experimental.	41
Figura 19. Diseño Experimento sintético de SNFRC.	42
Figura 20. Diseño Experimento ampliado.	43
Figura 21. Prueba de asentamiento de un concreto autocompactable [71].	54
Figura 22. Configuración de la norma EN 14651 [34].	56
Figura 23. Respuesta post-agrietamiento del concreto fibroreforzado [34].	57
Figura 24. Chasis CompaDAQ de 8 modulos de entrada.	60
Figura 25. Instrumento virtual de medicion, diagrama de flujo de señal de los sensores.	61
Figura 26. Pantalla frontal de instrumentos.	61
Figura 27. Micrografia de la wallostonita en forma acicular.	63
Figura 30. Revolvedora de 80 L en adición de fibras y cuarto de curado.	69
Figura 31. Fibras polipropileno, de izquierda a derecha (enduro, forta ferro, mac, tuf strand)	70
Figura 32. Micrografias de la Fibra Enduro.	71
Figura 33. Micrografias de la Fibra Mac.	71
Figura 34. Micrografias de la Fibra Tuf strand.	72
Figura 35. Micrografia de la fibra Forta ferro.	72
Figura 37 DTA/TGA. Serie I	74
Figura 38 DTA/TGA. De la serie II	74
Figura 39 DTA/TGA de la serie III.	74
Figura 40. Prueba de extensibilidad de diferentes series.	76
Figura 41. Prueba de contenido de aire por personal Certificado UANL-ACI.	77
Figura 42. Montaje de los sensores LVDT, Extensometro de greita y celda de carga.	84
Figura 40. Equipo de ensaye y montaje de la viga en tres puntos.	85

## Índice de Tablas.

Tabla 1. Propiedades físicas de las fibras según material [6].	14
Tabla 2. Composición química de las fibras de vidrio Fuente: ACI 544.1R [7].	16
Tabla 3. Propiedades físicas de las fibras de vidrio Fuente: ACI 544.1R [7].	17
Tabla 4. Propiedades físicas de las fibras naturales Fuente: ACI 544.1R [7].	17
Tabla 5. Propiedades de las fibras sintéticas [7].	18
Tabla 6. Principales fases cristalinas encontradas en el cemento portland [58].	45
Tabla 7. Clasificación de aditivos para concreto (NMX-C-199-ONNCCE) [66].	48
Tabla 8. Principales normas internacionales para evaluación de concretos fibroreforzados.	56
Tabla 9. Compuestos analíticos del Cemento Tipo CPO.	62
Tabla 10. Compuesto Químicos de Ceniza Volante sin tamizar.	63
Tabla 11. Compuesto Químicos de Ceniza Volante tamizados por la malla No.100.	63
Tabla 12. Distribución de tamaño de partícula.	63
Tabla 13. Compuesto químicos de Wollastonita.	64
Tabla 14. Granulometría del agregado grueso y propiedades.	64
Tabla 15. Granulometría de agregado fino.	65
Tabla 16. Proporciónamiento en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "A".	67
Tabla 17. Proporciónamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "B".	67
Tabla 18. Proporciónamiento de la mezcla en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "C".	67
Tabla 19. Proporciónamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "D".	68
Tabla 20. Proporciónamiento de la mezcla en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "E".	68
Tabla 21. Proporciónamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "F".	68
Tabla 22. Propiedades de las fibras de polipropileno del diseño del experimento.	70
Tabla 23. Extensibilidad de las muestras obtenidas de la fibra por serie.	75
Tabla 24. Resultados del muestreo de las mezclas por serie.	76
Tabla 25. Resultados de Contendio de aire de las mezclas	77
Tabla 26. Lecturas de temperatura de las series.	78
Tabla 27. Promedios de resistencia al esfuerzo a compresión por edad y tipo de fibra. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 28. Coeficientes de variación de la resistencia al esfuerzo a compresión.	83
Tabla 29. Datos de la serie "A" base cemento CPO	87
Tabla 30. Resultados de la serie "B" base cemento CPO	90
Tabla 31. Resultados de la serie "C" base cemento CPO y sustitución 15% de ceniza volante.	93
Tabla 32. Resultados de la serie "D" base cemento CPO y sustitución 15% de ceniza volante.	96
Tabla 33. Resultados de la serie "E" base cemento CPO y sustitución 15% de wollastonita.	98
Tabla 34. Resultados de la serie "F" base cemento CPO y sustitución 15% de wollastonita.	100

## Indice de Graficas.

Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado grueso, T.M.A. 19 mm (3/4").	65
Gráfica 2 Curva de Granulométrica del agregado Fino.	66
Gráfica 3. Resistencia a la compresion de los cubos.	73
Gráfica 4. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 dias de la fibra "Enduro".	79
Gráfica 5. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 dias de la fibra "Enduro".	79
Gráfica 6. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 dias de la fibra "Enduro".	79
Gráfica 7. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 dias de la fibra "Forta ferro".	80
Gráfica 8. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 dias de la fibra "Forta ferro".	80
Gráfica 9. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 dias de la fibra "Forta ferro".	80
Gráfica 10. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 dias de la fibra "Mac".	81
Gráfica 11. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 dias de la fibra "Mac".	81
Gráfica 12. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 dias de la fibra "Mac".	81
Gráfica 13. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 dias de la fibra "Tuf strand".	82
Gráfica 14 Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 dias de la fibra "Tuf strand".	82
Gráfica 15. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 dias de la fibra "Tuf strand".	82
Gráfica 16. Fibra enduro serie A al 0.5% v.f.	86
Gráfica 17. Fibra forta ferro serie A al 0.5% v.f.	86
Gráfica 18. Fibra mac serie A al 0.5% v.f.	86
Gráfica 19. Fibra tuf strand serie A al 0.5% v.f.	87
Gráfica 20. Fibra enduro serie B al 1% de v.f.	88
Gráfica 21. Fibra forta ferro serie B al 1% de v.f.	89
Gráfica 22. Fibra mac serie B al 1% v.f.	89
Gráfica 23. Fibra tuf strand serie B al 1% de v.f.	89
Gráfica 24. Fibra enduro serie C al 0.5%v.f.	91
Gráfica 25. Fibra forta ferro serie C al 0.5% v.f.	92
Gráfica 26. Fibra mac serie C al 0.5% v.f.	92
Gráfica 27. Fibra tuf strand serie C al 0.5% v.f.	92
Gráfica 28. Fibra enduro serie D al 1% v.f.	94
Gráfica 29. Fibra forta ferro serie D al 1% de v.f.	94
Gráfica 30. Fibra mac serie D al 1% de v.f.	95
Gráfica 31. Fibra tuf strand serie D al 1% de v.f.	95
Gráfica 32. Fibra Enduro serie E al 0.5% v.f.	96
Gráfica 33. Fibra forta ferro serie E al 0.5% v.f.	97
Gráfica 34. Fibra mac serie E al 0.5% v.f.	97
Gráfica 35. Fibra tuf strand serie E al 0.5% v.f.	97
Gráfica 36. Fibra enduro serie F al 1.0 % v.f.	98
Gráfica 37. Fibra forta ferro serie F al 1.0 % v.f.	99
Gráfica 38. Fibra mac serie F al 1% v.f.	99
Gráfica 39. Fibra tuf strand serie F al 1% v.f.	99
Gráfica 40. Tipos de fibra de la serie A a la edad 28 dias.	100
Gráfica 41. Tipos de fibras de la serie A a la edad 56 dias.	101
Gráfica 42. Tipo de fibras de la serie A a la edad 90 dias.	101
Gráfica 43. Tipos de fibra de la serie B a la edad 28 dias.	102
Gráfica 44. Tipos de fibra de la serie B a la edad 56 dias.	102
Gráfica 45. Tipos de fibra de la serie B a la edad 90 dias.	102
Gráfica 46. Tipos de fibra de la serie C a la edad 28 dias.	103
Gráfica 47. Tipos de fibra de la serie C a la edad 56 dias.	103
Gráfica 48. Tipos de fibras de la serie C a la edad 90 días.	104

<i>Gráfica 49. Tipos de fibras en el serie D a la edad 28 días.....</i>	<i>104</i>
<i>Gráfica 50. Tipos de fibras de la serie D a la edad 56 días.....</i>	<i>105</i>
<i>Gráfica 51. Tipos de fibras de la serie D a la edad 90 días.....</i>	<i>105</i>
<i>Gráfica 52. Tipos de fibra de la serie E a la edad 28 días.....</i>	<i>106</i>
<i>Gráfica 53. Tipos de fibra de la serie E a la edad 56 días.....</i>	<i>106</i>
<i>Gráfica 54. Tipos de fibras de la serie E a la edad 90 días.....</i>	<i>106</i>
<i>Gráfica 55. Tipos de fibras de la serie F a la edad 28 días.....</i>	<i>107</i>
<i>Gráfica 56. Tipos de fibra de la serie F a la edad de 56 días.....</i>	<i>107</i>
<i>Gráfica 57. Tipos de fibra de la serie F a la edad de 90 días.....</i>	<i>108</i>

Terminos y abreviaturas.

## INTRODUCCIÓN.

Hoy en día el mundo se encuentra en la necesidad de utilizar materiales sostenibles para mejorar la calidad de vida y su entorno, por ello se busca optimizar los recursos naturales, hacer uso con lo que dispone en su entorno para obtener materiales, crear, diseñar y construir. Se busca que los materiales tengan un eficiencia sustentable, mejorar sus propiedades mecánicas y durabilidad, así como eficientar los procesos de construcción de casas, escuelas, hospitales, espacios públicos y urbanos, el único propósito de optimizar recursos materiales, esto ha llevado a innovar, transformar en nuevos materiales compuestos.

El concreto ha sido utilizado en los últimos 100 años como un material compuesto idóneo en la construcción con propiedades físicas extraordinarias, de gran diversidad, y que ha sido objeto de investigación por ingenieros, científicos, y expertos en la construcción, debido a su sencillez en la preparación y facilidad por conseguir los materiales con los que se fabrica. En los últimos 10 años, la industria de la construcción creció en México un promedio anual del 7%, es decir, se producen en promedio 8.5 millones de metros cúbicos de concreto por año, de los cuales estos tiene una resistencia convencional promedio de 20 MPa y con un valor promedio de producción de \$ 7 mil millones de pesos, los cuales representa en el producto interno bruto (PIB) de 0.074% [1]. El concreto es el material mas utilizado en la industria de la construcción, su consumo en el país y en el mundo sigue en aumento, este dato puede ser similar en todos los países y regiones de nuestro planeta. Las razones son múltiples, bajos costos en la adquisición de materias primas, su elaboración es simple, su mezclado sencillo, puede tomar cualquier forma y la aplicación abarca gran variedad de infraestructura de obra civil y urbana [2]. Las tres atributos para un buen concreto de calidad debe ser:

- Resistencia; el material resuelva los problemas del diseño estructural;
- Durabilidad; para que el material tenga la habilidad para resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro;

- Económico; los elementos que integran al concreto sean de bajo costo, su adquisición es fácil, su proceso de mezclado no es complicado y no se ocupa maquinaria especializada [3].

Dentro de los atributos del concreto, se puede decir que son varios los elementos que hacen que un concreto cumpla con un buen diseño y de calidad (véase Figura 1).

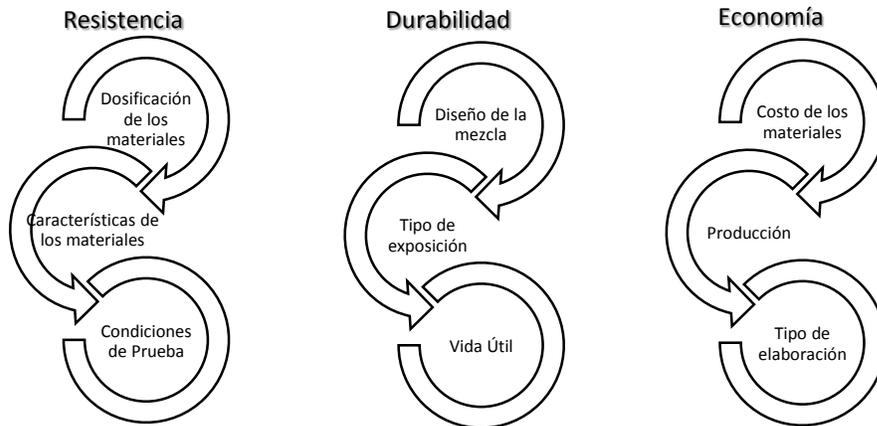


Figura 1. Elementos del Concreto.

El concreto es considerado como un material compuesto, el cual está formado por materiales como agregados finos, gruesos, cemento, agua, etc.; Su definición es: Un material estructural con agentes reforzadores por medio aglutinante inmerso en agregado fino y en agregado grueso [3] (véase Figura 2).

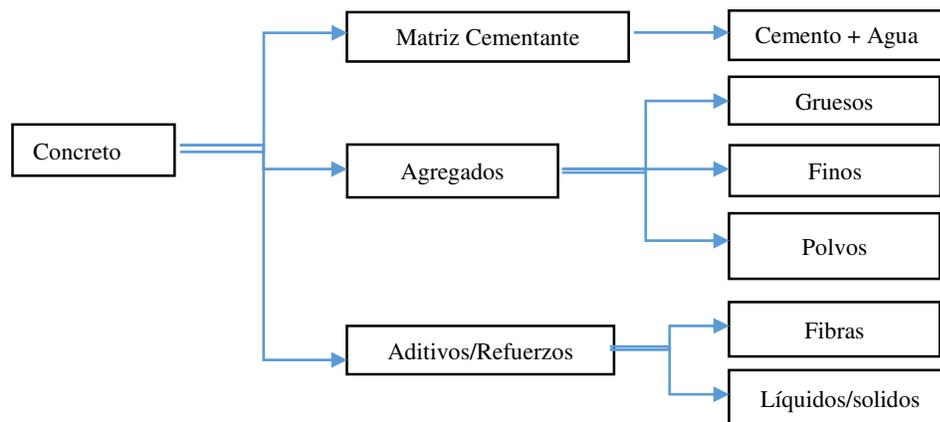


Figura 2. Principales componentes del Concreto.

La calidad en la resistencia del concreto depende de varios factores como la matriz cementante, los agregados y la unión entre los dos. Sin embargo, esto es más complejo, al pasar dentro de sus propiedades físicas del estado fresco (fluido, semifluido, plástico), a un estado endurecido puede depender de varios factores como se muestran en la Figura 3 [4].



Figura 3. Factores gobernantes que intervienen en la calidad de una resistencia del concreto [3].

## RELEVANCIA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN.

En la actualidad se puede considerar como un concreto moderno, al concreto fibroreforzado o por sus siglas en inglés Fiber Reinforced Concrete (FRC), es *un material compuesto donde en su estado fresco se le adiciona una cantidad de fibras, que evoluciona y mejora las propiedades en el estado endurecido*. Actualmente, las investigaciones de estos materiales compuestos reforzados con fibras avanza en dos direcciones y son:

- I. La selección de la adecuada combinación de la matriz cementante y la fibra de refuerzo.
- II. El mejor entendimiento del fenómeno de separación y/o agrietamiento entre las fibras y la matriz cementante [5].

Los concreto fibroreforzado en su comportamiento de la interface entre la fibra y la matriz cementante, tienen una gran importancia en las propiedades físicas del material compuesto, mejorar sus propiedades mecánicas como, modulo de elasticidad, resistencia a la tensión, flexión, ductilidad, tenacidad y energía de fractura. El desempeño del concreto fibroreforzado dependerá de:

- I. Tipo de Fibra.
- II. Propiedades físicas de las fibras.
- III. Volumen.
- IV. Geometría de las fibras y composición (véase Figura 4).
- V. Matriz cementante.
- VI. Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz cementante.

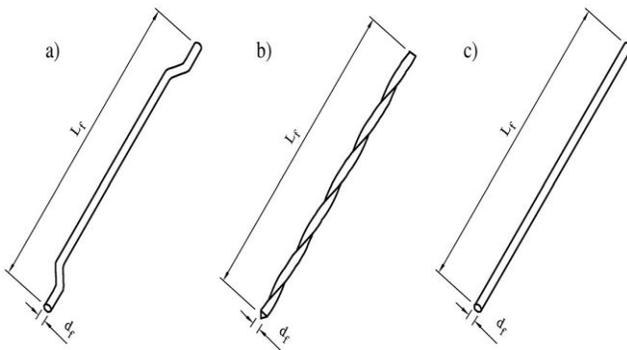


Figura 4. Algunos tipos de fibra: a) doble gancho 2D; b) torcida; c) lisa.

## LAS FIBRAS.

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas cuya longitud es muy superior a su diámetro y están orientadas a lo largo de un solo eje. Algunas se doblan con facilidad depende del tipo de material. En las fibras existe una amplia variedad de materiales, formas, tamaños, con longitud y espesor variado. La longitud de la fibras y el diámetro equivalente, divididas entre si forman una unidad patrón denominada “relación de aspecto” (longitud de la fibra  $l_f$  entre diámetro de la fibra  $d_f$ ) son características geométricas importantes, al igual que las propiedades mecánicas como: resistencia a la tensión, ductilidad, modulo de elasticidad, elongación, punto de fusión y punto de inflamación(véase Tabla 1 ).

Tabla 1. Propiedades físicas de las fibras según material [6].

Tipo de fibra	Densidad relativa	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Compatibilidad con la pasta
Acero	7.85	0.1-1.5	10-60	200	700-2000	3-4	Buena
amianto	2.55	0.02-0.3	5-40	164	200-1800	2-3	Buena
Vidrio	2.70	0.1-0.3	10-50	70	600-2500	<3	Pobre
poliéster	1.34-1.39	0.1-0.2	20-30	<17	800-1300	8-15	Pobre
Polipropileno (macro fibra)	0.91	0.2-1.0	20-75	<8	450-650	8	Buena
Polipropileno (micro fibra)	0.91	0.09-0.2	6-24	<4	<450	<8	Buena
Nylon	1.15	0.02	10-20	8	800	25	Buena
Celulosa	1.50	0.02-0.1	0.5-5	10-50	300-1000	20	Pobre

## CLASIFICACION DE LAS FIBRAS

La clasificación de las fibras se han realizado de acuerdo a su composición material, física y química. El instituto americano del concreto (ACI) publica el primer reporte del estado del arte en 1963 denominado ACI.544.1R, donde se muestra una clasificación de las fibras y sus diferentes nomenclaturas en concretos fibroreforzados (véase Figura 5).

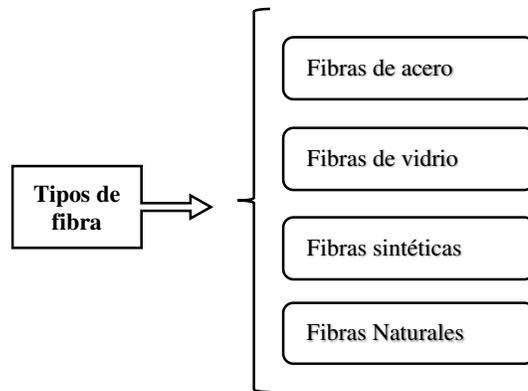


Figura 5. Clasificación de fibras [7].

### FIBRAS DE ACERO.

La fibra de acero en el concreto forma un material compuesto denominado SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), ha sido este concreto el más empleado por la industria de la construcción, con el objetivo de reforzar al concreto estructuralmente y de llevar a cabo una sustitución parcial o total del refuerzo continuo. Actualmente existe una gran variedad de marcas formas y tamaños, sin embargo todo se puede clasificar según la norma estándar ASTM A 820 [8], las clasifica en cuatro tipos de fibras y según la UNE-EN 14889-1 [9] clasifican por su manufactura y son: Tipo I alambre trefilado en frío, Tipo II alambre suelto y Tipo III alambre vaciado y Tipo IV otro tipo de fibras. La sociedad japonesa de ingenieros civiles también las clasifica de acuerdo a su geometría en tres tipos sección cuadrada, circular y deforme (véase Figura 6). Las normas establecen en común como requisitos el mínimo de resistencia como: tensión, tensión a la ruptura, modulo de elasticidad, tipo de acero, requerimientos mezclado y condiciones de superficie de la fibra así como longitudes. Las propiedades mecánicas de las fibras de acero, dependen básicamente del módulo de elasticidad del acero y tipo de acero empleado en su fabricación.

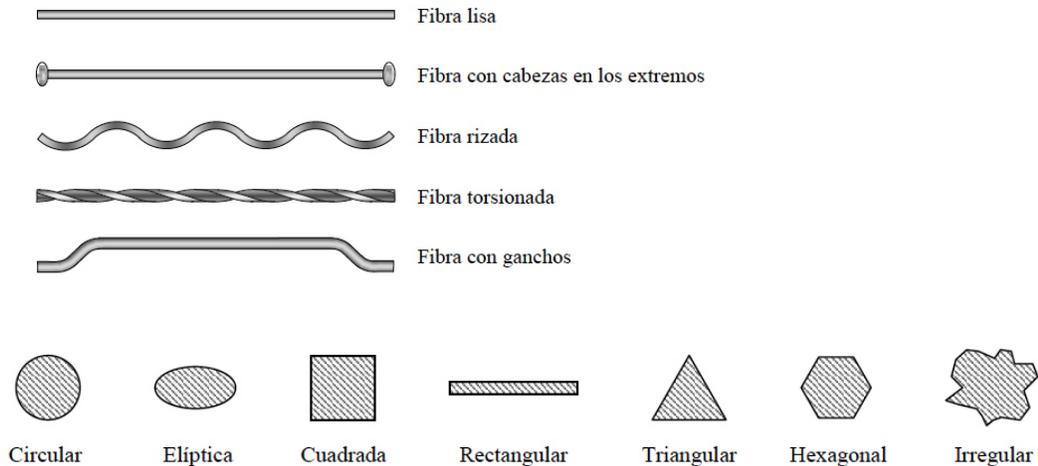


Figura 6. Geometría de las fibras de acero [7].

### FIBRAS DE VIDRIO.

El desarrollo de nuevos materiales en la industria hizo que se trabajara en nuevos materiales de fibras y es ahí donde surge las fibras de vidrio, al adicionarle en el concreto forman un material compuesto GFRC (*Glass Fiber Reinforced Concrete*). El uso de las fibras de vidrio en el concreto depende su composición química y propiedades mecánicas, desde 1960 se empezó a trabajar con este reforzamiento donde la nomenclatura en la industria las ha denominado como: las A-glass, son fibras con contenido alcalinas; las E-glass, son fibras textil, de gran uso en aislamiento térmico; Cem-FIL AR-glass, esta fibra es a de mayor compatibilidad con el concreto; NEG AR-glass, fibra con una alta resistencia propiedades mecánicas [10]. Este tipo de fibras tiene diferentes composiciones químicas se muestra en Tabla 2 y en la Tabla 3 sus propiedades físicas. Este tipo de fibras se debe tener especial cuidado por su alta reacción álcali dentro de la matriz cementante.

Tabla 2. Composición química de las fibras de vidrio Fuente: ACI 544.1R [7]

Composición química en porcentaje	A-glass	E-glass	Cem	FIL AR-glass	NEG AR-glass
SiO <sub>2</sub>	73.0	54.0	—	62.0	61.0
Na <sub>2</sub> O	13.0	—	—	14.8	15.0
CaO	8.0	22.0	—	—	—
MgO	4.0	0.5	—	—	—
K <sub>2</sub> O	0.5	0.8	—	—	2.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	15.0	—	0.8	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.3	—	—	—
ZrO <sub>2</sub>	—	—	—	16.7	20.0
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	0.1	—
Li <sub>2</sub> O	—	—	—	—	1.0

Tabla 3. Propiedades físicas de la fibras de vidrio Fuente: ACI 544.1R [7].

Propiedad	A-Glass	E-Glass Cem	FIL AR-Glass	NEG AR-Glass
Gravedad Especifica	2.46	2.54	2.70	2.74
Esfuerzo a Tensión (ksi)	450	500	360	355
Módulo de Elasticidad (ksi)	9400	10,400	11,600	11,400
Alargamiento a Rotura (%)	4.7	4.8	3.6	2.5

Equivalencia: 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

### Fibras naturales.

Las fibras naturales es un material que ha sido extraídas de plantas, arboles, etc. Este tipo de material se ha diversificado su uso, debido al encarecimiento de fibras de acero, vidrio, es por ello que en los países subdesarrollados se ha investigado este tipo de fibras, para proporcionar un concreto fibroreforzado a bajo costo, por medio de las fibras naturales NFRC (*Natural Fiber Reinforced Concrete*). Las fibras naturales mas conocidas son de: sisal, coco, bagazo de caña de azúcar, lechuguilla, plátano (banana), palma, etc., se han realizado diferentes productos como telas, cuerdas, esteras, sombreros, productos artesanales, etc. En la Tabla 4 se muestra las propiedades de las fibras naturales. Sin embargó este tipo de fibras con el tiempo tiende a degradarse dentro de la la matriz cementante, debido a que la matriz cementante tiene una alcalinidad elevada y descompone la celulosa y lignina de la fibra, lo cual implica un problema en la durabilidad de la fibra en la matriz.

Tabla 4. Propiedades físicas de las fibras naturales Fuente: ACI 544.1R [7].

Fiber type	Coconut	Sisal	Sugar cane Bagasse	Bamboo	Jute	Flax	Elephant grass	Water reed	Plantain	Musamba	Wood fiber (kraft pulp)
Fiber length, in.	2-4	N/A	N/A	N/A	7-12	20	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1-0.2
Fiber diameter, in.	0.004-0.016	N/A	0.008-0.016	0.002-0.016	0.004-0.008	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.001-0.003
Specific gravity	1.12-1.15	N/A	1.2-1.3	1.5	1.02-1.04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.5
Modulus of elasticity, ksi	2750-3770	1880-3770	2175-2750	4780-5800	3770-4640	14,500	710	750	200	130	N/A
Ultimate tensile strength, psi	17,400-29,000	40,000-82,400	26,650-42,000	50,750-72,500	36,250-50,750	145,000	25,800	10,000	13,300	12,000	101,500
Elongation at break, percent	10-25	3-5	N/A	N/A	1.5-1.9	1.8-2.2	3.6	1.2	5.9	9.7	N/A
Water absorption, percent	130-180	60-70	70-75	40-45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50-75

Note: N/A = properties not readily available or not applicable.  
Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

## FIBRAS SINTÉTICAS.

Las fibras sintéticas han sido desarrolladas en la industria petroquímica y textil, creando varios tipos de fibras que se usan en la industria de la construcción, están hechas de polímeros y de una molécula de peso molecular elevada o macromoléculas, con una estructura compleja, fruto de la repetición de una estructura menor llamada monómero, el cual es un producto generalmente orgánico. La mayor parte de los polímeros usados en ingeniería se extraen de los hidrocarburos, que son moléculas formadas fundamentalmente a partir de átomos de hidrógeno y carbono, dispuestas en distintas formas estructural. Al concreto que se le adiciona fibras sintéticas se denomina SNFRC (Synthetic Fiber Reinforced Concrete). En la Tabla 5 se muestran sus propiedades dependiendo del materia sintético.

Tabla 5. Propiedades de las fibras sintéticas [7].

No.	Tipo de fibra	Diametro equivalente (mm)	Gravedad	Esfuerzo a	Modulo de	Elongacion(%)	Temperatura	Absorcion de
			Especificas	Tension(MPa)	Elasticidad(MPa)		de Ignicion	Agua
1	Acrilico	0.1270	1.16	268-999.75	13,790 - 19,306	7.5-50	-	1.0-2.5
2	Aramida	0.1194	1.44	2,930.37	62,055	4.4	alta	4.3
3	Aramida II	0.1016	1.44	2,344.50	117,215	2.5	alta	1.2
4	Carbono PAN HM	0.0762	1.60	2,482.5 - 3,033.80	379,914	0.5-0.7	alta	-
5	Carbono PAN HT	0.0889	1.60	3,447.50 - 3,999.10	230,293	1.0-1.5	alta	-
6	Carbono pitch GP	0.0991	1.60	482.50 - 792.92	275800 - 482650	2.0-2.4	alta	3.7
7	Carbono pitch HP	0.0889	1.80	1,516.50 - 3,102.75	151,690 - 482,650	0.5-1.1	alta	-
8	Nylon	0.2286	1.14	965.30	5,171	20	-	2.8-5.0
9	Poliester	0.1981	1.34	227.53 - 1,103.20	17,238	12-150	1100	0.4
10	Polietileno	0.0254	0.92	75.84 - 586.07	4,999	3.0 - 80	-	-
11	Polipropileno	-	0.90	137.90 - 689.50	3,447.50 - 4,826.5	15	1100	-

Las fibras se clasifican por tamaño, peso y composición química del polímero así como sus aplicaciones en el concreto, mortero, etc., en la industria de la construcción. Las fibras sintéticas se pueden también clasificar de acuerdo a su forma y condición de uso, así como apariencia de monofilamento y multifilamento. También se pueden clasificar según su proceso de fabricación en:

- Monofilamentos extruidos (tipo I).
- Láminas fibriladas (tipo II).

Las dimensiones de las fibras son variables, igual que su diámetro y forma pueden clasificarse en:

- Micro-fibras: < 0,30mm diámetro.
- Macro-fibras: ≥ 0,30mm diámetro.

Existe un término que se usa en las fibras sintéticas de origen textil y es el “*denier*”. El *denier* es una medida de la finura de la fibra y puede ser relacionada a un diámetro equivalente de la fibra, es decir el área de sección transversal. En la Figura 7 se muestra la relación entre el *denier* y la gravedad específica.

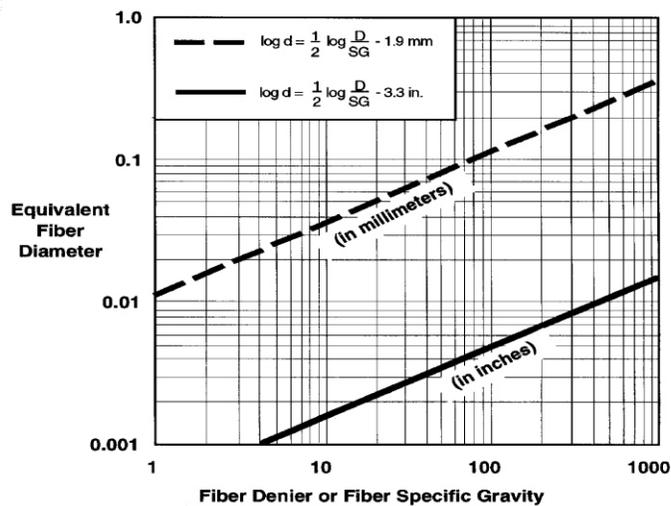


Figura 7. Diámetro Equivalente del peso específico de la fibra sintética [7].

Para determinar el diámetro equivalente de la fibra  $d$ , para una fibra de gravedad específica conocida se debe aplicar la siguiente ecuación 1:

$$d = f \left[ \frac{D}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \text{ecuación 1}$$

Dónde:

$f = 0.0120$  para un diámetro en mm.

$f = 0.0005$  para un diámetro en pulgadas.

$D =$  Peso de mezcla de fibra.

$\gamma =$  peso específico fibra.

El uso comercial de las fibras sintéticas existe en la actualidad en todo el mundo, principalmente en aplicaciones por cambios volumétricos en el concreto y contracciones sin embargo, en los últimos 10 años se ha visto mas fibras estructurales

en el concreto fibroreforzado en el mercado, por ejemplo en aplicaciones como losas de cimentación, pavimentos y revestimientos de túneles, pisos industriales y productos prefabricados y manufacturados en concreto muros concreto (til-up), paneles de revestimiento y bóvedas. Las fibras de mayor uso son las de polipropileno(PP), en la industria de la construcción debido a su versatilidad y bajo costo, que cumplen con la tarea de reforzar en el concreto ambientes muy agresivos y húmedos, estas fibras no se oxidan, son muy estables en el ambiente alcalino del concreto así como en ambientes muy ácidos. Otra propiedad es que su punto de fusión ronda en el rango de 160 °C a 300°C. Su resistencia a la tensión, dureza y rigidez es mayor que las de otros polietilenos (que además funden a los 100 °C).

PP tiene una alta resistencia al ataque químico debido a su naturaleza no polar como se menciona en el párrafo anterior. Por ejemplo el PP es resistente al alcohol, ácidos orgánicos, ésteres y cetonas, ácidos inorgánicos y álcalis. Sin embargo una desventaja es que se deforma cuando se expone a hidrocarburos alifáticos y aromáticos y por hidrocarburos halogenados [11]

## CAPITULO 1 ANTECEDENTES.

### 1.1 MARCO TEÓRICO.

Debido a sus propiedades atractivas el uso del concreto fibroreforzado ha incrementado su uso durante las últimas décadas. Se aplica actualmente en la edificación, también en otros campos como pavimentos de aeropuertos, autopistas, estructuras sismorresistentes y estructuras que resistan al impacto, túneles, puentes, estructuras hidráulicas, no solo en construcciones nuevas sino también en refuerzo y reparación de estructuras existentes. En estas tipos de obras que se menciona se utilizan ampliamente distintos tipos como: fibras de acero, vidrio, sintéticas y naturales para mejorar las propiedades físicas en del concreto.

Lo que atrae a los ingenieros e investigadores es su beneficio en mejorar las propiedades como: resistencia, ductilidad y durabilidad, para que pueden construir estructuras más resistentes, esbeltas y durables, los diseñadores estructurales y materialistas, les permite reducir espesores, peraltes y contenidos de cemento en las construcciones, así como incrementar la vida útil del proyecto. Actualmente existen dos tipos de reforzamiento general en función del tamaño de la fibra:

1. Reforzamiento por cambios volumétricos.
2. Reforzamiento estructural.

#### 1.1.1 REFORZAMIENTO DEL AGRIETAMIENTO POR CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN LOS FRC.

Las microfibras apoyan en el reforzamiento por cambios volumétricos en las primeras horas y esto se debe a la contracción, esta es una deformación que se presenta por un cambio de volumen en el concreto. Se debe principalmente a la pérdida de agua que sufre el concreto una vez que es colado y puesto a temperatura ambiente, así como a la humedad y al consumo de agua debido a su proceso de hidratación. Las deformaciones por contracción son críticas para el concreto, porque cuando se les restringe se manifiestan en forma de esfuerzos de tensión, el concreto

es débil en esfuerzos a tensión, se agrieta. Las microfibras ayudan y solventan en los cuatro tipos de contracciones y son:

- I. *La contracción secado*, se define como la deformación lineal, que depende del tiempo a una temperatura constante medida en una muestra que se seca, sin aplicación de carga [12]. Este fenómeno empieza a desarrollarse en la superficie del concreto, donde se lleva a cabo la evaporación. El progreso de este fenómeno dentro del concreto, depende de la compacidad de la microestructura del concreto y del desequilibrio entre la humedad relativa del ambiente y de los capilares del concreto. Mientras el agua se sigue evaporando se crea un menisco en los capilares más finos y las tensiones capilares que se desarrollan dentro del concreto se vuelven más fuertes [13].
- II. *La contracción autógena*, se produce a edades tempranas, antes de que el concreto haya desarrollado una resistencia estructural suficiente, incapaz de resistir las esfuerzos de tensiones, por lo que producen agrietamientos internos, que son susceptibles a la penetración del agua y el ataque químico, lo que conduce a problemas de durabilidad. Se desarrolla como consecuencia de la contracción química en el concreto.
- III. *La contracción química*, que la asociación americana de pruebas en materiales (ASTM) define en su norma ASTM C-1608 [14] como “la variación de volumen (interno) absoluto resultante de la hidratación del cemento, debido al hecho de que los productos de hidratación ocupan menos volumen físico que los reactivos”.
- IV. *La contracción plástica*, el comité del ACI 116 [15] define como el agrietamiento que ocurre en la superficie del concreto en estado fresco tan pronto como es colocado y se encuentra en estado plástico. Son características del concreto fresco y son producidos por la tensión capilar en los poros llenos de agua apareciendo como consecuencia de un retraso en el curado o protección del concreto [12] .

### 1.1.2 REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN LOS CONCRETOS FIBROREFORZADOS.

La macro-fibra, ayudan como refuerzo estructural, cada vez mas se ha incrementado su uso, debido a que puede remplazar parcial o totalmente, el reforzamiento continuo, Naamán investigo diferentes tipos de reforzamiento y clasifico los niveles de reforzamiento en el concreto fibroreforzado(véase Figura 8). En donde se puede observar los cuatro niveles de reforzamiento en función de parámetros de volumen de fibra, la relación de aspecto y la matriz cementante [16]:

- I. Control de agrietamiento(Crack control).
- II. Endurecimiento por deflexión(Deflection hardening).
- III. Endurecimiento por deformación(strain hardening).
- IV. Alta energía(high energy).

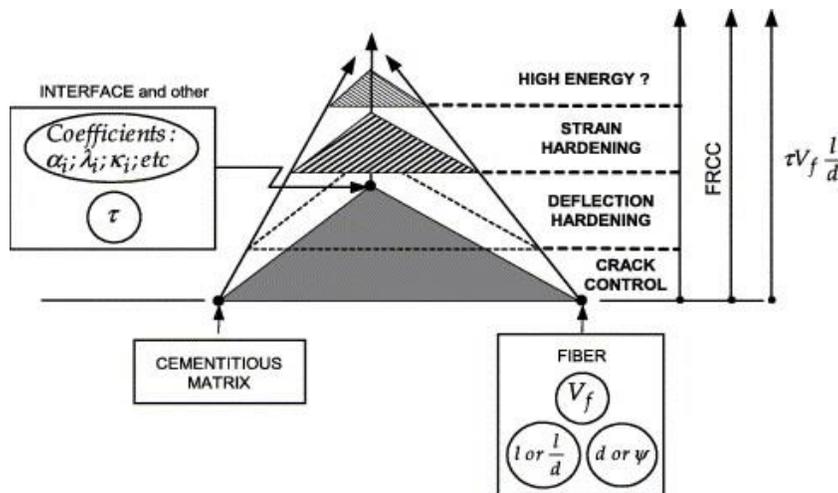


Figura 8. Cuatro propuestos niveles de reforzamiento del FRC [16].

Los reforzamientos pueden ser en elementos estructurales como: losas [17], losa de cimentación de edificios, pavimentos rígidos, revestimientos de túneles, columnas [18] y productos en la industria de prefabricados.

## 1.2 Clasificación de los modelos de fractura FRC

El concreto fibroreforzado se han desarrollado estudios experimentales para investigar sus propiedades mecánicas, nuevos modelos y métodos de diseño. Para ello se necesita conocer en detalle el comportamiento post-agrietamiento del concreto fibroreforzado. Si bien el mejor comportamiento mecánico del concreto es la resistencia a la compresión, en cambio cuando el concreto se encuentra a esfuerzos a tensión genera una falla frágil. Como se menciona anteriormente la ciencia que estudia los materiales frágiles y dúctiles es la “Mecánica de Fractura” [19]. Esta estudia la curvas de tensión-deformación a diferentes materiales en base a modelos, tipos de prueba. La respuesta mecánica de los materiales se puede distinguir tres estados:

- I. Régimen elástico.
- II. Régimen plástico.
- III. Fractura.

El concreto presenta un problema la falla frágil debido a su naturaleza cerámica, debido a su nula capacidad de absorber energías bajo esfuerzos de tensión, la única solución ante esta desventaja del material compuesto es a través del reforzamiento continuo y otra solución es la adición de fibras, sin embargo, el concreto fibroreforzado presenta defectos como material heterogéneo y son: poros y micro grietas, es por ello que el concreto en esfuerzos a tensión en la presencia de estos defectos genera tensiones críticas y superiores a los régimen elástico, plástico y proviene la fractura.

Para dar solución a cualquier material y entender la fractura el modelo elástico de Griffith dió respuesta mediante los esfuerzos de grieta, los cual se idealiza mediante la representación de una elipse dentro de un sólido infinito, donde se determina una expresión en términos de esfuerzos que tienden a infinito en la punta o vértice de la elipse, con ello surgió el termino de energía como base para los análisis de la mecánica de fractura lineal elástico (MFLE) [20].

Otro investigador Irwin [20] estableció un formalismo más correcto en la equivalencia entre la formulación energética y la formulación basada en tensiones de la mecánica de la fractura para la descripción del proceso de propagación de grietas(véase Figura 9) y son:

- Modo 1- apertura; corresponde a la separación de las caras de la grieta por aplicación de tensiones normales al plano de la grieta.
- Modo 2- deslizamiento; se refiere al desplazamiento de las caras por la acción de fuerzas de corte de signo contrario y paralelas a la grieta.
- Modo 3- desgarre; se refiere al desplazamiento y cortante de las caras de la grieta por la acción de fuerzas de tensión perpendiculares al frente de grieta.

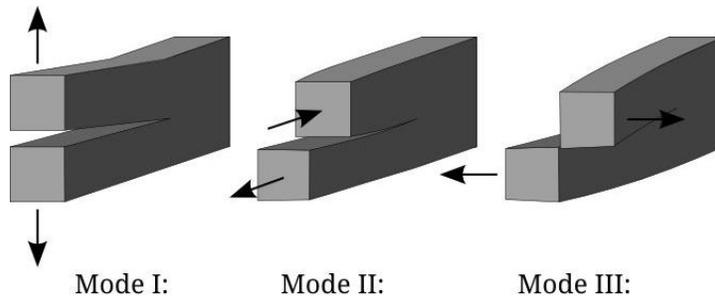


Figura 9. Modos de Falla [20].

Sin embargo el modelo MFLE tuvo sus limitaciones en especial para los materiales cuasi frágiles, como lo es el concreto, dado que la solución es válida cuando la grieta es pequeña en comparación con el tamaño del cuerpo sólido en estudio [21]. Diferentes investigadores iniciaron la caracterización del concreto, cuya ley constitutiva de modelo lineal no daba respuesta, es donde surge los modelos en la mecánica de fractura no lineal elástica (MFNLE). Dentro de estos trabajos Hillerborg [19], propuso un modelo de grieta cohesiva, basado en un estudio de propagación de grietas en una viga de concreto simple. Desde entonces y hasta la fecha se han propuesto modelos adicionales, con algunas variantes incluidas, para intentar idealizar el comportamiento de la fractura de los materiales cuasi frágiles y en especial para el concreto fibroreforzado. Los modelos de la MFNLE están basados en dos aproximaciones:

- Usando métodos de elementos finitos.
- Usando conceptos modificados de la mecánica de fractura lineal y elástica.

Uno de los modelos que mas impacto tuvo en el concreto fibroreforzado es el modelo de grieta Cohesiva (MGC). La formulación del modelo se atribuye a quién lo

propuso para simular el comportamiento de fractura de materiales frágiles, Dugdale [21], definió el comportamiento de materiales dúctiles y cuasi-frágiles con la denominada función de ablandamiento  $f(w)$ , es el esfuerzo de tensión  $\sigma_{t0}$  y  $w_c$  la apertura de grieta (véase Figura 10). El modelo es la descripción del comportamiento no lineal en la proximidad de la grieta y el avance de la grieta.

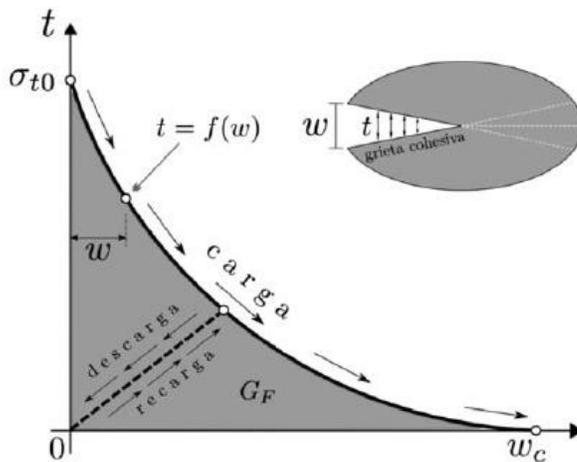


Figura 10. Modelo de la grieta ficticia MFNLE [21].

Este modelo asume que la grieta se extiende y abre mientras continua transfiriendo esfuerzos entre los lados de la grieta. Para describir este modelo tres propiedades del material son requeridas:

$f_t$ : Resistencia a la tensión del concreto.

$E$ : Módulo de elasticidad.

$G_F$ : Energía específica de fractura.

La energía específica de fractura  $G_F$  por definición, es: *la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de superficie completamente agrietada y es el área bajo la curva de la función de ablandamiento de la grieta*. Una primera aproximación muy simple para la curva  $\sigma$ - $w$  puede ser la representada en la figura lineal, donde se establece una relación lineal, bilineal y exponencial (véase Figura 11).

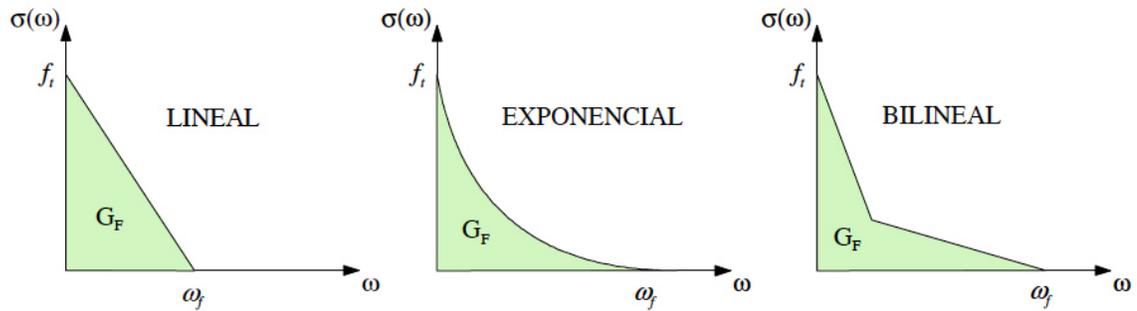


Figura 11. Modelos de aproximación de de la grieta ficticia [21].

$$G_F = \int_0^{w_i} \sigma dw = \frac{1}{2} f_{ct} w_i \text{ ecuación de aproximación no lineal.}$$

$$\sigma = f_{ct} e^{-\frac{f_{ct} * w_i}{G_F}} \text{ ecuación de aproximación exponencial.}$$

Sin embargo, la simulación del comportamiento concreto fibroreforzado es complejo por el tamaño del agregado, la zona de interface de transición (ITZ), tipo de cementante, porosidad, acomodo del agregado, relación agua cemento, etc. El concreto fibroreforzado es todavía mas complejo simular y modelar, debido al acomodo aleatorio de las fibras y lo que se ha mencionado anteriormente. Existen modelos confiables y probados para un amplio rango de cargas y configuraciones, pero los modelos propuestos para el concreto fibroreforzado sólo permiten reproducir su comportamiento bajo algunas condiciones de carga, como tensión o para algún tipo de fibras, sin embargo no tienen en cuenta el deslizamiento de las fibras respecto de la matriz cementante. Otro inconveniente es que estos modelos resultan computacionalmente muy costosos en su implementación [22]. Los modelos constitutivos para concreto fibroreforzado en su respuesta post-agrietamiento en deformación por endurecimiento (hardening) y deformación por reblandecimiento (softening) se pueden clasificar en:

- Macro-modelos
- Meso-modelos
- Multi-escala.

En los macro-modelos se representa al material compuesto como un único material con propiedades promedio. Los meso-modelos toman en cuenta cada componente

material, o sea, la matriz de concreto, las fibras y la interfaz. Los modelos multi-escala resuelven simultáneamente el problema en diferentes escalas, hacen una homogeneización para pasar de la meso a la macro-escala [23]. En la Figura 12 se muestra el comportamiento de los materiales compuestos de los concretos fibroreforzados en función del volumen de fibra ( $v_f$ ), para determinar el comportamiento a la resistencia a la tensión global de un material FRC.

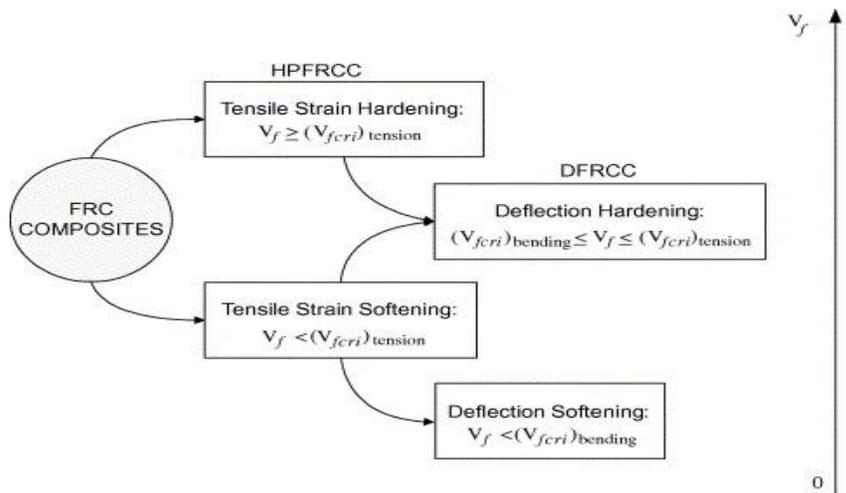


Figura 12. Comportamiento de los materiales compuestos de FRC [16].

Existen varios métodos de diseño para aplicaciones particulares de los concretos fibroreforzados, se han desarrollado dependiendo de la aplicación, sin embargo, los fabricantes de las fibras pueden sugerir el tipo de fibra ha usar, su contenido volumen y la geometría de la fibra. Los criterios, normas estándares y documentos se basan en la ecuación de aproximación no lineal. El comité americano del concreto ACI 544 [7] [24] [25]. Asi como las recomendaciones por parte del organismo europeo *Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux* RILEM TC -162-TDF [26], la sociedad japonesa ingenieros civiles (JCI-S-001-2003) [27]. Y las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), son documentos para un buen diseño de concreto fibroreforzado.

### 1.3 FENÓMENO DE FRACTURA EN UN CONCRETO FIBROREFORZADO.

A través del tiempo se ha demostrado que los criterios tradicionales de diseño de estructuras bajo el supuesto de ausencia de ningún defectos, para después considerar su efecto de algún tipo de defecto mediante factores de seguridad. Si bien el hecho de los defectos y en particular de las grietas, aparecen en los cuerpos solidos como lo es concreto que pasa de un estado fluido a solido. Surge la necesidad de analizar a este tipo de grietas y el comportamiento mecánico post-agrietamiento. La ciencia que estudia este tipo de fenómenos es la mecánica de fractura, que provee las bases y la metodología para el diseño y evaluación de componentes agrietados a fin de determinar su resistencia mecánica. Sin embargo la mecánica de fractura se encuentra en la fase de desarrollo y búsqueda de investigación en todo el mundo para comprender mejor el fenómeno de la fractura, en desarrollar mejores modelos no lineales, técnicas de medición y análisis del concreto al igual que al concreto fibroreforzado. La fractura se define como “la separación o fragmentación de un solido bajo la acción de una carga externa a través de un proceso de creación de nuevas superficies” [28]. Algo muy importante es que la fractura puede iniciar a partir de una grieta preexistente en el concreto fibroreforzado debido a estos defectos. Las fibras son una solución al concreto en su falla frágil y aumentar la resistencia a tensión y dotan de cierta ductilidad al mismo. Todo esto es por el fenómeno de punteo (*bridging effect*) de las grietas originadas en el concreto y son capaces de soportar esfuerzos y energía especifica a través de ellas. La fractura tiene tres zonas y varios autores han denominado al concreto como un material cuasi-frágil. La zona de grieta abierta(ZGA), que no tiene posibilidad de transmitir tensiones entre caras de grieta, la zona en proceso de fractura(ZPF), en la cual el material ha superado su resistencia y se ha roto, pero continua transmitiendo tensiones normales y tangenciales a través de los caras de la grieta y la zona de material sano(ZMS) en el cual no se ha alcanzado la resistencia ultima(véase Figura 13).

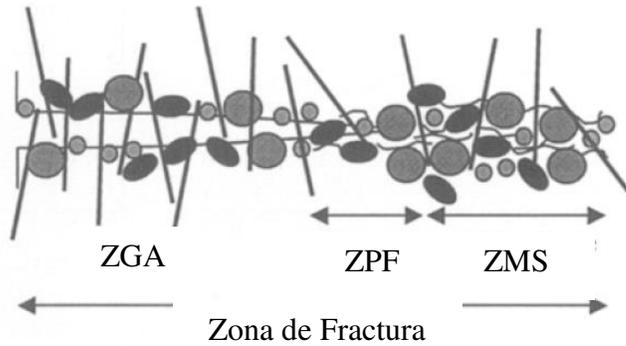


Figura 13. Fenomeno de puenteo de las fibras y proceso de fractura [22]

Este mecanismo de punteo por parte de las fibras genera también fallas y estas dependen de tres factores [29].

3. Relación de aspecto (longitud/diámetro) de la fibra.
4. La adherencia de la fibra a la matriz cementante.
5. La orientación de la fibra en la matriz cementante.

En la Figura 14 se muestra las idealizaciones de las cuatro tipos falla y absorción de energía de la fibra [30] [31], donde cabe señalar que el máximo esfuerzo de transferencia de carga de las fibras a la matriz cementante son las 3, 4 y son:

1. Falla de la fibra
2. Extracción de la fibra
3. Esfuerzo de la fibra
4. Desunión de la fibra

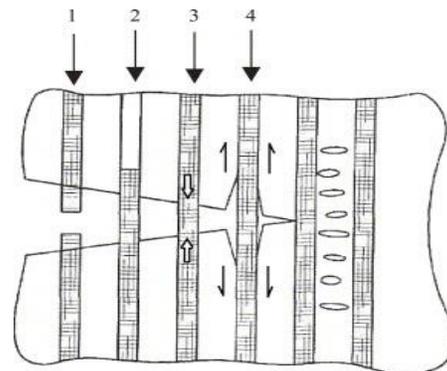


Figura 14. Modos de Falla de la Fibra en una Matriz Cementante [30].

Este incremento de energía absorbida es el fenómeno de punteo en el concreto fibroreforzado y depende en gran medida de la cantidad de fibras que atraviese la sección agrietada o fracturada. El comportamiento a tensión en el concreto fibroreforzado está afectado por varios parámetros como:

- El tipo de fibra.

- La geometría de la fibra.
- El contenido de fibras en la mezcla.
- La resistencia de adherencia de entre la fibra y la matriz cementante.
- La resistencia de la matriz cementante.
- Resistencia a la ruptura de la fibra.
- La orientación y distribución de las fibras.
- El modulo de elasticidad de las fibras [32].

Se han desarrollado numerosas investigación de la influencia de la adición de fibras en la mezcla de concreto, con diferentes relaciones agua-material cementante( $a/mc$ ), tipo de agregado, volumen de fibra( $v_f$ ), en propiedades como la resistencia a la tensión, tenacidad, ductilidad, resistencia post-agrietamiento.

En el mismo planteamiento para las pruebas en función de la ley de tensión(véase Figura 15), los dos tipos de vertientes las cuales son: en el planteamiento de la prueba directa “tensión directa”, así como también el de la placa redonda circular (RDP) de acuerdo con ASTM C 1550 [33] ,este fue desarrollada especialmente para medir la absorción de la energía, utilizado en la concreto fibroreforzado apoyado sobre tres puntos a 120°. En el planteamiento de la prueba indirecta, existe la prueba de tensión por flexión, donde hay varios tipos de vigas, dimensiones de viga así como diferentes configuraciones de carga, los más comunes son los tres o cuatro puntos, con o sin ranura. El ensayo de tensión por flexión de tres puntos con muescas según la norma EN 14651 [34] y el ensayo de flexión de cuatro puntos sin muesca de acuerdo con la norma ASTM C 1609 [35].

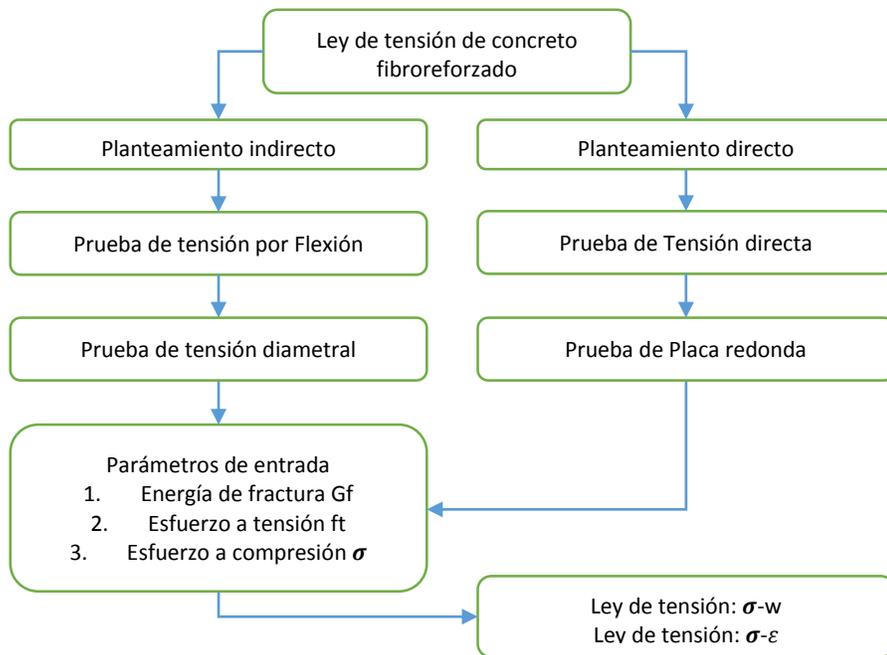


Figura 15. Procedimientos para la obtención de un modelo de tensión [22]

El concreto fibroreforzado es su prueba de resistencia a la tensión, es complicado realizarla la prueba de tensión directa, debido al tipo de ensayo, tamaño del espécimen, excentricidad en el prueba, agarre del espécimen, por lo que comúnmente se evalúa el comportamiento a tensión mediante pruebas de tensión indirecta y ensayos a tensión por flexión, siendo una prueba mas estable con menos excentricidad y durante su desarrollo. Se han realizado investigaciones de tensión directa uniaxial en probetas cilíndricas, en forma de hueso, para realizar un estudio paramétrico sobre: esbeltez del espécimen, las tensiones post-agrietamiento y los parámetros de tenacidad, donde se presentaron un coeficiente de variación de hasta 30%, que se atribuye principalmente a la aleatoriedad del número de fibras en la superficie de falla [36]. Otros investigadores lo atribuyen al problema de la matriz cementante y el agarre para poder realizar la prueba, especialmente el comportamiento a resistencia a la tensión directa es aún un desafío en cuanto a su montaje y manipulación durante la prueba [37]. Estos realizaron pruebas de tensión directa en ella, estudiaron el módulo de elasticidad y la curva tensión deformación, especialmente en la etapa post-agrietamiento, tanto en tensión como en compresión, concretos fibroreforzados con fibras de acero [38].

Es por ello que se necesita tener mayor confiabilidad en los datos del experimento y tener menos coeficientes de variación en los datos de respuesta, la prueba con mayor confiabilidad para evaluar es la tensión indirecta.

En investigaciones donde se ha realizado concreto fibroreforzado con fibras de acero, se ha comprobado que la eficiencia de las fibras, son las que tiene un modulo de elasticidad muy elevado con respecto a otras fibras, al igual que una resistencia a la ruptura muy alta, así como una alta absorción de energía en el concreto fibroreforzado y algunas tipos de fibras de acero que tiene un doblez de gancho, estas tiene una absorción mayor de energía, debido al mecanismo que se opone al movimiento relativo de la fibra en la matriz cementante cuando se encuentra en tensión por la desunión.

Sin embargo tienen desventajas como una alta conductividad eléctrica en grandes dosificaciones, mal acabado en las superficies, porosidad elevada, concreto con propiedades de magnetismo y en un ambiente húmedo las fibras tienden a generar corrosión y mas si el concreto presenta porosidades, por lo tanto presentan un deterioro de la estructura de concreto, es por ello que no se cumple con la resistencia mecánica en el concreto. Hablar de la resistencia en el concreto es tener la certeza de realizar estructuras con un buen diseño. Otro factor que no debe pasarse por alto es el aumento de los precios del acero en la última década, que, por lo tanto el precio de la concreto fibroreforzado con fibras de acero va en aumento. Desde hace algunos años se viene investigando el uso de las fibras macro-sintéticas que pueden proveer de resistencia en el concreto fibroreforzado y cumplir con la función estructural. A pesar de que esto podría ser una buena razón para desarrollar un concreto fibroreforzado con fibras de polipropileno. El interés del uso de las fibras de polipropileno como material estructural se ha incrementado en la última década, se han desarrollado y publicado en la bibliografía especializada gran cantidad y diversidad de experimentos en su comportamiento estructural así como de modelos [11, 39]. El efecto de refuerzo es proporcional al volumen y la eficiencia de las fibras. Debido a que las fibras son una parte importante del costo de la producción del concreto fibroreforzado, el volumen de fibra en ejemplos de aplicación

(pisos industriales, pavimentos, etc.) normalmente se limita a 0.5% o incluso en volúmenes inferiores [40]. Las dificultades para una distribución correcta de las fibras también aumentan con su volumen de fibra y con este aspecto deben ser siempre considerados la trabajabilidad del estos concreto fibroreforzado. Es por ello que una solución a la distribución y orientación de las fibras cuando el concreto esta en estado fresco y se realiza la mezcla con altas dosificaciones o volúmenes de fibra >1.0% es atreves de los denominados concretos autocompactables por sus siglas en ingles *Self-consolidating concrete(SCC)*, el cual en estudios experimentales demuestran que las fibras independiente de su densidad y composición química mejoran su distribución dentro de la mezcla así como las propiedades mecánicas post-agrietamiento [41]. Independientemente del tipo de fibras usadas, la eficacia de refuerzo de fibra depende de numerosos factores. Es decir, la capacidad de refuerzo de las fibras se basa en su distribución. Por lo tanto, el comportamiento mecánico del concreto fibroreforzado, dependerá básicamente de la homogenización de la mezcla y su evaluación con diferentes métodos para SCC, así como también del procedimiento de colado y la relación entre la longitud de la fibra, el tamaño del molde o cimbra [42, 43]. El SCC se ha utilizado ampliamente debido a la capacidad de paso en los refuerzos. Para producir un concreto autocompactable se requiere una buena granulometría de los agregados, una mayor cantidad de agregados finos con respecto a los agregados gruesos, un buen aditivo que modifique la viscosidad de la mezcla a base de policarboxilato o los denominados tercera generación, también es necesario evaluar los parámetros de trabajabilidad en el diseño inicial de la mezcla del concreto autocompactable, de la mezcla elegida para una aplicación correcta, la calidad dependerá del método de prueba, las mas frecuentes son de flujo de asentamiento con el cono de Abrams, embudo V o flujo de asentamiento y anillo J, se puede evaluar con solo método de prueba, el mas sencillo de implementar, rápido de utilizar y que no requiere equipo especializado, es la prueba de asentamiento de cono de Abrams.

En esta investigación se realizó la evaluación experimental de la resistencia residual a tensión por flexión en vigas con 3 puntos de acuerdo a la norma europea EN 14651 [34], así como también la evaluación de la energía de fractura especifica en índices de rigidez con el modelo de Hillerborg [44].

#### 1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Los elementos estructurales de concreto convencional, cuando se encuentran sometidos a esfuerzos mayores que los permisibles durante la vida útil, tiene problemas de agrietamiento y poca ductilidad antes de la falla frágil. Además el concreto tiene otros defectos una población de pequeñas grietas, poros y estos poseen una variedad de tamaños, geometrías y orientaciones. La falla frágil en los concretos es un hecho no deseable por razones como pérdidas de vidas humanas, económicas y de materiales. El concreto en su estado endurecido tiene otro tipo de fallas, la estabilidad de volumen, la abrasión, grietas por contracción. Los concretos, necesitan mayores exigencias en el diseño estructural, donde los elementos estructurales se sometan a mayores cargas y donde los modelos lineales no aportan solución en las propiedades mecánicas de un concreto normal. Por lo que está comprobado que la adición de fibras permite el reforzamiento de dichas grietas antes de su falla frágil. Las fibras de polipropileno estructural (PP), son químicamente inertes, muy estables en el medio alcalino del concreto, presentando una superficie hidrófoba, por lo que no absorbe agua durante la mezcla, ni durante el fraguado, pero tienen la desventaja de una pobre adherencia en una matriz cementante, la falta de esta adherencia es debido a que no existe interacción química, al igual que una falta de rugosidad y un bajo módulo de elasticidad. Las fibras en general con volúmenes altos de dosificación pueden ser difíciles de mezclar en su estado fresco, haciendo más rígida la mezcla generando erizos. Existen fibras de PP que durante su mezclado en el concreto tienden a la fibrilación, lo cual genera mezclas mas rígidas. El problema en el bajo desempeño de la adherencia de fibras de PP es la interfaz entre la rugosidad de las fibras de refuerzo y la matriz cementante también llamada zona de interface de Transición (ITZ) [45], la adherencia entre las superficies de los materiales compuestos se muestran en la figura 16, esta interfaz de rugosidad constituye un enclavamiento mecánico que se resiste al movimiento relativo de las fibras inmediatamente después iniciadas las grietas por cualquier tipo de esfuerzos [46]. Las fibras de polipropileno no tienen una alta resistencia en la dirección axial, debido a la falta de rigidez del material. Otra desventaja es la exposición de la fibra de

polipropileno es muy sensible a la luz solar y el oxígeno [47]. Esto depende de su composición química y tipo moléculas de polímero y su cadena [10].

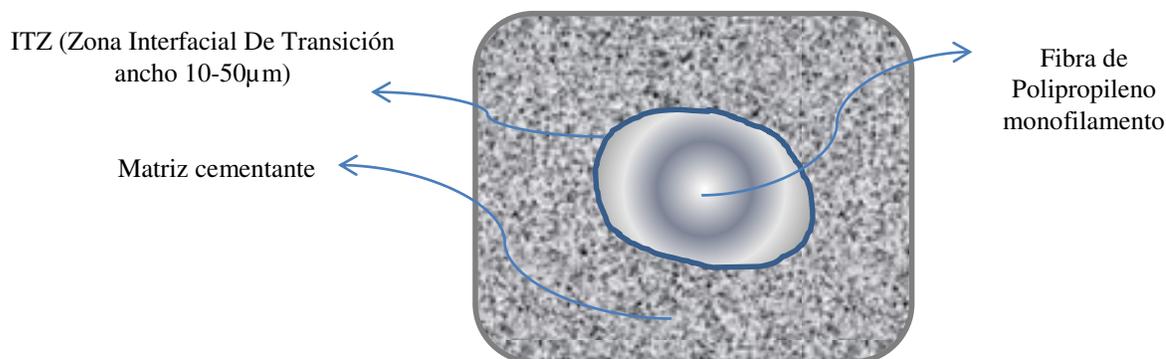


Figura16. Vista axial de la matriz cementante con fibra de polipropileno [45].

La ITZ es una variable que regula la resistencia mecánica del concreto, por lo tanto su resistencia residual post-agrietamiento del concreto fibroreforzado, el espesor de esta zona tiene un promedio entre 10-50µm de ancho (véase Figura16), es una estructura compleja, donde se tiene agregados finos, micro poros y cristales como el Hidróxido de Calcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], también silicato de calcio hidratado [C-S-H]. La relación de la ITZ y la composición del empaquetamiento de estos cristales, se ha encontrado que existen hidróxidos de calcio, se encuentran perpendiculares a la estructura de la fibra, favoreciendo la formación de micro grietas, por lo que cuando se somete algún tipo de esfuerzo, o por de estabilidad de volumen, temperatura y que genera el fenómeno de contracción plástica u externo, estas propician una propagación y formación de grietas y estas a su vez en grandes grietas visibles al ojo humano en el elemento estructural [48]. Por lo tanto esta zona ITZ y la interacción con las fibras sintéticas de polipropileno se considera fundamental en el entendimiento de las propiedades físico-mecánicas. Otra aspecto en la zona ITZ se suele atribuir a sangrado local alrededor de las fibras y la consecuencia del efecto de "pared". Los resultados del efecto de pared es la incapacidad de los granos de cemento que tiene un tamaño medio de partícula de 10 µm, para llenar el espacio de 10 a 20 µm de la superficie de la fibra.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN.

Los concretos fibroreforzados(FRC) es un material compuesto dúctil y tenaz, propiciando que el agrietamiento sea el menor una vez sometido a todo tipo de esfuerzos. El uso y función de las fibras en el concreto es reforzar principalmente y de inhibir la iniciación y propagación de grietas de diferentes tamaños [49]. Existen modelos matemáticos del FRC, donde se modela en un sistema elastoplástico, ortotrópicos, que intentan reproducir el comportamiento matemático de la adherencia entre la fibra y la matriz cementante [50]. También sea investigado con el apoyo de la matemática del elemento finito la obtención del comportamiento macroscópico del concreto sobre la base de su microestructura y se le conoce como la teoría de la homogeneización [51] [52]. En los últimos 20 años, un gran número de investigadores han demostrado que la zona ITZ, tiene una gran importancia en el desempeño del concreto fibroreforzado, si la ITZ es débil y por lo tanto será débil el concreto fibroreforzado, esta zona controla las propiedades mecánicas del concreto. La fuerza de unión entre los agregados, la matriz y las fibras, el tamaño de los cristales, también depende de la ITZ, se han realizado estudios densificación de esta zona, por medio de materiales suplementario en la matriz cementante con la adición de humo de sílice, ceniza volante llegando a buenos resultados en fibras de acero [53]. El estudio de la ITZ al optimizar la composición de los cementos portland, en adiciones considerables, otros materiales suplementarios permiten modificar la aureola de transición, incrementando la fuerza de adherencia en la ITZ [54]. En la ITZ se ha observado que el Hidróxido de Calcio  $[Ca(OH)_2]$  no aporta un beneficio a la acción mecánica de la matriz cementante, sin embargo, ayudan en mantener un ambiente alcalino (alto pH). Es por ello que si se adiciona un material puzolanico como la ceniza volante (CV) que es un un material del alto contenido de sílice y la suma de los óxidos ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ), y que otro beneficio de la ceniza volante es el rango del tamaño de las partículas y la forma esférica de éstas contribuyen a una mejor trabajabilidad de las fibras. Debido a que las partículas esféricas de la ceniza se desplacen fácilmente una sobre otra, reduciendo la fricción interna entre partículas y las fibras. La forma esférica minimiza también el área de superficie de la partícula, dando como resultado mejor

consumo de agua. Si bien es conocido que durante su hidratación el cemento portland produce hidróxidos de calcio, es por ello que al adicionar ceniza volante se tenga una segunda reacción de los hidróxidos con el sílice de la ceniza volante y se produzcan otros compuestos de C-S-H, similares a los producidos en la primera hidratación. Por otra parte si se adiciona wollastonita que en su composición química única y a su estructura acicular. Su composición química ( $\text{CaSiO}_3$ ) representa una ventaja clave en las aplicaciones que requieren una fuente de calcio y sílice para la reactividad, lo cual proporciona una mejor adherencia por su forma acicular (forma de agujas) y concretos fibroreforzados con una mayor ductilidad [55].

## 1.6 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar experimentalmente la resistencia residual a tensión por flexión en vigas de concreto reforzado con fibras de polipropileno estructurales monofilamento y multifilamento de alta densidad, en dos dosificaciones de fibra, en una matriz cementante densificada por medio de subproductos industrial como la ceniza volante (CV) y mineral wollastonita (W), en sustitución por volumen, para mejorar las propiedades mecánicas de fractura post-agrietamiento e índices de respuesta y energía de fractura así como la ductilidad generar una mejor adherencia en su zona de interfacial.

## 1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- 1.7.1 Elaborar un concreto fibroreforzado binario de relaciones a/mc de 0.55 para especímenes de vigas de dimensiones normadas, con fibras polipropileno con diferentes relaciones de aspecto para fracciones de volumen de fibra 0.5% y 1.0%, sustituyendo el material cementante CPO 40, en porcentajes de 15% por volumen con un sub producto industrial mineral, la ceniza volante y la wollastonita .
- 1.7.2 Evaluar comportamiento mecánico de resistencia a compresión de los concretos fibroreforzados de referencia, binarios y ternarios en cilindros de 100x200 mm.

1.7.3 Evaluar el módulo de elasticidad de los concretos fibroreforzados en especímenes de dimensiones de 100x200 mm en anillo de carga.

1.7.4 Evaluar la resistencia residual a tensión por flexión de los concretos fibroreforzados en diferentes combinaciones de material cementante y tipo de fibra.

1.7.5

## 1.8 HIPÓTESIS.

Si se densifica la matriz cementante para un concreto fibroreforzado de polipropileno, por medio de los subproductos industriales, la ceniza volante y el mineral wollastonita, se generara una mejor adherencia en la ITZ entre la matriz cementante y la fibra, y se incrementara las propiedades mecánicas, post-agrietamiento, como son la resistencia residual, ductilidad, trabajo de energía y energía específica de fractura.

## CAPITULO 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

### 2.1 ESTAPAS DE LA INVESTIGACION

La Metodología de la investigación consta de cuatro etapas(véase Figura 17 y Figura 18), se basa en la información que se tendrán en base a las etapas del experimento y con la precisión y rigurosidad del programa de pruebas acorde a la norma ASTM C 802-96.

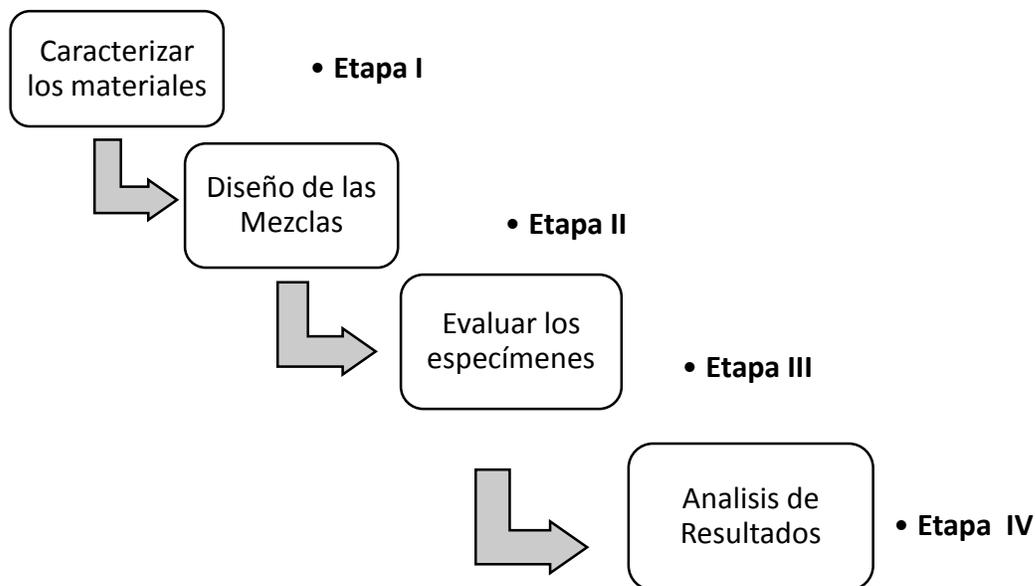


Figura 17. Etapas del Programa Experimental SNFRC.

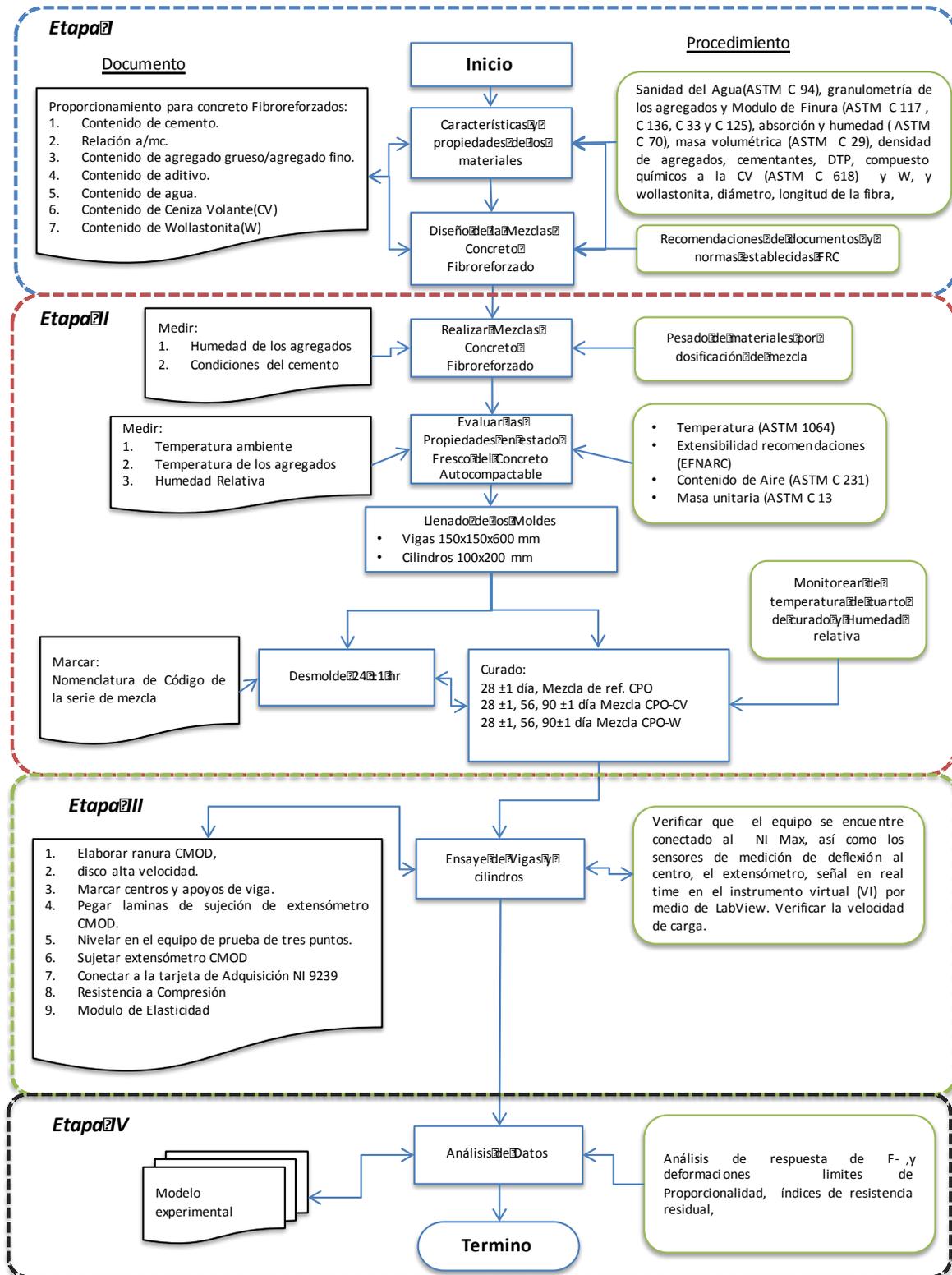


Figura 18. Esquema general de la metodología experimental.

## 2.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

El diseño del experimento fue planeado para estudiar las características de cuatro tipos de fibras sintética de polipropileno con relaciones de aspecto de 50, 67, 74 y una fibra multifilamento, en dos volúmenes de fibra de 0.5% y 1.0% en tres diferentes mezclas de concreto con cemento CPO 40, en sustituciones de 15% de ceniza volante y también de wollastonita, evaluado en edades de 28, 56 y 90 días. La mezcla del concreto fibroreforzado se realizo con agregado caliza con un tamaño máximo de 19mm. La mezclas se realizaron en el laboratorio de tecnología de concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, para conocer las propiedades en estado fresco y estado endurecido, las mediciones se llevaran de acuerdo a los requisitos normados ASTM en pruebas. El diseño del experimento se muestra en forma sintética y general(véase Figura 19 y Figura 20). El numero total de especímenes fue de 216 vigas realizadas y 216 cilindros.

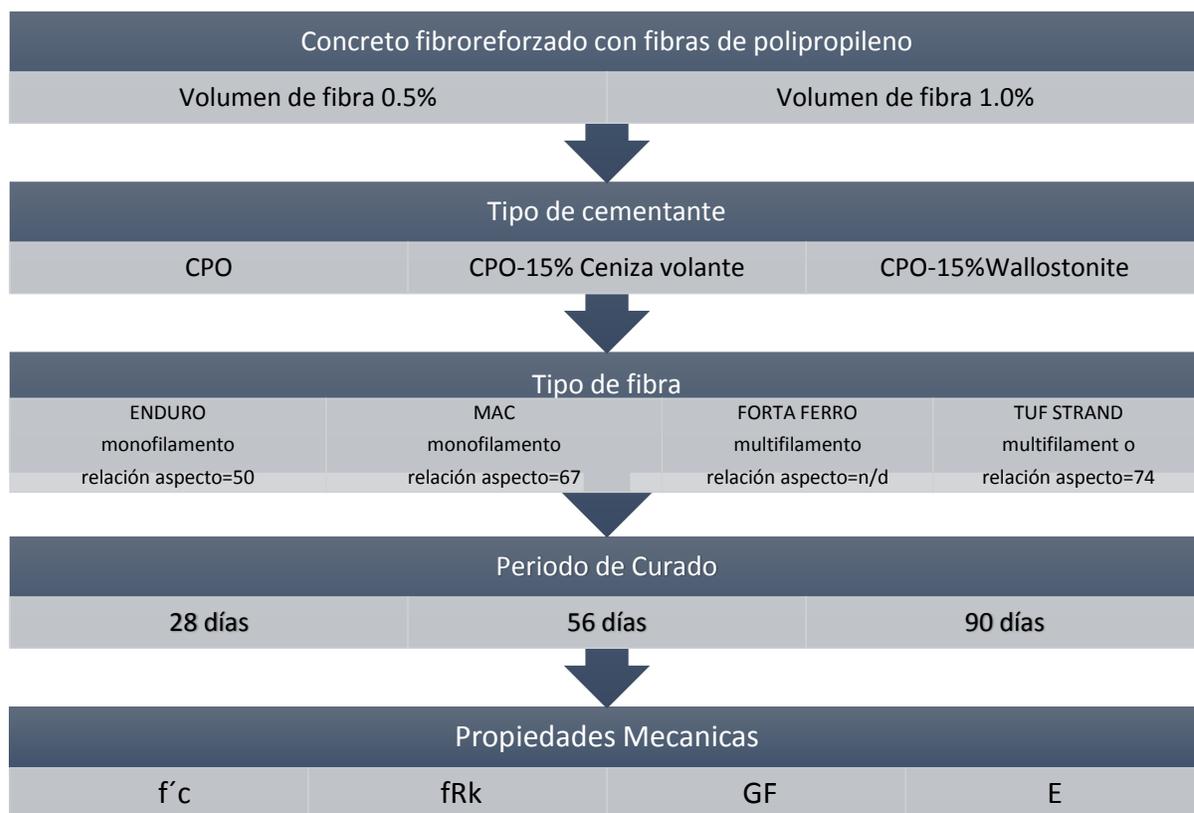


Figura 19. Diseño Experimento sintético de SNFRC.

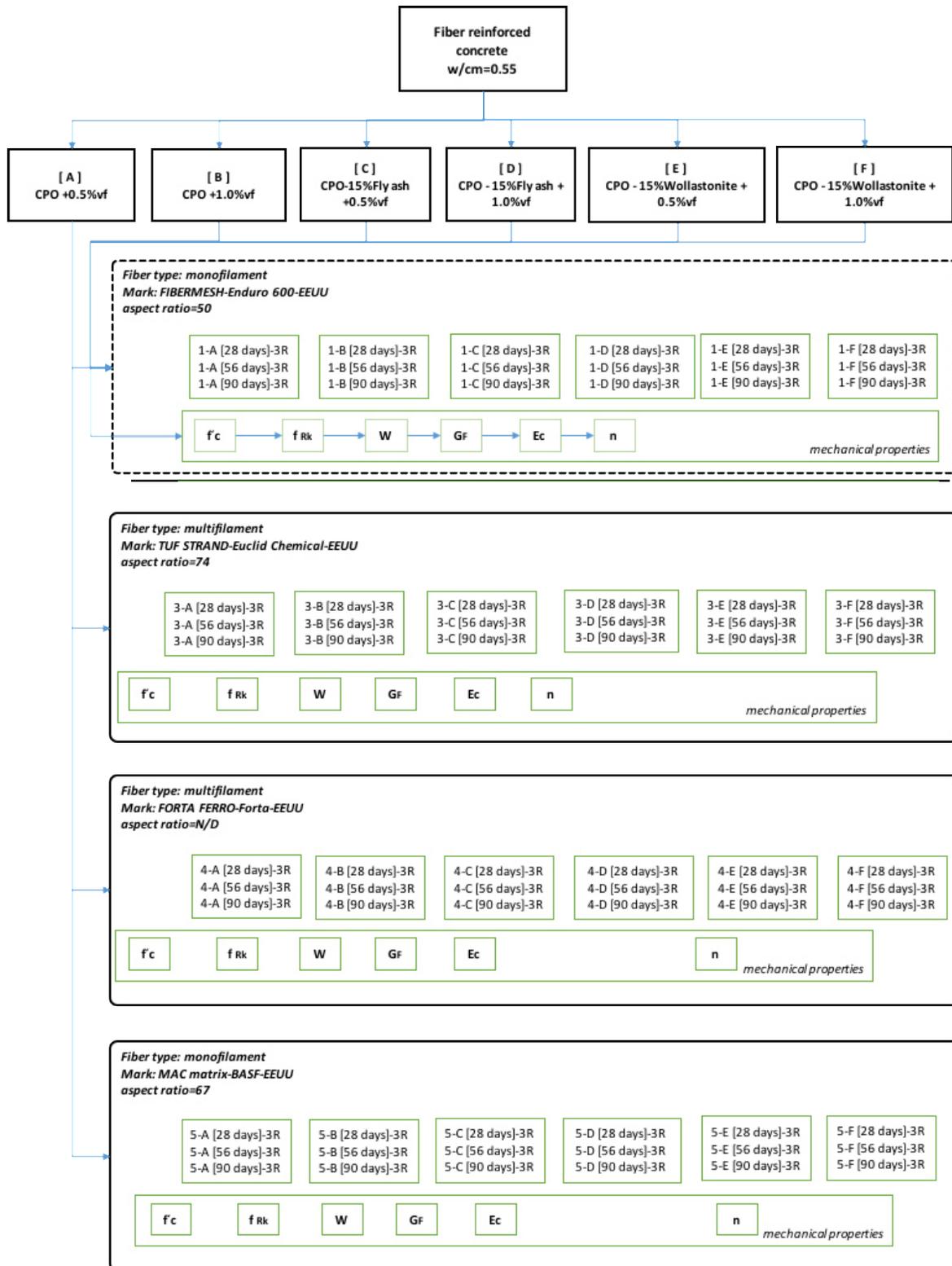


Figura 20. Diseño Experimento ampliado.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS.

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas, durante la hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad. La clasificación de los tipos de cemento esta proporcionada por la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 [56], la cual establece su composición, éstos pueden ser:

- CPO (cemento portland ordinario).
- CPP (cemento portland puzolánico).
- CPEG (cemento portland con Escoria Granulada de Alto Horno).
- CPC (cemento portland compuestos).
- CPS (cemento portland con humo de sílice).
- CEG(cemento con escoria granulada de alto horno).

El cemento es un componente aglutinante del material en estado fresco y en estado endurecido. Los requisitos establecidos para un concreto tradicional estará en función de la relación agua-cemento, siempre que sea capaz de proporcionar al concreto las características que exige el proyecto. Los materiales cementantes empleados en la investigación fue el CPO, la ceniza volante y wollastonita.

### 2.3.1 Cemento portland ordinario (CPO).

Este cemento portland ordinario que cumple con la normatividad NMX C 414-2004 [56] y ASTM C 150-15 [57]. Esta compuesto por 95-100% de clinker con sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y hasta un 5% de adiciones minerales tales como escoria, puzolanas naturales, humo de sílice o filler de caliza. En esta investigación se realizaron en el diseño de las mezclas para los especímenes con un cemento tipo CPO 40. El cemento se encuentra formado por cuatro fases cristalinas(véase Tabla 6), resultado de la combinación de los óxidos antes mencionados.

Tabla 6. Principales fases cristalinas encontradas en el cemento portland [58].

Fase pura	Nombre	Escritura simplificada	Fase impura
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	$\text{C}_3\text{S}$	Alita
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	$\text{C}_2\text{S}$	Belita
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	$\text{C}_3\text{A}$	Algunas veces celita
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico	$\text{C}_4\text{AF}$	Algunas veces felita
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de calcio	$\text{CS}$	
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	$\text{CS}_2\text{H}$	
	Silicato de calcio hidratado	$\text{C S H}$	
	Hidróxido de calcio	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Cal

El cemento utilizado en la experimentación fue un Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40) de una marca disponible en la región, cumple con la norma NMX C 414 [57], con una composición del 90 al 95% de clinker y yeso, marcando el resto como componentes minoritarios. De acuerdo a su clase resistente CPO 40 tiene una resistencia a la compresión mínima de 40 MPa a los 28 días.

## 2.4 CENIZA VOLANTE.

Subproducto industrial considerado como puzolana artificial, la cual se obtiene de los sistemas colectores de polvos de las plantas productoras de energía eléctrica que queman carbón como materia prima, carboeléctricas. Dicha puzolana esta formada por pequeñas partículas esféricas de color gris oscuro, principalmente por el contenido residual de carbón. La norma ASTM C 618 clasifica a la ceniza volante en tres diferentes clases:

- Clase N. Puzolanas naturales o calcinadas tales como las tierras diatomáceas, los horstenos opalinos y las lutitas, turbas y cenizas volcánicas o pumicitas y los materiales calcinados como las arcillas.
- Clase F. Ceniza volante generalmente producida por la quema de carbón de antracita o bituminoso.

- Clase C. Ceniza volante generalmente producida por la quema de lignito o de carbón sub-bituminoso (tiene algunas propiedades cementantes, además de las puzolánicas).

La ceniza volante (CV) empleada en el proyecto fue la ceniza clase F donada por la Central Termoeléctrica “José López Portillo-Carbón I”, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), localizada en Nava, Coahuila. La ceniza volante producida en este lugar, es clasificada por el ASTM C 618 [59]. como clase F, por su bajo contenido de óxido de calcio. Su densidad será determinada bajo la norma ASTM C 188 [60] Con el fin de mejorar su desempeño y reducir su impacto en la variación de sus resultados e incrementar su reactividad la CV fue cribada mecánicamente con un equipo Swequips modelo LS30C666, haciéndola pasar por la malla No. 100 con la finalidad de remover la fracción de partículas con tamaños mayores a 100  $\mu\text{m}$ . Donde a simple vista cambia su tonalidad, haciéndola mas clara y menos oscura, todo esto por las partículas de carbón, estas partículas son del proceso que tiene sin quemar del proceso de la carbonífera [61].

## 2.5 WOLLASTONITA.

La wollastonita es un mineral de origen natural, su composición química ( $\text{CaSiO}_3$ ) representa una ventaja clave en las aplicaciones que requieren una fuente de calcio y sílice para reactividad, lo cual proporciona una mejor adherencia. La wollastonita es un mineral acicular(forma de aguja) de forma natural de calcio meta-silicato ( $\beta\text{-CaSiO}_3$ ), formado debido a la interacción de la piedra caliza con la sílice en magmas calientes. Principalmente pertenece al grupo de piroxenoides que son silicatos con una estructura de cadena que consiste en silicio y oxígeno aniones. Composición química de las fibras de wollastonita en general incluyen aproximadamente 90% de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ); Y menos del 1% de óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). También consiste en trazas de óxido de manganeso ( $\text{MnO}$ ) y dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Las microfibras de wollastonita natural se caracterizan por partículas aciculares sueltas de tamaños no uniformes con un diámetro típicamente en el mismo intervalo de las partículas de cemento Portland ordinario (CPO)

(aproximadamente 25-650  $\mu\text{m}$ ); La longitud es de aproximadamente 40-900  $\mu\text{m}$  [62, 63]. El módulo de elasticidad de las fibras de wollastonita varía de aproximadamente 300-530 GPa, y la resistencia a la tracción oscila entre 2700 y 4100 MPa y se usan típicamente en la pintura, productos cerámicos, productos de cemento, alfarería y cuidado dental.

## 2.6 AGREGADOS.

Los agregados son componentes derivados de la trituración natural o artificial de diversas rocas, y pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de roca. La norma ASTM C 33 [64] define los requisitos para la graduación y la calidad del agregado fino y grueso para su uso en el concreto. En esta investigación se utilizaron materiales de la región de Santa Catarina N.L. Como agregado fino se empleó arena triturada y como agregado grueso grava triturada con un tamaño máximo nominal de 19 mm. Tanto el agregado fino como el agregado grueso fueron caracterizados para obtener sus propiedades físicas y de granulometría de acuerdo con las especificaciones de las normas ASTM C 136 [65].

### 2.6.1 AGREGADOS FINOS.

Los agregados finos o arenas consisten en arena natural extraída de los ríos, lagos, depósitos volcánicos o arenas artificiales o bien han sido triturados. Estos agregados abarcan normalmente tamaños de partículas entre 4.75 y 0.075 mm.

### 2.6.2 AGREGADOS GRUESOS.

Los agregados gruesos o gravas, son materiales extraídos de rocas de calizas, triturados o procesados, piedra bola o canto rodado, cuyas partículas comprenden tamaños desde unos 5 milímetros hasta 100 milímetros para los fragmentos más grandes. Para obtener los mejores resultados conviene que el tamaño máximo del agregado (TMA) grueso sea la mitad de la longitud de la fibra, siendo preferible que no supere el menor de los siguientes valores:

- $2/3$  de la longitud de la fibra

- 1/5 del lado mayor del elemento
- 3/4 de la distancia libre entre acero de refuerzo.

## 2.7 ADITIVOS.

De acuerdo al informe del Comité ACI 116, dice que un aditivo es un material diferente al agua, agregados, cemento y fibras de refuerzo, que se utiliza como un ingrediente del concreto o mortero y que se agrega a la mezcla inmediatamente antes, durante o después de su mezclado. Los aditivos son muy extenso, sin embargo, debe tenerse presente que cualquier tipo de ingrediente no puede ser un aditivo para el concreto; al margen de la definición, se debe considerar como aditivo a cualquier material que se añade al concreto para modificar favorablemente sus propiedades y durabilidad. En la Tabla 7 se muestra una clasificación de los aditivos, según la normatividad mexicana NMX-C-199-ONNCCE [66].

Tabla 7. Clasificación de aditivos para concreto (NMX-C-199-ONNCCE) [66].

<i>Tipo de Aditivo</i>	<i>Efecto deseado en el concreto</i>
1. Acelerantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceleran el desarrollo de Resistencia tempranas</li> </ul>
Inclusores de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usualmente mejoran la trabajabilidad</li> <li>• Disminuyen el sangrado</li> <li>• Inducen el control de los efectos por congelamiento y deshielo</li> </ul>
2. Reductores de agua y controladores de fraguado	
(A) Reductores de agua simple	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuyen el contenido de agua</li> </ul>
(B) Retardantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inducen un retardo controlado sobre el tiempo de fraguado</li> </ul>
(C) Retardante y reductor de agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Induce retardo en el tiempo de fraguado del agua</li> <li>• Reducción en el contenido de agua</li> </ul>
(D) Acelerante y reductor de agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acelera el desarrollo de resistencia</li> <li>• Reducción en el contenido de agua</li> </ul>
(E) Reductor de agua de alto rango (plastificante)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce radicalmente el contenido de agua</li> <li>• Incrementa el revenimiento sin incremento del agua</li> <li>• Incrementa la fluidez de la mezcla</li> </ul>
(F) Reductor de agua de alto rango y retardante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marcada reducción del contenido de agua</li> <li>• Incrementa la fluidez de la mezcla</li> </ul>

Minerales finamente divididos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la resistencia contra el ataque de los sulfatos</li> <li>• Reduce la permeabilidad</li> <li>• Controla la reacción álcali-agregado</li> <li>• Disminuye los efectos por lixiviación</li> <li>• Produce disminución del calor de hidratación</li> </ul>
3. Diversos	
Formadores de gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para producir concretos celulares</li> </ul>
Para mezclas de inyección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Induce estabilidad, reduce la contracción de la mezcla</li> </ul>
Para control de expansión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regula la expansión</li> </ul>
Adhesivos integrales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentan la adherencia de concreto nuevo con concreto endurecido</li> </ul>
Auxiliares de bombeo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementan la cohesión y viscosidad de la mezcla</li> </ul>
Repelentes de humedad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducen la velocidad de penetración del agua</li> </ul>
Reductores de permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducen la permeabilidad</li> </ul>
Inhibidores de reacción tipo de álcali-agregado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducen las expansiones causadas por esta reacción</li> </ul>
Inhibidores de la corrosión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducen la permeabilidad del concreto con acero</li> </ul>

Para esta investigación se optó por un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante, formulado con tecnología en agentes dispersantes base policarboxilato con nombre comercial "*plastol precast plus*", este aditivo da alta fluidez y alta reducción de agua. Cumple con la norma ASTM C 494 [67] tipo "A" y "F" como reductor de agua de alto rango. Este aditivo no contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto. Dentro de las aplicaciones que menciona el fabricante para el aditivo destaca: Aplicaciones principales

- Concreto para elaboración de elementos prefabricados
- Concretos auto-consolidables.
- Concretos fluidos.
- Concretos de alto desempeño.
- Concretos fibroreforzados.

## 2.8 DISEÑO DE LAS MEZCLAS.

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener concretos con características específicas, sin embargo todos estos métodos deben ser tomados solamente como referenciales pues siempre requieren de pruebas de laboratorio para su ajuste. Para dosificar un metro cúbico de concreto la norma recomienda un máximo contenido de cemento de 350 Kg/cm<sup>2</sup> [68] A continuación se presenta el método propuesto por el ACI 211.1-70 [69] los siguientes pasos:

- I. Se determina el consumo de cemento en función de la resistencia del concreto.
- II. Se determina la cantidad de agua que se requiere por m<sup>3</sup> de concreto, y el porcentaje de volumen de aire atrapado, en función del tamaño máximo del agregado.
- III. Se calcula el volumen aparente de agregado grueso mediante el método de diseño, en función del módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo del agregado grueso.
- IV. Se calculan los volúmenes efectivos de cemento, agua, agregado grueso y aire atrapado.
- V. Se calcula el volumen de agregado fino.
- VI. Se calcula el volumen de la fibra en función de su densidad y peso.

Este método sirve de base para iniciar pruebas de comprobación en laboratorio que permitirán su ajuste. Algunos criterios básicos para corrección del diseño, en laboratorio, pueden ser los siguientes:

- Si la mezcla resulta demasiado seca, deberá incorporarse un aditivo plastificante en función del peso del cemento.
- Si la mezcla presenta oquedades internas, deberá incrementarse proporcionalmente la cantidad de arena.
- Si la mezcla presenta segregación, deberá disminuirse proporcionalmente la cantidad de arena.
- Se determina la humedad de los materiales en sitio.

- Se calcula el diseño de mezcla a ensayar y se realice la corrección por humedad.
- Se deben pesar las cantidades de material a utilizar.
- Se humedece la revolvedora y se dosifican los materiales en el siguiente orden: agregado grueso, agua+ aditivo, cemento, fibra y agregado fino.
- Se mezclan los materiales por 3 minutos.
- Se deja reposar la mezcla por 2 minutos, tapando la boca de la misma con una manta húmeda, para evitar evaporación de agua.
- Después, se reinicia el remezclado por 3 minutos mas, se vacía el concreto en la carretilla.
- Se homogeniza la muestra y se determina la extensibilidad.
- Se elaboran los especímenes de concreto vigas y cilindros y otras pruebas.

Los especímenes se cubren para el curado, con una bolsa de polietileno para evitar evaporación en cuarto de temperatura controlada.

Después de 24 hrs. se desmoldan y se identifican con un número de control, para guardarlos en el cuarto de humedad relativa de 100% y temperatura controlada de 24 °C .

## 2.9 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO.

El control de calidad del concreto fresco depende de los procedimientos de muestreo que permitan contar con porciones representativas de la mezcla así como del conocimiento de las propiedades de este. La norma ASTM C-172, da los pasos a seguirse en el muestreo y que consisten en:

- El tiempo transcurrido entre la obtención de dos porciones para formar una muestra debe ser como máximo 15 minutos.
- Las muestras deben transportarse al sitio donde se realizarán los ensayos ó donde se moldearán probetas, teniendo que efectuarse un re-mezclado con lampa para uniformizar la mezcla luego del transporte.
- Las pruebas de control de concreto fresco deben efectuarse a mas tardar 5 minutos después de obtenida la muestra.

- El moldeo de probetas para ensayo de compresión debe iniciarse dentro de los 15 minutos del muestreo.

Las características de dispersión de la fibra afectan a las propiedades en estado fresco de FRC y viceversa. Teniendo en cuenta que el rendimiento mecánico está fuertemente relacionada con:

- I. Las propiedades en estado fresco y
- II. Características de dispersión de la fibra.

Es esencial en el control de ambos parámetros para un rendimiento mecánico post-agrietamiento. La importancia de las características reológicas en el rendimiento mecánico de los concretos fibroreforzados a base de cemento portland ha sido conocido y extensas investigaciones se ha hecho sobre el tema. Varios equipos y métodos se utilizado para medir y definir las propiedades reológicas. Es difícil de utilizar un solo equipo para definir las características de los materiales con diferentes propiedades y componentes (cemento, mortero, concreto, materiales a base de cemento reforzado con fibras, etc.). Dependiendo del tipo fibra, se deben de considerar algunos aspectos, como el efecto de tamaño de los agregados en el estudio de concreto fibroreforzado, o el efecto de orientación de las fibras cuando se estudia la reología de los materiales reforzados con fibras.

Los problemas relacionados con dispersión de la fibra son susceptibles de ser alcanzadas cuando se utilizan materiales de FRC y el control de las características de dispersión de la fibra es generalmente difícil. Se necesitan tener control en estado fresco, es por ello que en esta investigación se opto por realizar un concreto autocompactable que permitiría al menos tener menos variación en la propiedades mecánicas post-agrietamiento. El concepto de concreto autocompactante (SCC) fue propuesta en 1986 por Hajime Okamura, pero el prototipo fue desarrollado por primera vez en Japón en 1988 por Ozawa [70]. Este nuevo concreto fue diseñado para ser capaz de llenar todos los rincones de la forma y encapsular todos los refuerzos sólo bajo la influencia de fuerzas gravitacionales, sin segregación o sangrado. Estas ventajas hacen SCC, útil siempre que la colocación sea difícil en los elementos estructurales de concreto fibroreforzado en gran medida o en formas de trabajo complicadas.

### 2.9.1 TRABAJABILIDAD.

La trabajabilidad es el nivel de fluidez de la mezcla de concreto autocompactable se rige básicamente mediante la dosificación del superplastificante. No obstante, una dosis excesiva puede producir un riesgo de segregación y bloqueo. Al diseñar la mezcla es preciso tener en cuenta las proporciones relativas de los componentes clave en cuanto al volumen y no a la masa. Las proporciones habituales y las cantidades para alcanzar la auto compactación se presentan a continuación. Relación agua / finos en volumen de 0,80 a 1,10

- 1) Contenido total de los agregados finos de 160 a 240 litros (400-600 kg) por metro cúbico
- 2) El contenido de agregado grueso suele ser del 28 al 35% por volumen de la mezcla.
- 3) La relación agua/cementante se selecciona sobre el diseño. Normalmente el contenido de agua no debe superar los 200 litros/m<sup>3</sup>.

Pueden requerirse otras modificaciones para cumplir ciertos requisitos de resistencia y otros requisitos de rendimiento. Las normas recomiendan evaluar tres parámetros y son:

- I. Capacidad de Relleno.
- II. Capacidad de Paso.
- III. Resistencia a la segregación.

Es necesario evaluar al menos uno de los tres parámetros de trabajabilidad en el diseño inicial de la mezcla, para garantizar que se satisfacen todos los aspectos. En esta investigación se decidió evaluar la capacidad de relleno(véase Figura 21), y observar la segregación en la extensibilidad [71]. Se llevo acabo la prueba conformé al procedimiento establecido en la norma ASTM C 1611 [72].



Figura 21. Prueba de asentamiento de un concreto autocompactable [71].

### 2.9.2 MASA VOLUMÉTRICA.

El propósito de este método de ensayo es determinar la masa por unidad de volumen de una muestra de agregado, para agregados que no excedan 100 mm. de Tamaño máximo nominal. El peso unitario del concreto debe ser conocido para seleccionar las proporciones adecuadas en el diseño de mezclas de concreto. Según la Norma ASTM C138 [73]. El peso unitario del concreto fibroreforzado en estado fresco nos permite formar un juicio inmediato de la calidad de la composición granulométrica, del volumen de fibra y de la compactación del concreto, siendo un importante medio de control del concreto. Debido a la baja densidad de la fibra sintética de polipropileno no influye en el peso unitario de concreto fibroreforzado.

### 2.9.3 CONTENIDO DE AIRE.

El aire en el concreto fibroreforzado es un valor que entra como componente del concreto, además de los elementos cemento, agua y agregados. Este aire puede encontrarse como elemento accidental del aire atrapado por factores como los agregados, aditivos y mezclado, sin embargo las fibras en gran medida influyen de que exista aire incorporado en la mezcla, en las fibras multifilamento que se desfibrila durante su mezclado mas que las de monofilamento. El método que se considero para evaluar las mezclas de concreto fibroreforzado fue con la norma ASTM C 231 [74].

#### 2.9.4 TEMPERATURA.

La temperatura del concreto depende del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, además del calor liberado por la hidratación del cemento, la energía de mezclado y el medio ambiente. Las fibras sintéticas de polipropileno no generan cambios de temperatura en el mezclado del concreto fibroreforzado. La temperatura del concreto fue realizada conforme a la norma ASTM C 1064 [75] como indicador en los datos de homogeneidad en la investigación.

#### 2.10 PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO.

##### 2.10.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial. Generalmente se expresa en unidades de esfuerzo en Kg/cm<sup>2</sup> o en Mega pascales (MPa) a una edad de 28 días como marque el proyecto y se le designa con el símbolo  $f'_c$  para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas especímenes de concreto. En esta investigación se realizaron cilindros de dimensiones de 100mm de diámetro y 200mm de altura, se realizaron pruebas a edades de 28, 56 y 90 días, conforme a la norma ASTM C 39 [76].

##### 2.10.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN.

Las pruebas de tensión por flexión son los más habituales en la caracterización y el control de las propiedades post-agrietamiento a tensión de los concretos reforzados con fibras. En Tabla 8 se muestra de manera abreviada las principales normas internacionales para la medición de resistencia residual a tensión por flexión con diferentes configuraciones y puntos de aplicación de carga, dimensiones, volumen de concreto fibroreforzado, velocidad de carga, superficie de falla, máxima medición y parámetros de medición.

Tabla 8. Principales normas internacionales para evaluación de concretos fibroreforzados.

Norma	Prueba	Puntos de carga	Dimensiones del espécimen (mm)	Superficie de fractura (mm <sup>2</sup> )	Volumen de concreto (dm <sup>3</sup> )	Velocidad de carga	Medición	Maxima Medición
ASTM-1609	VIGA	2	150X150X500	22,500	11.3	0.035 a 0.10 mm/min	Deflexión/Energía	3 mm
	VIGA	2	100X100X350	10,000	3.5	0.025 a 0.075 mm/min	Deflexión/Energía	3 mm
EN 14 651	VIGA	1	150x150x600	18,750	13.5	0.1 a 0.20 mm/min	Deflexión/CMOD/Energía	3.5 mm
EFNARC	VIGA	2	75X125X500	9,375	11.3	0.05 a 1.0 mm/min	Deflexión/Energía	3 mm
EFNARC	PANEL	1	600X600X100	90,000	36.0	1.5 mm/min	Energía de Absorción	4.5 mm
JCI-SF4	VIGA	2	150X150X500	22,500	11.3	0.05 a 0.10 mm/min	Deflexión/Energía	3 mm

Las pruebas de tensión por flexión son los más habituales en la caracterización y el control de las propiedades post-agrietamiento a tensión de los concretos fibroreforzados.

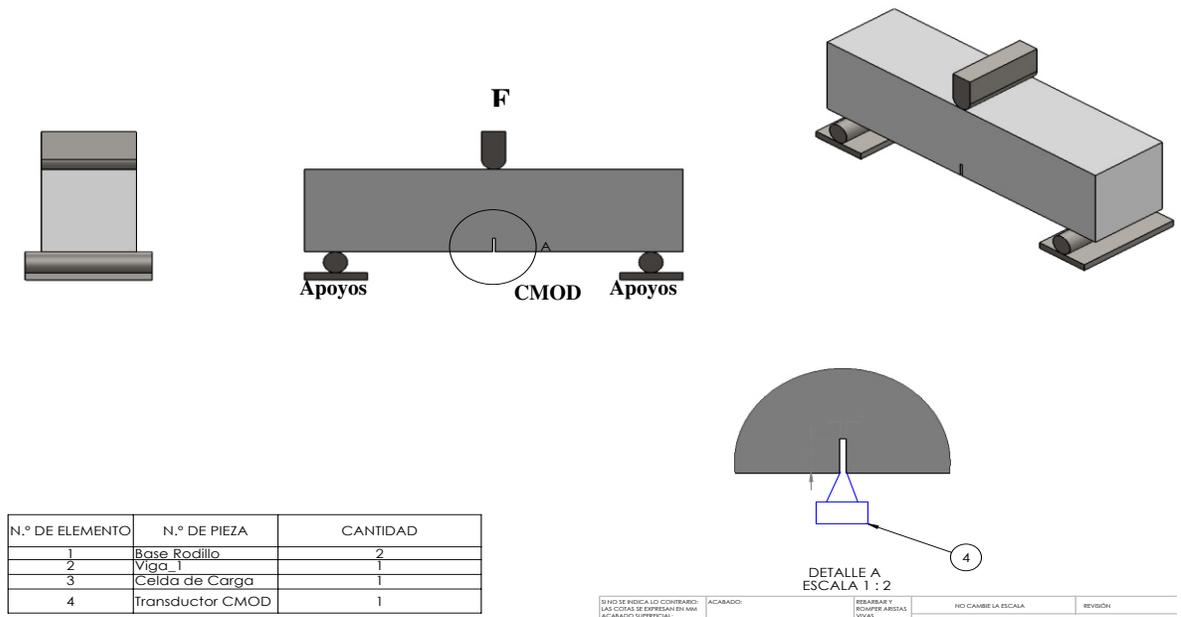


Figura 22. Configuración de la norma EN 14651 [34].

Cada prueba en la viga de resistencia a tensión por flexión proporciona el valor de la fuerza vertical “F” ejercida por la máquina universal sobre los distintos

valores de apertura de grieta CMOD (véase Figura 22). La determinación de la resistencia residual asociada a cada punto de análisis para cada ( $f_{R,j}$ ) se realiza mediante la adopción de un comportamiento lineal elástico. En consecuencia y debido a la configuración del prueba a tensión por flexión la resistencia residual ( $f_{R,j}$ ) se determina mediante la siguiente ecuación 2.

$$f_{Rj} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad \dots \text{ecuacion 2}$$

Donde “ $F_j$ ” es la carga vertical aplicada en el punto de análisis  $j$ , “ $l$ ” es el claro de la viga y “ $b$ ” el ancho de la viga respectivamente, y  $h_{sp}$  corresponde al peralte efectivo de la sección central donde se encuentra corte de grieta de viga. La clasificación de la respuesta post-agrietamiento de los concretos fibroreforzado, el significado de estos caracteres va asociado a los valores que la resistencia residual característica toma para distintos valores de la apertura de grieta en la prueba por su sigla en inglés (CMOD) crack mouth opening displacement) (véase Figura 23). Es necesario conocer la resistencia residual característica en los puntos 1 ( $f_{R1k}$ ,  $CMOD_1=0.5\text{mm}$  o bien  $\frac{1}{64}$  de pulgada) y punto 3 ( $f_{R3k}$ ,  $CMOD_3=2.5\text{mm}$  o bien  $\frac{1}{8}$  de pulgada).

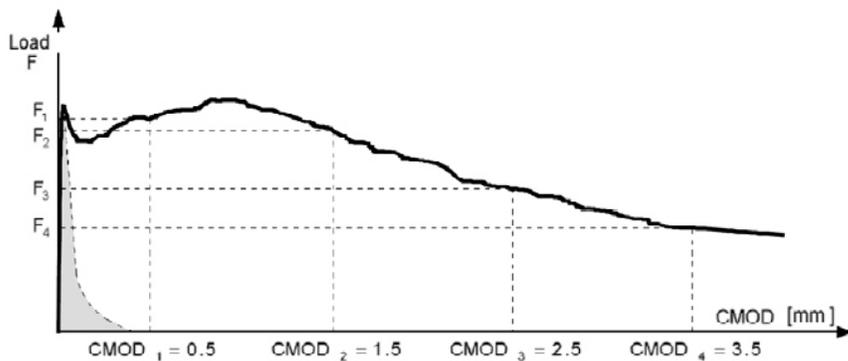


Figura 23. Respuesta post-agrietamiento del concreto fibroreforzado [34].

El ensayo requiere el empleo de vigas de dimensiones 150x150x600mm, sobre las cuales se realiza una ranura central a fin de presentar un peralte real de 125 mm en la sección de grieta inducida (véase Figura 23 ). La viga se coloca sobre dos soportes de rodillos en configuración isostática, conformando un claro libre de 500mm. La carga se aplica en el punto medio del claro(el cual debe coincidir con la posición

de la ranura) y en todo el ancho de la viga. Existen dos alternativas para realizar las mediciones y el control de la carga aplicada:

1. Directa de la apertura de grieta (CMOD) por sus siglas en ingles “crack mouth opening displacement” empleando un extensómetro tipo “clip”.
2. Indirecta deflexión empleando un transformador diferencial variable lineal(LVDT) situado en un marco metálico adherido a la probeta

La resistencia residual a tensión por flexión se determina utilizando la prueba de tensión por flexión de tres puntos en vigas ranuradas con unas dimensiones de 150 x 150 x 600 mm. El peralte con ranura es de 125 mm. En el punto medio donde se aplica la carga a tensión por flexión se define claramente la posición de la grieta inicial, pero no puede tener en cuenta la distribución real de la fibra. El Model Code contempla que el diseñador de concreto fibroreforzado tiene que especificar la clase, la relación de resistencia residual y la material de la fibra. La notación correspondiente a este ratio es la que se indica a continuación:

- si  $0.5 \leq f_{R3k}/ f_{R1k} \leq 0.7$  – reblandecimiento.
- si  $0.7 \leq f_{R3k}/ f_{R1k} \leq 0.9$  - reblandecimiento suave.
- si  $0.9 \leq f_{R3k}/ f_{R1k} \leq 1.1$  - plástico perfecto.
- si  $1.1 \leq f_{R3k}/ f_{R1k} \leq 1.3$  - suave endurecimiento.
- si  $1.3 \leq f_{R3k}/ f_{R1k}$  – endurecimiento.

El momento de rotación queda de la siguiente manera como se describe en la siguiente ecuación 3:

$$Mu = \frac{f_{R3}bh_{sp}^2}{6} = \frac{f_{TU}bh_{sp}^2}{2} \dots \text{ecuación 3}$$

El modelo de plástico rígido identifica un valor de referencia único,  $f_{Tu}$ , basado en el comportamiento final. Dicho valor se determina con la siguiente ecuación 4:

$$f_{TU} = \frac{f_{R3}}{3} \dots \text{ecuacion 4}$$

El refuerzo de fibra puede sustituir total o parcialmente si se cumple el refuerzo en el estado límite último, puede distinguir si la respuesta post-agrietamiento es plástico perfecta, con reblandecimiento o endurecimiento.

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} > 0.4$$

Si bien esta ecuación implica la relación de caída de carga no sea menor del 40% para evitar la fragilidad.

### 2.10.3 MODULO DE ELASTICIDAD.

El Módulo de elasticidad estático del concreto se determina a través de la prueba estándar de compresión definida en la Norma ASTM C469 [77], preparando especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, los cuales son sometidos a una carga axial incrementada gradualmente hasta que el cilindro del concreto falla.

### 2.10.4 ENERGÍA DE FRACTURA.

El valor de la energía de fractura se modela del modelo e Hillerborg, de acuerdo con las recomendaciones RILEM-T50-FMC [44], las características de la fractura de concreto fibroreforzado, se obtiene de la siguiente ecuación 5.

$$G_F = \frac{\text{Energía de Fractura Absorbida}}{\text{Área de Fractura}} = \frac{W + mg\delta}{b(h_{sp})} \quad \dots \text{ecuacion 5}$$

Donde W es el área bajo el diagrama de esfuerzo deformación hasta el colapso total de la viga, b (m) es el ancho de viga,  $h_{sp}$  corresponde al peralte efectivo de la sección central donde se encuentra corte de grieta de viga, m (kg) es la masa de la viga, que incluya la masa del equipo unido a la viga,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  y  $\delta$  (m) es la desviación del peso propio. El método es válido sólo cuando toda la energía disipada sólo es en una sola grieta, es decir, una sola zona de daño. El método tiene en cuenta que la energía de fractura se disipa en el tercio medio de una muestra sometida a flexión de tres puntos. El método utilizado define el trabajo de energía de fractura W

de las fuerzas externas, como el trabajo en el medio de la extensión de la prueba de flexión de tres puntos.

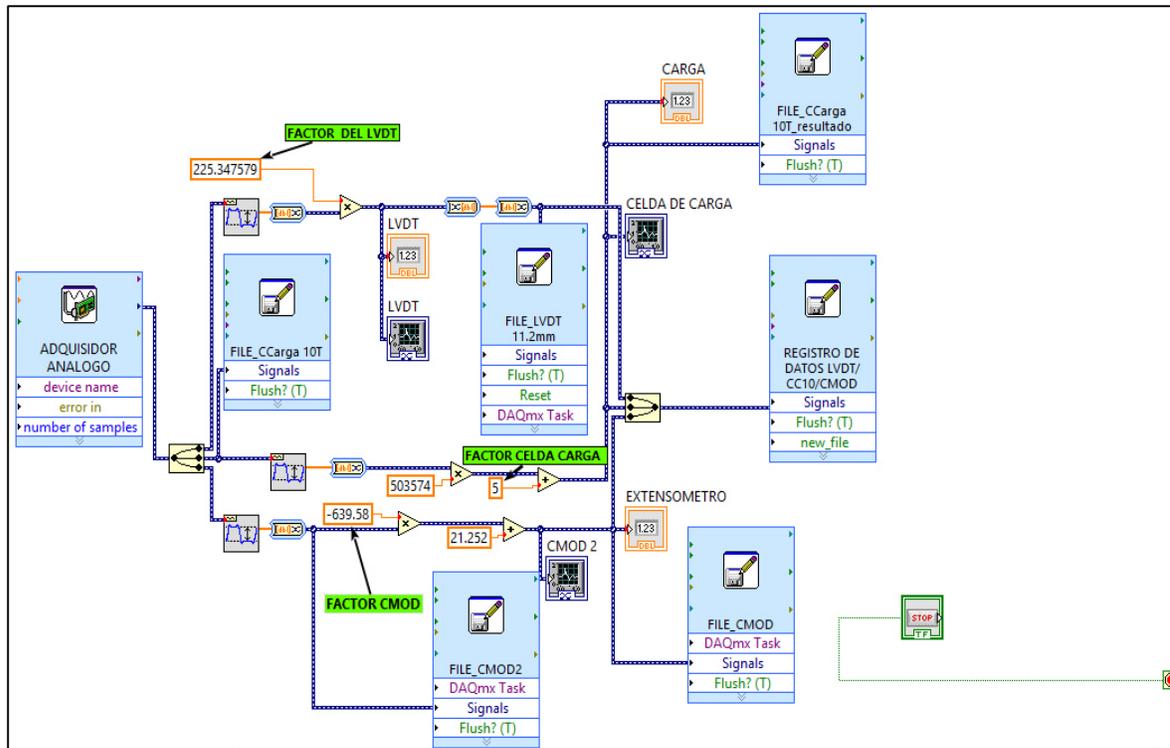
## 2.11 INSTRUMENTACIÓN, ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL.

### 2.11.1 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO VIRTUAL.

La instrumentación de la prueba se realizo con la adquisición de señales análogas por medio un sistema CompactDAQ(véase Figura 24), de National Intruments, la cual consta de varios slots(ranuras de tarjetas) para la conectividad de tarjetas de adquisición de señal, el CompactDAQ es una plataforma de adquisición de datos robusta y portátil que integra conectividad y acondicionamiento de señales, para conectar directamente a cualquier sensor o señal, se usaron tarjetas de catalogo denominadas NI 9239, esta es un módulo de entrada analógica de la Serie C de 24 bits de 4 canales para usarse con cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO por medio de un instrumento virtual (VI) realizado con el software LabView, este consta de dos pantallas las cuales una es el diagrama de flujo de información(véase Figura 25) y el segundo es el de pantalla frontal de instrumentos(véase Figura 26) y su señales. El sistema de registro de datos fue directamente a las salidas electrónicas analógicas de carga y CMOD, con una velocidad de grabación no inferior a 5 Hz, conforme marca la normas, para después en base a la arquitectura de VI, dicha señal se convirtió en una señal digital. Las señales fueron registradas en una base de datos teniendo la misma secuencia y tiempo de señales. Para después analizarse por medio cada ensaye de viga por el cantidad de datos en el software Matlab.



Figura 24.Chasis CompaDAQ de 8 modulos de entrada.



A continuación se muestra el diagrama de instrumento virtual de medición el cual fue construido (véase Figura 26).

Figura 25. Instrumento virtual de medición, diagrama de flujo de señal de los sensores.

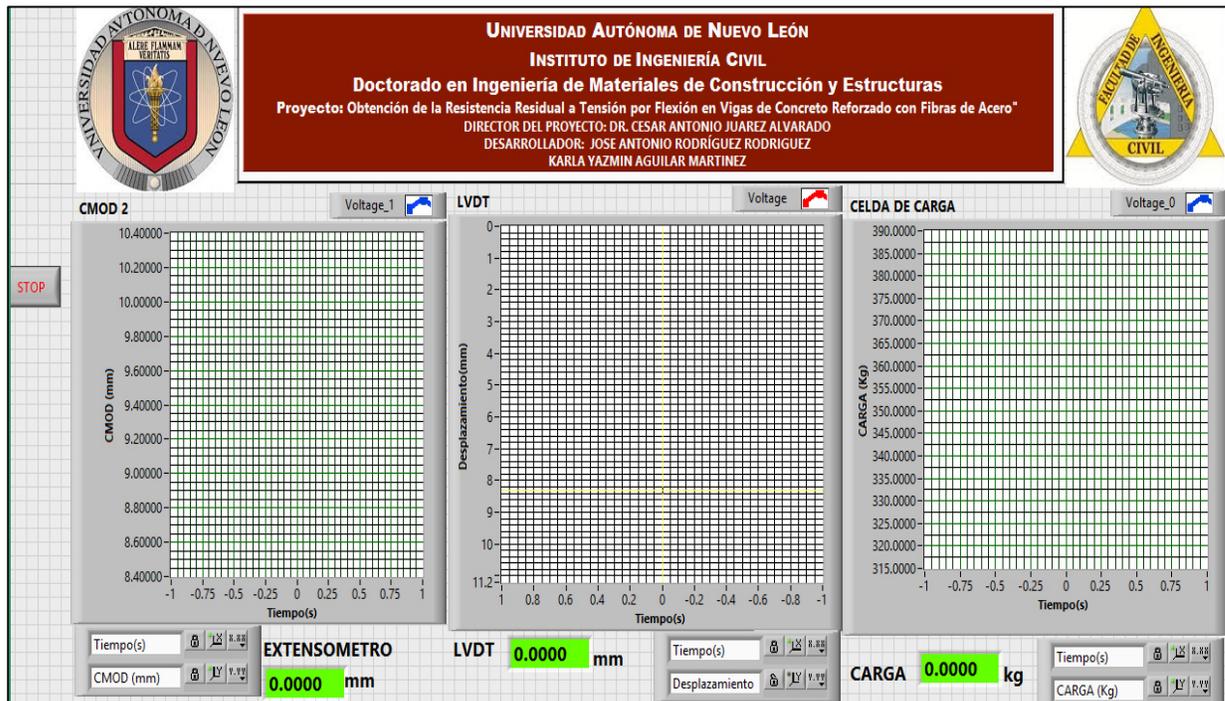


Figura 26. Pantalla frontal de instrumentos.

## CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.

### 3.1 CEMENTO PORTLAND ORDINARIO.

La composición del cemento portland tiene gran influencia en su comportamiento, así como en su cinética de hidratación. Su composición normalmente se reporta en cuanto al contenido en porcentaje de óxidos, siendo el óxido de calcio (CaO) y el óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), esta fase es la que tiene en mayor porcentaje. La Tabla 9 muestra los resultados composición de óxidos de un cemento portland, donde vemos en menor cantidad pero no de menor importancia algunos óxidos realizados por equipo de espectrómetro de fluorescencia de rayos X de Épsilon 3XLE por dispersión de energías (EDXRF) de sobremesa que se utiliza para análisis compuestos de los cuales, cabe mencionar, tienen un efecto en el proceso de hidratación del cemento. Los cuatro óxidos principales son CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Comp. Químico	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
%	21.30	4.77	3.72	60.45	4.09	2.82	0.296	0.45	0.24	0.095	0.077

Tabla 9. Compuestos analíticos del Cemento Tipo CPO.

Para la densidad se verifico que cumpliera conforme a la Norma ASTM C 188, la cual especifica que el resultado de la prueba efectuada se acon una sola persona y que no deba presentar una variacion mayor  $\pm 0.03$ . de la cual su densidad fue de 3.10gr/cm<sup>3</sup>.

### 3.2 CENIZA VOLANTE.

En el caso de la CV se verifico que esta cumpleira con la norma ASTM C188-09, la cual se obtuvo el resultado de densidad 2.06gr/cm<sup>3</sup>, a continuacion se muestran la compocision quimca de sus fases minerales antes de ser cribados por la malla No. 100 en la Tabla 10 y despues ser tamizado por la malla. Por que se puede ver una disminucion del contenido Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, esta fase mineral de aluminosilicato crsiatlino(mulita), presente en la CV se genera a partir de la crsiatlizacion del carbon fundido al enfrairse en el horno y pasa a través del escape, por lo que esta contiene fase no reactiva. En la fase mineral SiO<sub>2</sub>, se ve un incremento del oxido de silicio(vease Tabla 11). Por lo se espera que tenga mayor reactividad al tener mayor

deposito de silice y en ciertas condiciones de humedad y junto con la hidroxio de calcio producto de la hidratacion pueda generar segundos productos C-S-H.

Comp. Químico	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO
%	57.58	23.29	5.26	4.70	0.96	0.52	2.34	1.58	1.16	0.039	0.018

Tabla 10. Compuesto Químicos de Ceniza Volante sin tamizar.

Comp. Químico	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO
%	67.48	23.94	4.63	1.76	1.16	0.52	1.14	0.99	0.94	-	0.04

Tabla 11. Compuesto Químicos de Ceniza Volante tamizados por la malla No.100.

### 3.3 WOLLASTONITA.

Para esta investigación se decidió utilizar la wollastonita tipo 20x40, por ser la mas económica entre los cuatro tipos y que sus compuestos químicos minerales(véase Tabla 13. Compuesto químicos de Wollastonita.), en comparativa de la importada y las nacionales son muy similares entre sí salvo una ligera disminución en CaO (véase Tabla 12). La única desventaja es el tamaño medio de partícula. La forma se muestra la Figura 27 en acicular de la wollastonita.

Tipo de wollastonita	NYAD G	NYAD MG	HARRP -40	HARRP 20x40
Tamaño medio de partícula (µm)	55.0	53.65	255.90	625.80

Tabla 12. Distribucion de tamaño de partícula.

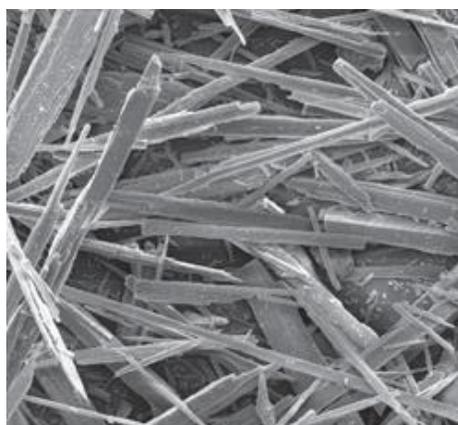


Figura 27. Micrografia de la wollastonita en forma acicular.

COMPOSICION QUÍMICO (%)				
Compuesto	NYAD G	NYAD MG	HARRP -40	HARRP 20x40
MgO	0.08	0.02	0.19	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.75	0.25	1.12	0.41
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>48.62</b>	<b>46.52</b>	<b>32.46</b>	<b>35.60</b>
SO <sub>3</sub>	0.07	0.09	0.03	0.25
K <sub>2</sub> O	1.58	0.20	1.35	0.03
<b>CaO</b>	<b>47.28</b>	<b>45.72</b>	<b>62.24</b>	<b>60.98</b>
TiO <sub>2</sub>	1.16	0.05	0.39	0.03
MnO	0.02	0.71	0.00	0.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.97	0.25	0.21	0.38
<b>Ubicación</b>	Importación		Nacionales	

Tabla 13. Compuesto químicos de Wollastonita.

### 3.4 AGREGADOS.

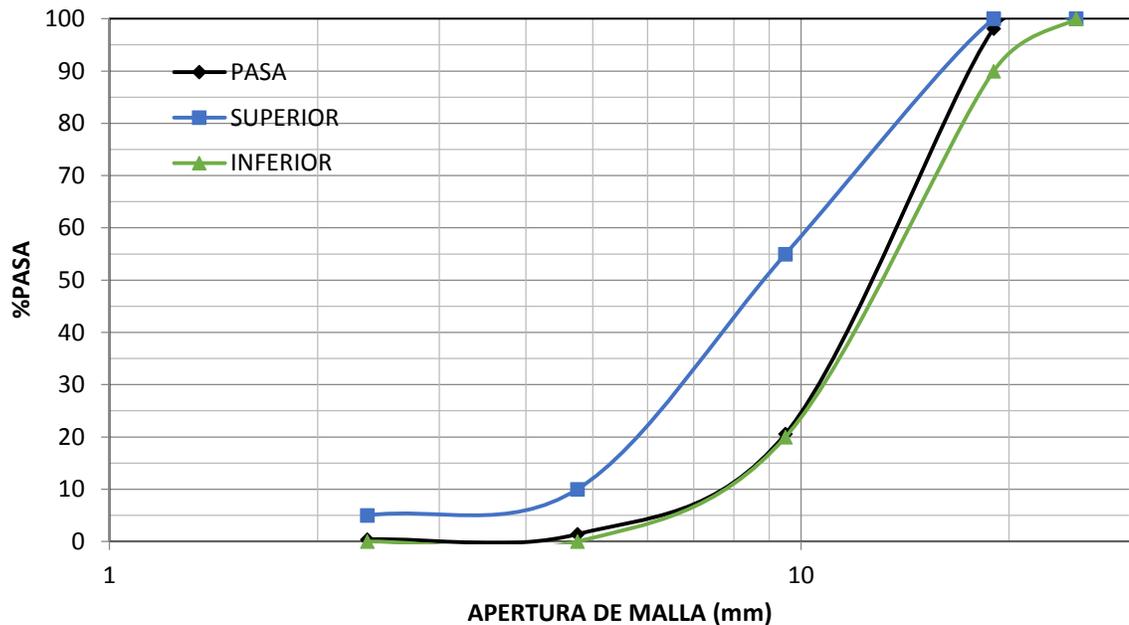
#### 3.4.1 AGREGADO GRUESO.

En la Tabla 14 muestra los resultados de la prueba de la granulometría así como en la Gráfica 1 la curva granulométrica de los agregados grueso calizos empleados. La densidad y absorción realizadas con las normas vigentes ASTM C 136 y AASHTO T 27-11.

Malla No.	Retenido Parcial (grs)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Pasa	% Norma
1"	-	-	-	100.00	100.00
3/4"	93.00	1.86	1.86	98.14	90-100
3/8"	3,877.00	77.54	79.40	20.60	20-55
No.4	960.00	19.20	98.60	1.40	0-10
No.8	50.00	1.00	99.60	0.40	0-5
P8	15.00	0.30	99.90	0.10	
SUMA	4,995.00				
PESO INICIAL	5,000.00				
ERROR	5.00				
TOLERANCIA	15.00				
DENSIDAD(SS)	2.71	gr/cm <sup>3</sup>			
% ABS	0.31				

Tabla 14. Granulometría del agregado grueso y propiedades.

### GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO



Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado grueso, T.M.A. 19 mm (3/4").

### 3.4.2 AGREGADO FINO.

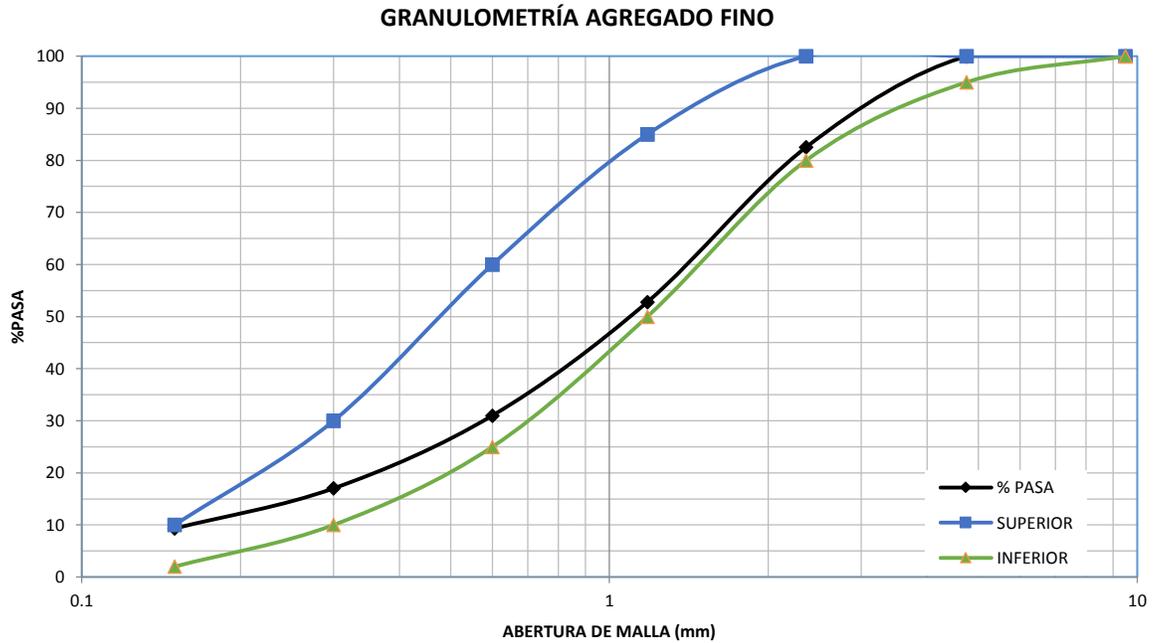
En la Tabla 15 se muestra las granulometría así como en la Gráfica 2 la curva granulométrica de los agregados fino calizos empleados. La densidad y absorción realizadas con las normas vigentes ASTM C 136 y AASHTO T 27-11.

Tabla 15. Granulometria de agregado fino.

Malla No.	Retenido Parcial (grs)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Pasa	% Norma
3/8"	-	-	-	100.00	100.00
No.4	0.10	0.02	0.02	99.98	95-100
No.8	87.20	17.44	17.46	82.54	80-100
No.16	148.70	29.74	47.20	52.80	50-85
No.30	109.00	21.80	69.00	31.00	25-60
No.50	69.90	13.98	82.98	17.02	10-30
No.100	38.50	7.70	90.68	9.32	2-10
P100	45.50	9.10	100.00	0.22	
SUMA	498.90	MF=	3.07		
PESO INICIAL	500.00				
ERROR	1.10				
TOLERANCIA	1.50				

DENSIDAD (SS)	2.66	gr/cm <sup>3</sup>
% ABS	1.42	



Gráfica 2 Curva de Granulométrica del agregado Fino.

### 3.5 ADITIVO.

El aditivo empleado como se mencio en el capitulo 2, fue el Plastol plus, el cual tiene una densidad de  $1.11\text{gr/cm}^3$ , este aditivo tiene una coloracion ambar, el proveedor recomienda usarlo en dosificaciones de  $4$  a  $7\text{ cm}^3/\text{kg}$  de cemento, otra varaiente que recomienda el comerciante en su ficha tecnica es que se debe de mezclar entre  $5$  a  $10$  min. El contenido de solidos fue de  $43\%$  y el  $57\%$  restante se consiera como parte de agua de reaccion.

### 3.6 DISEÑO DE MEZCLAS.

En el diseño de las mezclas como se menciona anteriormente en el capítulo 2, el objetivo es tener una mezcla de un concreto fibrerreforzado autocompactable. En las Tabla 16 y

Tabla 17 los proporcionamientos de los concretos para las series A y B respectivamente a volumen de fibra de 0.5% y 1.0%. La cantidad de fibra es en relación a su densidad, obtenida en la caracterización de los materiales de los concretos.

Tabla 16. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "A".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.114
Arena	0.386
Grava	0.300
Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.005

Tabla 17. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "B".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.114
Arena	0.381
Grava	0.301
Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.010

Para las mezclas de las series B y C se sustituyo el volumen de 15% de de cemento tipo CPO 40 por ceniza volante tipo F(vease Tabla 18 y Tabla 19).

Tabla 18. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "C".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.096
Ceniza volante	0.017
Arena	0.381
Grava	0.301

Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.010

Tabla 19. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "D".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.096
Ceniza volante	0.017
Arena	0.381
Grava	0.301
Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.010

En las series E y F se sustituyo de igual forma el 15% de volumen de cemento CPO 40 por wallostonita en sus proporcionamientos(vease Tabla 20 y Tabla 21).

Tabla 20. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 0.5% de volumen de fibra para la serie "E".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.096
Ceniza volante	0.017
Arena	0.381
Grava	0.301
Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.005
Suma	1.000

Tabla 21. Proporcionamiento de la mezcla en volumen aparente de 1.0% de volumen de fibra para la serie "F".

Material	Volumen aparente
Agua	0.193
Cemento	0.097
Wollastonita	0.016
Arena	0.381
Grava	0.301
Aire	0.002
Fibra de Polipropileno	0.010
Suma	1.000

El mezclado de las series, se llevó a cabo en una revolvedora con capacidad de 80 L, bajo condiciones de laboratorio. Se humedeció el interior de la revolvedora evitando el excedente de agua. Después se introdujo a la revolvedora la la grava en primer lugar, despues la arena junto con el cemento, y se mezcló durante 30 segundos para homogenizarlos. Se agregó el agua con el aditivo y se mezcló por 3 minutos, fue necesario tapar la boca de la revolvedora para evitar la pérdida de humedad. La fibra fue adicionada durante el reposo de la revolvedora, de manera que pudiera ser distribuida de forma homogénea en toda la mezcla. Se puso en reposo la revolvedora y la mezcla durante 3 minutos para despues terminar con ciclo de mezclado los ultimos 2 minutos, en un total de 8 minutos. Los especímenes fueron desmoldados 24 horas después de su fabricación, durante este periodo se evitó la evaporación del agua. Después de extraer los especímenes, lasmuestras se etiquetaron y se conservaron durante 28, 56 y 90 días en un cuarto de curado a 24°C con 100% de humedad relativa (vease Figura 28).



Figura 28. Revolvedora de 80 L en adición de fibras y cuarto de curado.

### 3.6.1 FIBRAS SINTÉTICAS.

En esta investigación se realizó el diseño del experimento, teniendo como variables el tipo de fibra sintética de polipropileno, las cuales fueron 4 tipos de fibra (véase Figura 29). Dos tipos de fibra fueron de monofilamento, denominadas comercialmente *Enduro* y *Mac* de misma longitud. Y las otras dos fibras fueron multifilamento y que tienden con mayor facilidad de desfibrilarse y son denominadas comercialmente *Tuf strand* y *Forta ferro* de igual longitud. La Tabla 22 se muestran sus propiedades físicas.

Fibra	Enduro 600	Forta ferro	Mac	Tuf strand
<b>Propiedad</b>				
Absorción(%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	0.91	0.90	0.91	0.90
Elongación (%)	15.0	10.0	5.0	7.0
Longitud (mm)	50.0	54.00	50.0	50.0
Diámetro(mm)	1.0	N/d	0.67	0.75
Relación de aspecto	50	N/d	74	67
Forma	ondulada	N/d	estriada	ondulada
Modulo de elasticidad (GPa)	9.0	7.0	11.0	9.5
Resistencia a la tensión (MPa)	412.0	350.0	600	590
Conductividad eléctrica	Baja	Baja	Baja	Baja
Resistencia ácidos	Alta	Alta	Alta	Alta
Punto de ignición(°C)	160	164	210	330
Pureza del polímero	100 %virgen	90 % virgen	100% virgen	70% virgen
Color	Gris	Gris	Transparente	Blanca

Tabla 22. Propiedades de las fibras de polipropileno del diseño del experimento.



Figura 29. Fibras polipropileno, de izquierda a derecha (enduro, forta ferro, mac, tuf strand)

### 3.6.2 MICROGRAFIAS DE FIBRAS.

A continuación se muestran la sección transversal y longitudinal de la fibra *enduro* en la Figura 30, en la imagen de la izquierda se puede observar un punto frío en el centro, el cual contribuye para que la fibra en su mezclado se desfibre en la matriz cementante.

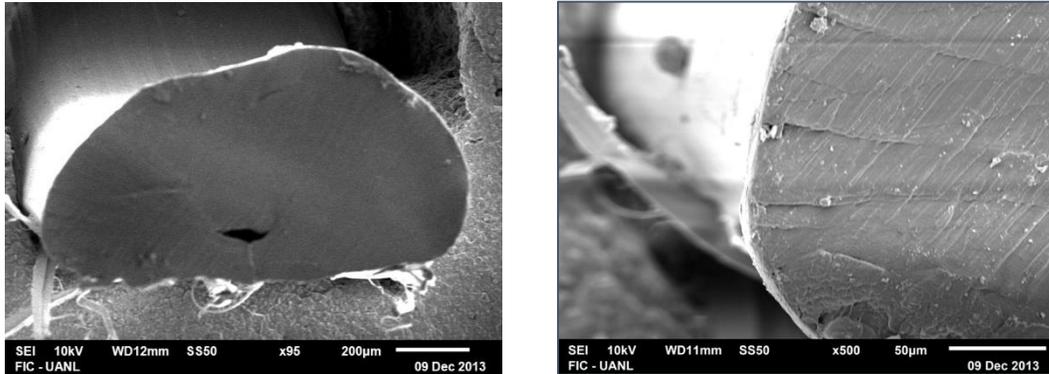


Figura 30. Micrografías de la Fibra *Enduro*.

La fibra *Mac* ( véase Figura 31), esta tiene una forma ondulada en su sección transversal y longitudinal que contribuye a un mejor enclavamiento dentro de la matriz cementante.

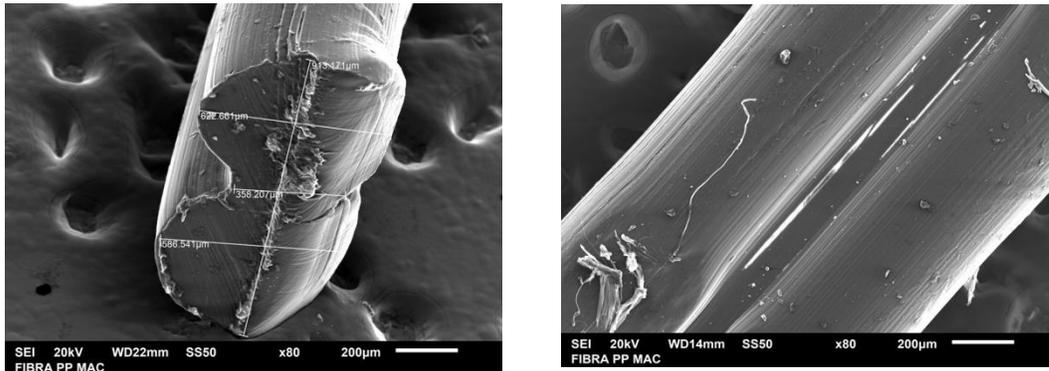


Figura 31. Micrografías de la Fibra *Mac*.

Para la fibra tuf strand se muestra en la Figura 32, la cual es considerada multifilamento y se observa un desgarramiento en la fibra que en la hora de su mezclado se desfibrila fácilmente.

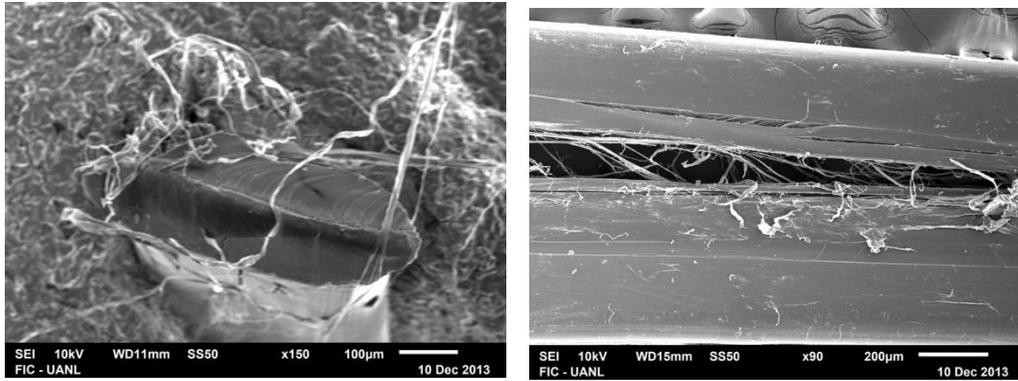


Figura 32. Micrografías de la Fibra *Tuf strand*.

La Figura 33 muestra la fibra *Forta ferro* es multifilamento y se observa un desgarramiento en la fibra por que se observa sus fallas y puntos fríos para que en su mezclado se desfibrile mejor . Estos puntos fríos se deben al proceso que se tiene de estriado a la temperatura de elaborar la fibra con los polímeros.

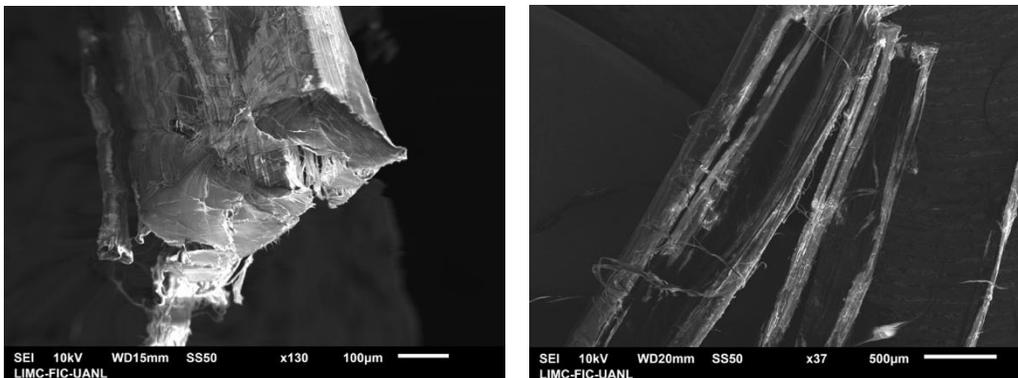


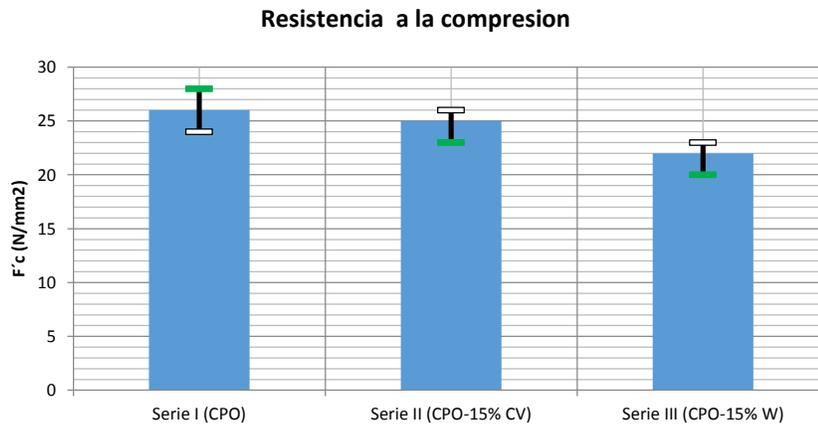
Figura 33. Micrografía de la fibra *Forta ferro*.

### 3.6.3 PASTA.

Con la finalidad de ver el consumo de Hidróxido de Calcio y carbonato de calcio por parte de la ceniza volante y wollastonita, se hizo de manera grafica a partir de los termogramas. se decidió trabajar con pastas sin fibras, se elaboraron tres tipos de mezclas en sustitución por volumen de:

- Serie I (CPO).
- Serie II(CPO-15%CV).
- Serie III(CPO-15%W).

Se realizaron 3 cubos por cada serie de dimensiones conformé a la ASTM C 109 [78], se desmoldo a las 24 horas, se colocaron en cuarto de curado de temperatura controlada de 24°C colada a con una humedad relativa de 100%. Se evaluaron a compresión simple para ver su resistencia a compresión. A continuación se muestran (véase Gráfica 3), los resultados de los ensayos de las tres series en resistencia compresión:



Gráfica 3. Resistencia a la compresion de los cubos.

De los restos de los cubos ensayados a la edad de 28 días, se analizaron y se molieron para analizar por medio de la técnica de DTA/TGA. Las curvas TGA presentan perdidas de peso, cuyo origen esta en:

- Reacciones químicas (descomposición y separación del agua, y la reducción de óxidos).
- Transformaciones físicas (evaporación, desorción y desecación).

Las curvas TGA muestran tres escalones pronunciados de perdida de peso. El primero es aun 100°C, esto se debe a la desecación de agua residual de los poros capilares de las pastas y/o deshidratación de la etringita. El segundo escalón sucede en 400°C a 450°C, se atribuye a la deshidratación del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o portlandita. El tercer escalón es la perdida de peso a unos 700°C debido a la des carbonatación de  $\text{CaCO}_3$ . De los resultados mostrados por las isotermas se muestran en la Figura 34, Figura 35 y Figura 36.

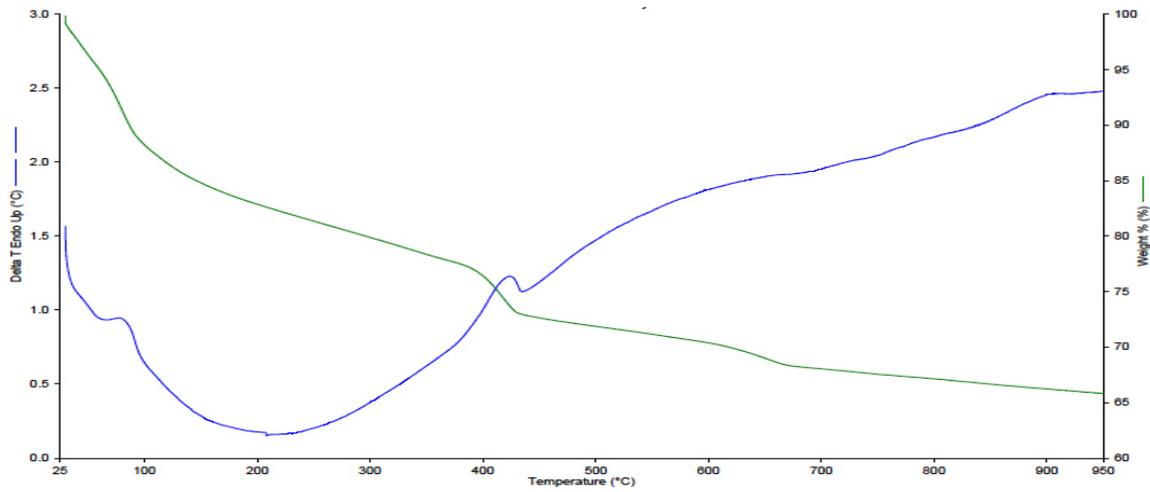


Figura 34 DTA/TGA. Serie I

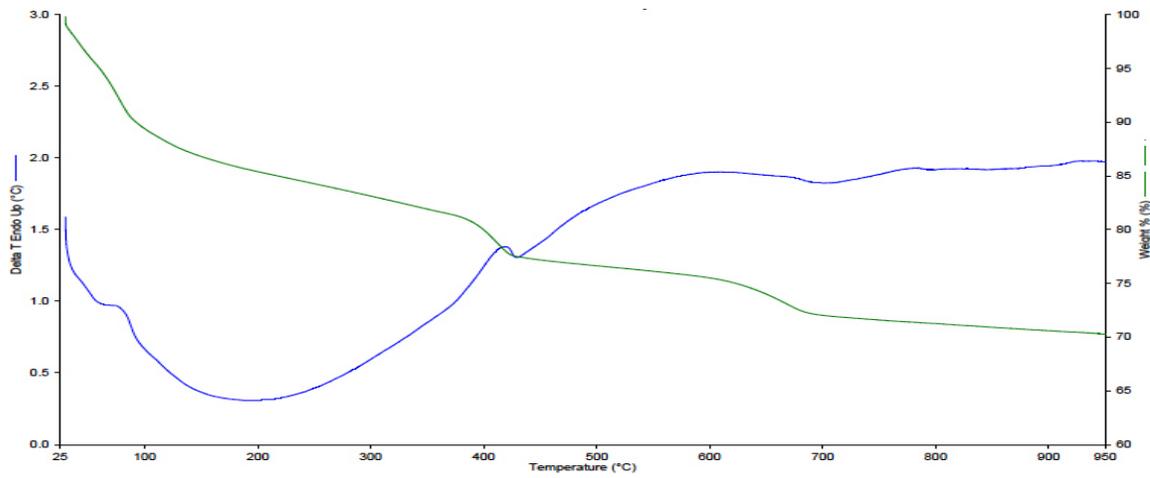


Figura 35 DTA/TGA. De la serie II

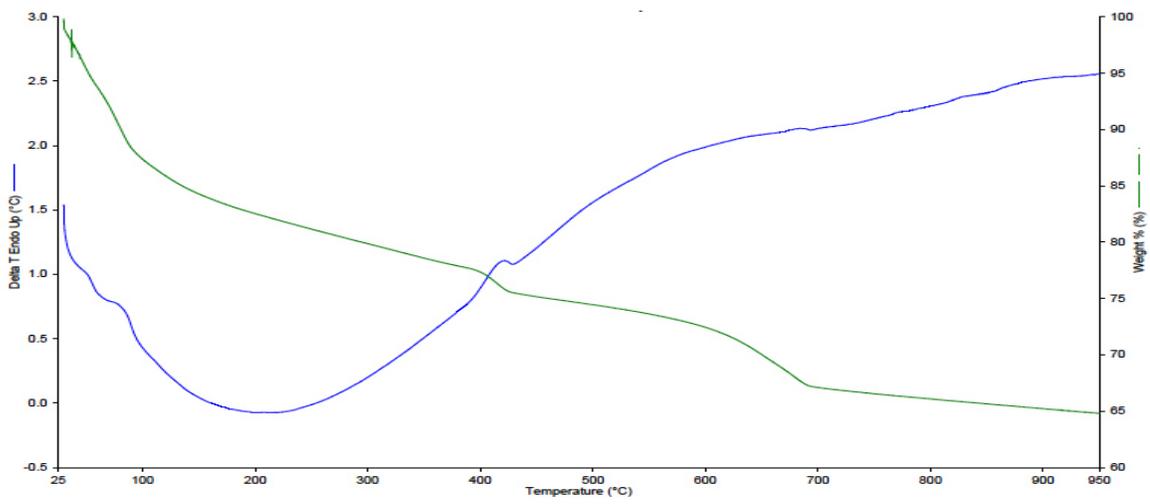


Figura 36 DTA/TGA de la serie III.

De análisis de los termogramas la muestras de serie II, presenta menor pérdida de hidróxido de calcio menos del 10%. Por que si tuvo efecto de reacción con hidróxido de calcio y la sustitución de ceniza volante tamizada por la malla N. 100, contrario a la sustitución de la wollastonita que la pérdida de peso por hidróxido de calcio fue de un 20%. En cambio para la mezcla de serie I de referencia tuvo una pérdida de peso de 25%.

### 3.7 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO FIBROREFORZADO.

#### 3.7.1 TRABAJABILIDAD.

La principal característica de concreto fibroreforzado autocompactante(FRC-SCC) es el aumento de la fluidez, que ayuda a la colocación y compactación del material. Estas dos operaciones se llevan a cabo sin intervención humana. El concreto autocompactante, la no segregación de los materiales está asegurado, a través de:

- La elección adecuada de los agregados.
- El uso de agregados finos (tamaño de partículas de polvo).
- El uso de aditivos químicos especiales.

Para las muestras obtenidas que se realizaron conforme a la procedimiento establecido en la norma ASTM C 1611 [72], las series A y B elaboradas con CPO fueron las de menor fluidez, en cambio las series C y D, la ceniza volante facilito a una mayor fluidez de las mezcla. También en las series E y F la wollastonita mejoro considerablemente a la fluidez de las mezclas. Sin embargo disminuyo la fluidez en el volumen de fibra las series B, D y F. En el caso particular de la fibra *Forta ferro*, en este fibra se obstaculizo mas a la mezcla durante la prueba y fue menor su fluidez. Los resultados se muestran a continuación (véase la Tabla 23).

Tabla 23. Extensibilidad de las muestras obtenidas de la fibra por serie.

Serie	Fibras (cm)			
	Enduro	Forta ferro	Mac	Tuf strand
<b>A</b>	59.5	54.0	60.0	59.0
<b>B</b>	58.0	50.0	58.0	58.0
<b>C</b>	61.0	55.0	62.0	60.0
<b>D</b>	58.0	52.0	58.0	58.0
<b>E</b>	60.0	56.0	64.0	60.0
<b>F</b>	58.0	50.0	60.0	59.0

En la Figura 37 se puede ver el procedimiento y medición del diámetro de la extensibilidad de la mezcla y en la imagen de izquierda no se observa rasgos de sangrado en la mezcla.



Figura 37. Prueba de extensibilidad de diferentes series.

### 3.7.2 MASA VOLUMÉTRICA.

La prueba de masa volumétrica con el procedimiento establecido en la norma ASTM C 138 [73], para ello se utilizó como equipo una olla estandarizada y calibrada para todas la pruebas con un peso de 5,878 gramos y el volumen de 6,338 cm<sup>3</sup>. Para cada serie se hizo una muestra , las cuales no tuvieron mucha variación debido a que la fibra de polipropileno tiene una densidad baja de 0.91 gr/cm<sup>3</sup>, las únicas series que tuvieron variación fueron las series B, D y F, debido a que en estas series se adiciono un volumen de fibra 1.0%( véase Tabla 24).

Tabla 24. Resultados del muestreo de las mezclas por serie.

Serie	A	B	C	D	E	F
Masa volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )	2,337	2,379	2,302	2,350	2,310	2,360

### 3.7.3 CONTENIDO DE AIRE.

Para la realización de la prueba de contenido de aire, se procedió con el desarrollo de la prueba con la norma estandarizada (véase Figura 38), ASTM C 231 [74]. Durante las lecturas tomadas de las muestras de las series la fibra que genero mayor aire en la mezcla fue la fibra “*Forta ferro*”, debido que durante el mezclado de la fibra se desfibra generando aire atrapado. En las series C y D la ceniza también contribuyo a generar mayor aire en las cuatro tipos de fibra en la se muestran las lecturas obtenidas para cada muestreo por serie y fibra.

**Tabla 25. Resultados de Contenido de aire de las mezclas**

Serie	Fibras (%)			
	Enduro	Forta ferro	Mac	Tuf strand
A	1.2	0.9	0.9	1.1
B	1.3	1.1	1.2	1.4
C	1.8	2.8	1.5	2.2
D	2.2	3.2	1.9	2.6
E	1.4	1.1	1.2	1.8
F	1.2	1.3	1.5	1.9



Figura 38. Prueba de contenido de aire por personal Certificado UANL-ACI.

### 3.7.4 TEMPERATURA.

Durante el muestreo de las mezclas para cada una de las series se procedió a tomar la lectura de la temperatura de la muestras por mezcla y serie, conforme a la norma ASTM C 1064 , cabe mencionar que todas las mezclas se realizaron en un cuarto de temperatura controlada de 26°C. Todos lo materiales se encontraban en dicha temperatura. Debido a que la fibras de polipropileno no alteran en estado fresco la temperatura aun en volúmenes del 1%. En la Tabla 26 se muestran las lecturas de temperatura de las mezclas por serie.

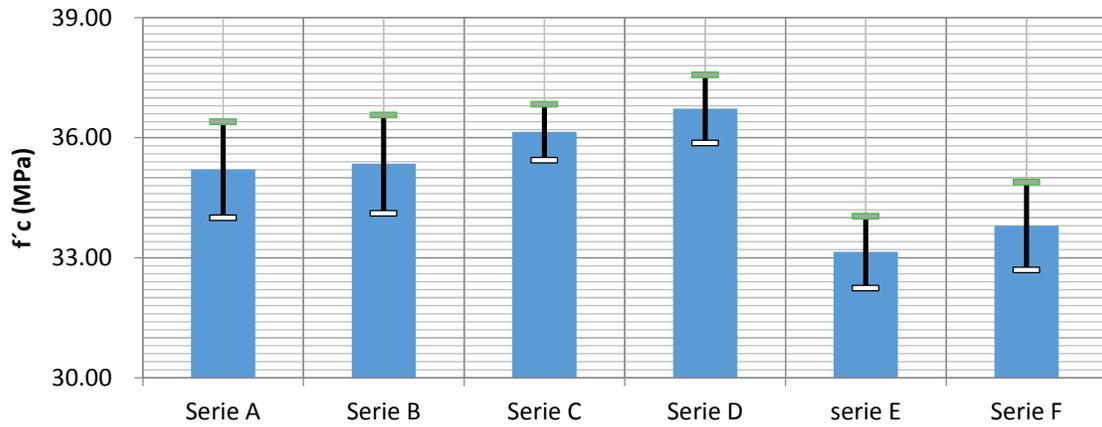
Serie	A	B	C	D	E	F
°C	27.3	26.4	27.5	26.5	27.9	28.1

Tabla 26. Lecturas de temperatura de las series.

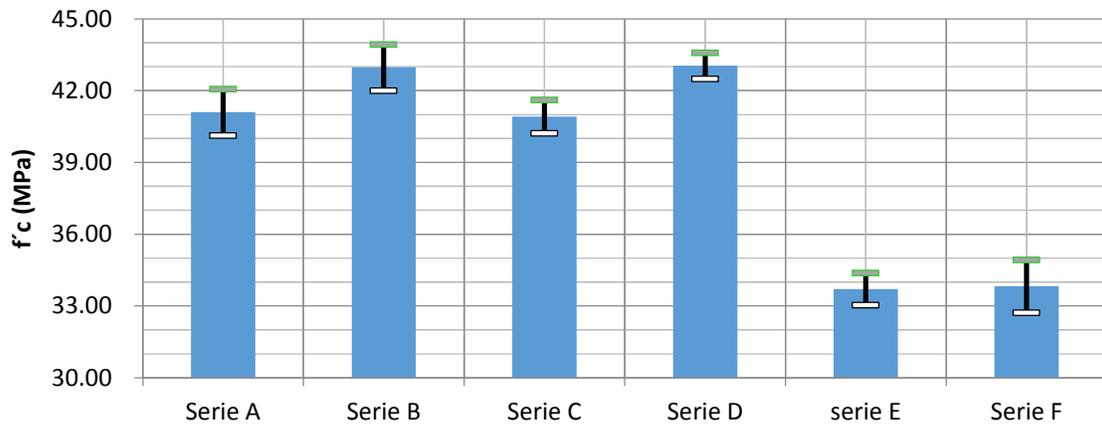
## 3.8 PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO.

### 3.8.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

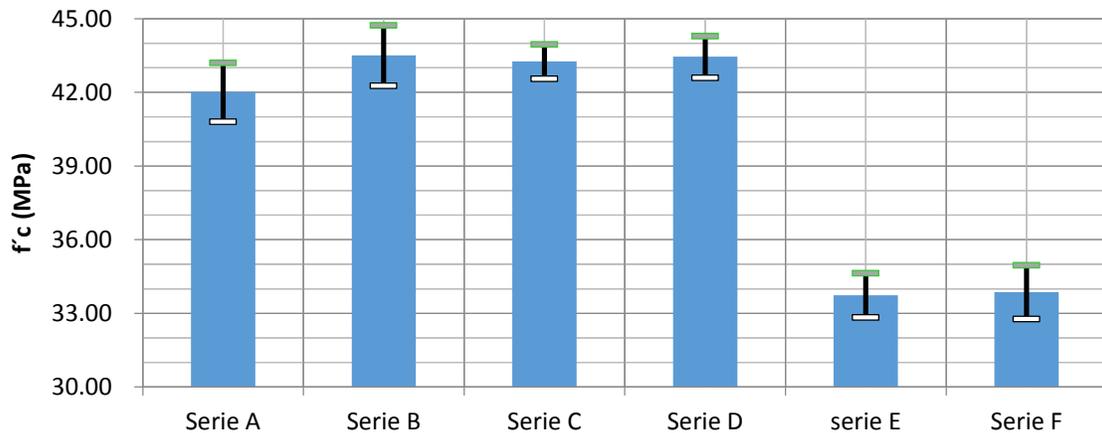
Como se menciona en el capítulo 2, para esta investigación se realizaron cilindros de dimensiones de 100mm de diámetro y 200mm de altura, en edades de 28, 56 y 90 días, dicha prueba se realizo conforme a la norma ASTM C 39 [76]. La maquina universal que se utilizo fue la de marca Instron de capacidad de carga 600 kilo Newton(kN) la cuenta con una precisión en su celda de carga de 0.1Newton(N). A continuación se muestran los resultados en comparativa los 12 gráficos por edad y tipo de fibra de cada una de las series A, B, C, D, E y F conforme al diseño del experimento.



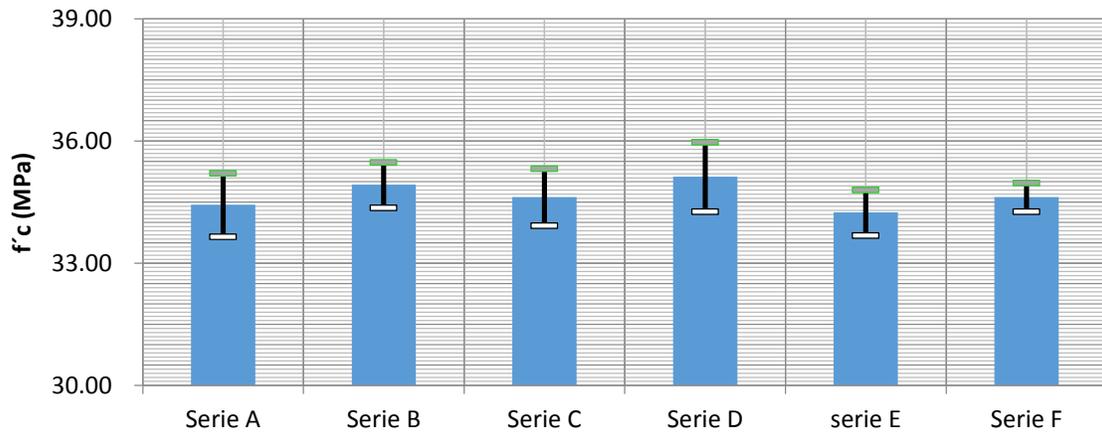
Gráfica 4. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 días de la fibra "Enduro".



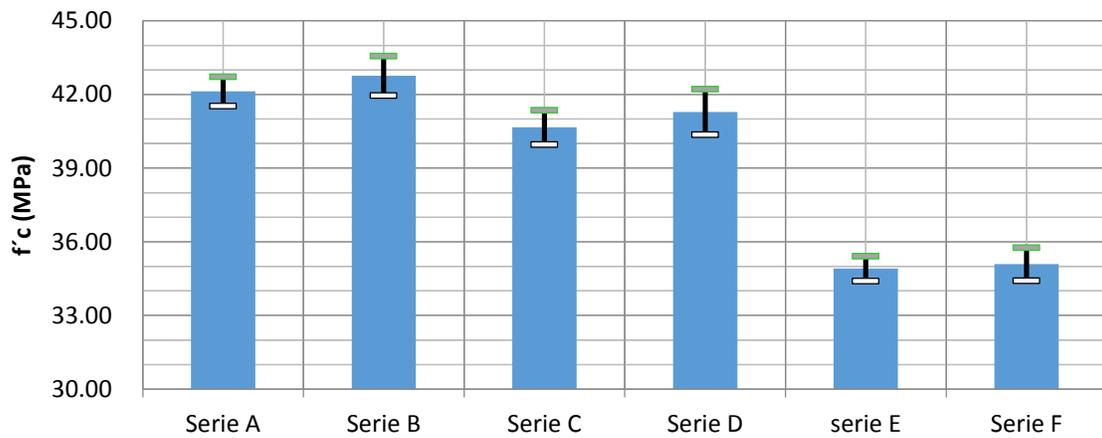
Gráfica 5. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 días de la fibra "Enduro"



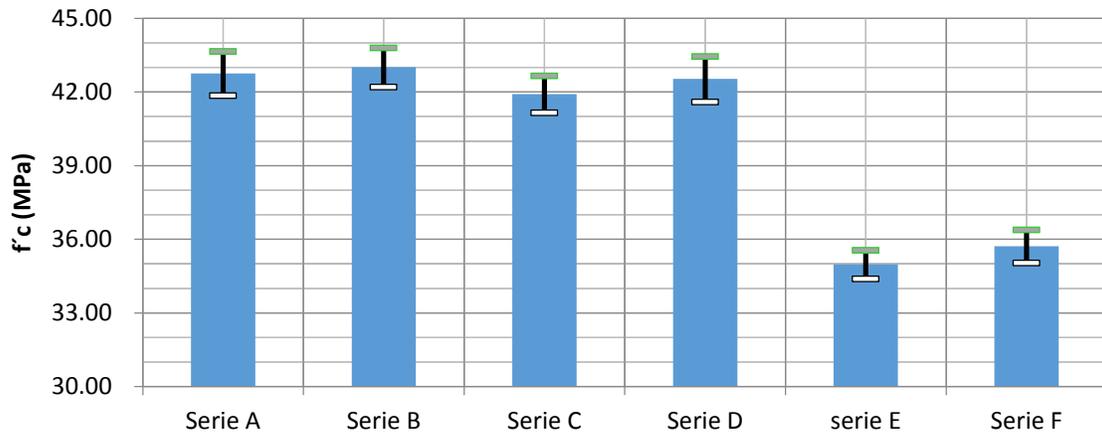
Gráfica 6. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 días de la fibra "Enduro"



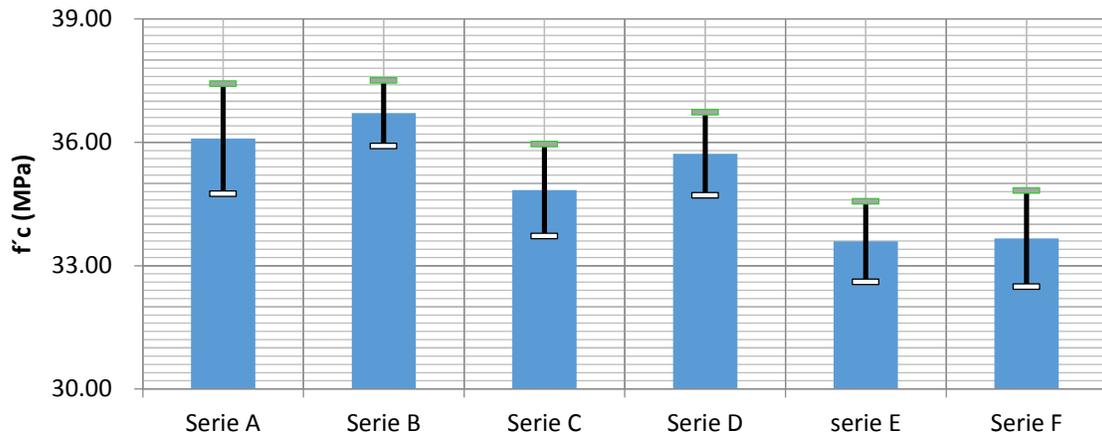
Gráfica 7. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 días de la fibra "Forta ferro"



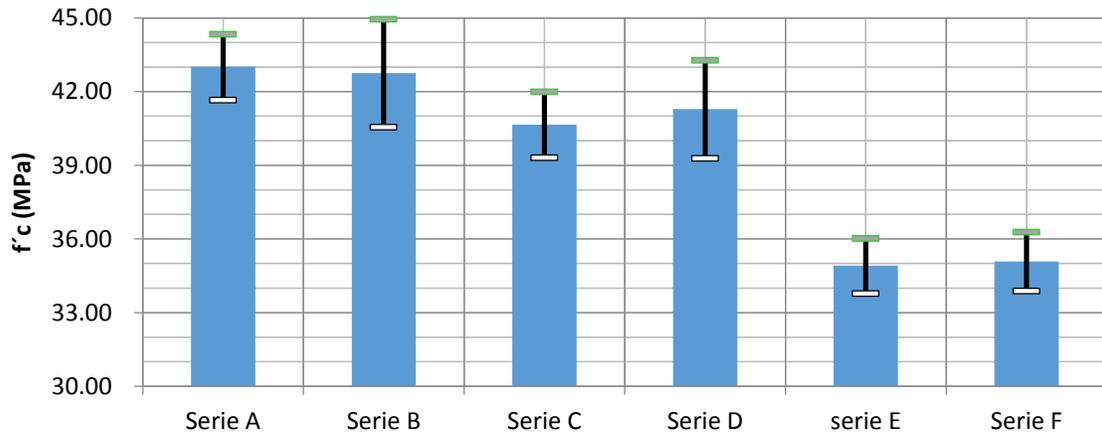
Gráfica 8. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 días de la fibra "Forta ferro"



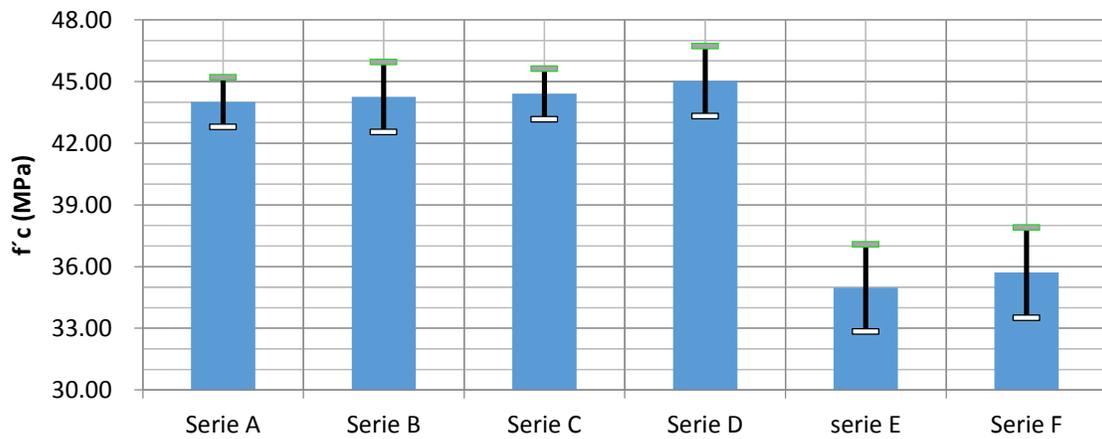
Gráfica 9. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 días de la fibra "Forta ferro"



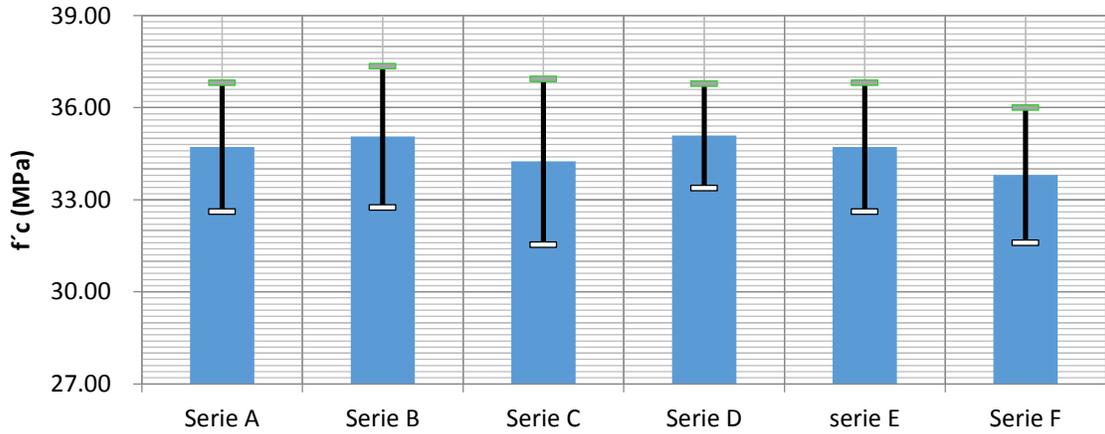
Gráfica 10. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 días de la fibra “Mac”



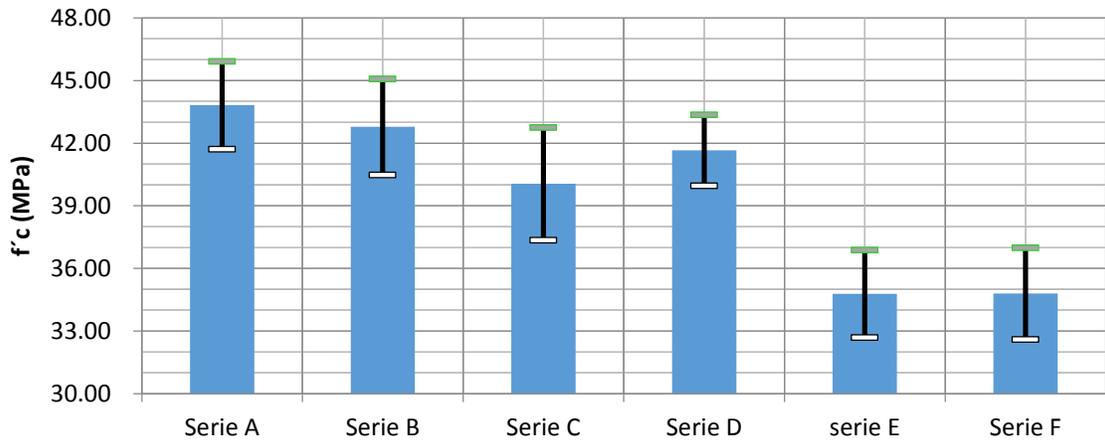
Gráfica 11. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 días de la fibra “Mac”



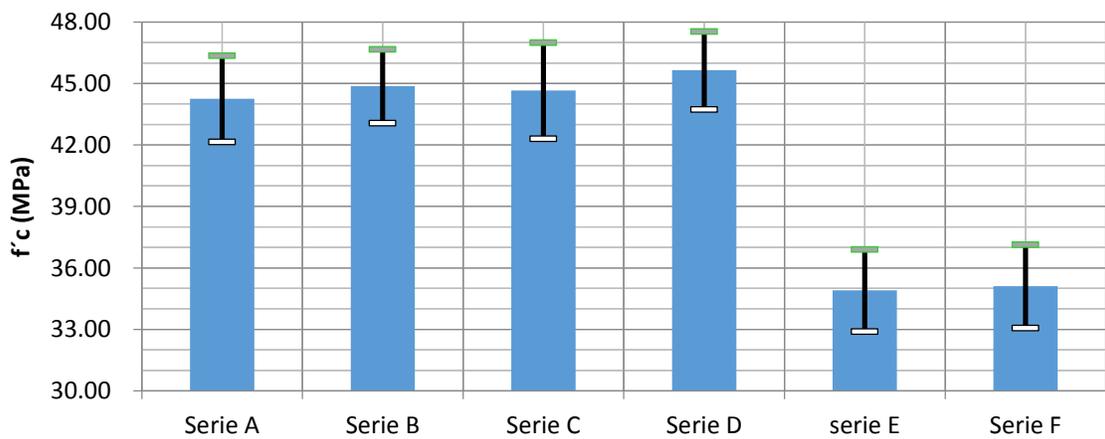
Gráfica 12. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 días de la fibra “Mac”.



Gráfica 13. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 28 días de la fibra "Tuf strand"



Gráfica 14 Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 56 días de la fibra "Tuf strand"



Gráfica 15. Resistencia al esfuerzo compresión de las series a la edad de 90 días de la fibra "Tuf strand"

En la Tabla 27 se muestran los resultados de los promedios de 3 replicas por cilindro, edad y tipo de fibra por cada una de las serie en unidades de esfuerzo MegaPascuales (MPa). La

Tabla 28 muestran los coeficientes de variación calculados de los promedios y sus desviaciones estándar.

Tabla 27. Promedios de resistencia al esfuerzo a compresion por edad y tipo de fibra

Serie	Edad/fibra												
	Enduro			Forta ferro			Mac			Tuf strand			
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90	
A	MPa	35.21	41.10	42.01	34.44	42.13	42.76	36.09	43.01	44.01	34.72	43.82	44.26
B		35.35	42.97	43.51	34.93	42.76	43.01	36.71	42.76	44.26	35.06	42.76	44.88
C		36.15	40.92	43.26	34.63	40.66	41.91	34.84	40.66	44.41	34.25	40.06	44.66
D		36.73	43.04	43.45	35.13	41.29	42.53	35.72	41.29	45.03	35.09	41.66	45.65
E		33.15	33.71	33.74	34.25	34.91	34.98	33.59	34.91	34.98	34.72	34.79	34.91
F		33.80	33.83	33.74	34.31	35.09	35.72	33.66	35.09	35.72	33.81	34.80	35.11

Tabla 28. Coeficientes de variacion de la resistencia al esfuerzo a compresion.

Serie	Edad/fibra											
	Enduro			Forta ferro			Mac			Tuf strand		
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
A	3.41%	2.36%	2.86%	2.26%	1.42%	2.10%	3.71%	3.12%	2.73%	6.05%	4.79%	4.74%
B	3.48%	2.23%	2.83%	1.60%	1.87%	1.86%	2.18%	5.14%	3.84%	6.56%	5.38%	4.01%
C	1.94%	1.71%	1.62%	2.02%	1.72%	1.79%	3.21%	3.30%	2.77%	7.88%	6.74%	5.24%
D	2.31%	1.28%	1.96%	2.42%	2.25%	2.19%	2.83%	4.84%	3.78%	4.84%	4.08%	4.16%
E	2.71%	1.99%	2.67%	1.64%	1.43%	1.66%	2.92%	3.21%	6.06%	6.05%	6.04%	5.73%
F	3.25%	3.25%	3.25%	1.01%	1.91%	1.88%	3.48%	3.42%	6.16%	6.51%	6.32%	5.78%

La desarrollo de resistencia en el tiempo para la series C y D, mostraron que la sustitución de ceniza volante obtuvieron buen desempeño en las e inclusive llegando a desarrollar mejor resistencia que las CPO, en cambio las que no obtuvieron ninguna mejora fueron las series E y F en sustitución de wollastonita. La relación de

aspecto. tipo de fibra al igual que el volumen de fibra no se observó que generaran algún cambio en la resistencia a compresión.

### 3.8.2 Resistencia a la tensión por flexión.

El prueba mecánica para obtener la resistencia residual a tensión por flexión del concreto fibroreforzado, se realizo con una maquina universal marca Instron de capacidad de 600KN. Acorde a la normativa europea UNE-EN 14651, UNE-EN 14845-1, UNE-EN 14845-2, UNE-EN 14845-3 y Norma mexicana NMX-C-488-ONNCCE-2014. El ensayo requiero del empleo de especímenes prismáticos de las dimensiones mencionadas( véase Figura 40), en el capitulo 2, sobre las cuales se realizara un corte central a fin de tener un hsp de 125 mm en la sección de falla. Dicha viga se apoyara sobre dos rodillos en configuración isostática, conformando un claro libre de 500 mm. El CMOD se medirá mediante un extensómetro tipo clip de marca Épsilon(véase Figura 39). Definiendo una velocidad constante de 0.05 mm/min para todos los pruebas. Cuándo CMOD=0.1mm, se puso en funcionamiento la universal de modo que CMOD aumenta a una velocidad constante de 0.2 mm/min.

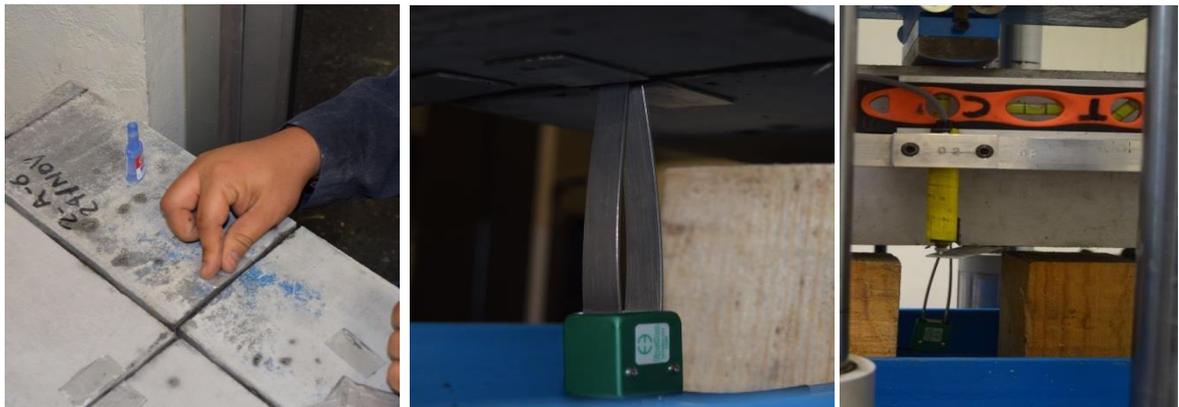


Figura 39.Montaje de los sensores LVDT,

Extensometro de greita y celda de carga.

La instrumentación de la prueba permitió la adquisición de señales análogas por medio un sistema CompactDAQ de National Instruments, el cual es una plataforma de adquisición de datos robusta y portátil que integra conectividad y acondicionamiento de señales, para conectar directamente a cualquier sensor o señal, por medio de un instrumento virtual (VI) realizado con el software LabView.



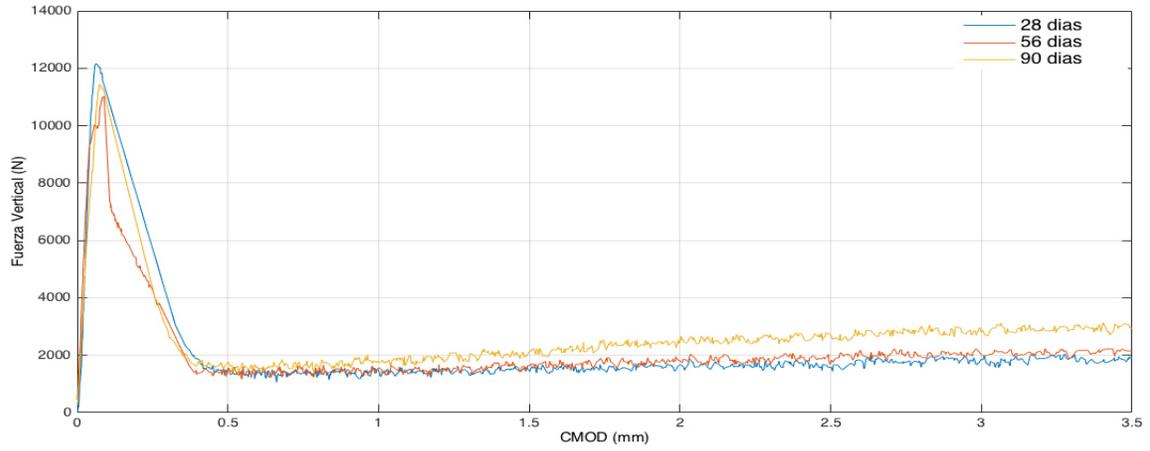
Figura 40. Equipo de ensaye y montaje de la viga en tres puntos.

El sistema de registro de datos será a las salidas electrónicas de carga y CMOD, con una velocidad de grabación no inferior a 5 Hz, conforme marca la norma. Se presentan los resultados de las curvas de fuerza vertical- CMOD de la serie A de 3 replicas por curva, esta serie fue elaborada con cemento tipo CPO y reforzada con un volumen de fibra al 0.5%. Como se menciona en capítulo 2 sección 2.8, se proceso cada registro de información en matrices por cada experimento, por medio del “Matlab”, este software como su nombre lo indica es laboratorio de matrices es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). En el apéndice 1, se presenta el lenguaje de programación del entorno de trabajo.

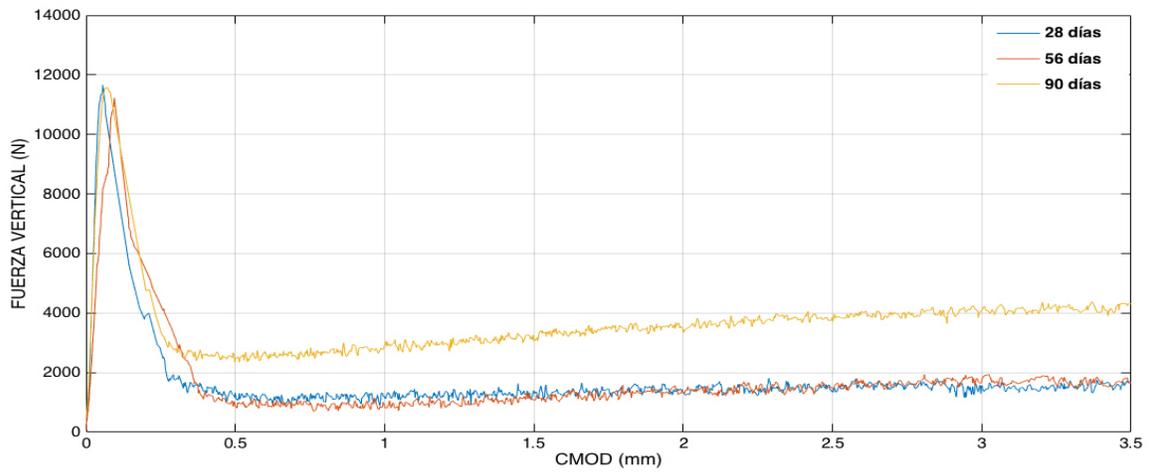
#### 3.8.2.1 Resultados por tipo de fibra y serie en el tiempo.

En la siguiente seccion se muestran los resultados por cada una de los cuatro tipos de fibra y de las seis series fabricadas en funcion del tiempo. En la

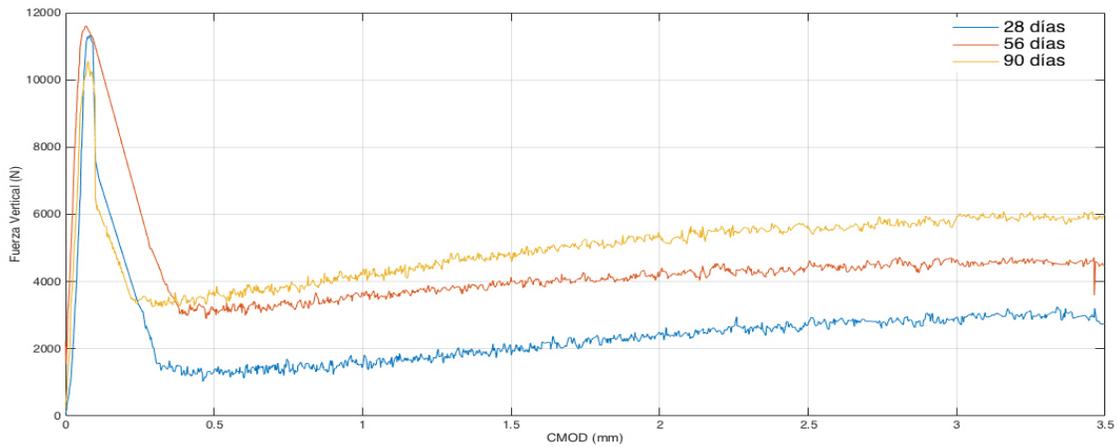
Gráfica 16, se puede observa que la fibra *enduro* en la 3 replicas del expermiento, desarrollo un bajo incremento de endurecimiento por deformación, sin embargo en la Gráfica 17 la fibra *forta ferro* tuvo en sus resultados mejor desempeño llegando a duplicar su endurecimiento deformación a la edad de 90 días, esto debido a que la fibra al desfibrilarse en la mezcla se obtiene mayor área de contacto en la matriz cementante.



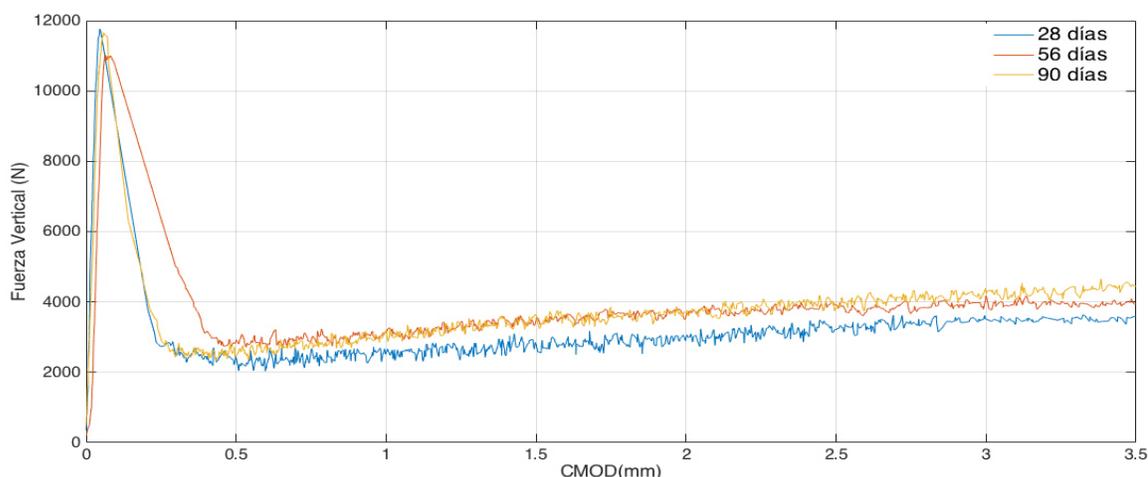
Gráfica 16. Fibra enduro serie A al 0.5% vf.



Gráfica 17. Fibra forta ferro serie A al 0.5% vf.



Gráfica 18. Fibra mac serie A al 0.5% v.f.



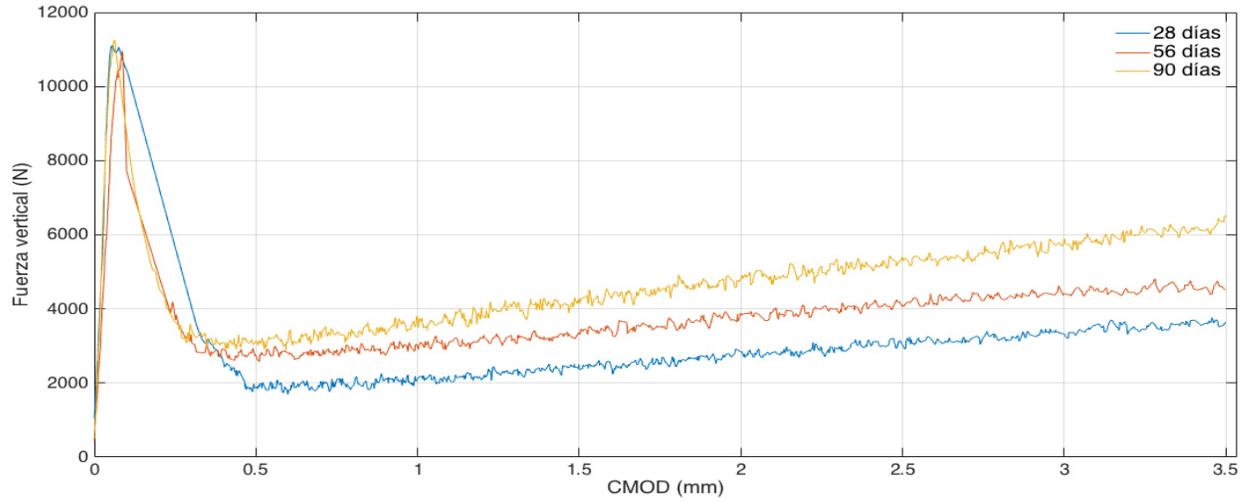
Gráfica 19. Fibra tuf strand serie A al 0.5% vf.

En la Gráfica 18 la fibra *mac* tuvo el mejor desempeño de endurecimiento por deformación de toda la serie, debido a sus bordes y su forma que generan un mayor enclavamiento dentro de la matriz. En cambio en la Gráfica 19 se muestran los resultados de la fibra tuf strand que obtuvo similar comportamiento a la fibra *forta ferro*, debido a que ambas fibras en el mezclado se desfibrilan. En la Tabla 29 se muestran los resultados tabulados de la serie A.

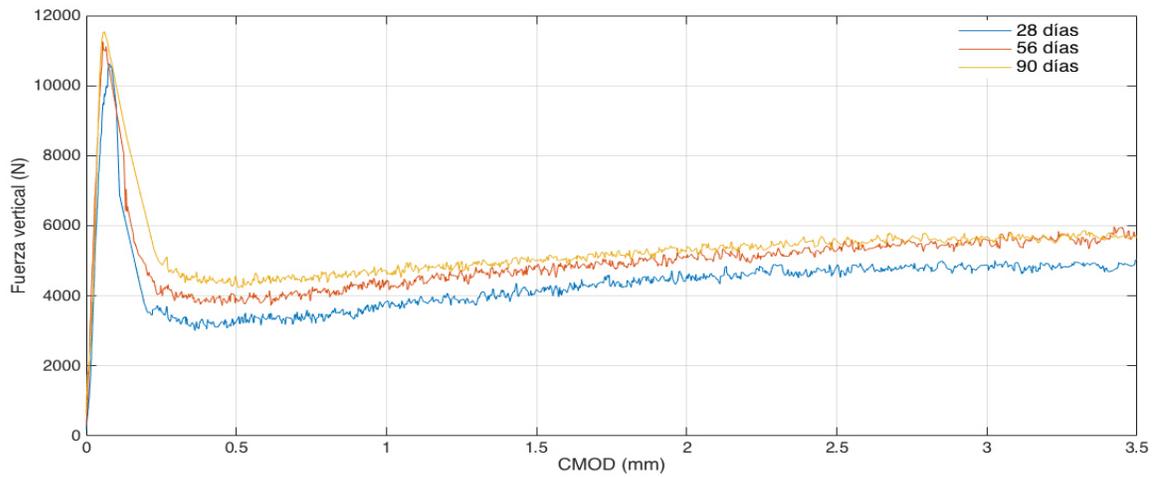
Tabla 29. Datos de la serie “A” base cemento CPO

Fibra	Edad de los especímenes (días)											
	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
Propiedades	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
$F_{max}$ (N)	12,164.53	11,024.21	11,448.20	11,664.62	11,225.61	11,573.07	11,331.80	11,607.83	10,567.48	11,761.01	11,010.66	11,666.43
$F_1$ (N)	1,492.88	1,542.54	1,751.53	1,274.45	915.99	2,501.91	1,344.34	3,172.21	3,609.68	2,426.07	2,906.00	2,457.85
$F_2$ (N)	1,457.80	1,643.21	2,115.59	1,399.43	1,069.08	3,065.02	1,856.92	3,172.21	4,718.28	2,779.24	3,474.90	3,632.69
$F_3$ (N)	1,574.81	1,643.21	2,707.67	1,369.54	1,460.64	3,723.09	2,752.18	4,496.48	5,627.34	3,223.19	3,914.56	3,840.17
$F_4$ (N)	1,909.56	2,144.67	2,940.56	1,690.22	1,654.62	4,315.69	2,740.04	4,470.76	6,005.56	3,586.05	3,941.19	4,448.52
$f_{Rj1}$ (MPa)	0.48	0.49	0.56	0.41	0.29	0.80	0.43	1.02	1.16	0.78	0.93	0.79
$f_{Rj2}$ (MPa)	0.47	0.53	0.68	0.45	0.34	0.98	0.59	1.32	1.51	0.89	1.11	1.16
$f_{Rj3}$ (MPa)	0.50	0.55	0.87	0.44	0.47	1.19	0.88	1.44	1.80	1.03	1.25	1.23
$f_{Rj4}$ (MPa)	0.61	0.69	0.94	0.54	0.529479	1.38	0.88	1.43	1.92	1.15	1.26	1.42
$W$ (Nm)	7.58	7.54	9.51	6.10	6.12	12.97	8.72	15.40	17.54	11.30	13.69	13.27
$GF$ (N/m)	404.02	402.04	507.35	325.15	326.36	691.47	465.09	821.15	935.57	602.65	730.16	707.69
$\mu$ (Nm)	196.85	216.01	338.46	171.19	182.58	465.39	344.02	562.06	703.42	402.90	489.32	480.02
$f_{TU}$ (MPa)	0.17	0.18	0.29	0.15	0.16	0.40	0.29	0.48	0.60	0.34	0.42	0.41
$f_{TS}$ (MPa)	0.21	0.22	0.25	0.18	0.13	0.36	0.19	0.46	0.52	0.35	0.42	0.35
$f_{Rk}/f_{Lk}$	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
$f_{Rk3}/f_{Rk1}$	1.1	1.1	1.5	1.1	1.6	1.5	2.0	1.4	1.6	1.3	1.3	1.6

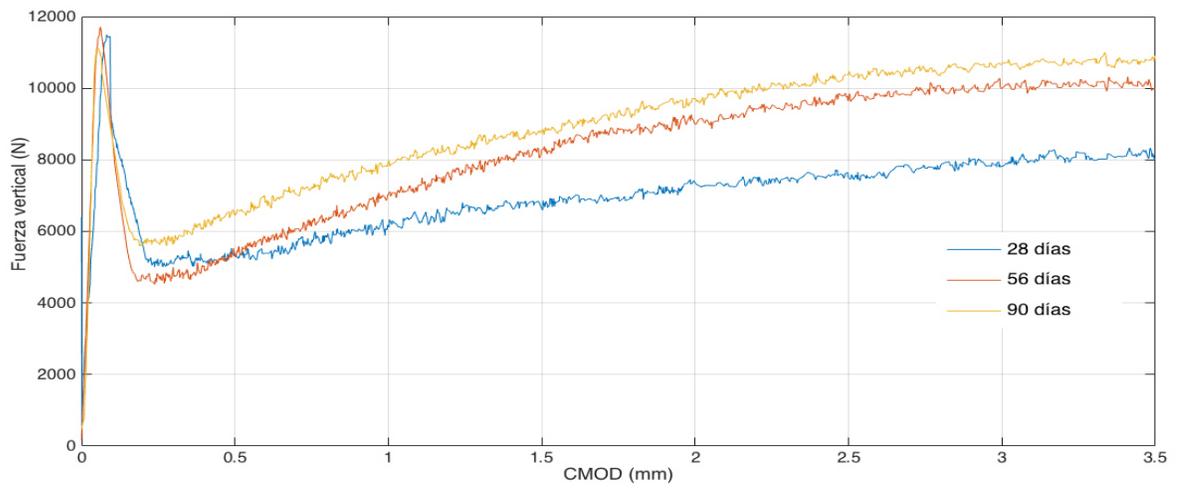
Los resultados de las curvas de fuerza- CMOD de la serie B, de 3 replicas de experimento con cemento CPO y 1.0 % de volumen de fibra.



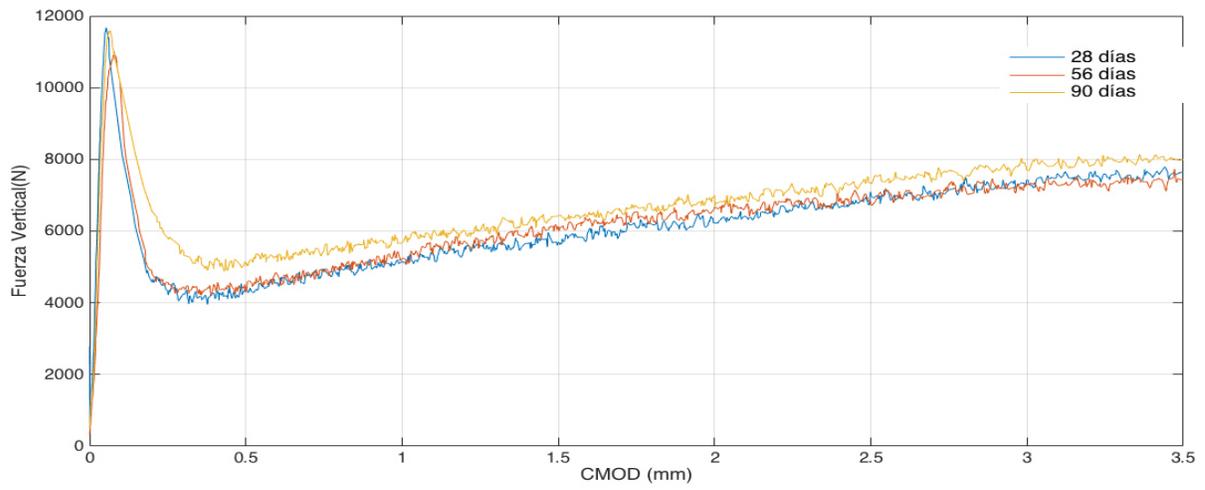
Gráfica 20. Fibra endure serie B al 1% de v.f.



Gráfica 21. Fibra fuerte serie B al 1% de v.f.



Gráfica 22. Fibra mac serie B al 1% v.f.



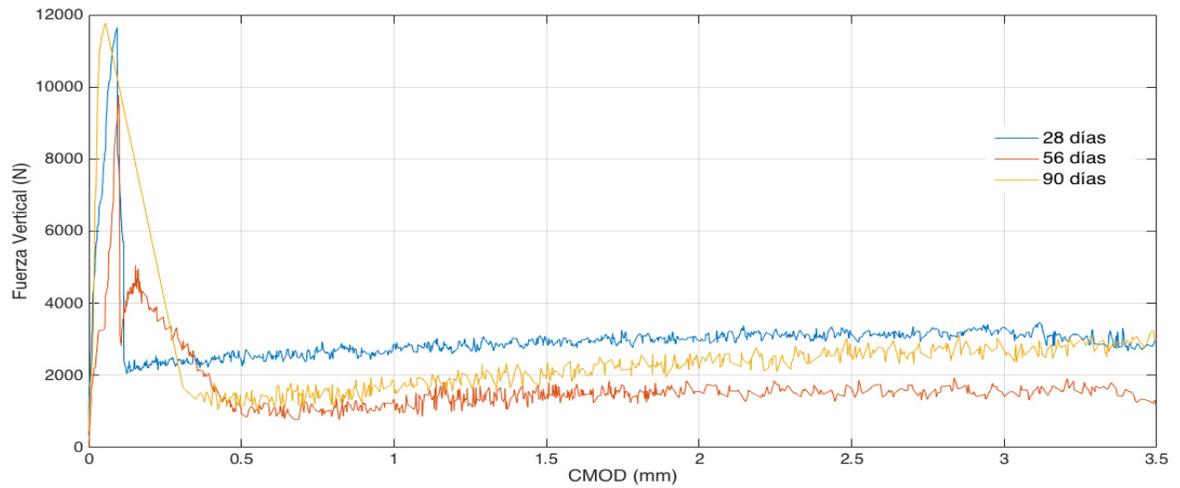
Gráfica 23. Fibra tuf strand serie B al 1% de v.f.

El volumen del 1% de fibra *mac* en la matriz cementante tuvo mejor desempeño de endurecimiento por deformación como se puede observar en el grafico 19. En la Tabla 30 se muestran los resultados de la serie B.

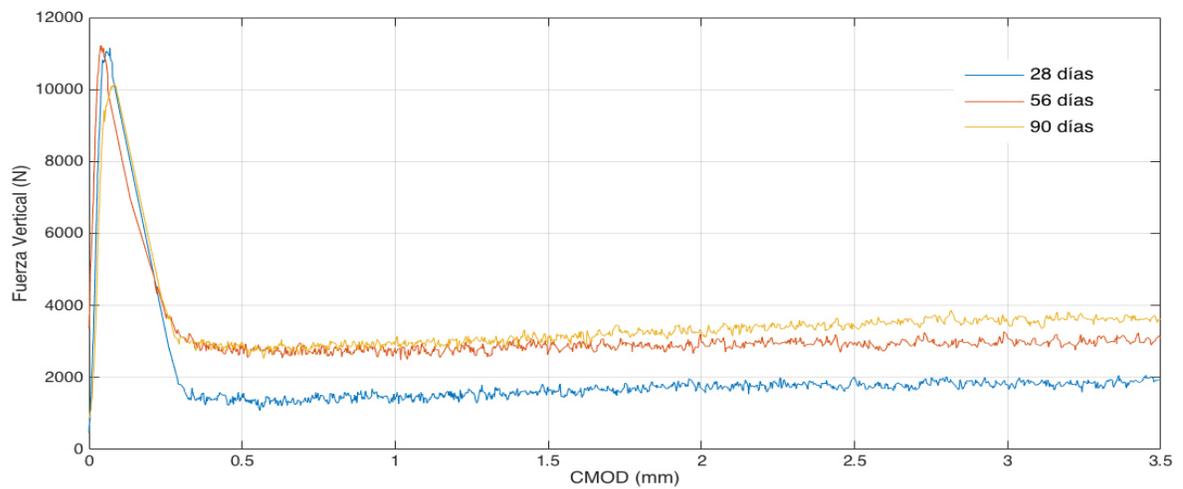
Tabla 30. Resultados de la serie “B” base cemento CPO.

Fibra	Edad de los especimenes (días)											
	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
Propiedades	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
<i>Fmax (N)</i>	11,122.67	10,962.23	11,246.56	10,630.86	11,258.30	11,545.65	11,501.44	11,711.93	11,122.15	11,673.17	11,002.53	11,588.24
<i>F1 (N)</i>	1,889.85	2,727.24	3,135.21	3,272.24	3,928.25	4,455.26	5,362.28	5,355.90	6,519.40	4,321.32	4,379.31	5,106.63
<i>F2 (N)</i>	2,370.50	3,363.59	4,271.48	4,182.77	4,825.04	5,011.30	6,637.15	8,289.91	8,803.30	5,691.60	6,140.06	6,423.72
<i>F3 (N)</i>	3,029.51	4,056.98	5,380.99	4,856.73	5,299.53	5,561.11	7,499.22	9,709.74	10,414.86	7,083.42	6,779.90	7,329.15
<i>F4 (N)</i>	3,641.71	4,514.44	6,517.86	5,039.93	5,721.55	5,670.09	8,015.55	9,986.55	10,911.92	7,637.60	7,420.79	7,993.93
<i>fRj1 (MPa)</i>	0.60	0.87	1.00	1.05	1.26	1.43	1.72	1.71	2.09	1.38	1.40	1.63
<i>fRj2 (MPa)</i>	0.76	1.08	1.37	1.34	1.54	1.60	2.12	2.65	2.82	1.82	1.96	2.06
<i>fRj3 (MPa)</i>	0.97	1.30	1.72	1.55	1.70	1.78	2.40	3.11	3.33	2.27	2.17	2.35
<i>fRj4 (MPa)</i>	1.17	1.44	2.09	1.61	1.83	1.81	2.56	3.20	3.49	2.44	2.37	2.56
<i>W (Nm)</i>	11.05	13.47	16.59	15.26	17.58	18.67	24.29	28.92	31.30	21.51	21.82	23.64
<i>GF (N/m)</i>	589.40	718.54	884.96	813.77	937.43	995.63	1,295.28	1,542.20	1,669.58	1,147.27	1,163.94	1,260.75
<i>Mu</i>	378.69	507.12	672.62	607.09	662.44	695.14	937.40	1,213.72	1,301.86	885.43	847.49	916.14
<i>fTU</i>	0.32	0.43	0.57	0.52	0.57	0.59	0.80	1.04	1.11	0.76	0.72	0.78
<i>fTs</i>	0.27	0.39	0.45	0.47	0.57	0.64	0.77	0.77	0.94	0.62	0.63	0.74
<i>fR1k/fLk</i>	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4
<i>fRk3/fRk1</i>	1.6	1.5	1.7	1.5	1.3	1.2	1.4	1.8	1.6	1.6	1.5	1.4

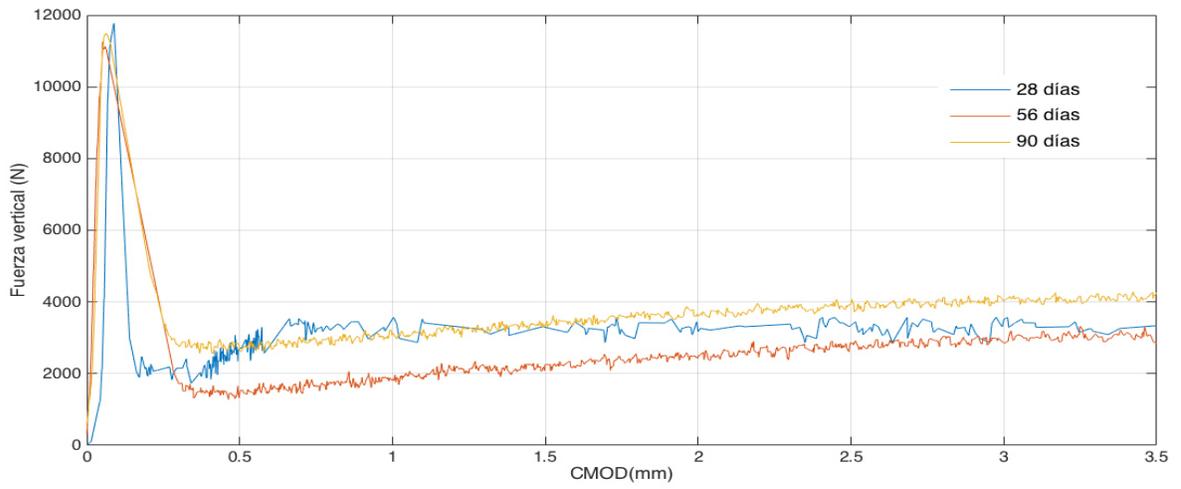
Para la serie C, de 3 replicas la cual fue realizada con la matriz cementante CPO en sustitución al 15% de ceniza volante, con 0.5% de volumen de fibra y su desempeño en el tiempo en edades de 28, 56 y 90 días.



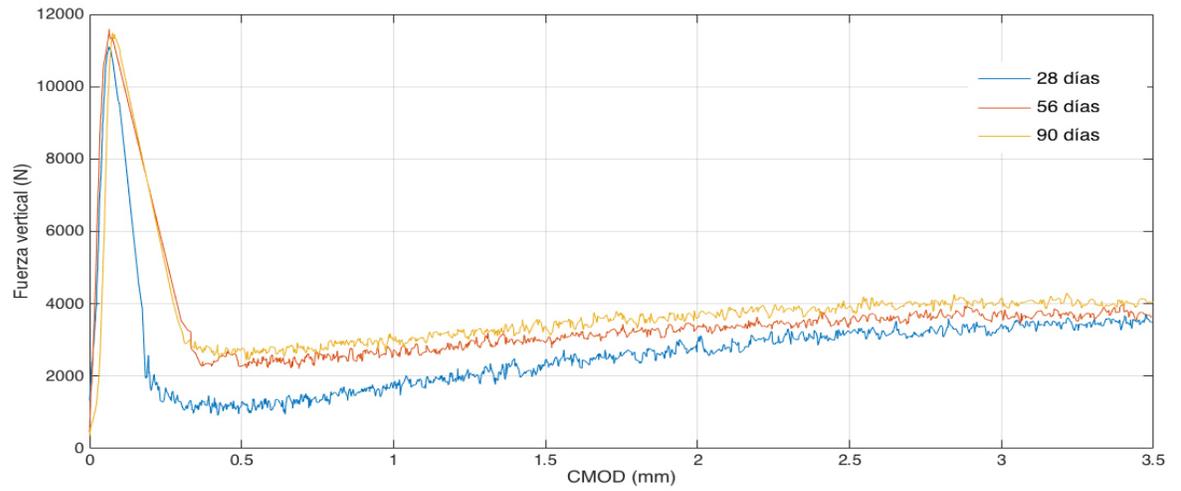
Gráfica 24. Fibra endure serie C al 0.5%vf.



Gráfica 25. Fibra forta ferro serie C al 0.5% v.f



Gráfica 26. Fibra mac serie C al 0.5% v.f



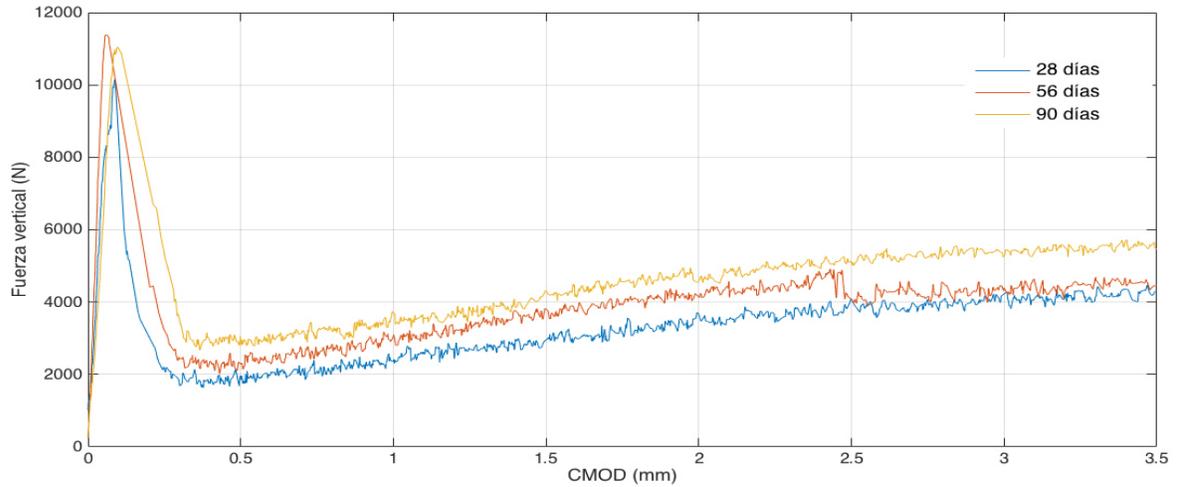
Gráfica 27. Fibra tuf strand serie C al 0.5% v.f.

A continuación se muestran los resultados de la serie C (véase Tabla 31).

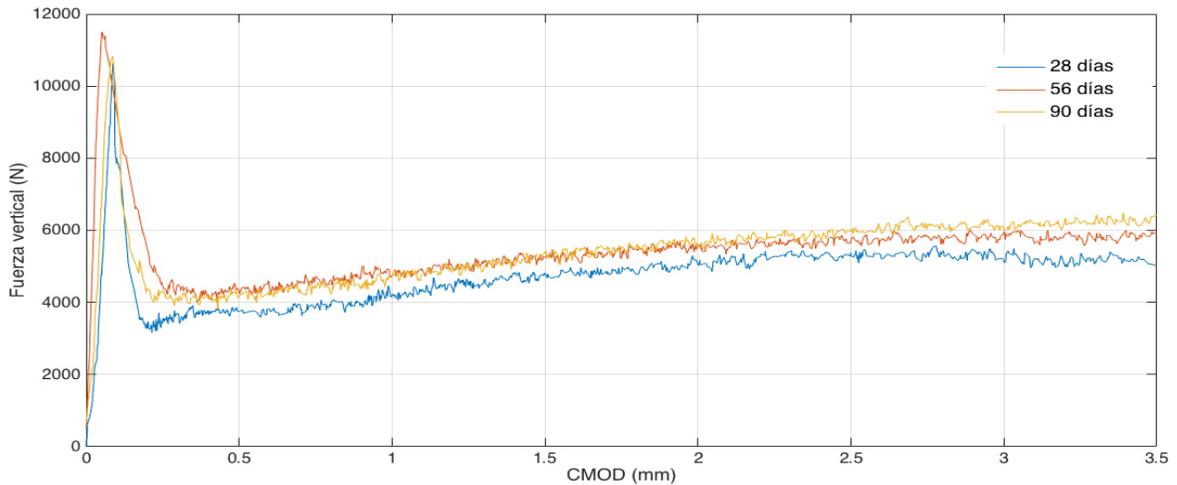
Fibra	Edad de los especímenes (días)											
	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
Propiedades	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
<i>F<sub>max</sub> (N)</i>	11,655.24	9,781.01	11,767.98	11,160.69	11,227.11	10,143.45	11,767.98	11,256.61	11,491.43	11,105.18	11,592.06	11,481.36
<i>F<sub>1</sub> (N)</i>	2,325.91	922.08	1,147.91	1,517.77	2,866.90	2,972.45	2,689.38	1,439.69	2,666.11	1,176.19	2,284.44	2,760.85
<i>F<sub>2</sub> (N)</i>	2,949.83	1,385.88	1,891.81	1,604.83	2,693.70	3,155.78	3,291.71	2,259.86	3,324.01	2,452.16	2,925.90	3,361.05
<i>F<sub>3</sub> (N)</i>	3,133.52	1,643.83	2,549.78	1,983.95	2,966.05	3,416.63	3,344.22	2,826.47	3,945.07	3,216.01	3,438.11	3,934.38
<i>F<sub>4</sub> (N)</i>	3,001.14	1,168.76	2,988.43	1,941.43	3,105.01	3,617.11	3,332.72	2,846.29	4,251.70	3,463.65	3,632.67	4,048.97
<i>f<sub>Rj1</sub> (MPa)</i>	0.74	0.30	0.37	0.49	0.92	0.95	0.86	0.46	0.85	0.38	0.73	0.88
<i>f<sub>Rj2</sub> (MPa)</i>	0.94	0.44	0.61	0.51	0.86	1.01	1.05	0.72	1.06	0.78	0.94	1.08
<i>f<sub>Rj3</sub> (MPa)</i>	1.00	0.53	0.82	0.63	0.95	1.09	1.07	0.90	1.26	1.03	1.10	1.26
<i>f<sub>Rj4</sub> (MPa)</i>	0.96	0.37	0.96	0.62	0.99	1.16	1.07	0.91	1.36	1.11	1.16	1.30
<i>W (Nm)</i>	10.63	5.89	9.18	7.21	11.21	12.31	11.29	9.54	13.23	9.54	12.47	13.28
<i>GF (N/m)</i>	567.14	313.88	489.85	384.62	597.97	656.71	602.39	508.98	705.64	508.90	665.12	708.37
<i>Mu</i>	391.69	205.48	318.72	247.99	370.76	427.08	418.03	353.31	493.13	402.00	429.76	491.80
<i>f<sub>TU</sub></i>	0.33	0.18	0.27	0.21	0.32	0.36	0.36	0.30	0.42	0.34	0.37	0.42
<i>f<sub>Ts</sub></i>	0.33	0.13	0.17	0.22	0.41	0.43	0.39	0.21	0.38	0.17	0.33	0.40
<i>f<sub>R1k</sub>/f<sub>Lk</sub></i>	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
<i>f<sub>Rk3</sub>/f<sub>Rk1</sub></i>	1.3	1.8	2.2	1.3	1.0	1.1	1.2	2.0	1.5	2.7	1.5	1.4

Tabla 31. Resultados de la serie "C" base cemento CPO y sustitución 15% de ceniza volante.

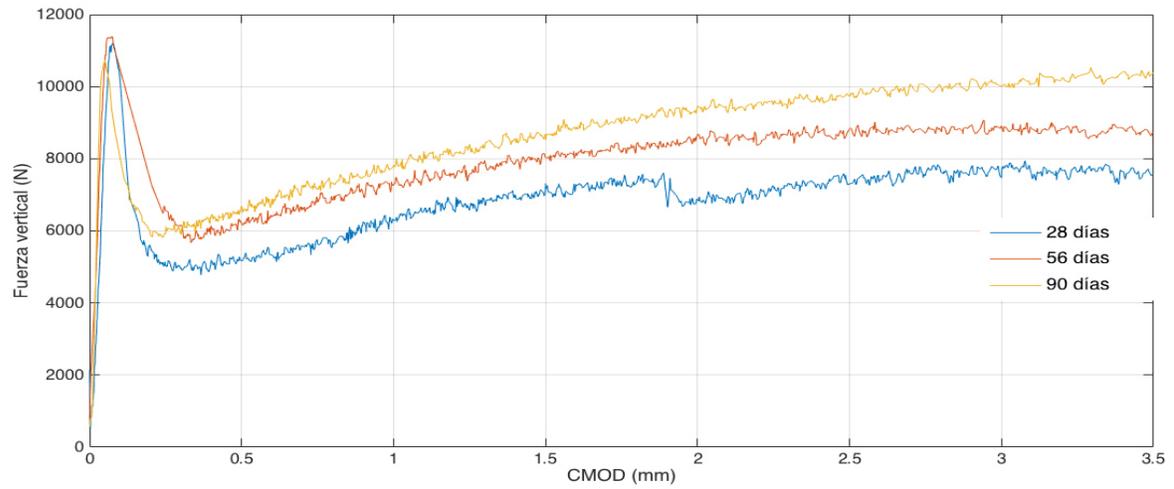
En la serie D, de 3 replicas del experimento, la cual fue realizada con la matriz cementante CPO en sustitución al 15% de ceniza volante, con 1% de volumen de fibra y su desempeño en el tiempo en edades de 28, 56 y 90 días.



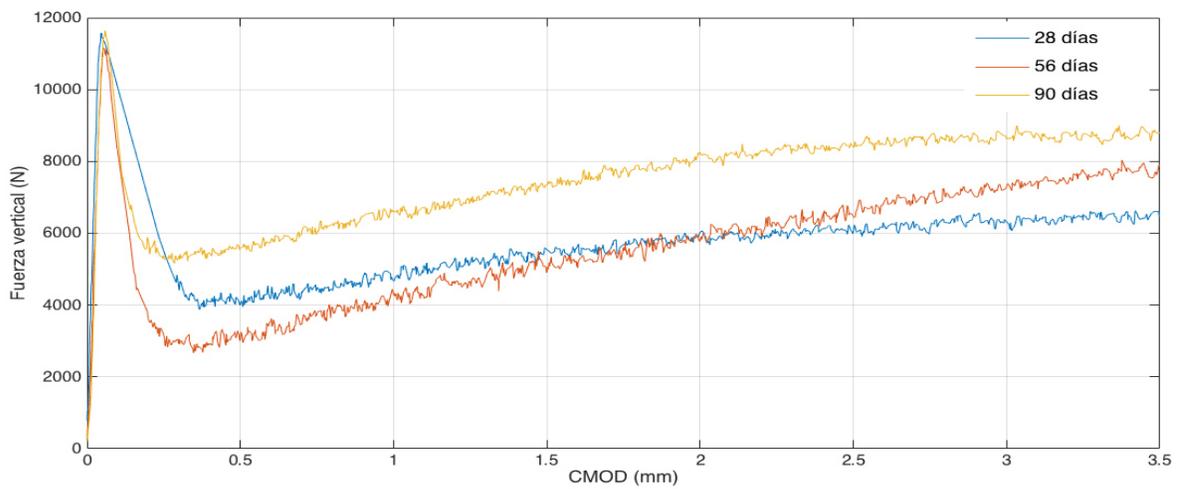
Gráfica 28. Fibra enduro serie D al 1% v.f.



Gráfica 29. Fibra forta ferro serie D al 1% de v.f



Gráfica 30. Fibra mac serie D al 1% de v.f



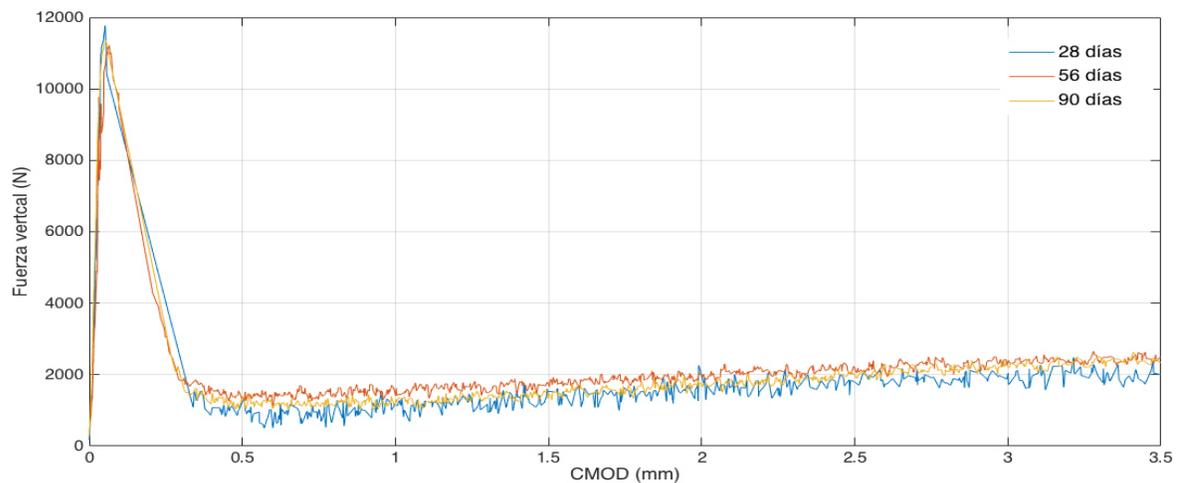
Gráfica 31. Fibra tuf strand serie D al 1% de v.f.

A continuación se muestran los resultados de la serie D (véase Tabla 32).

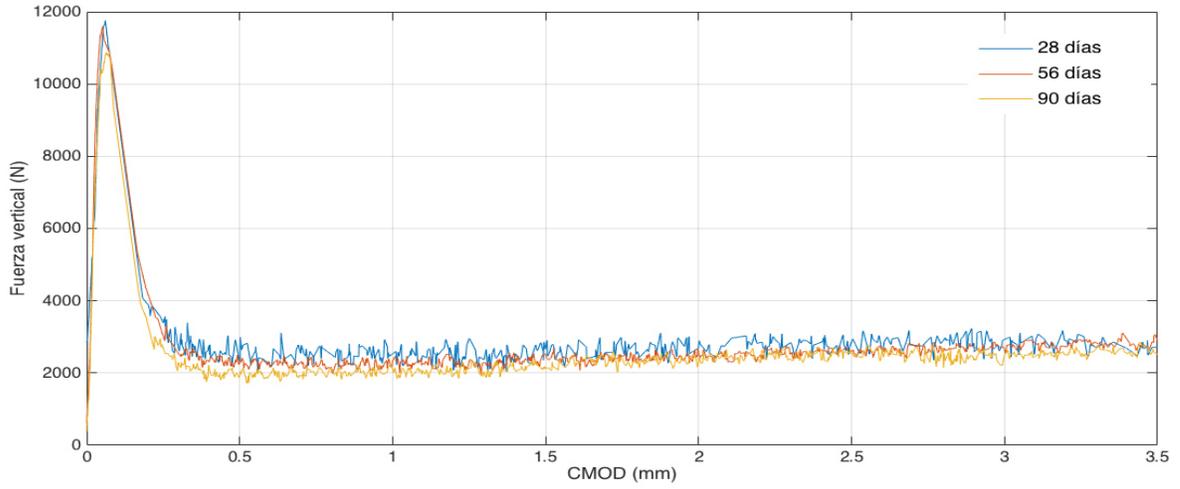
Tabla 32. Resultados de la serie "D" base cemento CPO y sustitución 15% de ceniza volante.

Fibra	Edad de los especímenes (días)											
	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
Propiedades	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
$F_{max}$ (N)	10,156.52	11,384.59	11,047.45	10,648.21	11,499.30	10,835.14	11,210.27	11,388.76	10,735.00	11,576.70	11,160.82	11,641.59
$F_1$ (N)	1,907.34	2,286.69	2,950.48	3,752.02	4,294.97	4,152.98	5,166.27	6,203.58	6,687.89	4,024.78	3,022.93	5,582.26
$F_2$ (N)	2,956.89	3,806.60	4,302.55	4,807.44	5,254.17	5,415.20	7,316.45	8,040.40	8,647.14	5,545.61	4,899.32	7,339.31
$F_3$ (N)	4,085.92	4,066.54	5,096.06	5,277.58	5,712.56	5,977.05	7,299.00	8,825.96	9,733.77	6,060.23	6,469.73	8,408.70
$F_4$ (N)	4,296.69	4,446.00	5,462.01	5,031.34	5,919.58	6,422.70	7,569.14	8,714.78	10,384.61	6,458.06	7,900.28	8,793.38
$f_{Rj1}$ (MPa)	0.61	0.73	0.94	1.20	1.37	1.33	1.65	1.99	2.14	1.29	0.97	1.79
$f_{Rj2}$ (MPa)	0.95	1.22	1.38	1.54	1.68	1.73	2.34	2.57	2.77	1.77	1.57	2.35
$f_{Rj3}$ (MPa)	1.31	1.30	1.63	1.69	1.83	1.91	2.34	2.82	3.11	1.94	2.07	2.69
$f_{Rj4}$ (MPa)	1.37	1.42	1.75	1.61	1.89	2.06	2.42	2.79	3.32	2.07	2.53	2.81
$W$ (Nm)	11.61	13.85	16.25	16.60	19.00	18.97	23.92	28.08	30.45	20.12	19.58	26.26
$GF$ (N/m)	619.27	738.79	866.64	885.10	1,013.37	1,011.67	1,275.90	1,497.43	1,624.24	1,073.21	1,044.18	1,400.56
$\mu$	510.74	508.32	637.01	659.70	714.07	747.13	912.38	1,103.24	1,216.72	757.53	808.72	1,051.09
$f_{TU}$	0.44	0.43	0.54	0.56	0.61	0.64	0.78	0.94	1.04	0.65	0.69	0.90
$f_{Ts}$	0.27	0.33	0.42	0.54	0.62	0.60	0.74	0.89	0.96	0.58	0.44	0.80
$f_{R1k}/f_{Lk}$	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.3	0.3	0.5
$f_{Rk3}/f_{Rk1}$	2.1	1.8	1.7	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	2.1	1.5

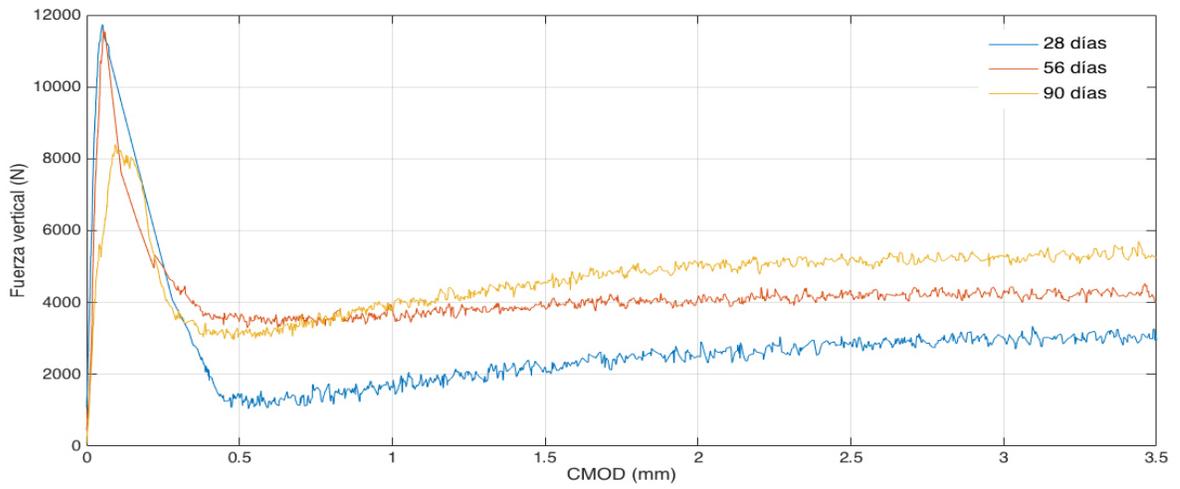
Para la serie E, fue realizada con la matriz cementante CPO en sustitución al 15% de wollastonita, con 0.5% de volumen de fibra y su desempeño en el tiempo en edades de 28, 56 y 90 días.



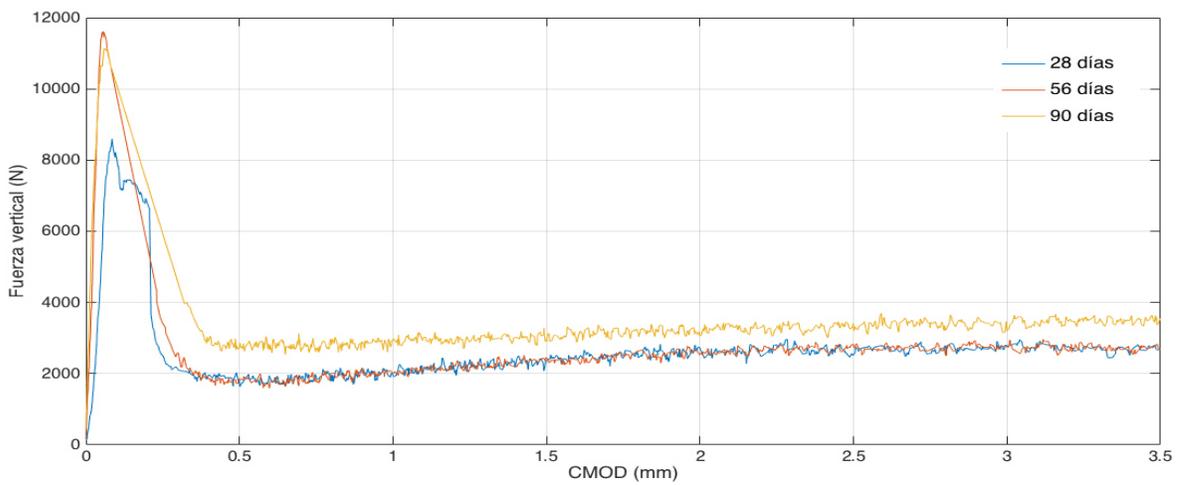
Gráfica 32. Fibra Enduro serie E al 0.5% v.f.



Gráfica 33. Fibra forta ferro serie E al 0.5% v.f.



Gráfica 34. Fibra mac serie E al 0.5% v.f.



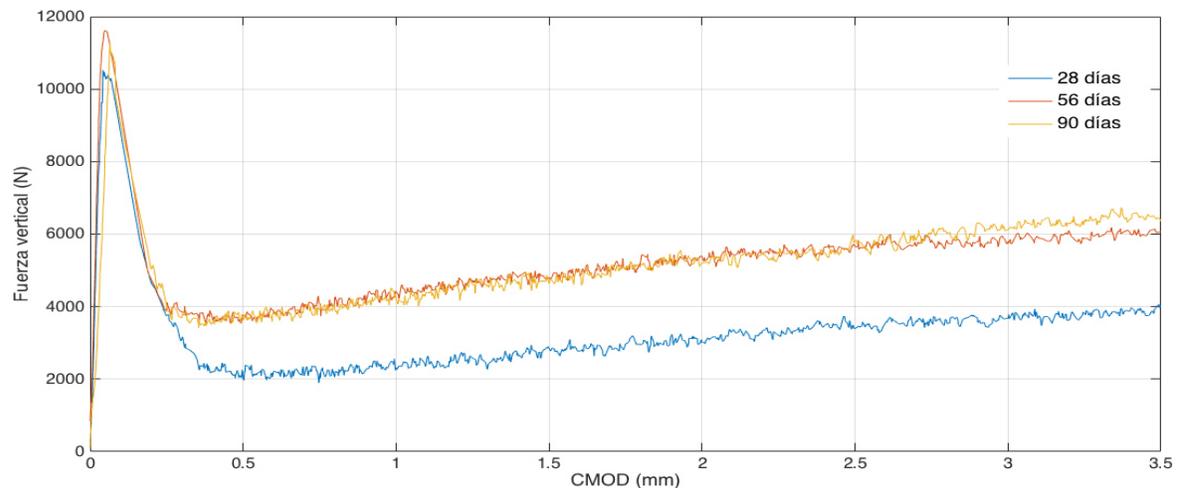
Gráfica 35. Fibra tuf strand serie E al 0.5% v.f.

A continuación se muestran los resultados de la serie E (véase Tabla 33).

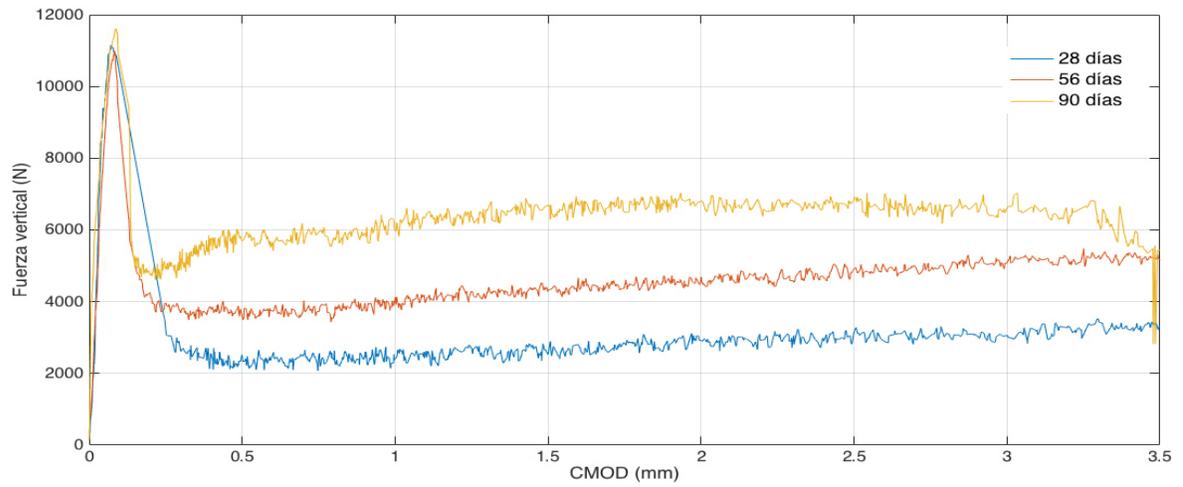
Edad de los especímenes (días)												
Fibra	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
Propiedades	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
$F_{max}$ (N)	11,767.98	11,218.87	11,359.08	11,752.77	11,591.74	10,872.96	11,741.70	11,580.31	8,406.42	8,596.70	11,619.39	11,148.57
$F_1$ (N)	1,246.30	1,352.31	1,328.13	2,360.17	2,281.87	1,917.49	1,340.97	3,512.66	3,110.56	1,833.02	1,855.43	2,731.56
$F_2$ (N)	1,531.18	1,727.71	1,334.31	2,655.40	2,526.79	2,112.57	2,195.15	3,839.59	4,567.82	2,373.83	2,442.71	2,953.73
$F_3$ (N)	1,791.26	2,174.91	1,978.31	2,863.57	2,585.92	2,531.16	2,882.74	4,209.62	5,232.74	2,524.40	2,795.42	3,415.38
$F_4$ (N)	2,008.32	2,483.72	2,344.17	2,708.64	2,898.27	2,519.08	2,942.59	4,011.91	5,250.60	2,704.62	2,677.05	3,547.26
$f_{Rj1}$ (MPa)	0.40	0.43	0.43	0.76	0.73	0.61	0.43	1.12	1.00	0.59	0.59	0.87
$f_{Rj2}$ (MPa)	0.49	0.55	0.43	0.85	0.81	0.68	0.70	1.23	1.46	0.76	0.78	0.95
$f_{Rj3}$ (MPa)	0.57	0.70	0.63	0.92	0.83	0.81	0.92	1.35	1.67	0.81	0.89	1.09
$f_{Rj4}$ (MPa)	0.64	0.79	0.75	0.87	0.93	0.81	0.94	1.28	1.68	0.87	0.86	1.14
$W$ (Nm)	6.79	7.98	7.44	10.42	9.80	9.01	9.94	14.70	16.50	9.24	9.71	12.52
$GF$ (N/m)	362.24	425.79	396.81	555.96	522.86	480.67	530.02	783.94	879.88	492.78	518.13	667.80
$\mu$	223.91	271.86	247.29	357.95	323.24	316.40	360.34	526.20	654.09	315.55	349.43	426.92
$f_{TU}$	0.19	0.23	0.21	0.31	0.28	0.27	0.31	0.45	0.56	0.27	0.30	0.36
$f_{Ts}$	0.18	0.19	0.19	0.34	0.33	0.28	0.19	0.51	0.45	0.26	0.27	0.39
$f_{R1k}/f_{Lk}$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2
$f_{Rk3}/f_{Rk1}$	1.4	1.6	1.5	1.2	1.1	1.3	2.1	1.2	1.7	1.4	1.5	1.3

Tabla 33. Resultados de la serie “E” base cemento CPO y sustitución 15% de wollastonita.

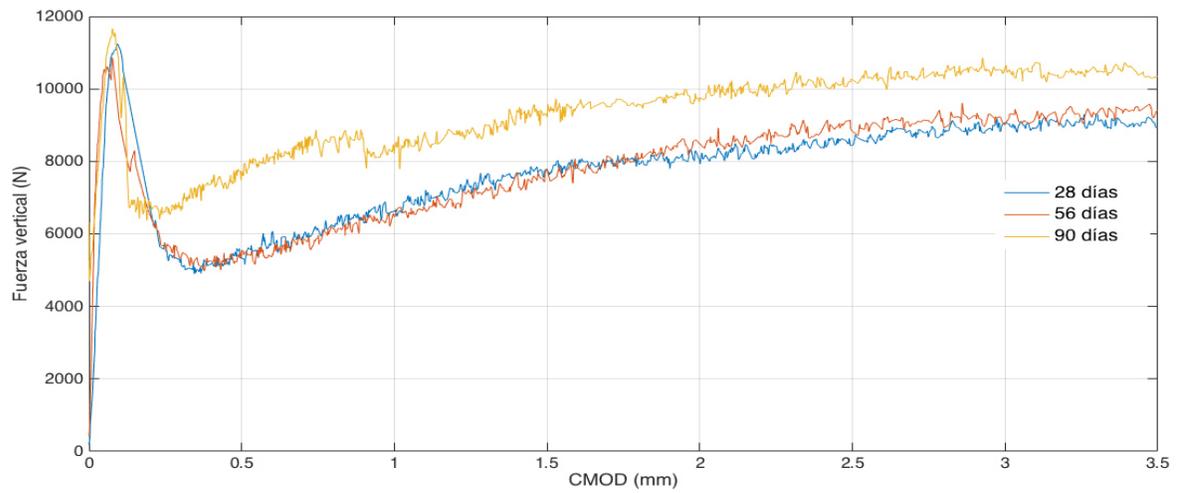
En la serie F, la cual fue realizada con la matriz cementante CPO en sustitución al 15% de wollastonita, con 1.0% de volumen de fibra y su desempeño en el tiempo en edades de 28, 56 y 90 días.



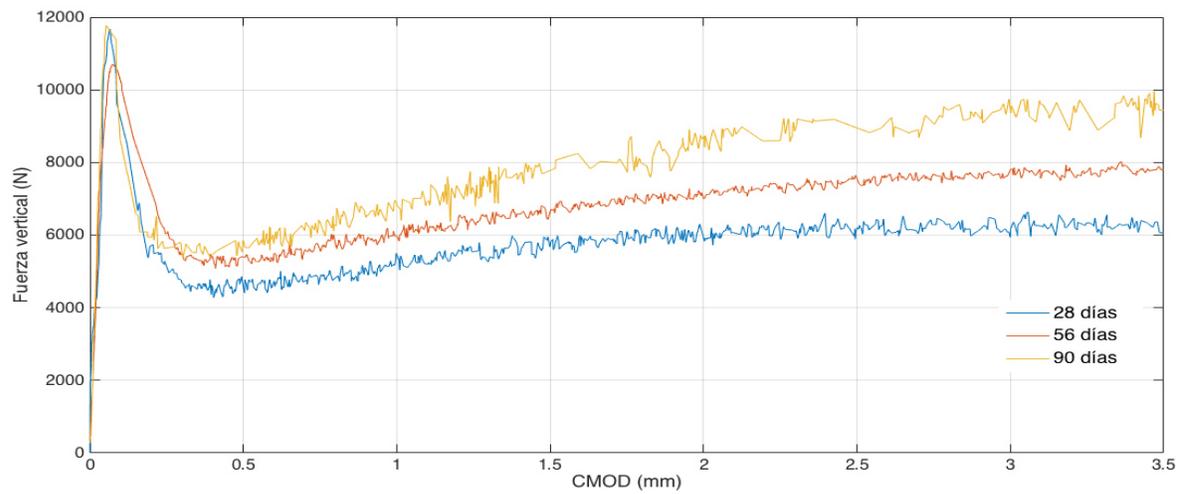
Gráfica 36. Fibra enduro serie F al 1.0 % v.f.



Gráfica 37. Fibra forta ferro serie F al 1.0 % v.f.



Gráfica 38. Fibra mac serie F al 1% v.f.



Gráfica 39. Fibra tuf strand serie F al 1% v.f.

A continuación se muestran los resultados de la serie F (véase Tabla 34).

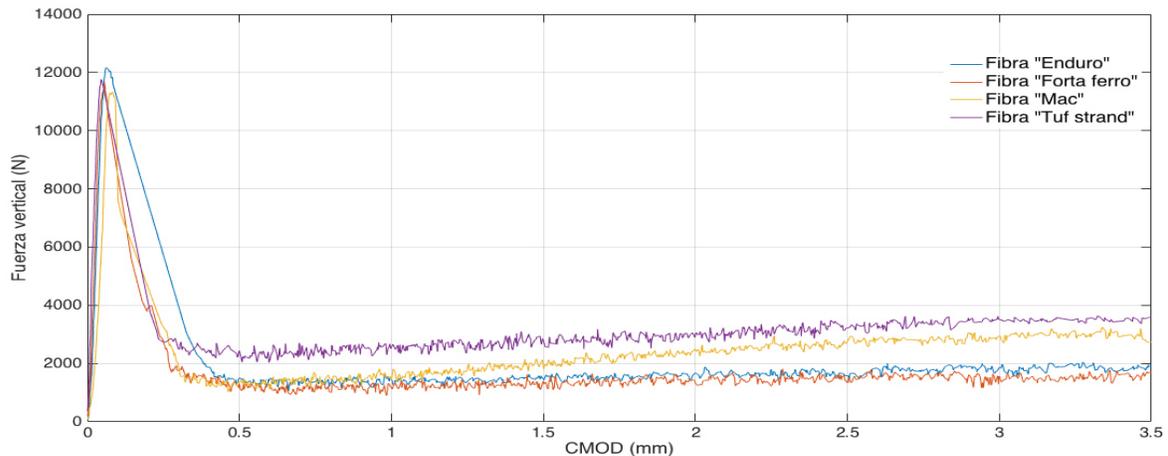
Propiedades	Edad de los especímenes (días)											
	Enduro			Forta ferro			MAC			Tuf Strand		
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90
<i>F<sub>max</sub></i> (N)	10,526.48	11,618.86	11,267.90	11,154.32	10,989.82	11,620.87	11,242.34	10,862.24	11,664.76	11,670.13	10,702.56	11,767.98
<i>F<sub>1</sub></i> (N)	2,055.62	3,770.61	3,697.85	2,492.98	3,577.44	5,700.59	5,333.49	5,554.48	7,734.17	4,564.31	5,399.10	5,847.76
<i>F<sub>2</sub></i> (N)	2,851.05	4,796.58	4,640.81	2,524.03	4,310.27	6,685.31	7,781.10	7,786.16	9,227.89	5,698.18	6,645.59	7,778.77
<i>F<sub>3</sub></i> (N)	3,402.89	5,671.35	5,805.52	3,148.85	4,908.61	6,856.38	8,458.75	8,828.36	10,245.98	6,205.24	7,549.69	8,949.44
<i>F<sub>4</sub></i> (N)	4,038.60	6,067.78	6,352.56	3,310.58	5,163.28	5,434.57	8,930.14	9,419.09	10,343.02	6,067.12	7,807.69	9,435.77
<i>f<sub>Rj1</sub></i> (MPa)	0.66	1.21	1.18	0.80	1.14	1.82	1.71	1.78	2.47	1.46	1.73	1.87
<i>f<sub>Rj2</sub></i> (MPa)	0.91	1.53	1.49	0.81	1.38	2.14	2.49	2.49	2.95	1.82	2.13	2.49
<i>f<sub>Rj3</sub></i> (MPa)	1.09	1.81	1.86	1.01	1.57	2.19	2.71	2.83	3.28	1.99	2.42	2.86
<i>f<sub>Rj4</sub></i> (MPa)	1.29	0.94	2.03	1.06	1.65	1.74	2.86	3.01	3.31	1.94	2.50	3.02
<i>W</i> (Nm)	11.52	18.24	18.19	10.90	16.06	22.37	27.02	27.34	32.65	20.40	24.13	27.83
<i>GF</i> (N/m)	614.47	972.98	970.05	581.44	856.43	1,193.16	1,440.82	1,457.90	1,741.14	1,087.88	1,286.94	1,484.20
<i>Mu</i>	425.36	708.92	725.69	393.61	613.58	857.05	1,057.34	1,103.54	1,280.75	775.66	943.71	1,118.68
<i>f<sub>TU</sub></i>	0.36	0.60	0.62	0.34	0.52	0.73	0.90	0.94	1.09	0.66	0.81	0.95
<i>f<sub>Ts</sub></i>	0.30	0.54	0.53	0.36	0.52	0.82	0.77	0.80	1.11	0.66	0.78	0.84
<i>f<sub>R1k</sub>/f<sub>Lk</sub></i>	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7	0.4	0.5	0.5
<i>f<sub>Rk3</sub>/f<sub>Rk1</sub></i>	1.7	1.5	1.6	1.3	1.4	1.2	1.6	1.6	1.3	1.4	1.4	1.5

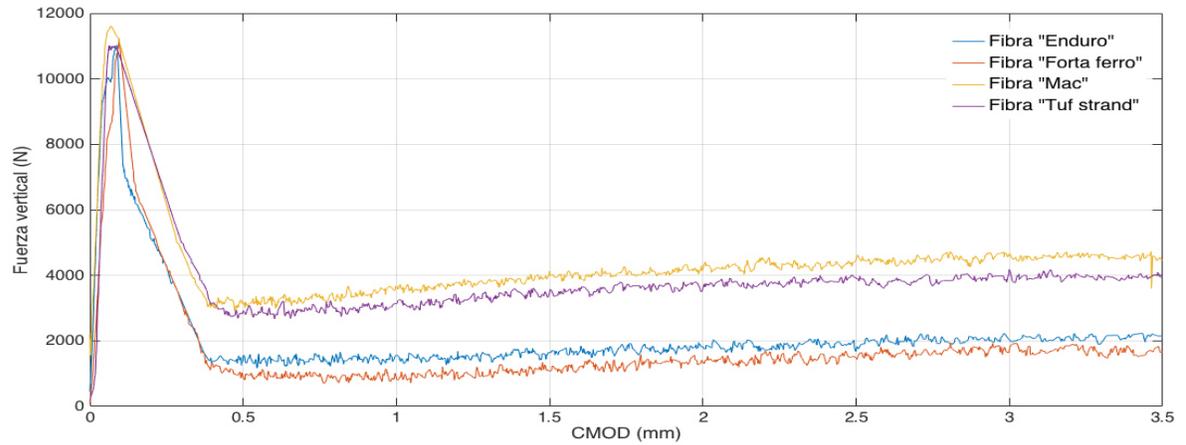
Tabla 34. Resultados de la serie "F" base cemento CPO y sustitucion 15% de wollastonita.

### 3.8.3 Resultados por tipo de fibra y serie en sus tres edades.

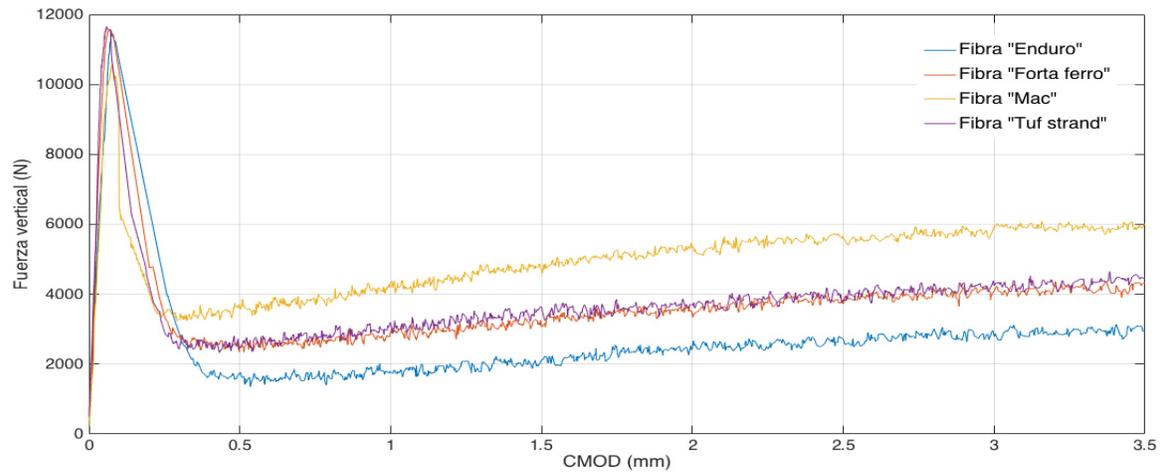
En la graficas 37, 38 y 39 se muestra la serie A de la matriz cementante CPO para cada una de las fibras y de volumen de fibra 0.5%, las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar en los resultados el desempeño por tipo de fibra y diferente relación de aspecto.

Gráfica 40. Tipos de fibra de la serie A a la edad 28 días.



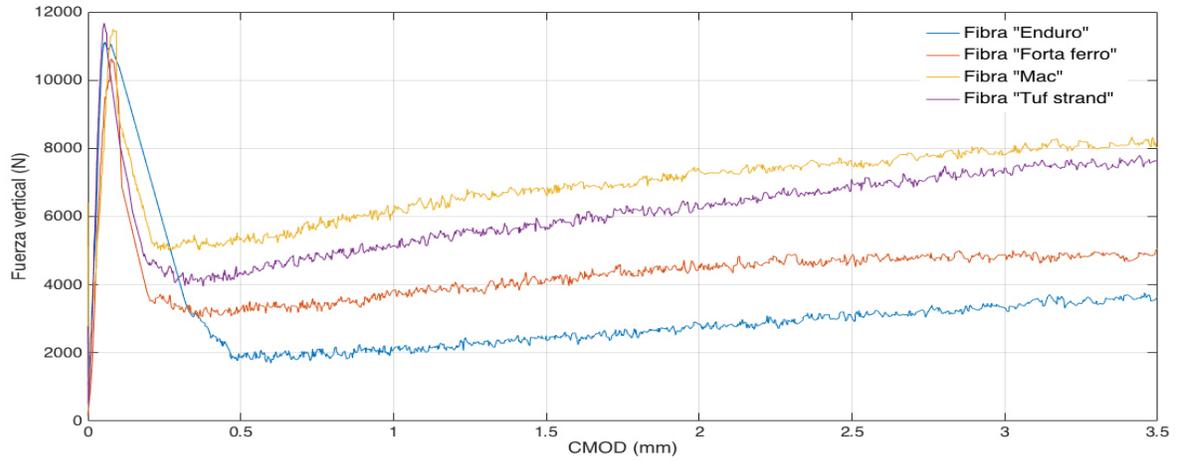


Gráfica 41. Tipos de fibras de la serie A a la edad 56 días.

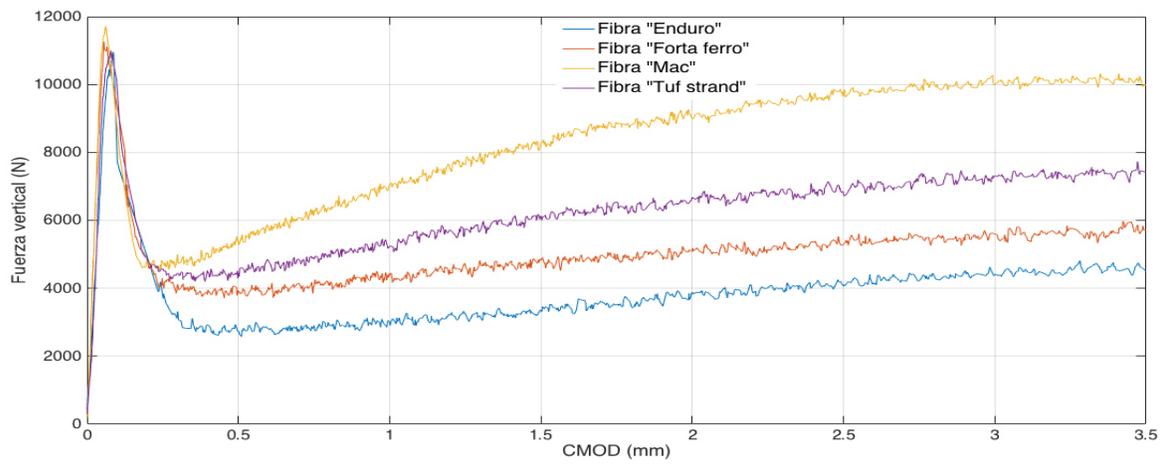


Gráfica 42. Tipo de fibras de la serie A a la edad 90 días.

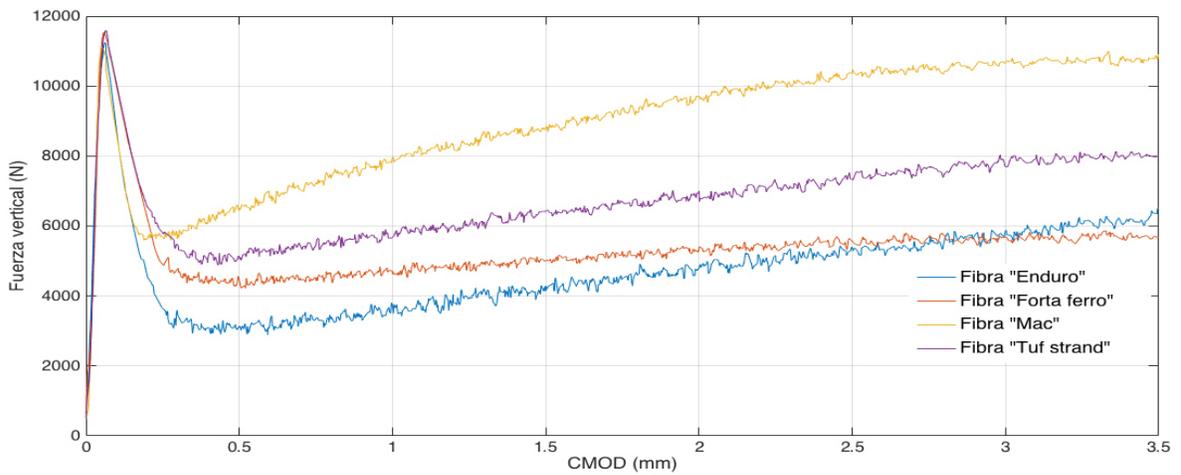
La serie B de la matriz cementante CPO y 1.0% de volumen de fibra, para las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar el desempeño por tipo de fibra.



Gráfica 43. Tipos de fibra de la serie B a la edad 28 días.

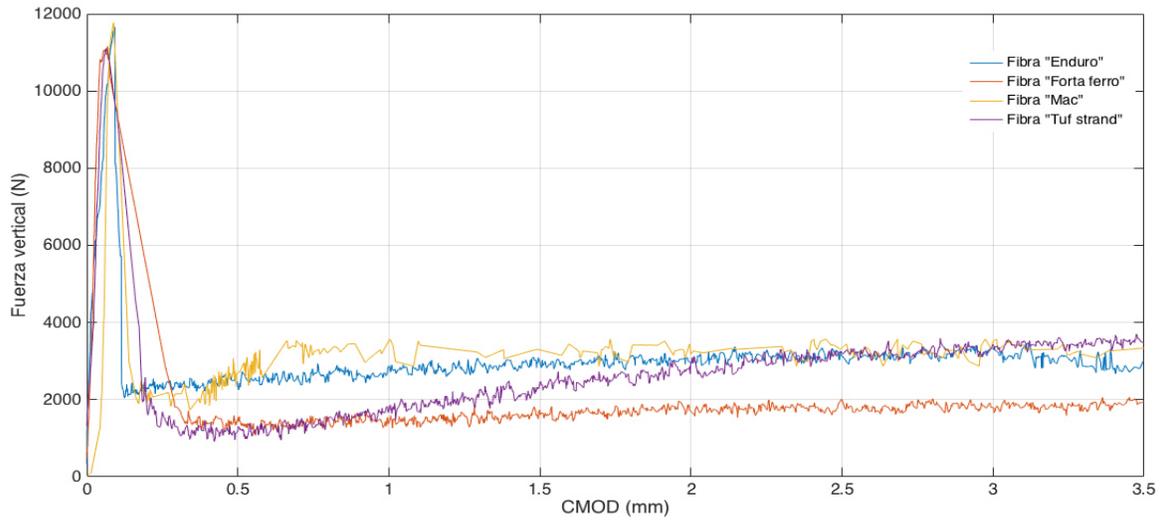


Gráfica 44. Tipos de fibra de la serie B a la edad 56 días.

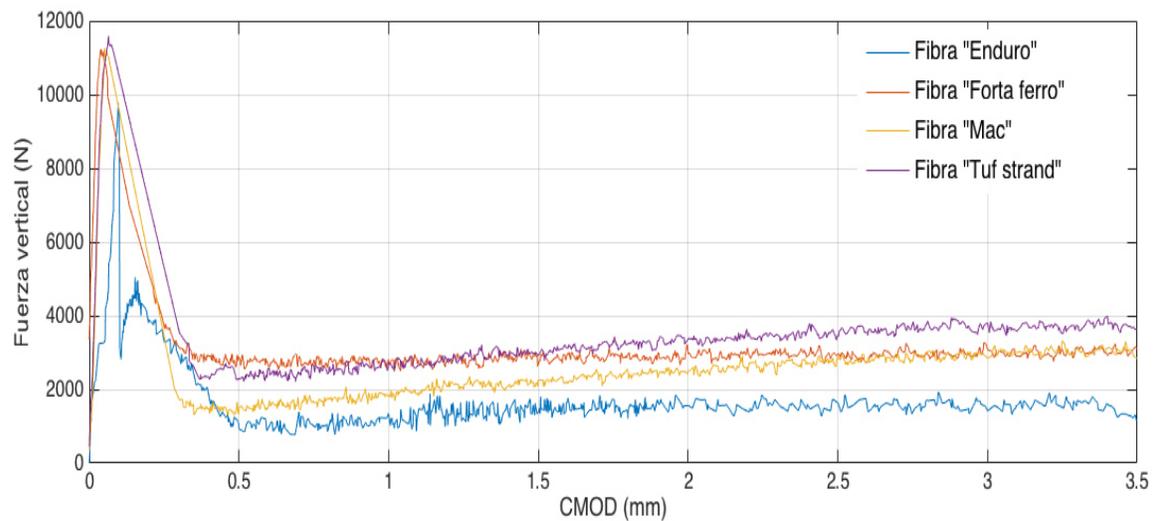


Gráfica 45. Tipos de fibra de la serie B a la edad 90 días.

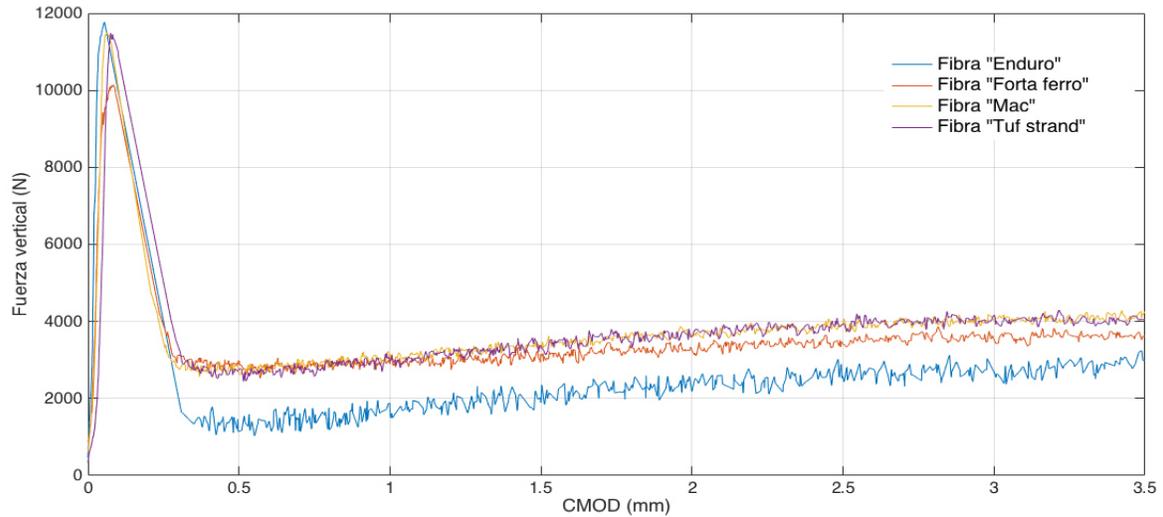
En la graficas 43, 44 y 45 se muestran la serie C de la matriz cementante CPO con sustitución del 15% de ceniza volante y de volumen de fibra 0.5%, para las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar el desempeño por tipo de fibra y diferente relación de aspecto.



Gráfica 46. Tipos de fibra de la serie C a la edad 28 días.

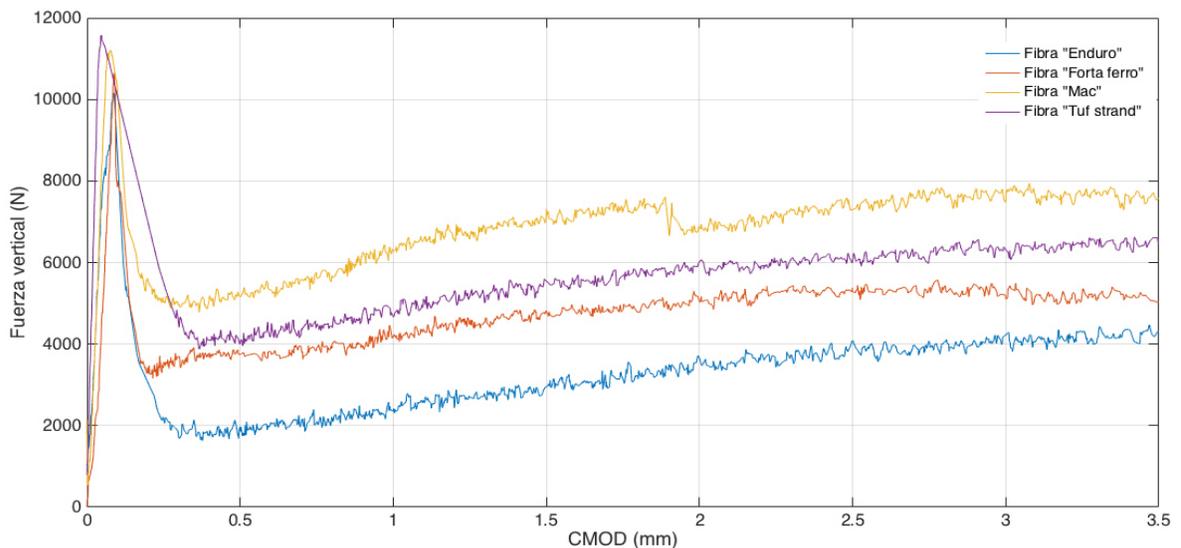


Gráfica 47. Tipos de fibra de la serie C a la edad 56 días.

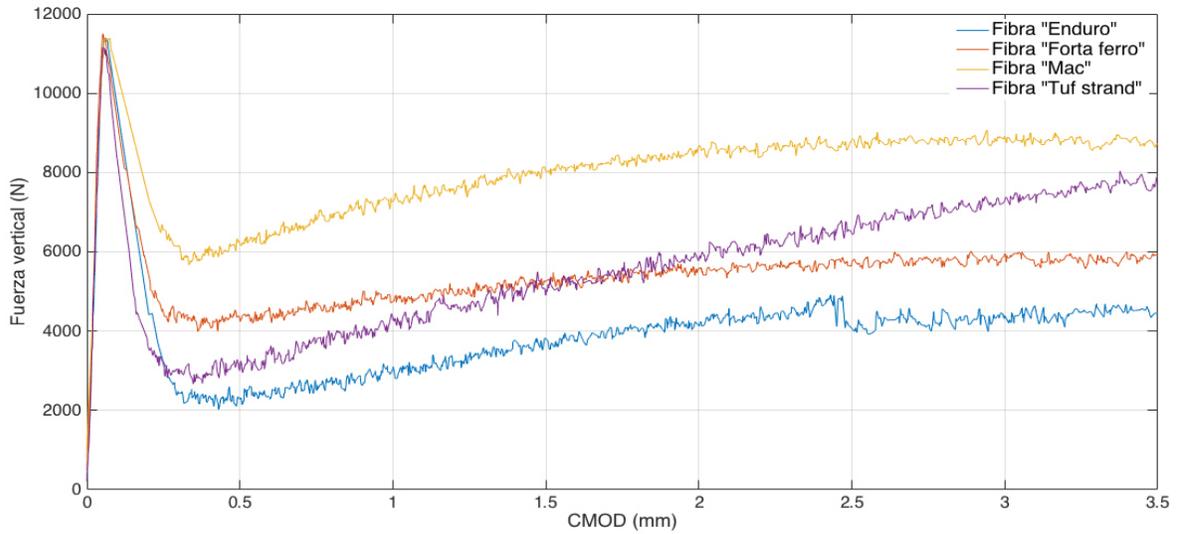


Gráfica 48. Tipos de fibras de la serie C a la edad 90 días.

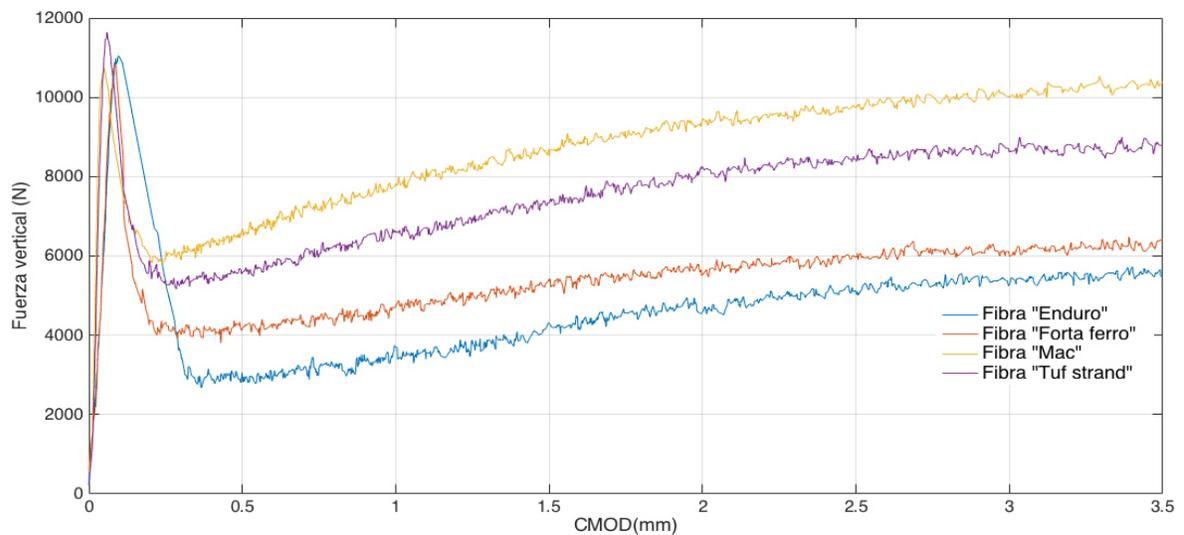
En la graficas 46, 47 y 48 se muestran la serie D de la matriz cementante CPO con sustitución del 15% de ceniza volante y 1.0% de volumen de fibra, para las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar el desempeño por tipo de fibra y diferente relación de aspecto.



Gráfica 49. Tipos de fibras en el serie D a la edad 28 días.

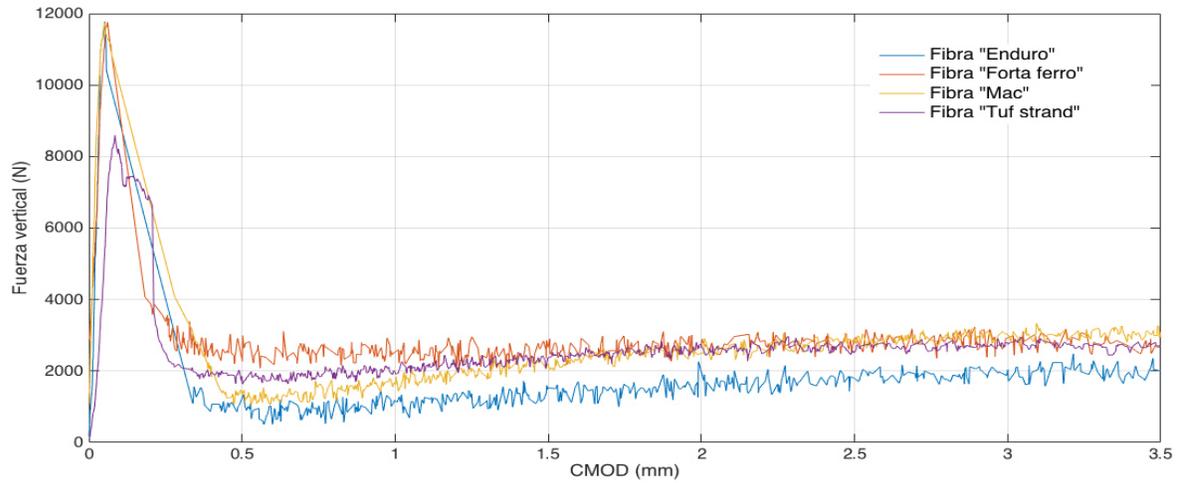


Gráfica 50. Tipos de fibras de la serie D a la edad 56 días.

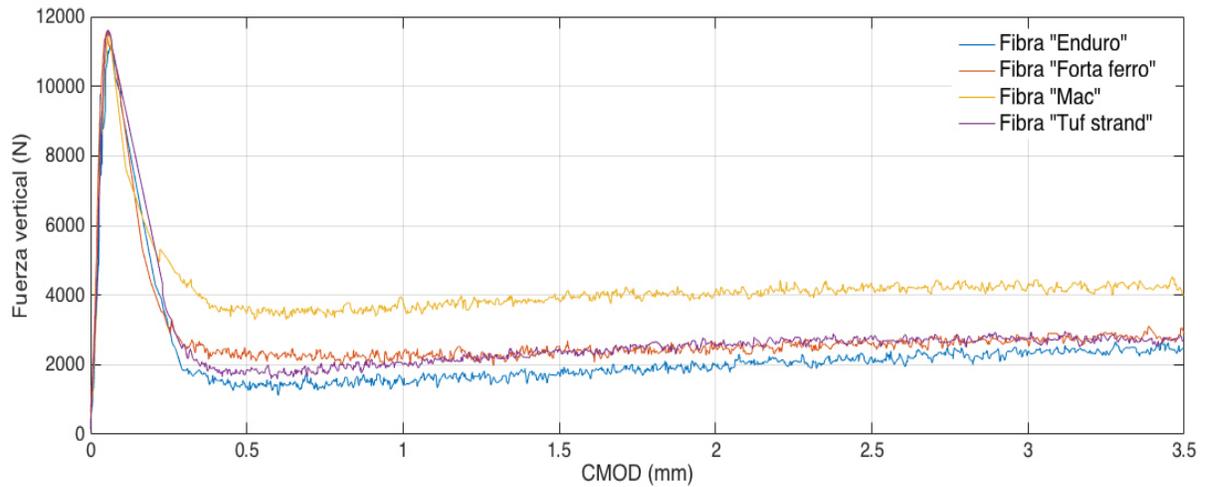


Gráfica 51. Tipos de fibras de la serie D a la edad 90 días.

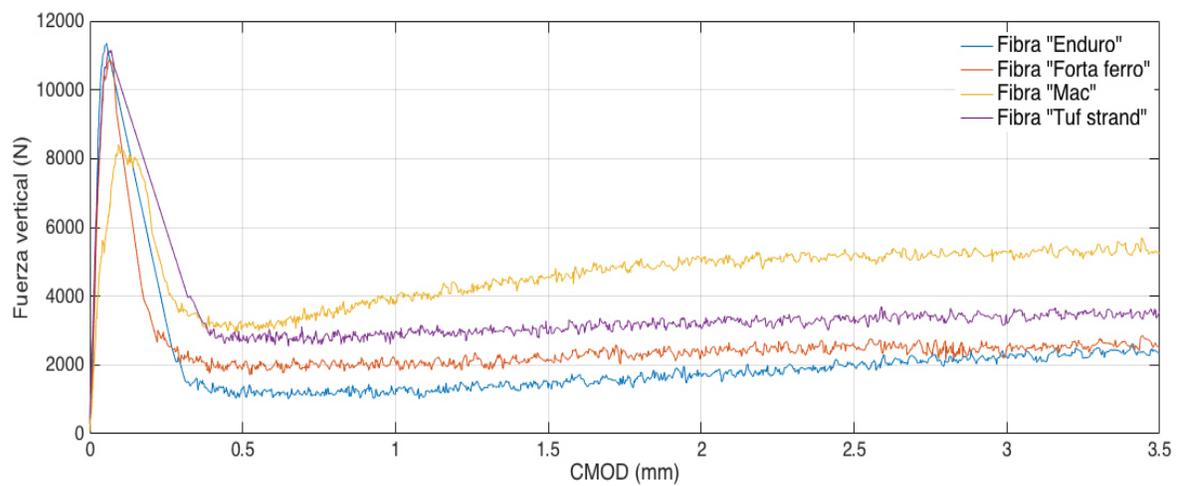
En la graficas 49, 50 y 51 se muestran la serie E de la matriz cementante CPO con sustitución del 15% de wollastonita y 0.5% de volumen de fibra, para las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar el desempeño por tipo de fibra y diferente relación de aspecto.



Gráfica 52. Tipos de fibra de la serie E a la edad 28 días.

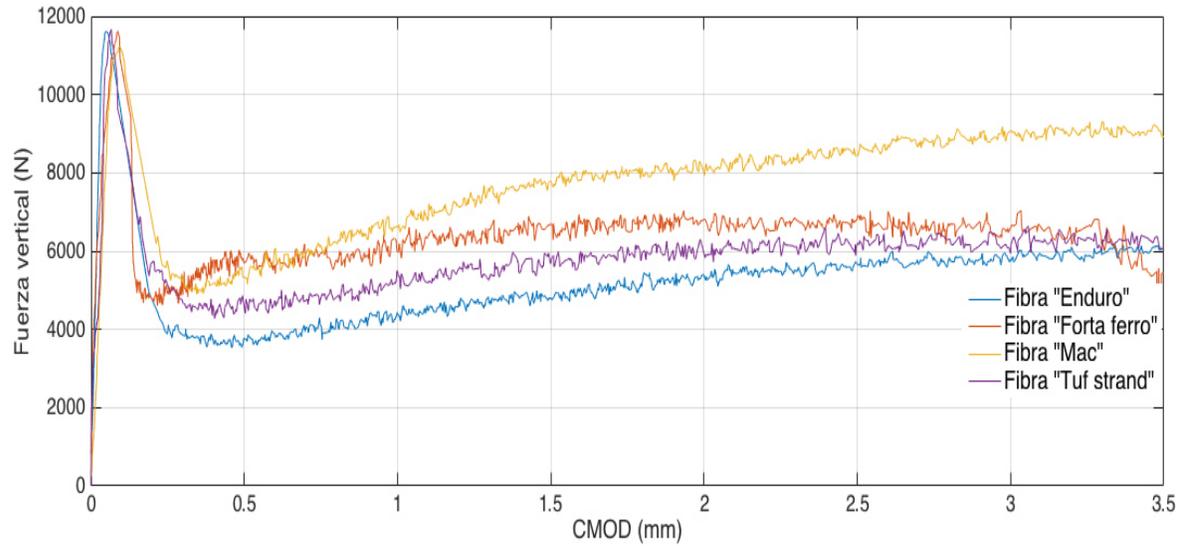


Gráfica 53. Tipos de fibra de la serie E a la edad 56 días.

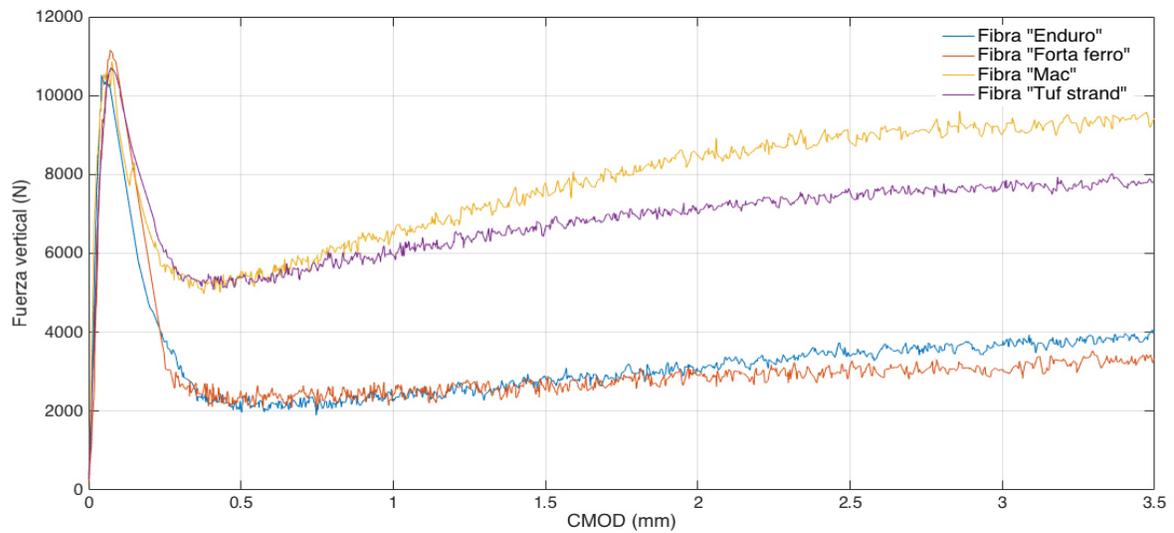


Gráfica 54. Tipos de fibras de la serie E a la edad 90 días.

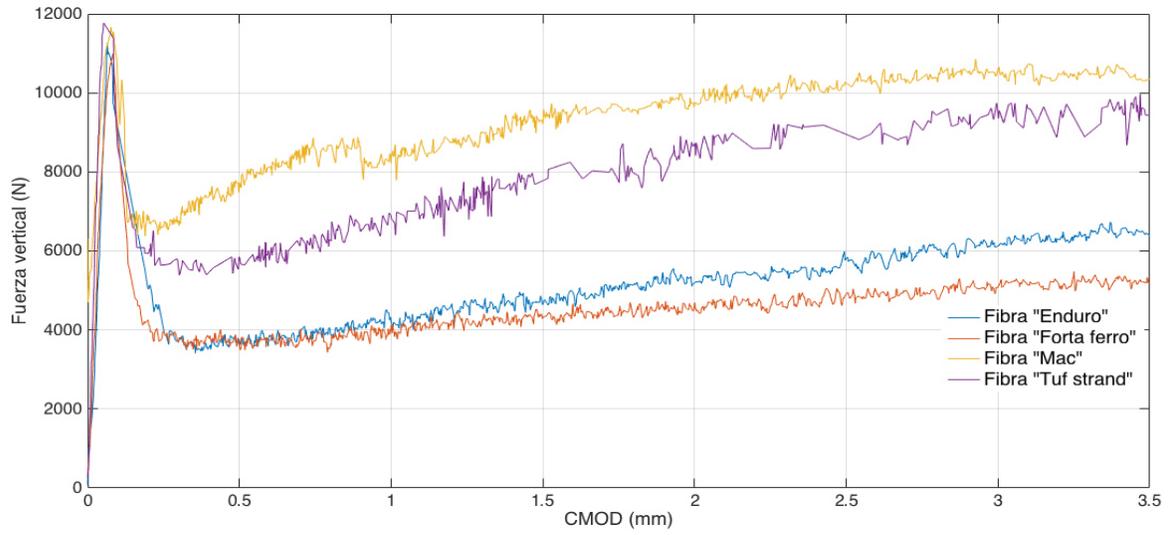
La serie F de la matriz cementante CPO con sustitución del 15% de wollastonita y 1.0% de volumen de fibra, para las cuatro tipos de fibras en edades de 28, 56 y 90. Se puede observar el desempeño por tipo de fibra y diferente relación de aspecto.



Gráfica 55. Tipos de fibras de la serie F a la edad 28 días.



Gráfica 56. Tipos de fibra de la serie F a la edad de 56 días.



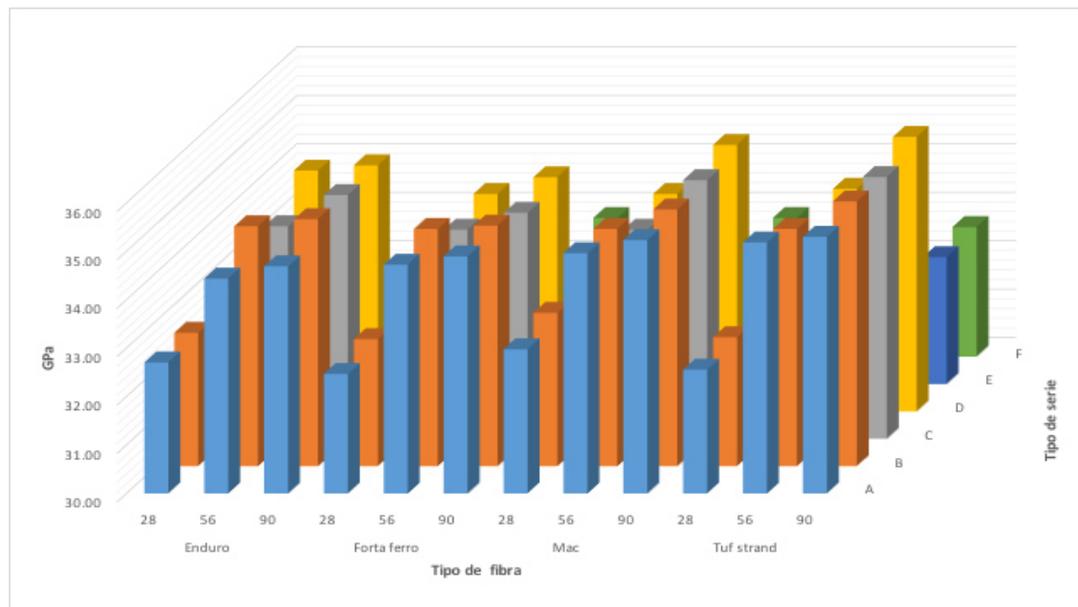
Gráfica 57. Tipos de fibra de la serie F a la edad de 90 días.

### 3.9 Modulo de elasticidad.

Se procedio a realizar los modulos de elasticidad conforme al procedimiento de la norma establecida en ASTM C469 [77]. Para cada muestra de cilindro de 100 mm x 200mm se realizo dos replicas, a continuacion se muestra en la Tabla 35 y para poder observar mejor la evolucion de los datos de moudlos de elsticidad en la Gráfica 58.

Tabla 35. Resultados de módulos de elasticidad.

Serie	Edad/fibra												
	Enduro			Forta ferro			Mac			Tuf strand			
	28	56	90	28	56	90	28	56	90	28	56	90	
GPa	A	32.71	34.44	34.69	32.47	34.73	34.90	32.98	34.96	35.23	32.56	35.18	35.30
	B	32.75	34.95	35.10	32.62	34.90	34.96	33.17	34.90	35.30	32.66	34.90	35.46
	C	33.00	34.39	35.03	32.53	34.32	34.66	32.59	34.32	35.34	32.41	34.15	35.40
	D	33.17	34.97	35.08	32.68	34.49	34.84	32.86	34.49	35.50	32.67	34.60	35.67
	E	32.06	32.24	32.25	32.41	32.62	32.64	32.20	32.62	32.64	32.56	32.58	32.62
	F	32.27	32.28	32.25	32.43	32.67	32.86	32.22	32.67	32.86	32.27	32.58	32.68

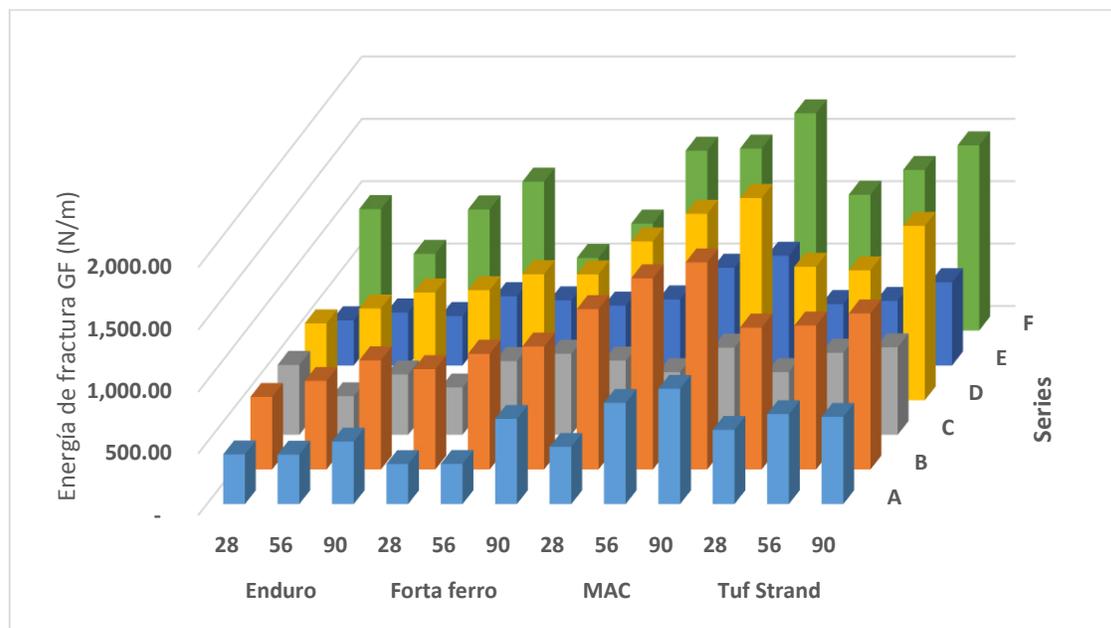


Gráfica 58. Resultados de modulo de elasticidad.

Los mejores resultados se presentaron a la edad de 90 días, que fue la ultimo dato de prueba, en los cuatro tipos de fibras, cabe señalar que fue en las series A, B, C y D, no se observo ninguna influencia del volumen de fibra en el modulo de elasticidad. En lo que corresponde a la serie E y F, fueron las mas bajas, en cambio para las series C y D fue muy similar su comportamiento que las series de referencia.

### 3.10 Energía de fractura.

La energía de fractura se muestran los resultados por tipo de fibra y serie en la Gráfica 59, en la cual se puede observar que los mejores resultados fueron las del volumen de fibra del 1% en las series B, D, F y a la edad de 90 días. Sin embargo la fibra que obtuvo mejor desempeño de energía de fractura fue la fibra “mac”, en las series B y D. Cabe señalar que todas las areas bajo la curva es decir el trabajo de energía fue realizada a 3.5mm de CMOD.



Gráfica 59. Resultados de energía de fractura.

## CAPITULO 4. CONCLUSIONES.

El presente trabajo se investigó el comportamiento experimental de la resistencia residual a tensión por flexión de fibras sintéticas estructurales con la prueba de ranura CMOD inducida conforme a la normas y procedimientos establecidos, con diferentes tipos y volumen de fibras macro-sintéticas. Es importante señalar que para el tipo de especímenes considerados aquí (150 × 150 × 600 mm ). Se ha demostrado que los concretos autocompactables en FRC presenta un grado de confiabilidad en los datos y en la configuración de prueba. También se observó que los FRC que contienen las fibras más rígidas (mac y tuf strand macro-sintéticas) dieron los resultados mejores en las series.

- Una justificación clave para la mejora de la resistencia y la fractura se atribuye al factor densificación de la matriz cementante, la mejora con la ceniza volante así como a la distribución de las fibras en una fase discontinua de fibras y que interactúan a través de la ITZ para introducir un camino tortuoso en la grieta que se induce.
- Esta prueba es apropiada para caracterizar el papel del tipo de fibra y su volumen de fibra en la grieta CMOD. El cambio en el cumplimiento y la deformación inelástica en cada ciclo de carga son indicadores del crecimiento de grieta y se utilizan para calcular la energía de fractura.
- Se verifico las disposiciones MC2010 actuales, por lo que puede proporciona al diseñador un procedimiento sencillo que permite evaluar fácilmente algunos parámetros importantes para el comportamiento estructural tanto en ULS (por ejemplo, la deflexión máxima, carga de rotura y ductilidad) y SLS por ejemplo, carga de trabajo máxima admisible ( y la deflexión).
- Los límites de ductilidad propuestos por el Model Code 2010 relativos al índice de fragilidad en la zona inelástica son demasiado rígidos, por que la para los cuatro tipos de fibra la única que cumplen con esta parámetro fue las fibras de mayor modulo de elasticidad fue la fibra mac y tuf strand, en las series B, D y F de 1.0% de volumen de fibra. Sin embargo, los

resultados experimentales sugieren que este índice debe de cambiarse debido a que la mayoría presente un endurecimiento por deformación en en al menos un 15%.

- En el presente trabajo se ha desarrollado un enfoque innovador experimental para determinar parámetros que puedan apoyar en algún análisis numérico de simulación, para determinar y comparar el momento frente a la relación de rotación de la sección transversal de los elementos de concreto fibroreforzado (FRC).
- El experimento demostró que de los datos disponibles en términos de fuerza-CMOD. Pueden valorarse para proponer un modelo numérico en los elementos en función de relación de aspecto, tipo de fibra y volumen.
- El uso de fibras de sintéticas de polipropileno en contenidos relativamente bajos de volumen de fibra como el único refuerzo a la tensión por flexión, se obtuvo un comportamiento dúctil, si embargo no con fines y cumplimiento en lo establecido en Model Code 2010.
- El uso de la fibra con corrugada como refuerzo da como resultado un mejor enclavamiento mecánico dentro de la matriz cementante

Finalmente, se observó que la rigidez de los concretos fibroreforzados tiene un efecto muy favorable en cemento CPO y en sustitución con material puzolanico como la ceniza volante y en el rendimiento del CMOD de la grieta. A pesar de las diferencias entre el experimental y el comportamiento que se pudiera generar en trabajos futuros del modelos de análisis inverso que se han desarrollado por investigadores. Los resultados experimentales revelan muchas veces la formulación de dichos modelos y su valides para estimar la respuesta post-agrietamiento del concreto fibroreforzado de fibras sintéticas estructurales.

## CAPITULO 5. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar experimentalmente así como formular analíticamente para predecir el comportamiento de tensión posterior a la grieta de los FRC a partir de la prueba de Barcelona sobre la base del diseño de este experimento, considerando una tamaño partícula mas pequeño para la wollastonita.

Desarrollar mediante estos datos experimentales la formulación de un análisis inverso y el estudio numérico que permite la identificación de la necesidad de valores mas fiables. El modelo de análisis inverso constitutivo puede ser usado para predecir la respuesta de ciertas aplicaciones estructurales para determinar si su predicción y con mayor precisión de los modelos de CMOD. Se recomienda el realizar la Nanoindentación alrededor de fibra para evaluar las propiedades mecánicas de la ITZ.

## CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] I. (. N. d. G. e. Informatica, «Encuesta Industrial Mensual,» 2008.
- [2] A. M.Brandt, «Fibre Reinforced Cement-Based(FRC) composites after over 40 years of Development in Building and civil Engineering,» *Composite Structures*, vol. 86, pp. 3-9, 2008.
- [3] B. K. W. C. P. y. J. T. Steven H. Kosmatka, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Skokie, Illinois 60077-1083 EE.UU: Portland Cement Association, 2004.
- [4] C. O. Bryant Mather, *Cartilla del Concreto*, D.F. Mexico: IMCYC, 2002.
- [5] M. F. C. Antonia Pacios, «Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras,» *Materiales de Construcción*, vol. 47, pp. 247-248, 1997.
- [6] L. R. J. M. J. J. Ruiz Sibaja A., «The synthetics fibers effect in the concrete plastic properties,» *Revista Ingeniería de Construcción*, 2005.
- [7] C. 544.1R, «State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete,» ACI, EEUU, 1996.
- [8] A. S. F. T. A. MATERIALS, *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*, Detroit, MI: ASTM, 2010.
- [9] UNE, *Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad*, 2008.
- [10] L. C. Antonio Miravate, «Materiales Compuestos,» *Grupo de Materiales Compuestos*, vol. 1, pp. 123-139, 2006.
- [11] R. T. F. S. M. C. T. C. N. S. Shi Yin a, «Use of macro plastic fibres in concrete: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 93, 2015.
- [12] A. c. i. C. 224, *Control of cracking in concrete structures*, 2001.
- [13] F. Wittmann, «Surface tension shrinkage of hardened cement paste,» *Materials and structure*, 1968.
- [14] A. s. t. m. A. C. 1608, *test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste*, 2000.
- [15] A. c. i. C. 116, *Cement and concrete terminology*, 2001.
- [16] H. R. A.E Naamana, «High performance fiber reinforced cement composites HPFRCC-4: International workshop Ann Arbor, Michigan, June 16–18, 2003,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 757-759, 2004.
- [17] M. F. R. A. M. S. F. L.F. Maya, «Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs,» *Engineering Structures*, vol. 40, pp. 83-94, 2012.
- [18] M. Hadi, «Using fibres to enhance the properties of concrete columns,» *Construction and Building Materials*, pp. 118-125, 2007.
- [19] M. M. y. P. P. Hillerborg A., «Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements,» *Cement and Concrete Research*, vol. 6, 1976.
- [20] G. AA, «The phenomena of rupture and flow in solids.,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1921.

- [21] B. Z. y. P. J., «Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, 2000.
- [22] P. P. Á. A. d. I. F. A. y. A. A. d. C. Ana Blanco Álvarez, «Comparative analysis of constitutive models of fibre reinforced concrete,» *HORMIGÓN Y ACERO*, vol. 61, 2009.
- [23] F. A. I. Calderon, Tesis: Modelo para Hormigones Reforzados con Fibras de Acero, San Miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, 2014.
- [24] C. 544.2R, «Guide for Specifying, Propotioning, Mixing, Placing, and Finishing SFRC,,» ACI, 1999.
- [25] C. 544.3R, «Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete,» ACI, 1999.
- [26] RILEM-Technical Committees, «Test and design methods for steel fibre reinforced concrete,» *Materials and Structures*, vol. 36, pp. 560-567, 2003.
- [27] J. C. I. Standard, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam JCI-S-001-2003, 2003.
- [28] J. L. G. Velazquez, *Mecanica de Fractura*, limusa, 2007.
- [29] P. M. a. C. K. R. R. N. Swamy, «The Mechanics of Fiber Reinforced Cement Matrices SP 44-1,» ACI, 1973.
- [30] A. S. R. B. Sehaj Singh, «Pullout behavior of polipropylene fibers from cementitious matrix,» *Cement and Concrete Reserch*, vol. 34, pp. 1919-1925, 2004.
- [31] H. S. V. C. L. Jun Zhang, «Crack bridging model for fibre reinforced concrete under fatigue,» *International Journal of Fatigue*, vol. 23, p. 655–670, 2001.
- [32] H. R. A.E. Naaman, «High performance fiber reinforced cement composites HPRCC-4,» *Cement & Concrete Composites*, 2003.
- [33] A. C. 1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel), 2005.
- [34] EUROPEAN STANDARD NORME, «Test Method for Metallic Fibered Concrete - Mesuringthe Flexural tensile strength (Limit of Proportionality[LOP], Residual),» EN, Brussels, Belgium, junio 2005.
- [35] A. C. 1609, tandard test method for flexural performance of fibrereinforced concrete (using beam with third–point loading, 2005.
- [36] F. M. G. F. Ieva Paegle, «Cracking and load-deformation behavior of fiber reinforced concrete: Influence of testing method,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 73, nº 147-163.
- [37] B. E. G. R. M. M. A. & Z. R. Barragán, «Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete-a parametric study,» *Cement & Concrete Composites*, 2002.
- [38] A. J. S. & M. G. Hassan, «Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, 2012.
- [39] A. E. J. G. M.G. Alberti, «On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 274-288, 2014.

- [40] A. M. Brandt, «Reforzado con Fibra de materiales compuestos (FRC) a base de cemento después de más de 40 años de desarrollo en la construcción y la ingeniería civil,» *Composite structure*, 2008.
- [41] J. A. B. M. A. Rodrigo Lameiras, «Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC),» *Cement & Concrete Composites*, vol. 59, 2015.
- [42] A. E. J. G. M.G. Alberti, «Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 154, 2016.
- [43] A. E. J. G. M.G. Alberti, «Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 85, 2015.
- [44] A. HILLERBORG, RILEM TC50 -FMC, CONCRETE FRACTURE ENERGY TESTS PERFORMED BY LABORATORIES ACCORDING TO A DRAFT RILEM RECOMMENDATION, Lund, 1983.
- [45] J. H. Sidney Diamond, «The ITZ in concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 252-270, 2003.
- [46] Y. V. N. P. A. Tagnit-Hamou, «Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes,» *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 364-370, 2005.
- [47] ↑. D. F. a. I. S. N. R. L. M. P. R. L. C. P. Hughes a, «Microscopic examination of a new mechanism for accelerated degradation, of synthetic fibre reinforced marine concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 498-504, 2013.
- [48] J. H. G. Prokopski, «Interfacial transition zone in cementitious materials,» *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 579-583, 2000.
- [49] P. S. Chunxiang Qian, «Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylenehybrid ®bres,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 22, pp. 343-351, 2000.
- [50] J. F. Young, *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*, EEUU: Prentice Hall, 2000.
- [51] R. K. Erez Gal, «Meso-scale analysis of FRC using a two-step homogenization approach,» *Computers and Structures*, vol. 89, pp. 921-929, 2011.
- [52] A. S. L. S. F.K.F. Radtke, «A computational model for failure analysis of fibre reinforced concrete with discrete treatment of fibres,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, pp. 597-620, 2010.
- [53] L. Jiang, «The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement pastes incorporating high volumes of  $\gamma$  ash,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 313-316, 1999.
- [54] M. G. d. I. Cotera, «Estudio De La Aureola De Transición De La Pasta De Cemento Y Soportes De Albañilería,» ASOCEM, 2000.
- [55] E. K. S. F. ., E. F. R.D. Toledo Filho, «Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced,» *Materials and Design*, vol. 36, p. 880–888, 2012.

- [56] N. o. mexicana, Industria De La Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones Y Métodos De Prueba, MX, 2004.
- [57] A. s. t. materials, Standard Specification for Portland Cement, EEUUU, 2015.
- [58] A. Pierre-Claude, Concretos de Alto Desempeño, Holcim Group, 1998.
- [59] T. K. D. R. ,. R. R. V. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ, «EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE HIDRATACION EN SISTEMAS PUZOLANAS NATURALES-PORTLANDITA,» *CIENCIA UANL*, vol. VII, nº 2, pp. 190-195, 2004.
- [60] A. S. f. T. Materials, ASTM C 188. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- [61] G. M. Daniel, Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la region de Monterrey N.L., Monterrey, N.L.: UANL, 2015.
- [62] B. M. J. Manuel, R. d. I. R. Jesus, V. R. Jesus y Z. P. Jose, Inventario Nacional de Wallostonita, D. G. d. Minas, Ed., 2000.
- [63] R. T. Filho, E. Koenders, S. Formagini y E. Fairbairn, «Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability,» *Materials and Design*, vol. 36, pp. 880-888, 2011.
- [64] A. C. 33, Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [65] A. C. 136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2010.
- [66] N. M. ONNCCE, NMX-C-199-2010. Industria de la Construcción - Aditivos para Concreto - Terminología y Clasificación en Concreto Hidráulico y Mortero, Mexico: ONNCCE, 2010.
- [67] A. C. 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2010.
- [68] E. Standard, Test methods for fibres in concrete part 1: Reference Concretes, Brusels, 2007.
- [69] A. C. I. A. 211.1, Manual of concrete practice. Part 1: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, 2002.
- [70] H. O. a. M. Ouchi, «Self-Compacting Concrete,» *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, pp. 5-15, 2003.
- [71] EFNARC, Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable - HAC, 2002.
- [72] A. C. 1. A. C. 1.-S. T. M. f. S. F. o. S.-C. Concrete, ASTM C 1611-Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.
- [73] A. C. 138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, 2015.
- [74] A. C. 231, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, 2014.
- [75] A. s. t. m. A. C. 1064, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete, 2015.
- [76] A. C. 39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2015.

- [77] A. C. 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2014.
- [78] A. C. 109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2009, p. EEUU.
- [79] M. A. T. Burcu Akcay, «Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 287-293, 2012.
- [80] T. Uygunog'lu, «Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 766-772, 2011.
- [81] S. A. Samer A. Barakat, «Concrete welding using steel fibers,» *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 2065-2073, 2010.
- [82] B. Y. L. J.-K. K. Y. Y. K. Su Tae Kang, «The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2450-2457, 2011.
- [83] M. S. N. Banthia, «Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization,» *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 1366-1372, 2007.
- [84] S. E.-T. ,. G. P.-M. Kittinun Sirijaroonchai, «Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 32, pp. 62-72, 2010.
- [85] W. P. S. S. Piti Sukontasukkul, «Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature,» *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1967-1974, 2010.
- [86] K. T. B. B. Burak Felekoğlu, «Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites,» *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 1023-1032, 2009.
- [87] N. N. N. Banthia, «Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 3-9, 2003.
- [88] C. T. P. S. Machine Hsiea, «Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete,» *Materials Science and Engineering*, vol. A 494, pp. 153-157, 2008.
- [89] E. G. Morteza Khorami, «Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus,» *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3661-3667, 2011.
- [90] X. L. N. C. Majid Ali, «Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete,» *Materials and Design*, vol. 44, pp. 596-605, 2013.
- [91] P. V. A. D. César Juárez, «Natural fibers of lechuguilla as reinforcement in construction materials,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 19, pp. 83-92, 2004.
- [92] R. G. N. Banthia, «Influence of Polypropylene Fiber Geometry on Plastic Shrinkage Cracking in Concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1263-1267, 2006.

- [93] S. J. J. Y. H. Z. L. Z. S. F. L. H. L. L. Xiao Hui Wang, «Application of nanoindentation testing to study of the interfacial transition zone in steel fiber reinforced mortar,» *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 701-715, 2009.
- [94] B. M. C. S. R. D. T. F. Flávio de Andrade Silva, «Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 33, pp. 814-823, 2011.
- [95] S. Z. E. M. E. Pisanova, «How can adhesion be determined from micromechanical tests?,» *Composites*, vol. A 32, pp. 425-434, 2001.
- [96] V. C. L. Aaron Richard Sakulich, «Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC),» *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 169-175, 2011.

## Apéndice 1. Programa de procesamiento de Matrices del experimento(viga).

```
%% Lectura de Datos
clc, clear
close all

r = 4;%numero de curvas
c = 3;%replicas de vigas

disp('Lectura de Datos')
A=csvread('S_F_90_type_fiber.csv',1,0);% Cambiar nombre de base de Datos
disp('Lectura de datos completa.....OK')
[~,N]=size(A);
LVDT = cell(r,c);
Load = cell(r,c);
CMOD = cell(r,c);

for i=1:r
    for j=1:c
        LVDT{i,j}=A(:, ((i-1)*3+j-1)*3+1);
        Load{i,j}=A(:, ((i-1)*3+j-1)*3+2);
        CMOD{i,j}=A(:, ((i-1)*3+j-1)*3+3);
    end
end

%% Ajuste de Curvas
disp('Ajuste de Curvas')
Ultimo_indice=3.5;
resolucion=0.001;
LVDT_ajustado = cell(r,c);
CMOD_ajustado = cell(r,c);
LOAD_LVDT_promedio = cell(1,r);
LOAD_CMOD_promedio = cell(1,r);
Fmax = cell(1,r);
W_CMOD = cell(1,r);
Frjmax = cell(1,r);
G_CMOD = cell(1,r);
F_rk1 = cell(1,r);
F_rk2 = cell(1,r);
F_rk3 = cell(1,r);
F_rk4 = cell(1,r);
f_rj1 = cell(1,r);
f_rj2 = cell(1,r);
f_rj3 = cell(1,r);
f_rj4 = cell(1,r);
fTU = cell(1,r);
Mu = cell(1,r);
fts = cell(1,r);

for i=1:r
    disp('-----')
    disp(sprintf('Curva %d',i))
end
```

```

aux_LVDT=[];
aux_CMOD=[];
for j=1:c

LVDT_ajustado{i,j}=ajusteCMOD(LVDT{i,j},Load{i,j},resolucion,Ultimo_indice)
;

CMOD_ajustado{i,j}=ajusteCMOD(CMOD{i,j},Load{i,j},resolucion,Ultimo_indice)
;

    aux_LVDT=[aux_LVDT LVDT_ajustado{i,j}(:,2)];
    aux_CMOD=[aux_CMOD CMOD_ajustado{i,j}(:,2)];
end
LOAD_LVDT_promedio{i}=mean(aux_LVDT,2);
LOAD_CMOD_promedio{i}=mean(aux_CMOD,2);
Fmax{i} = max(LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1));
[N,~] = size(LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1));
index = find(LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1) ==
max(LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1)));
F = LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1);
index = find(F == min(F(index:N,1)));
Fmin = LOAD_CMOD_promedio{i}(index,1);
cerocrr = LOAD_CMOD_promedio{i}(index,1)/Fmax{i}*100; % respecto a cero
porcentcrr = 100- cerocrr; % respecto al m?ximo
% Trabajo de Energia
function x=energia(CMOD,CC)
% Función que calcula la aproximación numerica del área
% bajo la curva con las sumas de riemman
% El CMOD-displacement las unidades en mm
% El CC-load las unidades en Newton
d=[diff(CMOD); 0];
y=CC.*d;
x=sum(y)/1000; % Se divide entre 1000 para obtener N.m=Joule
end
W_CMOD{i}=energia(CMOD_ajustado{i,1}(:,1),LOAD_CMOD_promedio{i});
disp(sprintf('\nTrabajo de Energia:\n CMOD %d: %f N*m\n',i,W_CMOD{i}))
Area=0.01875; %% Metros cuadrados
%G_LVDT=W_LVDT/Area;
h_sp=125; % en mm
b=150; % en mm
L=500; % en mm
Frjmax{i} = max(3*LOAD_CMOD_promedio{i}(:,1)*L/(2*b*h_sp*h_sp));
G_CMOD{i}=W_CMOD{i}/Area;
disp(sprintf('\n Area : %f m^2 \n\nEnergia de Fractura:\n CMOD %d: %f
N/m\n',Area,i,G_CMOD{i}))
disp('Calculos para CMOD')
index= CMOD_ajustado{i,1}(:,1)==0.5;
F_rk1{i}=LOAD_CMOD_promedio{i}(index);
f_rj1{i}=3*(F_rk1{i})*L/(2*b*h_sp*h_sp);
index= CMOD_ajustado{i}(:,1)==1.5;
F_rk2{i}=LOAD_CMOD_promedio{i}(index);
f_rj2{i}=3*(F_rk2{i})*L/(2*b*h_sp*h_sp);
index= CMOD_ajustado{i}(:,1)==2.5;
F_rk3{i}=LOAD_CMOD_promedio{i}(index);
f_rj3{i}=3*(F_rk3{i})*L/(2*b*h_sp*h_sp);

```

```

index=find(CMOD_ajustado{i}(:,1)==3.5);
F_rk4{i}=LOAD_CMOD_promedio{i}(index);
f_rj4{i}=3*(F_rk4{i})*L/(2*b*h_sp*h_sp);
disp(sprintf('Resistencia Residual para CMOD %d',i))
disp(sprintf('Fmax %.5f N',Fmax{i}))
disp(sprintf('Frjmax %.5f N/mm^2',Frjmax{i}))
%   disp(sprintf('Porcentaje de caida %.5f %%',porcentcrr))
%   disp(sprintf('Porcentaje %.5f %%',cerocrr))
disp(sprintf('\nF_rk1 : %f N\t f_rj1 : %f N/mm^2',F_rk1{i},f_rj1{i}))
disp(sprintf('F_rk2 : %f N\t f_rj2 : %f N/mm^2',F_rk2{i},f_rj2{i}))
disp(sprintf('F_rk3 : %f N\t f_rj3 : %f N/mm^2',F_rk3{i},f_rj3{i}))
disp(sprintf('F_rk4 : %f N\t f_rj4 : %f N/mm^2\n\n',F_rk4{i},f_rj4{i}))
disp(sprintf('Model Code \n fr1k/flk : %.1f \n frk3/frk1 : %.1f
',f_rj1{i}/Frjmax{i},f_rj3{i}/f_rj1{i}))

if f_rj1{i}/Frjmax{i} > 0.4
    disp('Cumple con una fibra estructural (5.6-2)')
else
    disp('No cumple Model code ')
end

if F_rk1{i} > 1.5
    disp('Si cumple con la EN 14651')
else
    disp('No cumple con la EN 14651')
end

fTU{i} = f_rj3{i}/3;
Mu{i} = f_rj3{i}*b*h_sp^2/6/1000;
fts{i} = 0.45*f_rj1{i};
disp(sprintf('fTU : %f',fTU{i}))
disp(sprintf('Mu : %f Nm',Mu{i}))
disp(sprintf('fts : %f',fts{i}))
ratio=F_rk3{i}/F_rk1{i};
if ratio<0.5
    disp('Prueba no operativa')
elseif ratio<0.7
    disp('Reblandecimiento')
elseif ratio<0.9
    disp('Reblandecimiento Suave')
elseif ratio<1.1
    disp('Plástico Perfecto')
elseif ratio<1.3
    disp('Suave Endurecimiento')
else
    disp('Endurecimiento')
end
end

eCMOD = zeros(N,4);
Fct = zeros(N,4);
for i = 1:r
    [eCMOD(:,i),Fct(:,i)] =

```

```

fct_e(CMOD_ajustado{i,1}(:,1),LOAD_CMOD_promedio{i});
end

%% Graficos
figure
hold on
for i=1:r
    plot(CMOD_ajustado{i,1}(:,1),LOAD_CMOD_promedio{i});
end
title('CMOD')
disp('Ajuste de Curvas...OK')
hold off

%%eCMOD
figure;
hold on;
for i=1:r
    plot(eCMOD(:,i),Fct(:,i));
end
title('eCMOD');
hold off;

```