

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS EN VOLADIZO DE
CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS ANTE CARGAS
DINÁMICAS**



**LAURA MICHELLE LOGREIRA GONZÁLEZ
CLAUDIA ISABEL RAMÍREZ ÁNGEL**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2012

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS EN VOLADIZO DE
CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS ANTE CARGAS
DINÁMICAS**

**LAURA MICHELLE LOGREIRA GONZÁLEZ
CLAUDIA ISABEL RAMÍREZ ÁNGEL**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTORES: ING. DANIEL MAURICIO RUÍZ VALENCIA
ING. MARÍA PATRICIA LEÓN NEIRA**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2012**

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera y en especial en el desarrollo del presente trabajo de grado. Sin ustedes ninguno de los logros alcanzados habrían sido posibles.

A nuestro director el Ingeniero Daniel Mauricio Ruíz Valencia por su confianza en nosotras, su orientación permanente y su apoyo a lo largo de todas las etapas del presente trabajo de grado.

A las empresas BEKAERT S.A., y CEMEX Colombia S.A., por apoyarnos en el suministro de algunos insumos para el desarrollo de la presente investigación.

Y finalmente, queremos agradecer de manera muy especial a los laboratoristas: Carlos Arturo Mora, Gary Alberto Tovar, Manuel Ernesto Daza y José Elvert Rubio, por su colaboración incondicional, su paciencia y su buena disposición para ayudarnos en todo momento; gracias a ellos, fue posible llevar a cabo la fase experimental del presente trabajo, de manera satisfactoria.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Planteamiento del problema y justificación.....	11
1.2Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1 Concreto con adiciones	14
2.1.1 Historia	14
2.1.2 Aplicaciones	15
2.2 Fibras Metálicas	20
2.2.1 Definición.....	20
2.2.2 Clasificación	21
2.2.3 Tenacidad	25
2.2.4 Dosificación y mezclado	27
2.3 Comportamiento sísmico del concreto reforzado	27
2.3.1 Introducción.....	27
2.3.3 Comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado con adición de fibras metálicas	40
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Diseño de mezcla.....	45
3.2 Diseño estructural de vigas en voladizo	45
3.3 Elaboración de probetas	51
3.4 Ensayos de laboratorio	56
3.4.2 Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad	56
3.4.3 Absorción de energía.....	56
3.4.4 Ensayos pseudo-dinámicos	57
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	65
4.1 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad	65
4.2 Resistencia flexural	67

4.3 Ensayos pseudo-dinámicos	71
5. CONCLUSIONES.....	80
6. BIBLIOGRAFÍA	82
7. ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado	15
Figura 2. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado	16
Figura 3. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado	17
Figura 4. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado	18
Figura 5. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado	18
Figura 6. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado. Prueba de resistencia al fuego de paneles de concreto reforzado con fibras.....	19
Figura 7.Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado.....	19
Figura 8. Falla concreto de ultra alta resistencia.	20
Figura 9. Caracterización geométrica Marmol 2010	21
Figura 10. Microfibras. Sika 2010	22
Figura 11. Microfibras Sika S.A 2010	23
Figura 12. Mecanismos de falla entre fibras y la matriz de concreto, Zollo 1996	26
Figura 13. Mecanismos de dosificación, Cardona 2010	27
Figura 14. Efecto de la carga alternante con deterioro de rigidez y de resistencia. (Adaptada de Gallego, Sarria 2010)	31
Figura 15. Grietas por la carga hacia arriba (Adaptada de Gallego, Sarria 2010)	32
Figura 16. Grietas por carga hacia abajo(Adaptada de Gallego, Sarria 2010)	32
Figura 17. Estudio de puentes de ferrocarril en Japón	41
Figura 18. Esquema de armado de vigas (Estudio en Michigan EEUU)	43
Figura 19. Esquemas estudio de unión viga-columna en Rumania.	44
Figura 20. Geometría alzado de la viga	47
Figura 21. Sección transversal de la viga.....	47
Figura 22. Corte transversal de la viga con detalles de diseño a flexión.....	48
Figura 23. Despiece de diseño a flexión	48
Figura 24. Esquema de medición de la altura efectiva de la sección.	49
Figura 25. Corte transversal de la viga con detalle de diseño a cortante	51
Figura 26. Despiece de diseño a cortante.....	51
Figura 27. Armado del empotramiento de las vigas.	52
Figura 28. Armado completo de las vigas en voladizo.....	53
Figura 29. Formaleta de vigas en voladizo.....	53
Figura 30. Formaleta y armado de vigas en voladizo.	54
Figura 31. Cilindros en piscina de curado.	55

Figura 32. Viguetas en piscina de curado	55
Figura 33. Vigas en voladizo húmedas.	55
Figura 34. Actuador hidráulico (González & Núñez, 2011).....	58
Figura 35. HydraulicServiceManifold (González & Núñez, 2011)	59
Figura 36. SilenFlowTM HydraulicPowerUnits- (González & Núñez, 2011).....	60
Figura 37. Marco metálico para soportar MTS. (Autores)	61
Figura 38. Sistema de empotramiento de los elementos estructurales (Autores)	61
Figura 39. Esquema del aditamento para sujetar la viga al actuador hidráulico (Vista superior).	62
Figura 40. Aditamento para sujetar la viga al actuador hidráulico.....	62
Figura 41. Estructura tipo cercha para soportar deformímetros.	63
Figura 42. Montaje de los deformímetros.	63
Figura 43. Montaje de ensayos pseudo-dinámicos.	64
Figura 44. Esquema del montaje experimental para ensayos pseudo-dinámicos.....	64
Figura 45. Montaje del ensayo de resistencia flexural.	67
Figura 46. Viguetas después de realizado el ensayo de resistencia flexural.	70
Figura 47. Falla de vigueta con adición de fibras metálicas.	71
Figura 48. Detalle de la zona de análisis de la evolución de los daños.	77

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Efecto del contenido de fibras en la curva Esfuerzo-deformacion de concreto (ACI 544.4R)	24
Gráfica 2. Ding y Wolfgang 1999	25
Gráfica 3. Degradación de la rigidez y la resistencia con los ciclos de carga (Adaptado de Gallego y Sarria 2010)	33
Gráfica 4. Curva esfuerzo-deformación de los materiales	34
Gráfica 5. Carga y descarga típica de un material inelástico (Adaptada de García, 1998)	35
Gráfica 6. Curva fuerza-deformación para un material elasto-plástico (Adaptado de García, 1998)	38
Gráfica 7. Curva fuerza-deformación del modelo de Ramberg-Osgood (Adaptado de García, 1998)	39
Gráfica 8. . Curva de esfuerzo deformación del modelo de rigidez degradante (Adaptado de García)	40
Gráfica 9. Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días.	66
Gráfica 10. Variación del módulo de elasticidad en las mezclas de concreto.....	66
Gráfica 11. Determinación de la resistencia flexural en viguetas con 15 kg/m ³ de adición de fibras metálicas.	68
Gráfica 12. Determinación de la resistencia flexural en viguetas con 30 kg/m ³ de adición de fibras metálicas	69
Gráfica 13. Resultado de ensayos de resistencia flexural.	70
Gráfica 14. Ciclo de histéresis probeta CC-1.....	72
Gráfica 15. Ciclo de histéresis probeta CC-2.....	72
Gráfica 16. Ciclo de histéresis probeta CF1-1.....	73
Gráfica 17. Ciclo de histéresis probeta CF1-2.....	73
Gráfica 18. Ciclo de histéresis para probeta CF2-1.....	74
Gráfica 19. Ciclo de histéresis probeta CF2-2.....	74
Gráfica 20. Disipación de energía de vigas en voladizo durante ensayos pseudodinámicos.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de comportamiento histerético de elementos de concreto reforzado.	36
Tabla 2. Diseño de mezcla	45
Tabla 3. Características de los materiales	46
Tabla 4. Características de las vigas en voladizo	46
Tabla 5. Parámetros de diseño obtenidos de la NSR-10 para determinar el diseño a flexión de la viga.	47
Tabla 6. Probetas elaboradas.	52
Tabla 7. Número de ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.	56
Tabla 8. Número de ensayos de absorción de energía.	57
Tabla 9. Número de ensayos pseudo-dinámicos.	57
Tabla 10. Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días de fundida.	65
Tabla 11. Variación en la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto.	65
Tabla 12. Módulo de elasticidad de las diferentes mezclas de concreto.	66
Tabla 13. Resultados ensayos de resistencia flexural.	69
Tabla 14. Evolución de fisuras en vigas en voladizo (Derivas de 1%, 2% y 3%)	78
Tabla 15. Evolución de fisuras en vigas en voladizo (Derivas de 4%, 5% y 6%)	79

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de la ingeniería civil en el ámbito de las estructuras, es lograr un buen funcionamiento de las edificaciones, tratando de mitigar los efectos de los sismos durante y después de ocasionarse el movimiento. Para lograr este objetivo, se han venido realizando numerosas investigaciones, que van desde la aplicación de los principios básicos, como es lograr un balance entre la rigidez, resistencia y capacidad de deformación, hasta el desarrollo de artefactos que permitan aislar las estructuras, con el fin de reducir las fuerzas que transmite el sismo a éstas.

Muchas de las soluciones, pueden ser costosas o difíciles de implementar, incluso la construcción de una estructura rígida y resistente, puede generar un sobre costo que muchas veces no es posible cubrir. Por esta razón, desde tiempo atrás, se ha querido mejorar el desempeño del concreto con adiciones de diferentes tipos, incluso de materiales reciclados, los cuales buscan brindar al concreto propiedades para hacerlo más dúctil a la deformación unitaria y por ende más seguro.

Tanto a nivel nacional como internacional, se ha investigado acerca del concreto adicionado con fibras metálicas, con el fin otorgarle una mayor disipación de energía al material, pues a mayor disipación de energía se obtienen mayores deformaciones, y por tanto, fallas dúctiles al desplazamiento, lo cual es el comportamiento que se desea de una estructura ante un evento sísmico (Gallego & Sarria, 2010).

Aunque las fibras metálicas son usadas actualmente en túneles, pisos industriales y pavimentos, son muy escasas las investigaciones que se encuentran acerca de estas adiciones desde el punto de vista dinámico en el comportamiento y desempeño estructural. Por esta razón, son pertinentes los estudios donde se realicen comparaciones acerca del comportamiento de una estructura (o elemento estructural), con adición de fibras metálicas y sin ningún tipo de adición, para así definir los beneficios que éstas puedan tener desde el punto de vista sísmico y para conocer otras posibles aplicaciones para la construcción de obras civiles.

1.1 Planteamiento del problema y justificación.

El concreto es uno de los materiales más usados en construcción a nivel mundial (Meyer, 2009), debido a su versatilidad y a su buen desempeño mecánico; lo anterior hace que éste material tenga una importante demanda y que sea objeto de estudio y constante investigación. A pesar de que el concreto presenta buena resistencia a la compresión, es un material frágil, el cual no permite que se den deformaciones importantes, con la aplicación de grandes esfuerzos. Se ha buscado mejorar esta característica mediante la implementación de nuevas tecnologías, como es el caso de algunas adiciones que le permitan al concreto adquirir propiedades que él, por sí solo, no puede desarrollar.

La adición de fibras en materiales como el ladrillo y el mortero, se ha realizado desde décadas atrás, pero los primeros adelantos que se conocen con certeza en este tema, fueron los realizados por Graham en 1911 (Marmol, 2010), cuando implementó por primera vez las fibras de acero para mejorar las características del concreto. Posterior a Graham, se registran estudios científicos en este tema, realizados por Griffith en 1920 y por Romualdi, Mandel y Batson (científicos de origen italianos) en 1963 (Marmol, 2010). Pero fue hasta 1970, que James Romualdi patentó los principios del concreto reforzado con fibras metálicas, como un material novedoso y muy útil para las estructuras (Maccaferri). Aunque la presente investigación se concentra en las fibras metálicas, existen otros tipos de fibras que también son objeto de estudio como las de polipropileno y las de vidrio.

El concreto adicionado con fibras metálicas se caracteriza por ser capaz de soportar esfuerzos, incluso después de que la matriz de concreto llega a la falla, esto gracias a que las fibras mantienen unida dicha matriz de forma residual, haciendo posible que siga soportando esfuerzos después de haber alcanzado la resistencia máxima (Nataraja et al., 2000). Este comportamiento del concreto es muy deseado en las estructuras, especialmente en aquellas que están ubicadas en zonas de riesgo sísmico, ya que al disipar más energía se hacen más seguras para las personas que las habitan, brindando integridad para no tener fallas frágiles y letales.

Las fibras metálicas son de acero y tienen usualmente una relación entre la longitud y el diámetro que varía entre 20 y 100; por funcionalidad, geometría y dosificación se clasifican en microfibras y macrofibras, las primeras, evitan la fisuración del concreto

en estado fresco y se dosifican en porcentajes de volumen entre el 3 y 15%, mientras que las macrofibras previenen la fisuración en estado endurecido, y su dosificación varía entre el 2 y 8%. La resistencia a la compresión varía muy poco con la adición de fibras metálicas, tanto que algunos autores como Ding y Wolfgang (1999) afirmaron que esta afectación es despreciable. El anclaje de las fibras metálicas en la matriz de concreto incrementa la tenacidad del material, ya que las fibras resisten el agrietamiento (Ding and Kusterle, 1999). El estudio de Holschemacher, Mueller, y Ribakov, en 2010 demostró que el comportamiento de las fibras como adición al concreto, depende de su dosificación y dimensionamiento y comprobó que efectivamente, las fibras metálicas, mejoran el comportamiento a flexión y la disipación de energía en el concreto.

En cuanto a estudios relacionados con el comportamiento sísmico de elementos estructurales de concreto reforzado con fibras metálicas, se tiene registro de algunos a nivel mundial, como es el caso de uno realizado en Francia en 2002, en el cual se elaboraron elementos estructurales con cuantías de fibras metálicas de 20 y 40 Kg/m³, los cuales fueron sometidos a cargas axiales y a cargas cíclicas, con el fin de evaluar la posibilidad de sustituir el acero de refuerzo convencional, por las fibras metálicas únicamente; de este estudio se concluyó que dicho reemplazo era viable, pero para ellos era necesario evaluar el comportamiento sísmico global de toda la estructura, y además, que en los lugares donde el elemento estaba sometido a mayores esfuerzos, era necesario el uso de acero de refuerzo convencional (Buyle-Bodin and Madhkhan, 2002).

En Malasia, en 2012, se llevó a cabo una investigación, en la cual se le adicionaron fibras metálicas a una viga-columna de concreto (construida con las prácticas propia de Malasia) para evaluar si el elemento se hacía más dúctil con dicha adición; se concluyó, que en el nodo, el aumento de la ductilidad fue casi despreciable, ya que las fibras metálicas no tenían un buen desempeño si se construía con las normas utilizadas en ese país que eran las mismas vigentes en Gran Bretaña (Kay & Hamid, 2012).

Numerosos estudios, tanto a nivel nacional como internacional, se han realizado acerca del comportamiento mecánico del concreto con adiciones de fibras metálicas, sin embargo, no se ha estudiado a fondo el desempeño ante eventos sísmicos de elementos estructurales construidos con este material. Lo cual hace que sea muy pertinente desarrollar investigaciones de este tipo en nuestro país, pues la mayor parte del territorio colombiano, presenta amenaza sísmica entre media y alta.

1.2Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento dinámico de vigas de concreto reforzado con fibras metálicas ante la aplicación de cargas dinámicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar el desempeño sísmico histerético de vigas en voladizo adicionadas con fibras metálicas, con aquellas sin ningún tipo de adición.
- Evaluar la capacidad de disipación de energía de vigas en voladizo con y sin adición de fibras metálicas.
- Comparar el daño ocasionado por cargas sísmicas en vigas en voladizo adicionadas con fibras metálicas, con aquellas sin ningún tipo de adición.

2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Concreto con adiciones

2.1.1 Historia

El concreto pese a que posee una serie de propiedades y características que lo sitúan en el material estructural más utilizado en la construcción, tiene algunas limitaciones en su comportamiento, el cual se caracteriza por ser frágil y por su pobre capacidad de deformación; es por esto que la alternativa de adicionar materiales a la matriz constituyente es un tema que ha llamado la atención de diferentes investigadores buscando que esta opción minimice las limitaciones y le confiera al concreto las propiedades que carece.

A pesar de que hasta 1950 surge el concepto de materiales compuestos, fue desde 1900 que se efectúan las primeras adiciones al concreto de diferentes tipos de fibras. Inicialmente se adicionaron fibras de asbesto, las cuales fueron sustituidas por su potencial cancerígeno, luego de esto en 1911 Graham utilizó por primera vez fibras de acero, buscando mejorar la resistencia y la estabilidad del concreto. En 1920, se realizan los primeros estudios del tema hechos por Griffith (Marmol, 2010), además de la adición de fibras de vidrio en la matriz del concreto en este mismo año, por otro lado en el año 1960 los científicos europeos Romualdi y Mandel, entre otros, establecieron las bases teóricas de la investigación sobre uso de fibras en el concreto, ayudando a patentar esta alternativa en 1970 (Maccaferri). Finalmente, la adición de fibras sintéticas se realizó en 1980, las cuales están formadas por materiales poliméricos de diferente tipo.

La urgente necesidad de proporcionarle al concreto facultades que mejore su respuesta como material estructural es un tema que se ha venido desarrollando e investigando desde hace mucho tiempo, lo cual se puede corroborar con el amplio número de investigaciones y publicaciones hechas por diferentes campos relacionados con el tema, tanto así que desde 1967, diferentes tipos de fibras y materiales han sido usados de forma satisfactoria para mejorar las propiedades, físicas, mecánicas y la durabilidad del concreto. A partir de la notoriedad del tema el American Concrete Institute (ACI), en una investigación realizada en 1996, definió el concreto reforzado con fibras como el material hecho principalmente de cemento hidráulico, agregados y fibras de refuerzo

discretas (ACI 544.IR96. ACI FanningonHilis, MI), es decir que se considera un concreto reforzado con fibras, a aquel que tiene fibras en su composición dispuestas de una forma adecuada y que proporcione al concreto propiedades que mejoran su comportamiento y respuesta, especialmente después de que alcanza su resistencia máxima.

2.1.2 Aplicaciones

La aplicabilidad de esta alternativa radica en su capacidad de absorber energía, aun, después de agrietarse alcanzar su resistencia al impacto, además de la disminución de tiempo en el proceso de producción, e incluso, en algunos casos se logra la sustitución parcial o total del refuerzo convencional, por lo que hace de esta aplicación, una muy atractiva posibilidad para su implementación en diferentes proyectos en el ámbito constructivo.

El comportamiento de las fibras metálicas en la matriz de concreto hace que la fisuración por parte de éste sea controlada y reducida tanto en estado fresco como endurecido, además de proporcionarle facilidad en el proceso constructivo, disminuyendo los tiempos de obra, y ahorrando material al poder disminuir los espesores del material; también le suministra menor permeabilidad y mayor durabilidad, por esto esta alternativa se hace interesante para diferentes procesos constructivos.

PISOS Y PAVIMENTOS



Figura 1. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado

En casos donde la relación entre superficie y volumen es muy alta, y existe la necesidad de extender el material dándole un bajo espesor como se presenta en la construcción de pisos y pavimentos, las fibras metálicas como refuerzo secundario o principal del concreto resulta ser una alternativa adecuada para evitar generación de fisuras durante las primeras etapas del fraguado y endurecimiento. Por tanto la dosificación homogénea de las fibras metálicas en toda la matriz de concreto que absorben los esfuerzos provocados por la retracción plástica, hacen que la aparición de fisuras sea mínima, y en caso de haberlas, las fibras metálicas reducirían sensiblemente su ancho y su propagación.

PREFABRICADOS



Figura 2. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado

Los elementos prefabricados por cuestión de traslado, y disposición son vulnerables y susceptibles a golpes que pueden generar desportillamientos, agrietamiento o incluso descascaramiento. Por lo que en casos donde los elementos han sido elaborados con

concreto fibroreforzado la generación de dichas grietas se reducen bastante, evitando así un comportamiento frágil por parte de dichos elementos, e incluso cuando se presenta fisuración, la estructura tiene total capacidad para seguir trabajando normalmente.

En elementos prefabricados como las dovelas, para la construcción de túneles es común encontrar que han sido fabricadas con concreto reforzado con fibras que trabajan como el refuerzo secundario, aumentando con esto los volúmenes de producción y mejorando los procesos productivos.

CONCRETO LANZADO



Figura 3. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado

En los procesos constructivos como taludes, túneles, reparaciones y reforzamiento, que en cuyas actividades está la de cubrir cierta superficie con concreto lanzado, es altamente usado el concreto reforzado con fibras metálicas las cuales sustituyen totalmente el uso de malla electro soldada como mecanismo de refuerzo.

En este caso, la inclusión de fibras metálicas en la matriz de concreto le brinda múltiples beneficios a la estructura, los tiempos que se ahorran eliminando los procesos de colocación y fijación de la malla electrosoldada se pueden ver claramente reflejados en los costos, además del ahorro de concreto que tiene que ser utilizado, ya que habrá un espesor constante en la seccion.

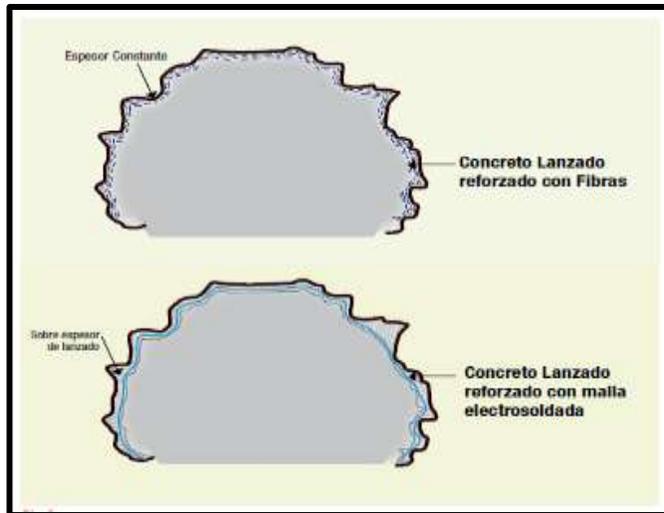


Figura 4. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado

CONCRETOS RESISTENTES A EXPLOSIONES



Figura 5. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado

La presión que se genera luego de una explosión y que recae de forma directa a la estructura, hace que estas pongan a prueba su capacidad de resistencia y deformación absorbiendo la energía provocada por la onda explosiva; es por esto que el concreto reforzado con fibras metálicas le proporciona al material una capacidad mayor de

deformación incluso después de fallar, y una mejor respuesta del concreto de recubrimiento; evitando de esta forma un comportamiento frágil, que acarrea fallas.



Figura 6. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado. Prueba de resistencia al fuego de paneles de concreto reforzado con fibras

CONCRETO DE ULTRA-ALTA RESISTENCIA

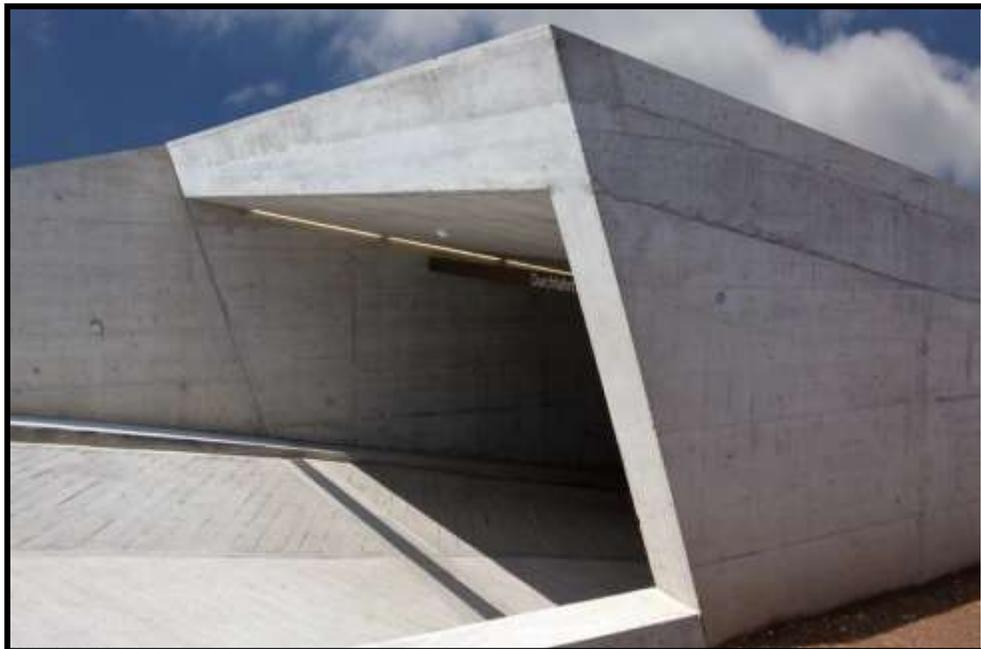


Figura 7. Sika S.A Informaciones Técnicas, Concreto reforzado.

El concreto de ultra-alta resistencia es aquel que alcanza resistencias que varían ente 1200 y 1800 kg/cm², aunque esta cualidad lo hace atractivo para su uso en la construcción, este material presenta una deformación mínima frente a las cargas a las que es sometido, por lo que la falla se alcanza de forma explosiva como se muestra en Figura 8 a). Siendo así que las fibras metálicas en este tipo de materiales evitan de forma directa la falla frágil y le confiere al material una mayor ductilidad, como se muestra en la Figura 8 b).



a)



b)

Figura 8. Falla concreto de ultra alta resistencia.

2.2 Fibras Metálicas

2.2.1 Definición

Según la norma ASTM C1018-97, se define a las fibras como "filamentos delgados y alargados en la forma de haz, malla o trenza de cualquier material natural o fabricado que puede ser distribuido a través del concreto en estado fresco". Es decir, que son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la matriz de concreto con el fin de conferirle ciertas propiedades, como mejorar la resistencia a la tracción e incrementar la capacidad de absorción de energía.

Estas fibras pueden ser de acero con bajos contenidos de éste, también pueden encontrarse fibras galvanizadas que son menos costosas que las fibras de acero inoxidable. Las fibras metálicas como filamentos de acero dispuestos de forma homogénea en la matriz de concreto que tiene una relación entre la longitud y el

diámetro que va desde 20 hasta 100, pueden clasificarse según su geometría como se muestra en la Figura 9, otra característica relacionada con la geometría es el tipo de extremo que presenta la fibra, los dobleces en forma de ganchos, perilla, o cono, le proporciona adherencia de la fibra con la matriz de concreto circundante al igual que ocurre con las fibras que tiene una superficie desigual.

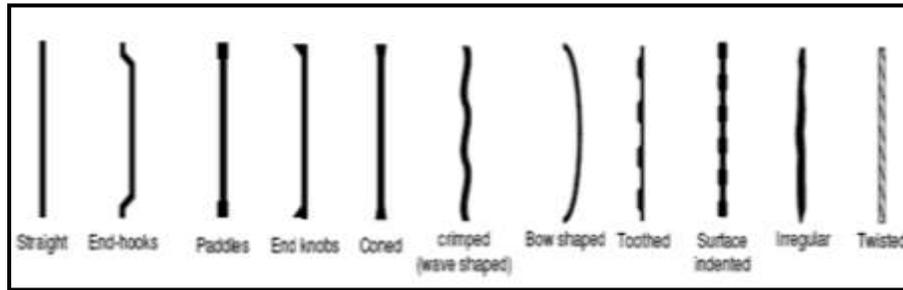


Figura 9. Caracterización geométrica Marmol 2010

2.2.2 Clasificación

Las fibras como alternativa de refuerzo en el concreto no tienen otro objetivo que el de proporcionarles al concreto propiedades que este por sí solo no es capaz de desarrollar; estas pueden clasificarse según diferentes características, aunque actualmente se clasifican en dos grandes grupos.

1. Clasificación por material

Esta clasificación concierne al material en el que están hechas las fibras y su definición corresponde a la suministrada por Sika S.A 2012.

- *Fibras metálicas*: filamentos de acero de bajo contenido de carbono, con una relación entre sus dimensiones longitud y diámetro.
- *Fibras sintéticas*: Secciones discretas que se distribuyen aleatoriamente dentro del concreto que pueden estar compuestas por Acrílico, Aramid, Carbón, Polipropileno, Poliéstileno, Nylon, Poliéster etc.

- *Fibras naturales*: Secciones discretas de origen natural, como coco, sisal, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc. Cuyos diámetros varían entre 0.5 y 0.2 mm, con valores de absorción superiores al 12%.
- *Fibras de vidrio*: Secciones discretas de fibra de vidrio resistentes al álcali.

2. Clasificación por funcionalidad, geometría y dosificación

Esta clasificación se realiza a partir de la forma geométrica, tamaño y el uso adecuado según el proceso constructivo y la estructura deseada.

- *Micro fibras*:

Las microfibras son las que se encargan de evitar la fisuración del concreto cuando este se encuentra en estado fresco, su dosificación aunque baja es bastante eficiente al prevenir la fisuración por causa de la retracción plástica, esta dosis no puede ser mayor al 15% del volumen de concreto. Las fibras más conocidas en esta clasificación son las fibras de polipropileno cuyos diámetros no son superiores a los 0.05 mm.



Figura 10. Microfibras. Sika 2010

- *Macrofibras:*

Estas fibras son las que controlan al aparición o generación de fisuras en la matriz de concreto en estado endurecido, y en caso de haberla, éstas se encargan de reducir el ancho de la fisura además son estas fibras las que permiten un mejoramiento de las propiedades mecánicas de la estructura o elemento cuando este ya ha llegado a su falla.

Las dosificaciones de estas fibras oscilan entre 2 y 8% del volumen del concreto, entre las macro fibras las más usadas son las sintéticas y las metálicas cuya relación entre longitud y diámetro van desde 20 hasta 100.

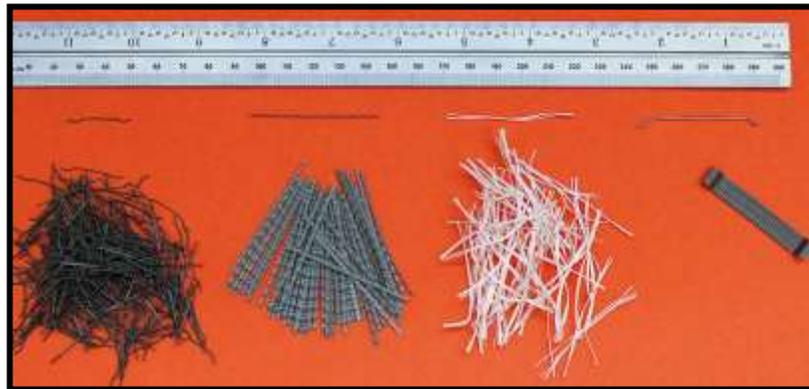
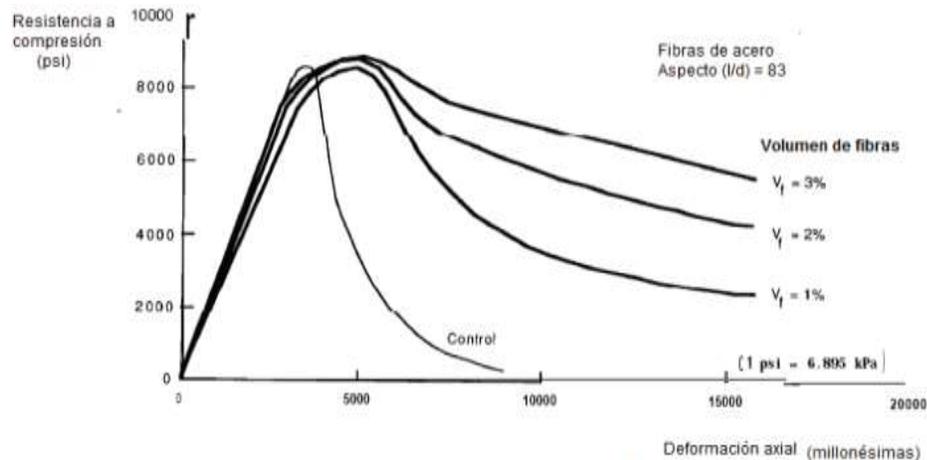


Figura 11. Microfibras Sika S.A 2010

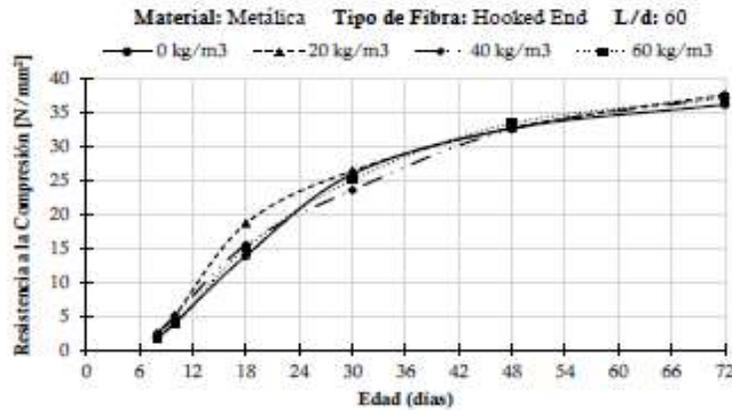
Estas fibras le confieren ciertas propiedades al concreto que mejoran su comportamiento frente a situaciones en donde su desempeño a flexión se ve claramente mejorado, si en su matriz, se incluyen este tipo de fibras. En cuanto a la resistencia a la compresión, no se ve afectada, y aunque en algunos casos incrementa, en otros casos no cambia significativamente.



Gráfica 1. Efecto del contenido de fibras en la curva Esfuerzo-deformación de concreto (ACI 544.4R)

Como lo reporta la ACI seccional Colombia las mezclas de concreto adicionado con diferentes porcentajes de fibras, en este caso de 1%, 2% y 3% en donde se observa que la resistencia residual mejora a medida que el porcentaje de adición incrementa como se muestra en la Gráfica 1.

Al igual que se mostró anteriormente, el estudio realizado por Ding y Wolfgang en 1999, en donde se compara la resistencia a la compresión adicionando diferentes porcentajes de fibras metálicas, se puede evidenciar que, a pesar de que se observa algún incremento en la mezcla que contiene los 20kg/m^3 de cuantía de fibra, el resto de muestras se comportan de forma similar que la muestra que no contiene ninguna cantidad de fibras en su composición, por lo que se establece que las fibras no le aporta de forma directa al concreto facultades que mejoren su resistencia inicial a la compresión, aunque la resistencia residual es mejorada.



Gráfica 2. Ding y Wolfgang 1999

2.2.3 Tenacidad

La evaluación de la tenacidad en elementos de concreto es sumamente importante al momento de describir y analizar el comportamiento o la respuesta de estos elementos frente a la aplicación de carga. Es la tenacidad la energía por unidad de volumen requerida para causar una ruptura, es decir que la capacidad que una estructura tiene de resistir un impacto depende de la tenacidad del material que es usado (F.P Beer and E.R Johnston, 2010).

En los concretos reforzados con fibras la tenacidad se ve mejor influenciada, ya que son las fibras metálicas en la matriz de concreto las que permiten que este pueda seguir soportando cargas aun cuando en la matriz cementicia ya se hayan desarrollado algunas grietas.

Esto se ha concluido y determinado a partir de numerosos estudios donde se aplican los procedimientos que se indican en las normas EFNARC y ASTM a diferentes tipos de mezcla en diferentes probetas con el fin de determinar cómo es la variación y el incremento de la tenacidad para cada una de las muestras.

La tenacidad en los concretos reforzados con fibras se ven altamente influenciada por el tipo de anclaje de las fibras ya que de este depende directamente la capacidad de la fibra de resistir los agrietamientos presentados en la matriz cementicia.

En un estudio realizado en 1996 por Zollo, se establecen los diferentes mecanismos de falla entre las fibras y la matriz cementicia y lo muestran en la Figura 12.

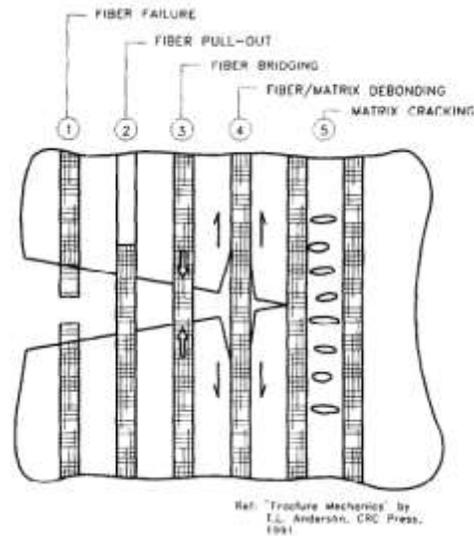


Figura 12. Mecanismos de falla entre fibras y la matriz de concreto, Zollo 1996

1. **Falla de la fibra.** La fibra llega a su resistencia máxima hasta la falla pero presenta buena adherencia con la matriz cementicia.
2. **Desprendimiento de la fibra.** La fibra no llega a su resistencia máxima, ya que antes esta se desprende de la matriz, perdiendo totalmente la adherencia con la matriz.
3. **Falla en la matriz cementicia.** La fibra responde eficiente fluyendo y disipando energía sin fracturarse
4. **Alargamiento de la fibra.** en este caso la fibra disipa energía sin alcanzar su resistencia máxima.
5. **Fisuramiento de la matriz cementicia.** En este caso tanto la fibra como la matriz disipan energía, sin que la fibra llegue a su resistencia máxima.

Estos mecanismos de falla dependen principalmente de la composición y las propiedades geométricas de la fibra, incluyendo el anclaje que tiene cada fibra, y la textura y rugosidad de la superficie de esta.

2.2.4 Dosificación y mezclado

Debido al tamaño y las características de las fibras, hace que éstas no se puedan entregar totalmente separadas, por lo que a veces es necesario el uso de algunos químicos, o en ciertas ocasiones con simple agua es posible desprenderlas entre sí, por tanto se requiere que su dosificación y mezclado se realice de la mejor forma garantizando una distribución de estas homogénea sobre la mezcla de concreto.

Así bien la dosificación de las fibras en la mezcla de concreto, debe realizarse de tal forma que se evite la aglomeración, o conformación de bolas entre la mezcla y las fibras, ya que esta situación impide que las fibras desarrollen su potencial, por esto se acostumbra realizar esta dosificación manualmente o por bandas transportadoras como se muestra en Figura 13 a) y b) respectivamente.



a)



b)

Figura 13. Mecanismos de dosificación, Cardona 2010

2.3 Comportamiento sísmico del concreto reforzado

2.3.1 Introducción

Los elementos y sistemas estructurales de concreto tienen un comportamiento especial cuando son sometidos a cargas sísmicas, ya que al presentarse un evento de este tipo las

edificaciones y demás tipo de construcciones son afectadas sensiblemente, generando una serie de desplazamientos y deformaciones en la estructura. Al generarse estas deformaciones vienen con ellas la creación de esfuerzos que al interactuar con la infraestructura van acumulando energía que luego son liberados a lo largo del evento sísmico. Esta disipación de energía se da por medio de la deformación que permite la estructura lo que puede decirse que es el comportamiento deseado de una construcción, ya que de no darse esta respuesta, dicha disipación se obtendrá por medio de los daños que se le causaran a la estructura que en ciertos casos llegan a ser irreparables a tal punto que pueden generar el colapso de la estructura.

El comportamiento de las estructuras frente a un sismo depende directamente de 2 aspectos fundamentales, el primero de ellos es la rigidez que a su vez depende de los módulos elásticos, la geometría de los elementos estructurales y del sistema como tal, y el segundo de estos aspectos principales, es la resistencia que al igual que el anterior depende de ciertos factores como lo son las propiedades geométricas y el conjunto en general, y aunque dependan de los mismos factores la diferencia radica en que en la inercia está relacionada con los momentos de inercia y la resistencia con las características mecánicas del concreto y del acero de refuerzo. Entonces si hablamos de la rigidez, esta propiedad es determinante en la capacidad que tiene la estructura de absorber energía, en cambio cuando se refiere a resistencia esta propiedad es la que permite que la estructura tenga un desempeño y una respuesta buena ante un sismo (Gallego y Sarria 2010)

Como consecuencia del desplazamiento y la deformación se generan unos esfuerzos que en el caso del concreto este es el encargado de soportar las fuerzas de compresión y el acero las de tracción, haciendo de este un trabajo en conjunto y de vital necesidad entre ellos, ya que es el refuerzo el que limita la expansión de forma lateral del concreto manteniendo la integridad y unión de la sección de concreto, permitiendo así un incremento en las capacidad de deformación; e igual va a mantener sus altas resistencias a la compresión lo cual resulta sumamente importante para responder de la mejor forma frente a un evento sísmico y lo que este demande de la estructura ya que el concreto simple por sí solo no sería capaz de conseguirlo, por lo que es la alta capacidad de deformación sin llegar a la rotura incluso más allá de la fluencia es lo que le proporciona mayor ductilidad a la estructura.

La rigidez, entendida como la fuerza necesaria para generar una deformación unitaria, es directamente afectada de forma negativa en los elementos estructurales de concreto por la aparición de grietas formadas por la redistribución de las fuerzas de forma interna, sin embargo esta reducción hace que la resistencia interna se desarrolle en el momento en que entra a funcionar el acero.

En el comportamiento de las estructuras en concreto reforzado es necesario definir el concepto del amortiguamiento el cual hace referencia a la energía que se pierde en el proceso en el que la estructura está siendo afectada por un evento sísmico, este amortiguamiento, se origina en la intervención de varios factores, participan fuerzas de fricción en las grietas y fuerzas de fricción en el refuerzo longitudinal y transversal con el concreto, a demás de esto en el proceso de fluencia es el refuerzo el que está sometido a deformaciones residuales lo que genera la disipación de energía durante dicho proceso.

Cuando una edificación es estremecida por efecto de un sismo, genera desplazamientos, éste movimiento oscilatorio de la estructura hace que las fuerzas inerciales cambien de dirección, dichos ciclos de oscilación genera en la estructura un proceso de histéresis. Estos ciclos son la relación entre la carga a la que se somete la estructura, y la deflexión con la que esta responde, lo que quiere decir que hay una serie de deformaciones que corresponden con la carga que se le aplica, y cada vez que aumente el desplazamiento máximo de un ciclo aumentará de la misma forma la carga, por lo que el ciclo de histéresis se va a ir acostando hacia el eje horizontal, como muestra de la perdida de la resistencia y la rigidez (Gallego y Sarria 2010).

El área de un ciclo de histéresis está relacionada con la cantidad de energía que disipa una estructura de concreto reforzado, quiere decir esto que entre mayor sea el área del ciclo de histéresis mayor será la energía disipada. Este fenómeno ocurre fundamentalmente en las uniones viga-columna.

Estos ciclos se presentan dado que las cargas que soporta la estructura llevan al concreto y al acero a esfuerzos mucho mayores a los lineales, y debido a la perdida de adherencia entre el concreto y el acero lo que genera un agrietamiento importante que afecta sensiblemente la estructura que al momento de abrirse y cerrarse genera un desagregamiento del material, y por otro lado dichas cargas pueden llevar al acero a

puntos en que las deformaciones sean residuales y de tal magnitud que los daños serian permanentes e incluso irreversibles (Gallego y Sarria 2010).

La repetición de las cargas son causa principales del deterioro en los nudos de una estructura, debido a esto en cada ciclo de carga y descarga la carga tiene a disminuir al igual que la rigidez, ya que la pérdida de resistencia implica una mayor deflexión. Por todo esto los ciclos de histéresis van presentando una caída y donde la energía que se disipa ciclo a ciclo es cada vez menor; por consiguiente si un sismo alcanza el número necesario para que se agote la capacidad de disipar energía puede llegar a ser letal para la estructura a tal punto que puede ocasionar su colapso.

Por consiguiente es tan relevante todo lo concerniente a la cantidad y distribución del acero en una edificación ya que este factor es fundamental en la ductilidad de una edificación, lo que es sumamente importante en el momento de tener que responder ante un evento sísmico. En el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado es necesario hablar sobre la sollicitación sísmica, un evento sísmico sobre una edificación implica una interrelación entre las características del acelerograma tanto del suelo como de la estructura, tal como lo explica Mauricio Gallego Silva y Alberto Sarria Molina en el libro *El concreto y los terremotos*, el terremoto llega afectando inicialmente a la cimentación desplazándola de su posición de reposo, por lo que la rigidez intentará arrastrar las masas del edificio consigo generando una fuerza de inercia que se opone al desplazamiento; seguido de la generación de deformaciones sobre la estructura y la cimentación y el suelo. Es ahí en ese proceso donde la masa interviene en las características dinámicas afectando las frecuencias y los desplazamientos y en la magnitud de las fuerza de inercia, por lo que en el diseño se debe cumplir que las fuerzas resistentes de la estructura superen a las impuestas por el sistema (Gallego & Sarria, 2010).

En el proceso conocido como la fase intensa del acelerograma, en donde las ondas llegan a la roca desde el foco con una alta frecuencia y se van propagando por la cimentación lo que generan una ondas superficiales, las cuales generan desplazamientos en tres direcciones por lo que la estructura es sollicitada por dicha combinación de ondas. Las deformaciones que sufren el suelo y la estructura son diferentes ya que las que sufre el suelo tienen componentes de cortante mientras que las que sufre la estructura tiene componente de flexión, fuerza axial y de cortante.

Las fuerzas inerciales serán mayores en la cubierta e irán disminuyendo hacia abajo debido a que las oscilaciones que se presentan tanto el suelo como la estructura se dan de manera armónica ya que aceleración de las masas superiores es mayor por los desplazamientos que estas realizan.

es por esto que las fuerzas inerciales serán mayores en la cubierta e irán disminuyendo hacia abajo.

Durante un sismo la edificación que oscila puede presentar en su estructura efectos degradantes que son acumulativos con los sismos futuros, estos efectos afectan principalmente los elementos que hacen parte de los sistemas aporticados y duales. En un evento sísmico las cargas inerciales desarrolladas por las masas van cambiando de dirección generando fenómenos locales que deterioran la adherencia entre el refuerzo y el concreto, además de la ampliación de las grietas a medida que van ocurriendo los ciclos, todo esto produce momentos de flexión y cortante cuyos esfuerzos generan una fisuración sensiblemente notoria en las fibras superiores e inferiores de las vigas y en las dos caras de las columnas (Gallego & Sarria, 2010).

En la Figura 14 se muestra una viga en voladizo que es sometida a una carga P en el extremo de la luz, la cual puede variar su magnitud y dirección, y a medida que aumenta la magnitud de la carga se mide simultáneamente la deflexión en el extremo libre de la viga. En esa misma ilustración es posible percibir el deterioro del elemento a partir de las grietas que se van formando como consecuencia de la aplicación de la carga hacia arriba y abajo.

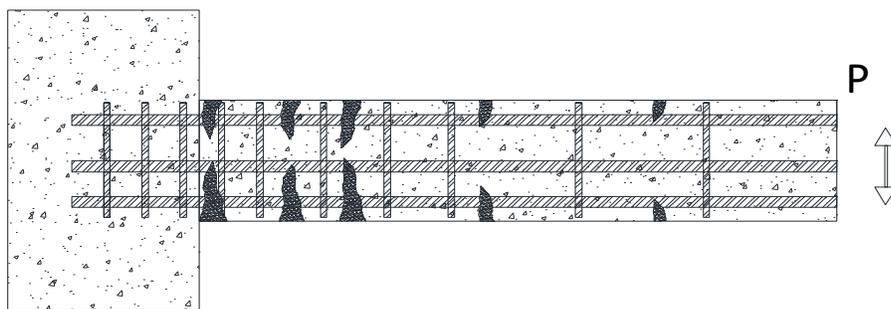


Figura 14. Efecto de la carga alternante con deterioro de rigidez y de resistencia. (Adaptada de Gallego, Sarria 2010)

En la Figura 15 y Figura 16 se muestran las grietas que se forman por la aplicación de la carga hacia arriba y hacia abajo, y el cambio que presenta a nivel horizontal es conocido como la deflexión que presenta el elemento estructural como respuesta a la aplicación de dicha carga.

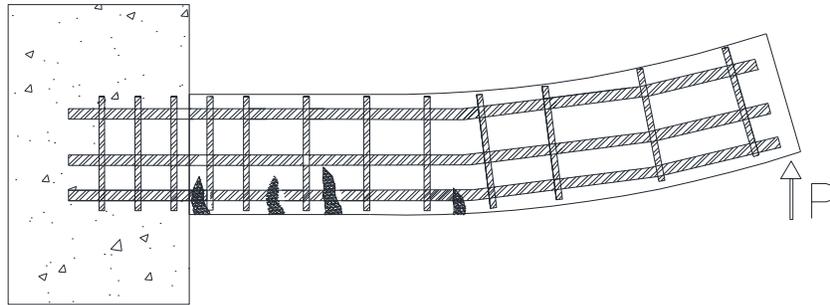


Figura 15. Grietas por la carga hacia arriba (Adaptada de Gallego, Sarria 2010)

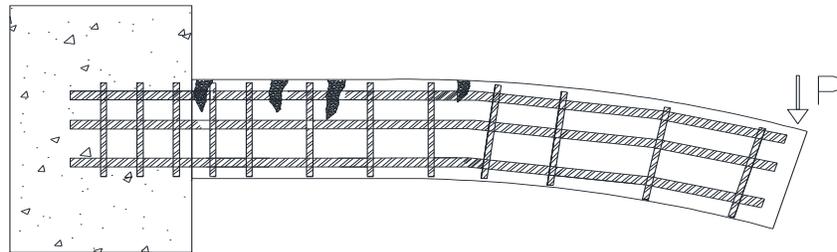
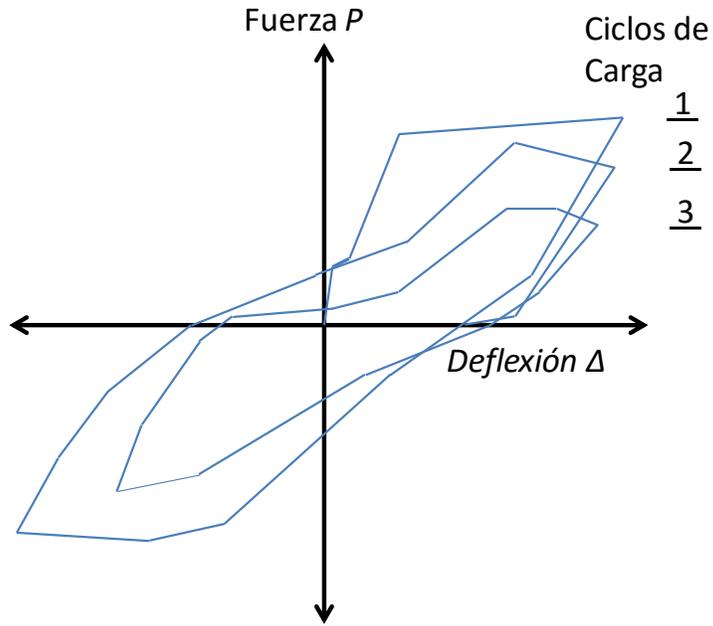


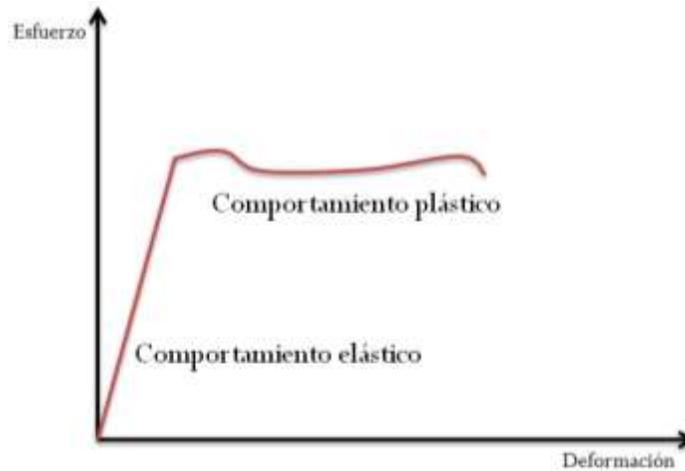
Figura 16. Grietas por carga hacia abajo (Adaptada de Gallego, Sarria 2010)

Al momento de graficar la fuerza que es aplicada, contra la deformación que presenta el elemento son conformados los ciclos de histéresis, lo cuales van cambiando según la carga que es aplicada a medida que los ciclos se van haciendo y la estructura va disminuyendo su capacidad de disipar energía los ciclos van cayendo lo que implica una disminución en la rigidez y la resistencia como se muestra en la Gráfica 3.



Gráfica 3. Degradación de la rigidez y la resistencia con los ciclos de carga (Adaptado de Gallego y Sarria 2010)

Todos los materiales que componen las estructuras, se comportan de manera diferente dependiendo de muchos factores, los cuales pueden ser intrínsecos, o factores externos a la composición propia del material. El comportamiento de los materiales que componen las estructuras, es difícil de predecir, ya que están expuestos permanentemente a cargas y esfuerzos debido al peso propio de la estructura, al uso que se le da a la misma e incluso a la zona geográfica en la que se encuentre. Materiales como el concreto, son susceptibles a sufrir deformaciones causadas por la aplicación de cargas, si estas deformaciones desaparecen cuando se retiran dichas cargas, se dice que el material se encuentra en el rango elástico (se comporta elásticamente) y el máximo valor de esfuerzo para el que el material se comporta elásticamente se denomina el límite elástico (Beer and Johnston, 2010). Por otra parte, si al retirar la carga, la deformación permanece, esto quiere decir que el material ha sufrido una deformación plástica y que se encuentra en el rango inelástico. En la Gráfica 4 se explica gráficamente lo anterior.

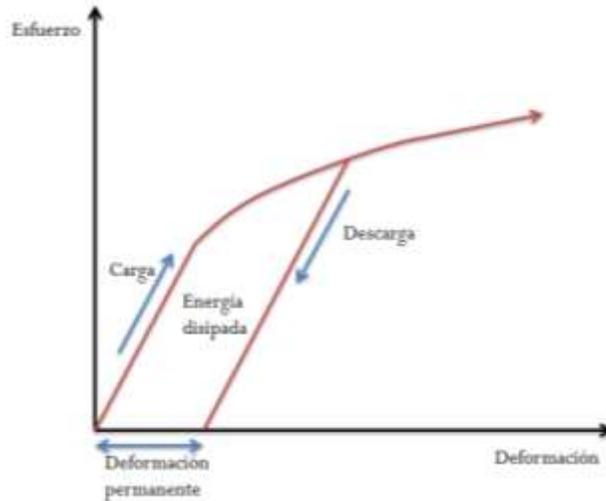


Gráfica 4. Curva esfuerzo-deformación de los materiales

Cuando las estructuras están sometidas a un sismo, generalmente actúan más allá del rango elástico, ya que están fabricadas con materiales como el concreto, el cual tiene características inelásticas en casi todo el rango útil de esfuerzos, al igual que la gran mayoría de materiales de construcción. Cuando una estructura supera el límite elástico, parte de la energía que impone el sismo se pierde como energía disipada, reduciendo así la energía cinética y las fuerzas inerciales a las que se ve expuesta dicha estructura.

La capacidad de un material de responder dinámicamente en el rango inelástico está asociado con la ausencia de modos frágiles de falla (García, 1998), es por eso que en el diseño de estructuras se evita reducir al máximo el riesgo de que se presenten fallas frágiles, ya que si esto sucede, una estructura no está en capacidad de resistir, o de responder ante alguna excitación dinámica. Para que esto no suceda, los materiales deben tener características de ductilidad y tenacidad que los haga capaces de soportar deformaciones en el rango inelástico sin llegar a la falla.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el concreto se puede catalogar como un material inelástico, ya que al aplicarle una carga y posteriormente descargarlo la curva de esfuerzo deformación no sigue la misma trayectoria, como se muestra en la Gráfica 5.



Gráfica 5. Carga y descarga típica de un material inelástico (Adaptada de García, 1998)

La Gráfica 5 representa la respuesta histerética de un material inelástico que está sometido a ciclos de carga y descarga en sentidos opuestos, en los cuales se sobrepasa el límite elástico. La histéresis se conoce como el fenómeno por medio del cual, dos o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo (García, 1998). Este tipo de análisis mediante ciclos de histéresis, permite analizar la capacidad de un material de disipar energía, lo cual se puede determinar calculando el área bajo la curva de esfuerzo-deformación de cualquier material que se lleve hasta la falla; entre mayor sea el área bajo la curva, mayor energía está disipando dicho material.

Comportamiento histerético del concreto estructural

Debido a que el concreto y el acero son dos materiales con comportamientos sumamente diferentes, se han realizado importantes investigaciones acerca de las respuestas de las estructuras en el rango inelástico ante sollicitaciones dinámicas.

En la Tabla 1, se ilustra el comportamiento de elementos de concreto reforzado ante cargas alternantes de una viga en voladizo. Dicha viga está sometida a deformaciones causadas por deflexiones iguales verticales en los dos sentidos.

Tabla 1. Esquema de comportamiento histerético de elementos de concreto reforzado (Adaptada de García, 1998).

RESPUESTA HISTERÉTICA DE UNA VIGA DE CONCRETO REFORZADO EN VOLADIZO	
1	
2	
3	
4	

En el numeral 1. de la Tabla 1, empiezan a aparecer las fisuras de las vigas en la base del voladizo y la rigidez empieza a disminuir, lo cual se puede apreciar en el cambio en la pendiente de las curvas (a mayor pendiente, mayor reducción de la rigidez). Estas fisuras aparecen porque el acero superior de la viga (el cual está a tensión) empieza a fluir. En el numeral 2, la rigidez del sistema está gobernada por la capacidad de endurecimiento por deformación que tiene el acero de refuerzo; el espesor del recubrimiento y la cuantía del acero de refuerzo transversal, son factores que influyen en el comportamiento de la rigidez en esta etapa del ciclo de histéresis. Terminando el ciclo del numeral 3. se da la inversión de la carga y en este punto la viga está tan rígida como en el numeral 1. debido a que el concreto de la parte baja de la viga sigue intacto, sin rastro de fisuras. La forma de la curva en esta fase del ciclo, depende en su mayoría de complejas interacciones entre las características de las fisuras existentes, la cuantía de refuerzo longitudinal, entre otros. Las deflexiones allí son producto de los esfuerzos de compresión en el concreto y de tensión en el acero en la zona de la viga que se encuentra a tensión. A medida que aumentan las deflexiones, el acero de refuerzo fluye con más facilidad. Finalmente, en el numeral 4. Ocurre un cambio en el sentido de las deformaciones, las cuales son de carácter permanente pero en la dirección inversa. La magnitud de estas deformaciones depende de la degradación de la rigidez que haya ocurrido anteriormente. La parte baja del concreto que conforma la viga se fisura de manera similar a como ocurrió en la parte superior. Los pasos descritos anteriormente se repiten una y otra vez en los ciclos de histéresis, cambiando las características de las curvas a medida que cambia la rigidez del elemento, lo cual ocurre desde que este empieza a fluir.

El hecho de que las fisuras aparezcan inicialmente en la parte del empotramiento de la viga, indica que este es el lugar de momento máximo, por lo cual allí se forman las articulaciones plásticas. La distancia a la cual se presentan estas articulaciones, se conoce como longitud de plastificación.

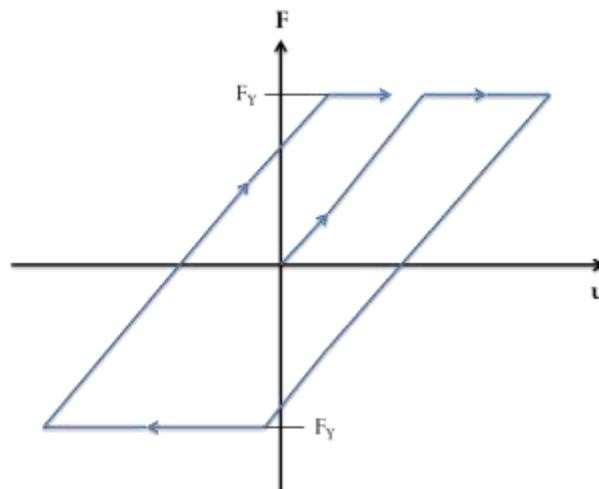
Existen numerosos factores por los cuales se ven influenciados los ciclos de histéresis del concreto reforzado, como es el caso de la carga axial a la que esté sometido el elemento, la eficacia de la adherencia entre el refuerzo y el concreto, los esfuerzos a cortante y el refuerzo a cortante, la estabilidad general de las barras del refuerzo, entre muchos otros(García, 1998). En algunos elementos de concreto reforzado es posible que se presente estrangulamiento, lo cual consiste en que las fisuras de los ciclos

anteriores no se cierran, y producen fisuras abiertas que pasan por todo el elemento, todo esto ocasiona a su vez que la disipación de energía se vea afectada.

Existen numerosos modelos matemáticos que buscan describir los complejos procesos que ocurren en los elementos estructurales construidos con diferentes materiales. Algunos ejemplos de dichos modelos son:

✓ **Modelo elastoplástico:**

Es el modelo más simple para describir la histéresis, en el cual el material se comporta como un material totalmente elástico, con una rigidez constante hasta que llega al nivel de la fuerza de fluencia (como se muestra en la Gráfica 6), una vez alcanza este punto se presentan deformaciones sin que haya incremento en la fuerza. Cuando se invierte el movimiento, el material retoma su condición de material totalmente elástico hasta que alcanza la fluencia en el lado opuesto.

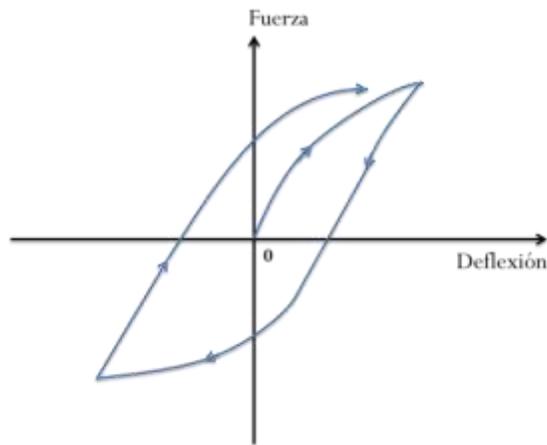


Gráfica 6. Curva fuerza-deformación para un material elasto-plástico (Adaptado de García, 1998)

La acumulación de energía de deformación corresponde al área bajo la curva de carga. En el caso de la curva de descarga, la energía disipada corresponde a la energía cinética. La diferencia entre las dos áreas corresponde a la energía que se disipa en forma de calor, ruido u otros tipos de energía.

✓ **Modelo de Ramberg-Osgood:**

Este modelo de histéresis se ajusta a las curvas de esfuerzo-deformación de varios materiales pero la diferencia que hay entre la energía disipada entre un modelo y otro radica en la forma como se llega a la fluencia, en este caso el acercamiento a la fuerza de fluencia es más gradual, como se puede apreciar en la **Gráfica 7**. La diferencia entre los resultados arrojados por el modelo elastoplástico y el de Ramberg-Osgood, son muy similares, pero en el primero los procedimientos numéricos son mucho más sencillos.



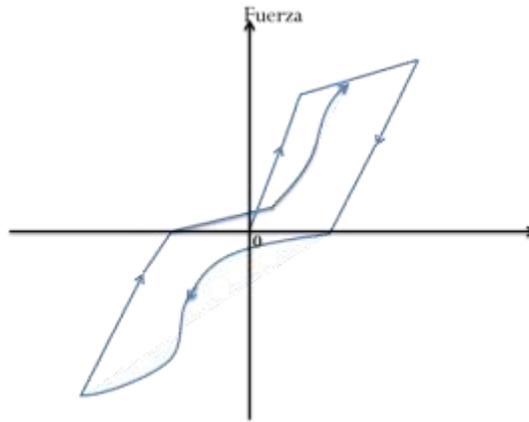
Gráfica 7. Curva fuerza-deformación del modelo de Ramberg-Osgood (Adaptado de García, 1998)

✓ **Modelo con degradación de la rigidez**

En este modelo la respuesta ante excitaciones dinámicas se describe por medio de segmentos rectos, que se encuentran en el punto donde ocurre un cambio abrupto en la curvatura, como se muestra en la Gráfica 8. La parte matemática del modelo se hace compleja por las posibilidades de rigidez que hay en la curva de carga y descarga del elemento.

Un ciclo de carga se representa en cuatro segmentos rectos de igual manera como sucede en los modelos de Ramberg-Osgood y el elastoplástico. Este modelo logra abarcar y representar la rigidez por la descarga lineal, el estrangulamiento causado por

la inversión de la fuerza, la rigidización gradual debido al cierre de fisuras y la resistencia a la fluencia para una rigidez determinada.



**Gráfica 8. . Curva de esfuerzo deformación del modelo de rigidez degradante
(Adaptado de García)**

2.3.3 Comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado con adición de fibras metálicas

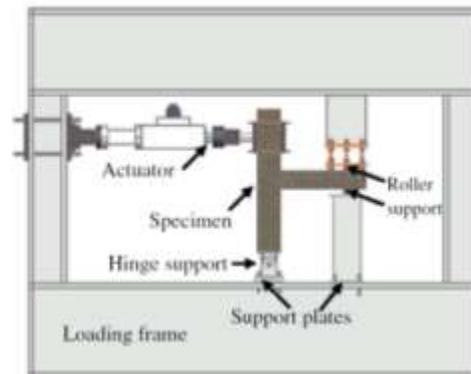
Aunque el concepto del concreto con adiciones se ha convertido en una realidad generalizada en los últimos años, aún su aplicación no está muy consolidada debido a que todavía se están desarrollando numerosas investigaciones en estos temas, y porque la implementación de adiciones como las fibras metálicas, generarían sobrecostos en el desarrollo de las estructuras e incluso dificultades en los procesos constructivos. Las investigaciones que se adelantan en estos temas, más específicamente en lo que respecta a la adición de fibras metálicas se están realizando a nivel mundial, especialmente en países ubicados en zona de alto riesgo sísmico.

Japón se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del pacífico, y recientemente fue afectado por uno de los sismos más fuertes registrado en la historia con una magnitud de 9,0 en la escala de Richter, al este de Sendai. Debido a eventos como este, se han desarrollado estudios como es el caso de uno realizado en el 2011, en el cual se evaluó la posibilidad de reducir el acero de refuerzo en los nodos, con el fin de evitar la congestión en estas uniones. La investigación se enfocó en reducir el acero a cortante ubicado en los nodos de los pórticos que componen los puentes de ferrocarriles. Para

evaluar si esta reducción era viable, se elaboraron tres especímenes a escala 1:6 de una unión viga-columna en forma de T de un puente ya existente en Japón, como el que se muestra en la Figura 17. Estos pórticos fueron ensayados bajo cargas cíclicas con desplazamientos contralados. La diferencia entre las tres probetas, radicaba en que una de ellas era sin adición de fibras metálicas, y las otras dos, tenía porcentajes de adición del 1% y 1,5% respectivamente, del porcentaje de volumen de concreto. A pesar de que la reducción de las varillas en las columnas debilita el efecto de confinamiento y hace que las fisuras en los nodos aparezcan más rápidamente, se observó que para las probetas con adiciones de fibras metálicas, el número de fisuras y su propagación fue mucho menor que en las sin ningún tipo de adición. Con base en esto, y en los análisis de la energía disipada por los elementos, se concluyó que: la adición de fibras metálicas mejora la adherencia entre el concreto y el acero previniendo fallas por anclaje; se comprobó que la resistencia a flexión y a cortante, aumentaba para los elementos elaborados con fibras, lo cual a su vez, hacía que la capacidad de carga fuera mayor, incluso después de reducir el acero de refuerzo, lo que quiere decir que las fibras metálicas pueden actuar como varillas a flexión y a cortante. Finalmente, se concluyó que en los elementos con adición de 1,5% de fibras metálicas, se puede alcanzar una disipación de energía tal, que se logre un comportamiento dúctil, incluso con menos acero de refuerzo(Shakya et al., 2012).



(a) Puente ferroviario con estructura tipo pórtico



(b) Esquema del ensayo

Figura 17. Estudio de puentes de ferrocarril en Japón

Por otra parte, en Estados Unidos, en la Universidad de Michigan, se estudió el uso de un concreto de alto desempeño con adición de fibras metálicas en las regiones críticas de las vigas de acople, con el fin de simplificar su diseño. Para esto, la idea era proporcionar confinamiento suficiente al refuerzo diagonal, para así mejorar el comportamiento cíclico en términos de disipación de energía y mitigación de daños. Se elaboraron cuatro especímenes: el primero, hecho con concreto convencional y con refuerzo diagonal en acero; el segundo, se realizó eliminando dicho refuerzo completamente y utilizando concreto de alto desempeño adicionado con fibras metálicas en su fabricación; para el tercero, se mantuvo el refuerzo diagonal, pero se eliminó el confinamiento que se encuentra alrededor de estas varillas en el mismo. Finalmente para el cuarto espécimen se combinaron los métodos utilizados en las probetas anteriores, ya que se usó concreto de alto desempeño adicionado con fibras metálicas y se implementó un refuerzo en la diagonal similar al del tercer espécimen; el esquema del armado de las vigas de acople se muestra en detalle en la Figura 18. Uno de los fines de la investigación, era facilitar el empotramiento de las vigas de acople prefabricadas a los muros estructurales, para esto, se utilizaron llaves de cortante en los dos primeros especímenes, en el tercero y cuarto, se realizó un diseño sin estas llaves, para examinar si realmente son necesarias, o son solo un complemento. Después de someter los especímenes a ensayos con cargas cíclicas, se realizó una determinación de la disipación de energía mediante el análisis de los ciclos de histéresis, de esto se concluyó que el concreto de alto rendimiento adicionado con fibras metálicas proporcionan un confinamiento adecuado para el refuerzo diagonal de las vigas de acople, lo cual facilitaría notablemente el proceso constructivo de las mismas. Finalmente, el nivel de daños en los especímenes elaborados con fibras metálicas es mucho menor a aquellos que no tienen adición, ya que las fibras retrasan la propagación de las fisuras y evitan fallas indeseables. Esto tiene una implicación importante en los sistemas de vigas de acople y muros estructurales, ya que la capacidad para disipar energía y para mantener la consistencia de los elementos estructurales, es el comportamiento deseado en estos sistemas durante un evento sísmico (Wight, 2011).

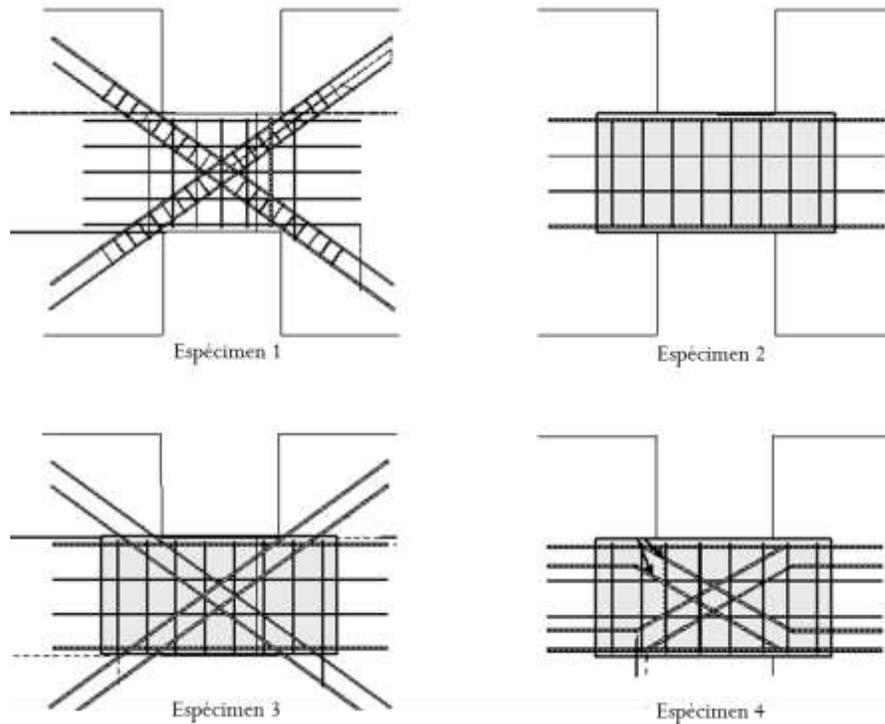


Figura 18. Esquema de armado de vigas (Estudio en Michigan EEUU)

En Rumania, al igual que en Japón se realizó una investigación acerca del comportamiento de las uniones viga columna, pero en este caso en vez de un puente, se analizó un edificio residencial. El estudio de estas uniones es de vital importancia, ya que el desempeño de los pórticos de concreto ante un sismo, está altamente influenciado por el comportamiento de los nodos. Se elaboraron un total de cuatro especímenes a escala real de las uniones centrales de los pórticos como se muestra en la Figura 19; el diseño de estos se realizó siguiendo los códigos de construcción vigentes en Rumania. Los especímenes uno y dos, estaban compuestos por vigas prefabricadas y columnas fundidas in-situ, y elaborados con concreto convencional, y los especímenes tres y cuatro, tuvieron un proceso de elaboración similar al anterior, pero en la parte de los nodos, tenían concreto adicionado con fibras metálicas. Para el espécimen cuatro, se realizó una reducción de los flejes en la unión. A todas las probetas se les realizaron ensayos con cargas cíclicas aplicadas a la parte superior de la columna, de los cuales se realizaron análisis de disipación de energía mediante ciclos de histéresis, análisis de la evolución de los daños, entre otros, llegando a la conclusiones tales como: Las fibras metálicas confinan el concreto desde la parte central del nodo, controlando el

agrietamiento y reduciendo potenciales fallas frágiles. Las probetas con adición de fibras metálicas presentaron una capacidad de carga superior en un 60%, y una disipación de energía del doble con respecto a las de concreto convencional (Ioan Olariu, 1992).

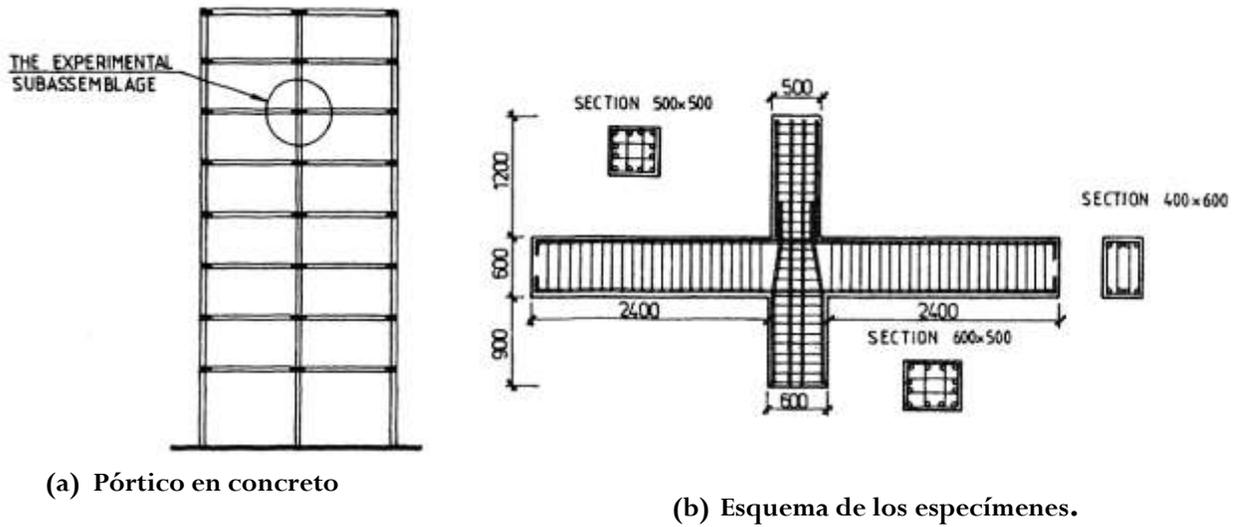


Figura 19. Esquemas estudio de unión viga-columna en Rumania.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Diseño de mezcla

El diseño de mezcla fue suministrado por CEMEX Colombia S.A., quien a su vez donó todos los materiales necesarios para llevar a cabo los ensayos que se realizaron, los cuales se describen más adelante.

Se realizaron un total de tres (3) mezclas diferentes, todas para una resistencia promedio de 21 MPa. La primera mezcla (CC), consiste en un concreto convencional sin adición de fibras metálicas, la segunda (CF1) contiene 15kg de fibras metálicas por cada m³ de concreto y la última (CF2) tiene una adición de fibras de 30 Kg/m³. Las cantidades exactas de cada material y las especificaciones de los mismos se muestran a continuación:

Tabla 2. Diseño de mezcla

	1m ³	CC	CF1	CF2
Cemento (kg)	340	49,20	53,03	53,04
Agua (lt)	170	23,95	25,82	25,82
Grava (kg)	942	136,32	146,92	146,93
Arena (kg)	866	125,32	135,06	135,07
Aditivo 1 (ml) *	1635	236,60	255,00	255,01
Aditivo 2 (ml) **	1973	285,52	307,71	307,72
Fibras metálicas (kg)	20	0	2,34	4,68

* Plastificante: Pozzolith 901n (BASF)

**Superplastificante: Glienium C355 (BASF)

3.2 Diseño estructural de vigas en voladizo

Una vez conocido el diseño de mezcla suministrado por CEMEX Colombia S.A., se empezó a diseñar el reforzamiento estructural de las vigas en voladizo, teniendo en cuenta el tamaño máximo de los agregados, los parámetros de diseño de la NSR-10 y en las características del actuador hidráulico.

Para realizar el pre-dimensionamiento de la viga, fue necesario tener en cuenta el punto de fluencia del elemento estructural, de manera que la fuerza necesaria para llevar la viga hasta dicho punto estuviera dentro de los rangos de carga del sistema MTS. Además de eso, las probetas debían ajustarse al tamaño del marco metálico existente en el laboratorio y su peso debía ser tal que su transporte y manejo pudiera ser realizado por varias personas y no fuera necesario el uso de maquinaria. Además de esto, la fuerza de diseño escogida para el diseño estructural de la viga fue de 20 kN y la cuantía de 1% para que coincidiera con la mitad de la cuantía balanceada.

- **Refuerzo estructural a flexión**

Las especificaciones de los materiales con los que se diseñaron los elementos estructurales son los mostrados a continuación:

Tabla 3. Características de los materiales

Materiales	
Concreto	$f_c=21$ MPa
Acero	$f_y=420$ MPa

Las dimensiones que más se ajustaban a los requerimientos mencionados anteriormente son:

Tabla 4. Características de las vigas en voladizo

Características vigas	
Cuantía	1%
Recubrimiento (d')	0.03m
Distancia efectiva (d)	0.17m
Ancho (b)	0.2m
Altura (h)	0.2m
Longitud	1.0m

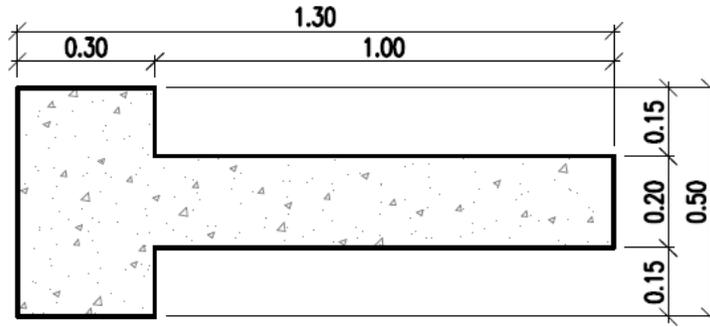


Figura 20. Geometría alzado de la viga

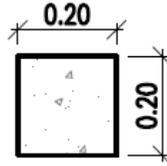


Figura 21. Sección transversal de la viga

Una vez definidas las características de los materiales y los parámetros de diseño de las vigas fue posible determinar lo siguiente, siguiendo lo estipulado por la NSR-10

Tabla 5. Parámetros de diseño obtenidos de la NSR-10 para determinar el diseño a flexión de la viga

Parámetros para diseñar	
m	23.53
ρ_{min}	0.002727724
ρ_{max}	0.01606402
ρ_b	0.02141869
ϕM_n (KN.m)	19.98863059

Con el momento nominal de la viga y la longitud de esta, fue posible determinar la fuerza que se debe aplicar en el extremo superior del elemento estructural, para que este fluya:

$$\begin{aligned} \text{Fuerza en la punta del voladizo} &= \frac{\phi M_n}{L} = \frac{19.98 \text{KN.m}}{1.0 \text{m}} = 19.98 \text{KN} \\ &= 1.99 \text{Ton} \end{aligned}$$

Conociendo los datos mostrados en: Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5, es posible determinar el diseño a flexión de las vigas en voladizo, el cual se muestra a continuación. Para más detalle mirar los planos que se encuentran en los anexos.

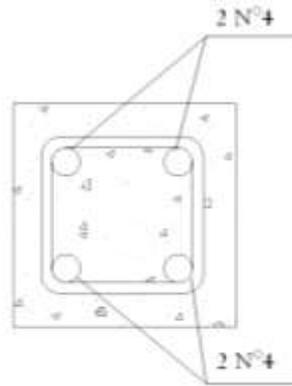


Figura 22. Corte transversal de la viga con detalles de diseño a flexión

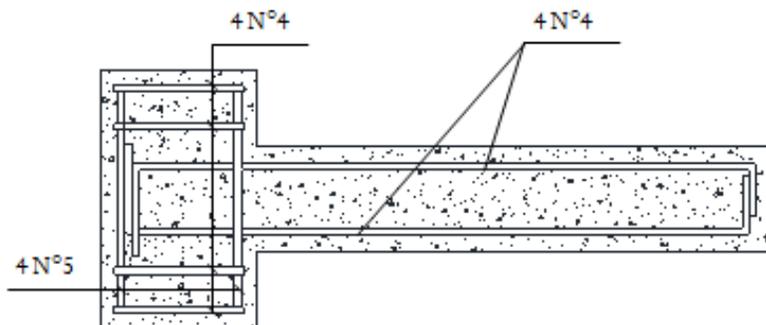


Figura 23. Despiece de diseño a flexión

- **Diseño estructural a cortante**

Antes de diseñar el refuerzo a cortante de la viga fue necesario conocer la resistencia a cortante del concreto, siguiendo dos métodos planteados por la NSR-10, los cuales se describen a continuación:

1. Según la ecuación C.11-3

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'c}.bw.d \quad \text{Donde } \lambda=1$$

$$V_c = 0,17 * 1\sqrt{21} * 1000 * 0,2 * 0,154 = \mathbf{23,99 KN}$$

2. Según la ecuación C.11-5

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f'c} + 17\rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u}\right) bw \cdot d$$

Para usar esta ecuación debe considerarse que V_u y M_u ocurren simultáneamente y que:

$$\lambda=1$$

$$V_c \leq \left(0,29\lambda\sqrt{f'c}.bw.d\right)$$

$$\frac{V_u \cdot d}{M_u} \leq 1$$

La altura efectiva de la sección (d) se mide de la fibra extrema a compresión al centroide de las barras a tensión (ver Figura 24).

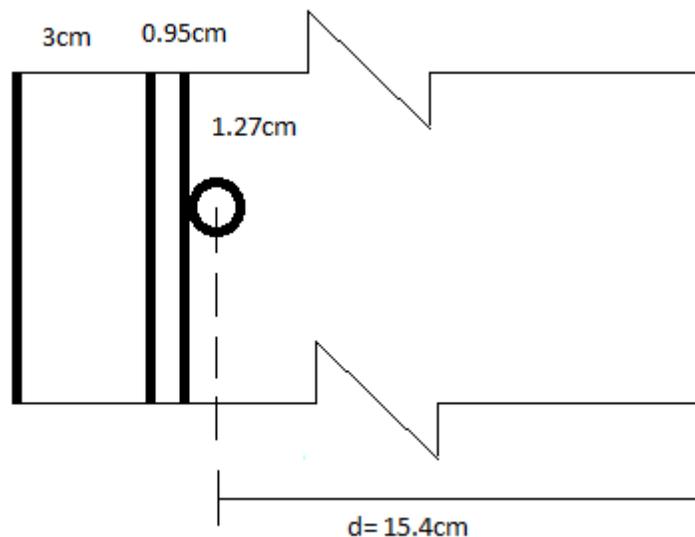


Figura 24. Esquema de medición de la altura efectiva de la sección.

Teniendo en cuenta lo anterior, las solicitaciones para fluencia obtenidas del diseño a flexión son:

$$V_u = 20KN$$

$$M_u = 20KN.m$$

$$\rho_w = \frac{A_s}{bw \cdot d} = \frac{2(1,29cm^2)}{20 * 15,4} = 8,376 * 10^{-3} = 0,008376$$

$$V_c = \left(0,16 * 1\sqrt{21} * 1000 + 17(0,008376) \frac{0,2 * 0,154}{0,2} \right) 0,2 * 0,154$$

$$= \mathbf{22,6 KN}$$

Refuerzo a cortante mínimo

$$\phi = 0,75$$

$$0,5\phi V_c = 0,5 * (0,75) * 22,6 = 8,47KN$$

Como $V_u > 0,5\phi V_c$, entonces

$$A_{vmin} = 0,062\sqrt{f'_c} * \frac{bw * S}{f_{yt}} \geq 0,35 * \frac{bw * S}{f_{yt}}$$

$$S_{min} = \min\left(\frac{d}{2}, 60cm\right)$$

$$S = \frac{d}{2} = \frac{0,154}{2} = 0,08m$$

$$A_{vmin} = 0,062\sqrt{21} * \frac{0,2 * 0,08}{420} = 0,11cm^2$$

Utilizando flejes de dos ramas con varillas de 3/8", se tiene:

Área de fleje N° 3 de dos ramas = 1,42cm².

$$\frac{1,42cm^2}{0,11cm^2} = 12,90 \approx 13$$

Por lo tanto el despiece a cortante de la viga en voladizo tendría: 13 flejes de 3/8" cada 8 cm, para cada viga.

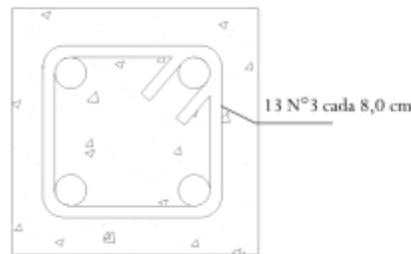


Figura 25. Corte transversal de la viga con detalle de diseño a cortante

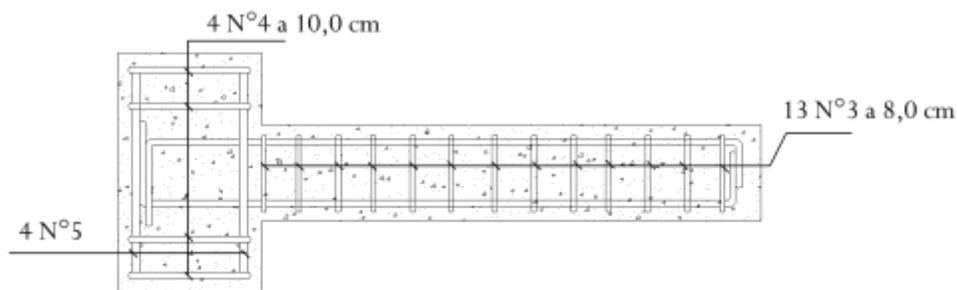


Figura 26. Despiece de diseño a cortante

3.3 Elaboración de probetas

La elaboración de las probetas se realizó en un total de cuatro (4) días, en los cuales se realizó el proceso de armado del acero de refuerzo, de las formaletas y la fundida del concreto como tal, la cual se llevó a cabo en un solo día, bajo las mismas condiciones de producción y con los mismos materiales.

Se construyeron un total de diecinueve (19) especímenes, los cuales fueron elaborados con diferentes diseños de mezclas como se indica a continuación:

Tabla 6. Probetas elaboradas.

	CC	CF1	CF2	Total
Cilindros	3	3	3	9
Viguetas		2	2	4
Vigas en voladizo	2	2	2	6
				19

- **Armado del acero de refuerzo**

Como se describió en el numeral anterior, para las vigas en voladizo se diseñó un refuerzo estructural tanto a flexión como a cortante, para el cual se elaboró un armado como se indica en los despieces. Los materiales utilizados en esta parte del proceso, fueron principalmente: Varillas de diferentes diámetros (3/8", 1/2" y 5/8"), alambre negro y un bichiroque. A pesar de que el acero venía previamente cortado, para darle forma a este, fue necesario el uso de herramienta especial para esta labor, la cual generalmente se encuentra en las obras. La parte del empotramiento, fue la primera en armarse, como se muestra en la Figura 27, para posteriormente unir a esta la parte del voladizo como aparece en la Figura 28.



Figura 27. Armado del empotramiento de las vigas.



Figura 28. Armado completo de las vigas en voladizo.

- **Armado de las formaletas**

Las formaletas se realizaron una vez finalizado el armado de todas las vigas. Para la elaboración de estas, se contó con madera previamente cortada en los tamaños necesarios, de manera que solo se tuviera que usar puntillas y martillo para su fabricación. Se hicieron un total de seis (6) formaletas, una para cada viga, ya que la fundida de los elementos, llevó a cabo en un solo día. El resultado final del proceso fue el mostrado a continuación:



Figura 29. Formaleta de vigas en voladizo

Una vez finalizado el proceso de armado del acero de refuerzo y de las formaletas, como se puede ver en la Figura 30, se llevó a cabo la fundida de las probetas.



Figura 30. Formaleta y armado de vigas en voladizo.

- **Proceso de fundida de los elementos:**

Como ya se mencionó, se realizaron tres (3) mezclas diferentes, las cuales se elaboraron el mismo día y bajo las mismas condiciones. Para mezclar el concreto, se utilizó un trompo con capacidad de 320 l. Las cantidades elaboradas para cada tipo de mezcla son las siguientes:

CC: 0,145 m³

CF1: 0,156 m³

CF2: 0,156 m³

Los cilindros utilizados para los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, tienen un diámetro de 10 cm por una altura de 20 cm; y los moldes de las viguetas utilizadas para los ensayos de absorción de energía tienen una sección transversal de 15cm x 15cm y de largo 55cm.

Para realizar el vibrado del concreto se utilizó un vibrador de 110 voltios y una aguja de 1”.

La desencofrada de todos los elementos, se realizó después de cuatro días de fundidos y el proceso de curado se realizó de dos maneras diferentes:

- ✓ **Cilindros y viguetas:** Se mantuvieron sumergidos en una piscina de curado, la cual se encuentra en un cuarto a una temperatura de 23°C y una humedad relativa de 100%.
- ✓ **Vigas en voladizo:** Se mantuvieron húmedas durante los primeros siete días. Para este fin, se utilizaba una manguera para añadirles agua tres veces diarias.



Figura 31. Cilindros en piscina de curado.



Figura 32. Viguetas en piscina de curado



Figura 33. Vigas en voladizo húmedas.

3.4 Ensayos de laboratorio

Para la realización de los ensayos, especialmente en lo que respecta a la elaboración de las probetas se contó con la colaboración de algunas empresas como es el caso de CEMEX Colombia S.A., la cual, como se mencionó anteriormente, donó los materiales necesarios para las diferentes mezclas de concreto y suministró un diseño de mezcla apropiado para un concreto convencional con adición de fibras metálicas. La empresa BEKAERT S.A., por su parte, donó las fibras metálicas.

3.4.2 Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Se realizaron un total de nueve (9) cilindros para evaluar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad tanto del concreto convencional, como del concreto adicionado con fibras metálicas; todo esto con el fin de garantizar la resistencia de las diferentes mezclas. Para lograr resultados representativos, se realizaron un total de tres (3) cilindros por mezcla, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Número de ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

Tipo de mezcla	CC	CF1	CF2	Total de ensayos
Número de ensayos	3	3	3	9

3.4.3 Absorción de energía

El ensayo de absorción de energía también se conoce como ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas. Para la realización de este se elaboraron probetas rectangulares de concreto fibroreforzado, a las cuales se les aplicó una carga con velocidad constante. Con esto se buscaba conocer la capacidad que tienen los elementos de trabajar en el rango inelástico sin perder su resistencia.

Se elaboraron un total de cuatro (4) probetas, dos (2) para cada una de las mezclas de concreto con adición de fibras metálicas (15 kg/m^3 y 30 kg/m^3), esto con el fin de conocer la capacidad de absorción de energía de cada una de estas. El ensayo se realizó después de los 28 días de fundidas las probetas.

Tabla 8. Número de ensayos de absorción de energía.

Tipo de mezcla	CF1	CF2	Total de ensayos
Número de ensayos	2	2	4

3.4.4 Ensayos pseudo-dinámicos

Este tipo de ensayos también se conocen como ensayos cíclicos; estos permiten evaluar la resistencia sísmica de diversos elementos estructurales. En el caso de la presente investigación, se evaluó la capacidad de disipación de energía de vigas en voladizo, el comportamiento sísmico histerético y los daños ocasionados en estas. Con el fin de realizar comparaciones entre las probetas elaboradas con diferentes tipos de mezcla, como se muestra en la Tabla 9, se hizo uso del sistema MTS y de todo un montaje experimental que permitiera llevar a cabo los ensayos pseudo-dinámicos de una manera segura y con condiciones experimentales muy cercanas a las condiciones planteadas de forma teórica.

Tabla 9. Número de ensayos pseudo-dinámicos.

Tipo de mezcla	CC	CF1	CF2	Total de ensayos
Número de ensayos	2	2	2	6

3.4.4.1 Descripción del equipo

De acuerdo a las características de la investigación que se realizó, se decidió utilizar el sistema MTS como herramienta, para llevar a cabo algunos de los ensayos que se requieren para cumplir los objetivos propuestos. Esta máquina permite realizar ensayos estáticos y dinámicos, tanto para materiales como para elementos estructurales, ya que posee un sistema variado de cargas controladas. Gracias a su versatilidad, puede configurarse para cumplir los requerimientos de diferentes tipos de materiales (como concreto, acero, plástico, aluminio, etc.) y de diversos tipos de estructuras (o los elementos que la componen). Algunas de las pruebas que se pueden realizar con este sistema son: pruebas de compresión, tensión, fatiga, simulaciones de sismos, entre otros. Lo anterior lo hace la herramienta ideal para la aplicación de cargas dinámicas a elementos estructurales, por ende, la herramienta ideal para la presente investigación.

- **MTS- Material Testing System**

MTS o sistema para prueba de materiales, ofrece una amplia variedad de posibilidades para realizar investigaciones en varias ramas de conocimiento; en el caso de la ingeniería civil, se pueden llevar a cabo procesos de simulaciones estructurales y la caracterización de materiales. Este sistema está compuesto por varios elementos, los cuales se expondrán brevemente a continuación:

1. Actuador hidráulico Serie 244

El actuador hidráulico serie 244, ofrece una solución integrada de alto desempeño, para la generación de cargas dinámicas. Todos los componentes que conforman el actuador y las diferentes opciones que ofrece, ayudan a simplificar el proceso de realización de ensayos de alto desempeño. Gracias a los materiales y a los procesos utilizados para su fabricación, se logra minimizar la fricción y logra disipar grandes cantidades de calor durante ensayos con alta frecuencia, se logra también mejorar la resistencia al desgaste y así ofrecer resultados más confiables. Algunos usos de los actuadores hidráulicos en otras áreas del conocimientos son en la ingeniería mecatrónica y aeronáutica.

El actuador hidráulico puede desarrollar fuerzas hasta de 100 kN y está en capacidad de alcanzar niveles de funcionamiento similares a los de un actuador hidrostático. Es al igual compatible con una gran variedad de accesorios que contribuyen al mejor desempeño del sistema y a la mejor calidad de sus ensayos. Entre los elementos que conforman el actuador hidráulico serie 244 se encuentran: Una serie de rótulas, arandelas espirales, transductores de fuerza, LVDT.

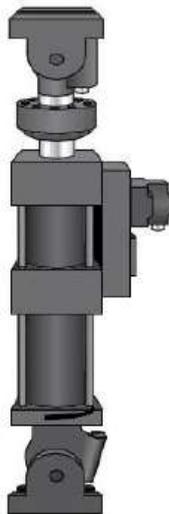


Figura 34. Actuador hidráulico (González & Núñez, 2011)

2. 293 – HydraulicServiceManifold (HSMs)

Son dispositivos de regulación de flujo y de presión hidráulica, que son los encargados de controlar la presión de una estación de ensayos, pero es independiente de la principal unidad de energía hidráulica. Entre las ventajas que tiene este sistema se encuentran: Control de presión independiente, transiciones suaves de presión, rápida respuesta a reducciones de presión, diseño confiable, es posible configurarlo para varias estaciones, entre otros.



Figura 35. HydraulicServiceManifold (González & Núñez, 2011)

3. Silent Flow™ Hydraulic Power Units

Es una unidad de energía que permite encender los sistemas para la realización de ensayos de manera flexible y ofreciendo una buena relación de costo-eficiencia. Estos dispositivos están diseñados para soportar ensayos rigurosos y de alto rendimiento.

Sus niveles de operación varían en un rango de 58 a 72 decibeles, lo cual hace que no sea necesario el uso de cuartos aislados para su instalación y la presión con la cual opera puede ser de hasta 3000 PSI (21 MPa). En términos de seguridad, esta unidad de energía ofrece buenas condiciones al operador mediante su sistema de refrigeración y de interruptores eléctricos.



Figura 36. SilenFlow™ HydraulicPowerUnits- (González & Núñez, 2011)

3.4.4.2 Descripción del montaje experimental

El diseño del montaje experimental se llevó a cabo en varias etapas, teniendo en cuenta diversos factores, con el fin de contar con condiciones muy cercanas a las teóricas, y así obtener resultados confiables y una buena interpretación de los mismos. Algunos de los factores a tener en cuenta fueron: las cargas aplicadas a las vigas, la geometría del montaje, el diseño y construcción del empotramiento de los elementos estructurales y en general, las condiciones ofrecidas por el laboratorio.

- **Cargas**

Teniendo en cuenta el rango de cargas que pueden ser aplicadas por el sistema MTS, se realizó el diseño de las vigas, teniendo especial atención en el punto de fluencia de estos elementos estructurales. Además de esto, se analizaron las fuerzas y momentos generados en el empotramiento, a raíz de las cargas aplicadas en el extremo superior de la viga en voladizo. Realizando este análisis de cargas, fue posible determinar la estabilidad y rigidez del sistema estructural.

- **Geometría**

Para soportar el actuador hidráulico y ubicar las vigas en voladizo, se hizo uso de un marco metálico de 3,6m x 4,10m x 1,45m compuesto por perfiles tipo canal, como se muestra a continuación:

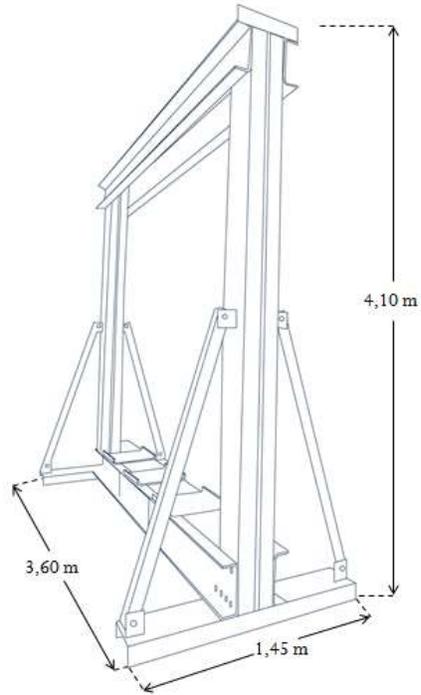


Figura 37. Marco metálico para soportar MTS. (Autores)

Las principales funciones del marco metálico son: ubicar el actuador hidráulico del sistema MTS y soportar el peso propio de las vigas, las cuales contarán con un sistema de empotramiento el cual se describe a continuación:

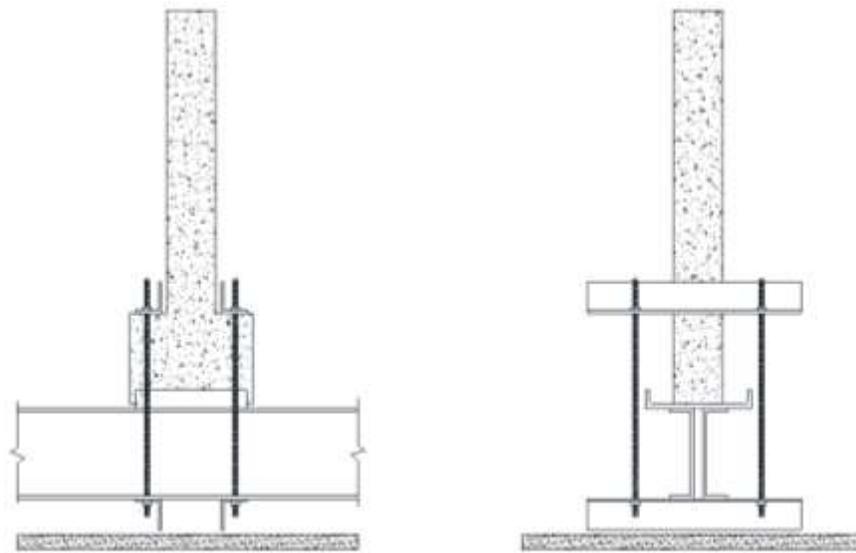


Figura 38. Sistema de empotramiento de los elementos estructurales (Autores)

El montaje consta de las siguientes piezas: cuatro ángulos ubicados como se indica en la Figura 38, dos sobre la parte inferior de la viga (donde empieza el empotramiento) y dos en la parte baja del marco. Las dimensiones de estos elementos son: 4" a cada lado y un espesor de 3/8" (cada uno). Para sujetarlos, fue necesario el uso de cuatro barras roscadas de 5/8" con tuercas grado ocho, con el fin de garantizar la rigidez del sistema estructural. En los anexos se puede observar con más detalle los planos de este montaje.

Para sujetar la viga al actuador hidráulico, fue necesario el diseño de un montaje que permitiera que ambos elementos se movieran en conjunto, garantizando así, condiciones muy cercanas a las teóricas. El aditamento consiste en una serie de platinas, las cuales rodean la viga y se unen al actuador hidráulico como se muestra en:

Figura 39 y

Figura 40. Para más detalle mirar los planos que se encuentran en los anexos.

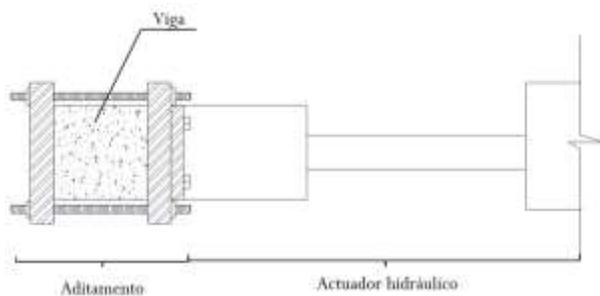


Figura 39. Esquema del aditamento para sujetar la viga al actuador hidráulico (Vista superior).



Figura 40. Aditamento para sujetar la viga al actuador hidráulico.

Con el fin de obtener un registro de aceleración en el tiempo, se hizo uso de dos dispositivos conocidos como “linear variable differential transducer” (LVDT), los cuales se ubicaron en una estructura rígida tipo cercha, fabricada en platina perforada con cuatro bases de fijación, como se muestra en la

Figura 41 y la Figura 42. Esta estructura se puede graduar para ubicar deformímetros en las diferentes ranuras de fijación.

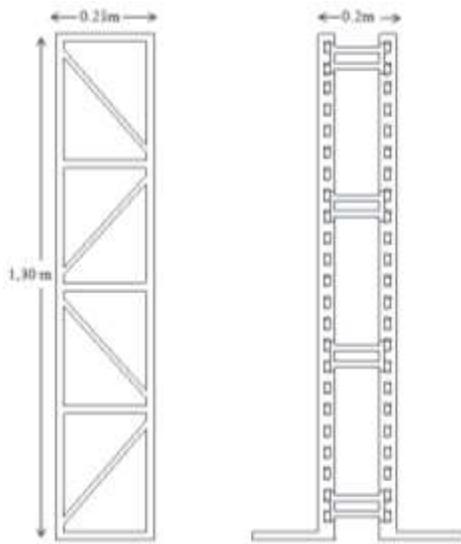


Figura 41. Estructura tipo cercha para soportar deformímetros.



Figura 42. Montaje de los deformímetros.

Una vez ensambladas todas las partes que componían el montaje de los ensayos pseudodinámicos, el resultado final es lo que se observa en la Figura 43 y Figura 44.

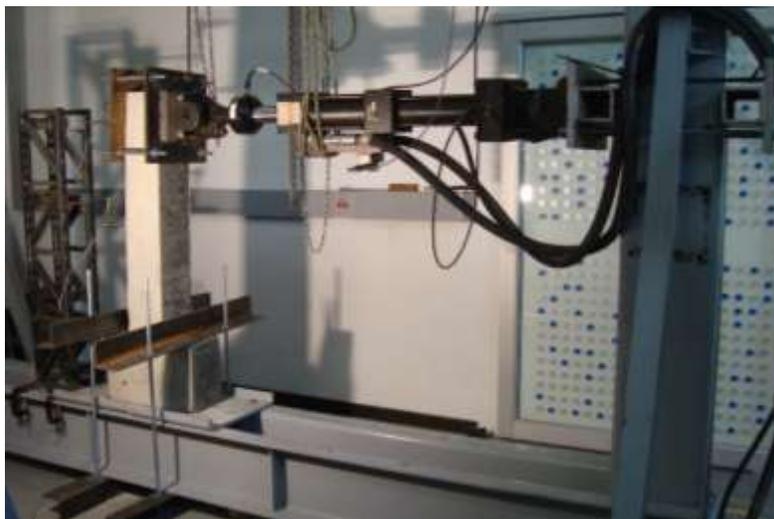


Figura 43. Montaje de ensayos pseudo-dinámicos.

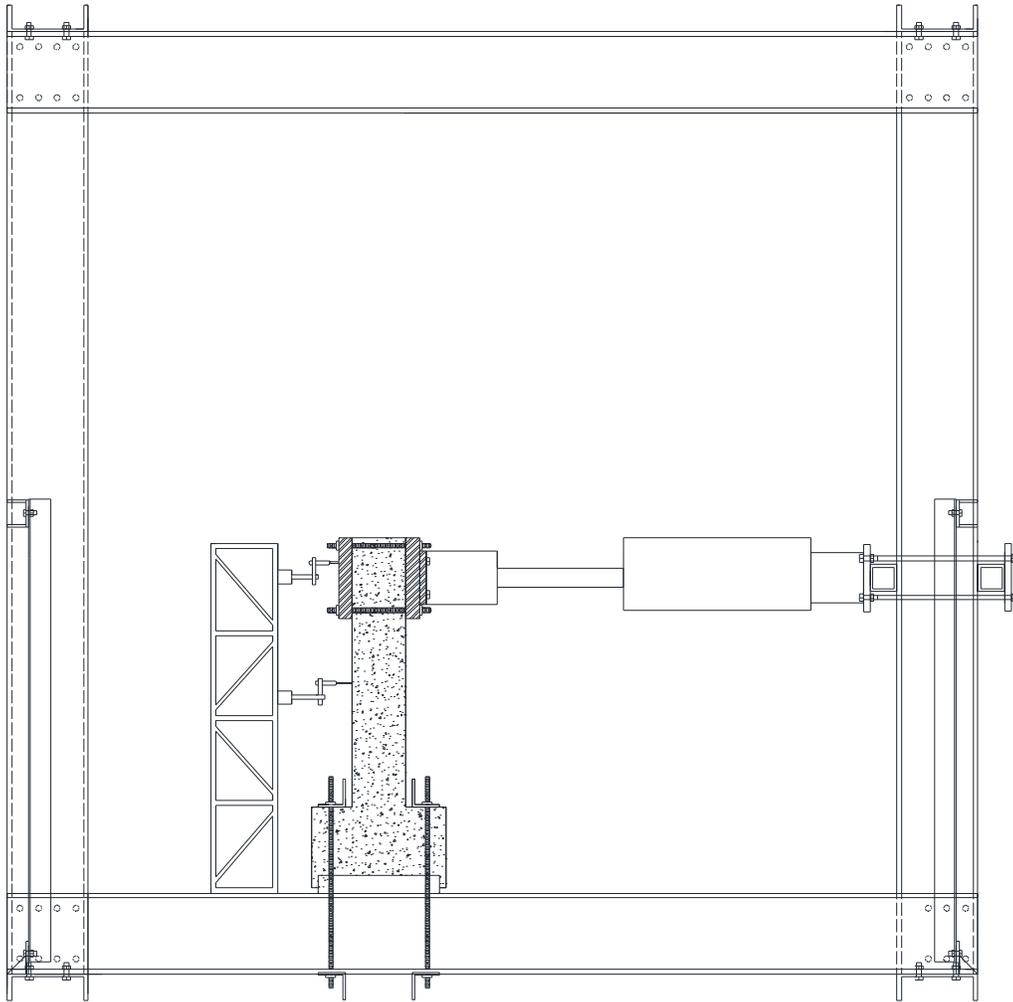


Figura 44. Esquema del montaje experimental para ensayos pseudo-dinámicos.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Con el fin de verificar la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas elaboradas y poder realizar comparaciones entre estas, se llevaron a cabo un total de nueve ensayos de resistencia a la compresión, los cuales dieron como resultado los valores mostrados en la Tabla 10. Dichos ensayos se realizaron en una máquina universal Shimadzu UH-100, a los veintiocho días de haber sido fundidos los elementos.

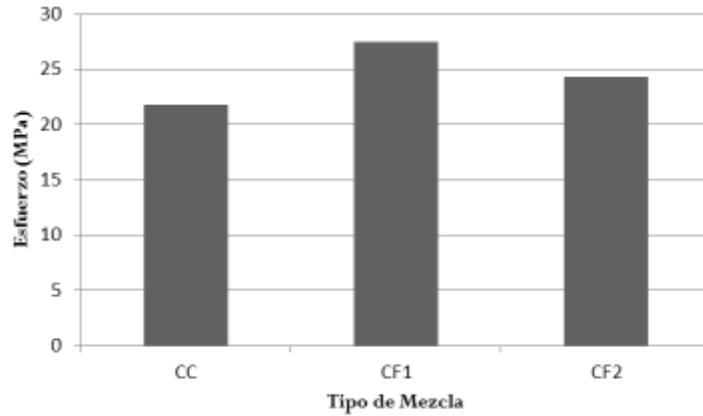
Tabla 10. Resistencia promedio a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días de fundida.

Tipo de Mezcla	CC	CF1	CF2
Resistencia a la Compresión (MPa)	21.75	27.45	24.36

Como se puede observar, la mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión fue CF1, seguida por CF2 y finalmente CC. Lo cual indica que para CF1 se presentó un incremento en la resistencia del 26%, mientras que en el caso de CF2 el incremento fue del 11%, con respecto a la mezcla de concreto convencional.

Tabla 11. Variación en la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto.

Tipo de Mezcla	CC	CF1	CF2
Variación de la resistencia a la compresión (%)	0%	26%	11%

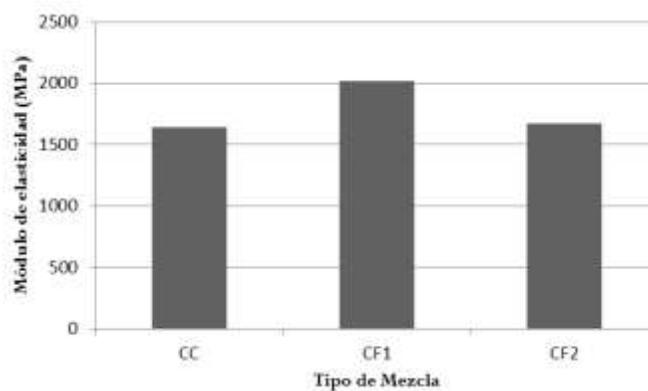


Gráfica 9. Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días.

Para los ensayos de módulo de elasticidad, se registraron valores similares para las mezclas de CC y CF2, mientras que para CF1 se obtuvo un módulo de elasticidad notablemente mayor que el de las otras mezclas de concreto. Los resultados se pueden observar en la Tabla 12 y la Gráfica 10.

Tabla 12. Módulo de elasticidad de las diferentes mezclas de concreto.

Tipo de Mezcla	CC	CF1	CF2
Módulo de Elasticidad (Mpa)	1646.16	2020.47	1675.35



Gráfica 10. Variación del módulo de elasticidad en las mezclas de concreto.

Tanto para los ensayos de resistencia a la compresión, como para los de módulo de elasticidad, la mezcla de concreto que presentó mejor desempeño fue CF1, que corresponde a la mezcla con adición de 15 kg/m^3 de fibras metálicas.

La resistencia a la compresión que presentó la mezcla de concreto convencional (CC) fue muy cercana a aquella con la que se realizó el diseño de mezcla, lo cual indica que la elaboración de los especímenes se realizó de manera adecuada y que la adición de fibras metálicas, mejora el comportamiento del concreto ante la aplicación de esfuerzos a compresión.

En el caso del módulo de elasticidad, las mezclas con adición de fibras metálicas (CF1 y CF2) presentaron un mejor desempeño que la mezcla de concreto convencional, obteniéndose un módulo notablemente mayor para CF1 que para CC; en el caso de CF2, el incremento fue muy bajo, pero aun así, mayor que para el concreto sin adición de fibras metálicas.

4.2 Resistencia flexural

Los ensayos de resistencia flexural se realizaron solo para las mezclas con adición de fibras metálicas, con el fin de conocer la capacidad de absorción de energía de estas. Se ejecutaron en total cuatro ensayos, dos para cada una de las mezclas ya mencionadas, estos ensayos se llevaron a cabo en la máquina universal como se muestra en la Figura 45 después de transcurridos 28 días desde el día que fueron fundidos.



Figura 45. Montaje del ensayo de resistencia flexural.

Para el cálculo de la resistencia flexural, se realizó la curva de carga-deflexión, con el fin de determinar la parte recta de la curva inicial, la cual corresponde al 50% de la carga máxima. Con respecto a esta recta, se traza una línea paralela desplazada 0.1 mm en el eje de la deflexión. La intersección de la línea paralela a la parte recta de la curva y la curva carga deflexión corresponde a la primera carga máxima ($P_{0,1}$), este valor es utilizado para hallar el valor de la resistencia flexural, la cual se calcula como una resistencia elástica a la tracción equivalente, como se muestra a continuación:

$$\text{Resistencia flexural (MPa)} = \frac{P_{0,1} \cdot L}{b \cdot d^2}$$

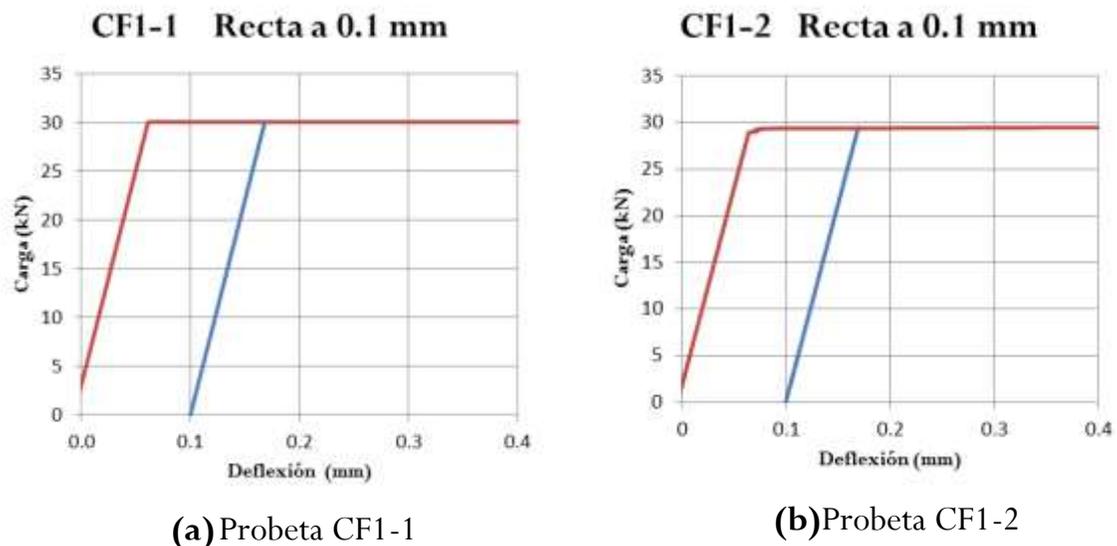
Donde $P_{0,1}$: Primera carga máxima (kN)

L: Longitud entre apoyos (50 cm)

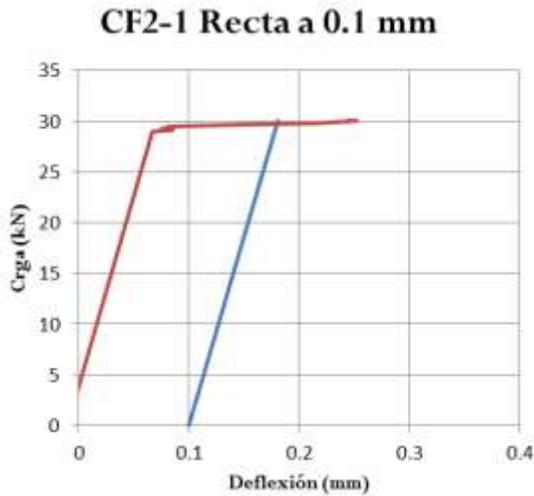
b: Ancho real de la viga (15 cm)

d: Altura real de la viga (15 cm)

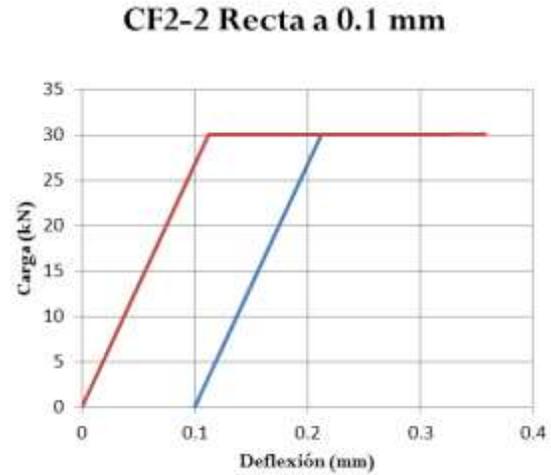
En la Gráfica 11 y la Gráfica 12, se pueden observar las curvas carga-deflexión y la carga máxima $P_{0,1}$ para cada uno de los especímenes elaborados.



Gráfica 11. Determinación de la resistencia flexural en viguetas con 15 kg/m³ de adición de fibras metálicas.



(a) Probeta CF2-2



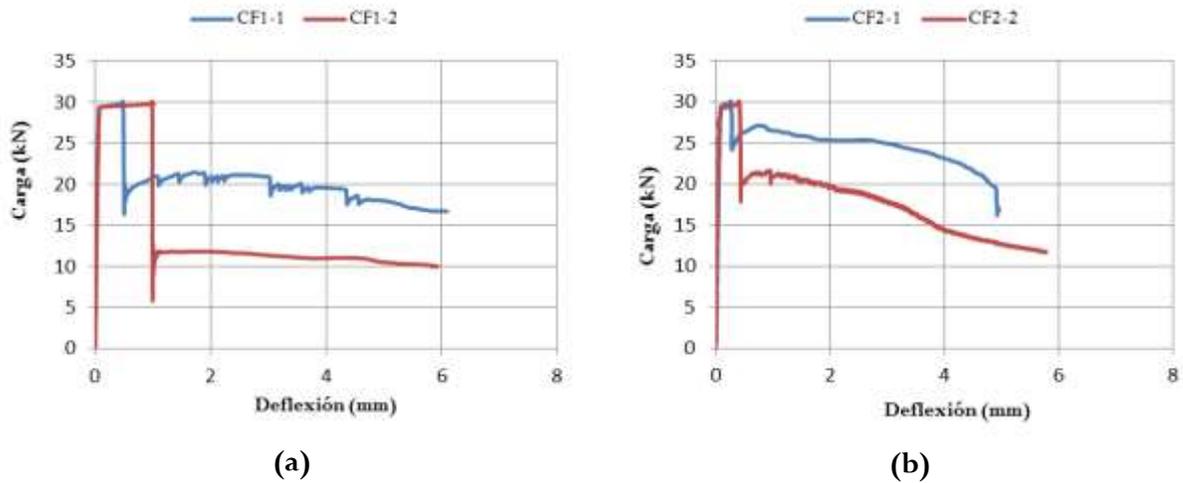
(b) Probeta CF2-1

Gráfica 12. Determinación de la resistencia flexural en viguetas con 30 kg/m³ de adición de fibras metálicas

Después de obtenidas las cargas máximas $P_{0,1}$, se calculó la resistencia flexural de cada una de las probetas. Dando como resultado los datos que se exponen en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados ensayos de resistencia flexural.

	CF1-1	CF1-2	CF2-1	CF2-2
Carga máxima (kN)	29.46	29.40	29.75	29.66
Resistencia flexural (Mpa)	4.36	4.36	4.41	4.39



Gráfica 13. Resultado de ensayos de resistencia flexural.

Para la mezcla CF1, el comportamiento de las dos probetas fue diferente, pues a pesar de que la carga máxima fue prácticamente la misma (cerca a los 30 kN), se presentaron fallas súbitas en valores de deflexión diferentes: en el caso de CF1-1 la falla se presentó a una deflexión cercana a 0,5mm, mientras que para CF1-2, se presentó a un valor de deflexión mayor, cercano a 1,2mm.

La mezcla CF2, presentó un comportamiento similar para las dos probetas, alcanzando una resistencia máxima cercana a los 30 kN en ambos casos, y con fallas súbitas en deflexiones cercanas a 0,5mm en ambos casos.

En la Figura 46 se pueden observar las viguetas después de realizados los ensayos de resistencia flexural.



(a) Mezcla CF1



(b) Mezcla CF2

Figura 46. Viguetas después de realizado el ensayo de resistencia flexural.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia flexural es posible afirmar que aunque todas las probetas alcanzaron una carga a flexión máxima similar, la mezcla CF1 presenta caídas súbitas de carga superiores a CF2, lo cual indica que CF1 posee una resistencia residual en promedio más baja que CF2, ya que esta última es capaz de disipar más energía después de la falla.



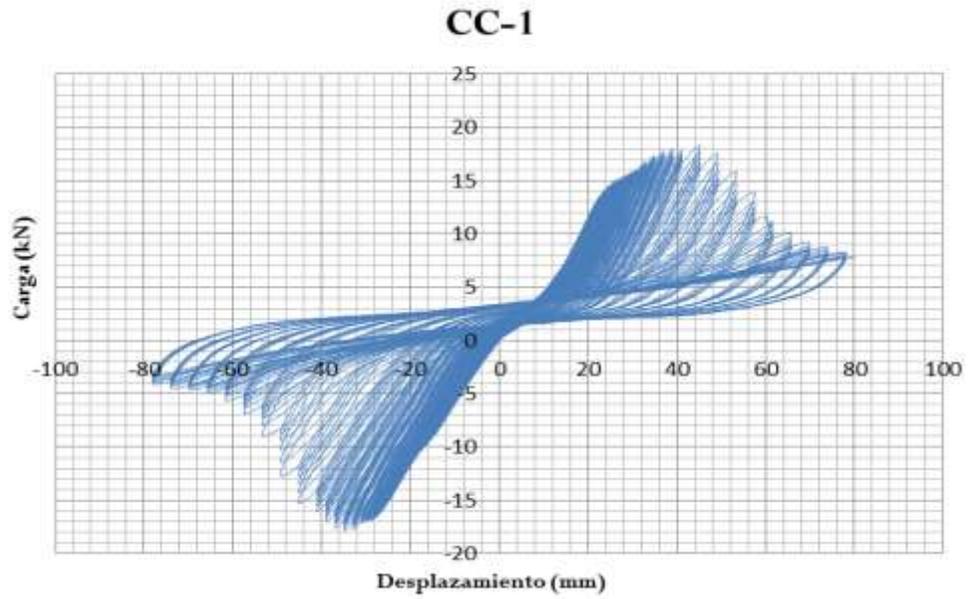
Figura 47. Falla de vigueta con adición de fibras metálicas.

Como se muestra en la Figura 47, las fibras metálicas no fallaron, algunas se desprendieron de la matriz de concreto pero la mayoría quedaron ancladas, retrasando el crecimiento de las fisuras y aportando tenacidad al material.

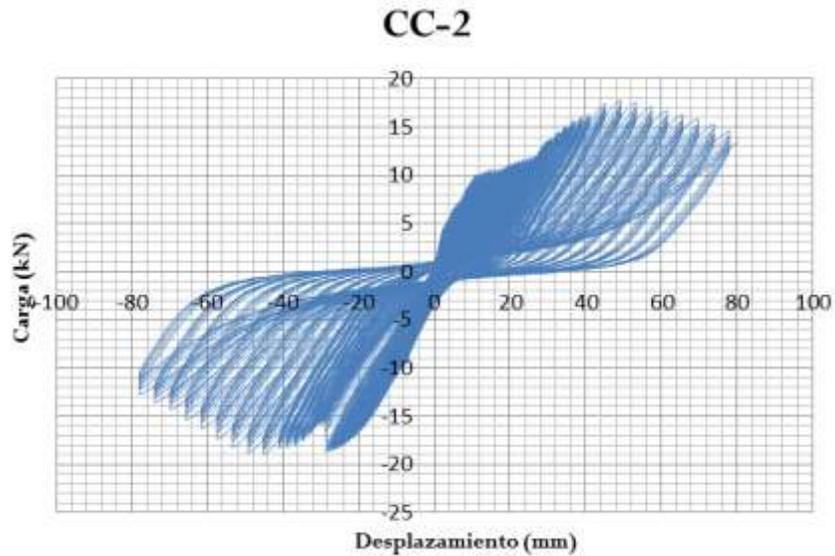
4.3 Ensayos pseudo-dinámicos

Los ensayos pseudo-dinámicos se realizaron para las seis vigas en voladizo. Los datos de carga y desplazamiento se graficaron para cada uno de los especímenes, dando como resultado los ciclos de histéresis mostrados a continuación:

- CONCRETO CONVENCIONAL

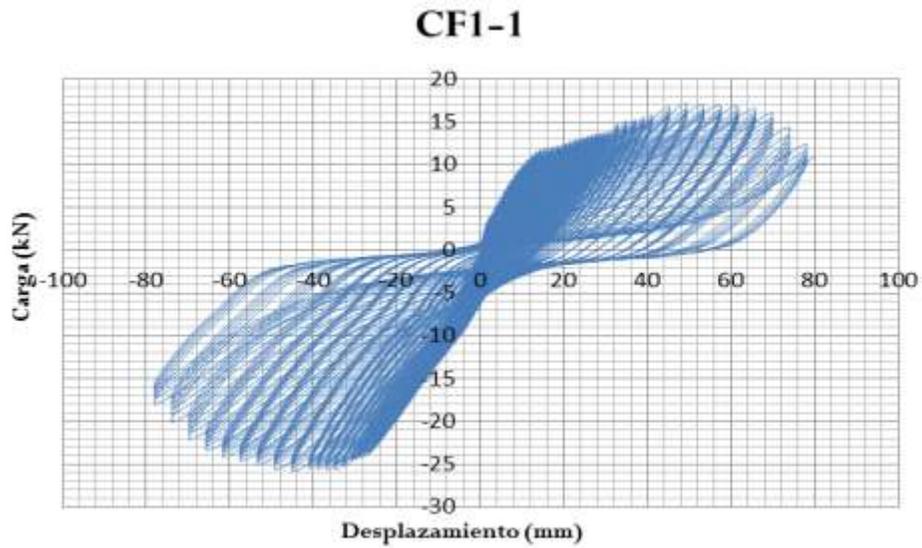


Gráfica 14. Ciclo de histéresis probeta CC-1.

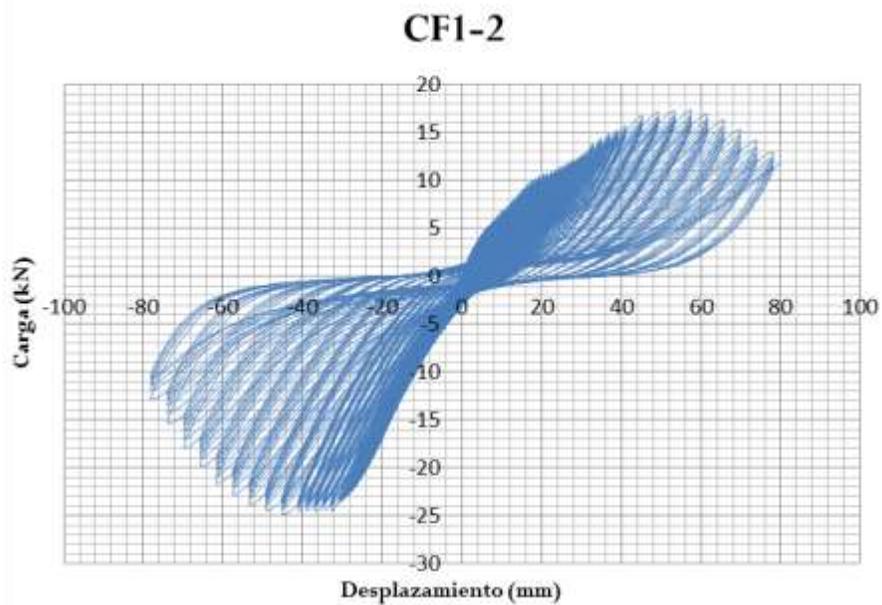


Gráfica 15. Ciclo de histéresis probeta CC-2.

- CONCRETO CON ADICIÓN DE 15 kg/m³ DE FIBRAS METÁLICAS

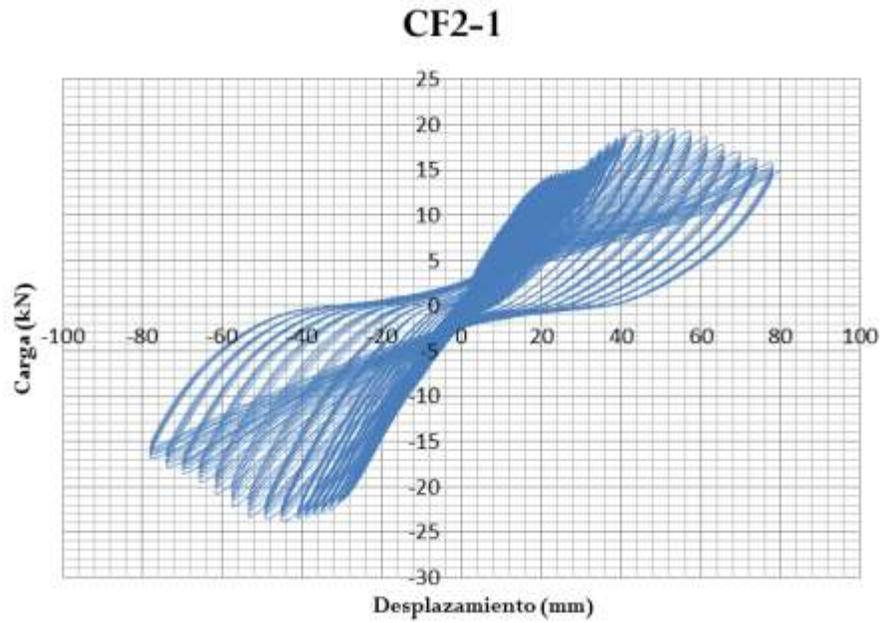


Gráfica 16. Ciclo de histéresis probeta CF1-1.

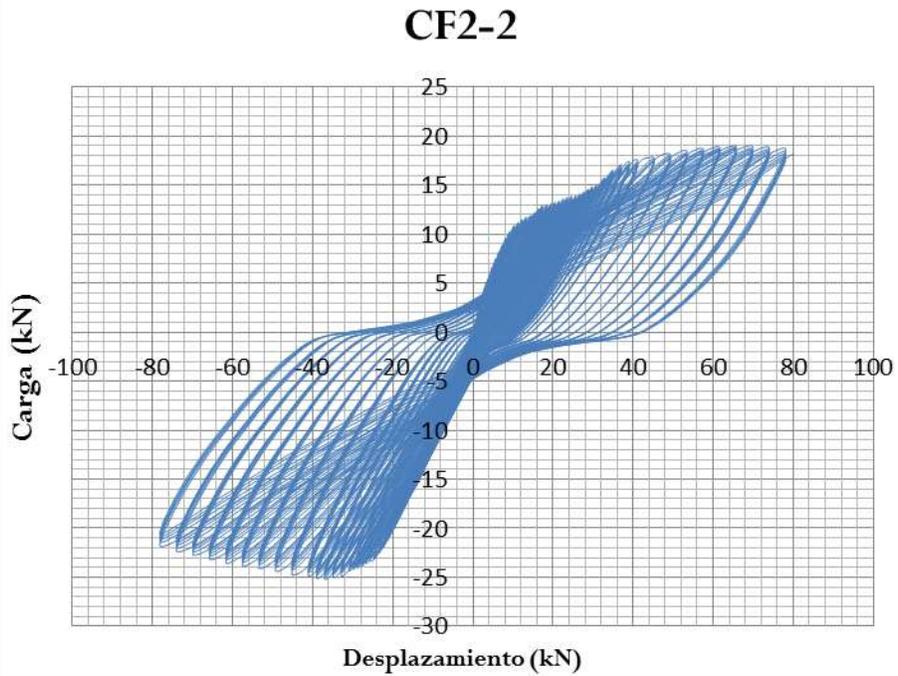


Gráfica 17. Ciclo de histéresis probeta CF1-2.

- CONCRETO CON ADICIÓN DE 30 kg/m³ DE FIBRAS METÁLICAS

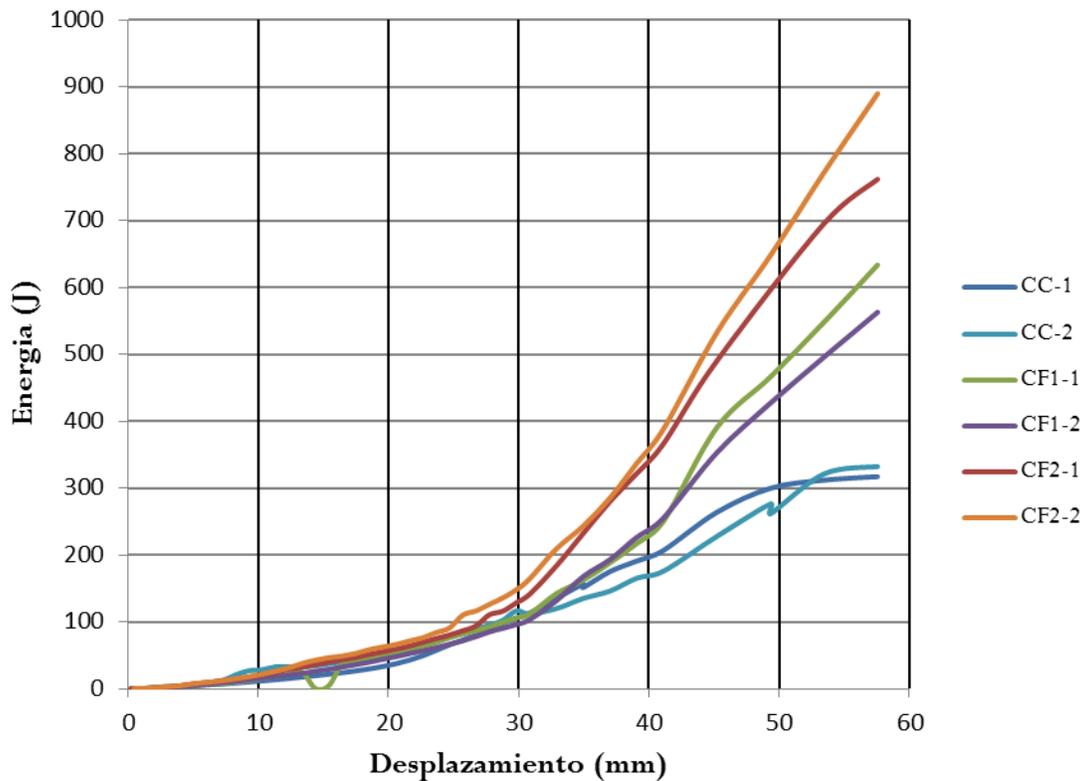


Gráfica 18. Ciclo de histéresis para probeta CF2-1.



Gráfica 19. Ciclo de histéresis probeta CF2-2.

Una vez conocidos los ciclos de histéresis obtenidos durante todo el ensayo, se realizó el cálculo de la energía disipada en un solo ciclo, para diferentes amplitudes entre 0 mm y 70.0 mm; este procedimiento se realizó para los seis especímenes estudiados y el resultado se muestra en la Gráfica 20.



Gráfica 20. Disipación de energía de vigas en voladizo durante ensayos pseudodinámicos.

Es posible inferir a partir de los resultados obtenidos en los seis ensayos pseudodinámicos, que para cada uno de los tres tipos de mezcla, la tendencia inicial es la misma, pero cuando empiezan a aparecer las fisuras, a un desplazamiento cercano a los 10 mm, cambia el amortiguamiento histérico de estas, ya que las fibras empiezan a actuar disipando energía.

El comportamiento de CC-1 y CC-2, fue bastante similar, disipando un máximo de energía cercano a los 300 J, siendo el nivel más bajo entre las tres mezclas de concreto, lo cual era de esperarse, ya que esta mezcla no tiene adición de fibras metálicas

La energía máxima disipada por CF-1, fue de 600J. Esta mezcla tuvo un mejor comportamiento que la de concreto convencional, gracias a que las fibras empezaron a actuar retardando las fisuras y aumentando el amortiguamiento del elemento, lo cual lo hace que su desempeño sea superior al de CC, disipando el doble de energía.

Finalmente, el desempeño de la mezcla CF2 fue superior al de CF-1 y al de CC. La alta capacidad para disipar energía, con respecto a las otras mezclas, se empieza a hacer muy notable a partir de desplazamientos cercanos a los 30mm. Estos especímenes con adición de 30 kg/m^3 de fibras metálicas, alcanzaron niveles de disipación de energía superiores a 800J, lo cual deja en evidencia que las fibras metálicas mejoran el comportamiento de los elementos estructurales sometidos a cargas dinámicas, ya que al retardar la formación de fisuras disminuye notablemente el nivel de daños de dichos elementos.

Como se muestra en la Tabla 14 y la Tabla 15, los daños ocasionados en las vigas en voladizo, variaron notablemente de una mezcla a otra. Para CC, las fisuras empiezan a ser muy pronunciadas desde los 20 mm de desplazamiento, propagándose con más facilidad y más velocidad que en CF-1 y CF-2. Los especímenes de CC, fueron los que tuvieron un mayor nivel de daños tanto al inicio como al final del ensayo.

En el caso de CF-1, las fisuras iniciaron en desplazamientos cercanos a los 20 mm, propagándose de manera similar a CC, pero en menor grado. El estado final de los especímenes fue mucho mejor en CF-1 que en CC, ya que las fibras metálicas lograron disipar más energía y prevenir la formación de fisuras, todo eso dio como resultado que el deterioro de estas vigas fuera menor.

Finalmente, la mezcla de CF-2, presentó el nivel de daños más bajo de las tres, ya que su alto contenido de fibras metálicas, le permitió disipar más energía y evitar la propagación de las fisuras. El resultado final de los especímenes correspondientes a CF-2, fue muy satisfactorio, ya que no quedaron en mal estado como los elaborados con CC.

En términos generales, la Tabla 14 y la Tabla 15, muestran una comparación clara entre las vigas correspondientes a CC, CF-1 y CF-2. Es posible apreciar que a mayor desplazamiento, mayor número de fisuras en las probetas; pero de igual manera los daños disminuyen, a medida que aumenta la adición de fibras en la mezcla de concreto.

En la Figura 48 se muestra la zona a la cual se le hizo el análisis de los daños sufridos a causa de las cargas dinámicas que fueron aplicadas en el extremo de la luz, dicha zona delimitada por el círculo rojo será la que se fotografiara y mostrara en las Tabla 14 y la Tabla 15.

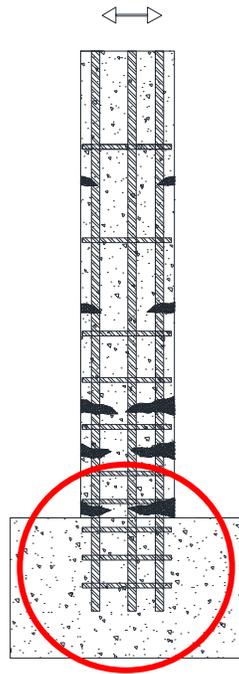


Figura 48. Detalle de la zona de análisis de la evolución de los daños.

Tabla 14. Evolución de fisuras en vigas en voladizo (Derivas de 1%, 2% y 3%)

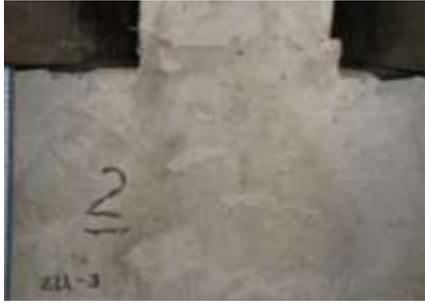
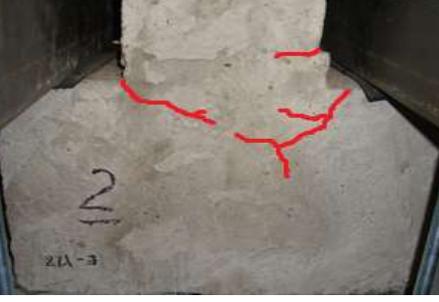
Deriva	CC	CF1	CF2
1%			
2%			
3%			

Tabla 15. Evolución de fisuras en vigas en voladizo (Derivas de 4%, 5% y 6%)

Deriva	CC	CF1	CF2
4%			
5%			
6%			

5. CONCLUSIONES

1. Se concluyó que las fibras metálicas mejoran propiedades del concreto tales como: la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Para la adición de 15 kg/m^3 , el aporte de las fibras fue más notorio que para la de 30 kg/m^3 , presentando incrementos del 26% en resistencia a la compresión y de 22% en el módulo de elasticidad con respecto a la mezcla de concreto convencional. Para la mezcla CF2, la resistencia a la compresión aumentó en un 11% y el módulo de elasticidad fue casi el mismo que para la mezcla CC, con un valor cercano al 1%.
2. La capacidad de disipación de energía se incrementa de manera proporcional al porcentaje de adición de fibras metálicas en las mezclas de concreto. Esta variación es clara, pues la diferencia de energía disipada en Julios, entre la mezcla de concreto convencional y las mezclas con adición es bastante notoria, siendo mayor la energía disipada por la mezcla CF2 con un valor cercano a los 900J, mientras que para CF1 la energía disipada no superó los 700J.
3. El nivel de daños en los diferentes tipos de mezclas cambió de manera considerable, teniendo en cuenta el proceso de formación de fisuras, y el resultado final de los especímenes que fueron ensayados. En el caso del concreto convencional, las fisuras aparecieron en desplazamientos menores que en las mezclas CF1 y CF2, y la velocidad de propagación de dichas fisuras fue mucho mayor que para los otros casos; el estado final de las probetas para CC, fue bastante deficiente, ya que el concreto sufrió fuerte descascamiento especialmente en los lugares cercanos al nodo. Para la mezcla CF1, la aparición de las fisuras se dio en desplazamientos similares a los de CC, pero la velocidad con que se propagaron las mismas fue menor, dando como resultado final unos especímenes menos fisurados y solo con indicios de descascamiento del material. Finalmente, en el caso de CF2, las fisuras aparecieron a desplazamientos mayores que para los casos anteriores, el estado final de las probetas elaboradas con esta mezcla fue el más satisfactorio, ya que el número de fisuras, la longitud y el espesor de estas fue significativamente menor que en CC y CF1.

Teniendo en cuenta la información anterior es posible concluir que las fibras metálicas contribuyen de manera muy notable a contrarrestar el nivel de daños en vigas en voladizo de concreto reforzado ante excitaciones dinámicas.

4. El comportamiento dinámico de las vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras metálicas es muy superior al de las vigas elaboradas sin ningún tipo de adición, ya que las fibras incrementan notablemente la capacidad de disipación de energía de estas.
5. El comportamiento de las vigas en el rango elástico es igual para todas las mezclas, ya que las fibras metálicas empiezan a actuar una vez empiezan a aparecer las fisuras y cuando se alcanza el rango inelástico.
6. Siendo esta investigación un primer estudio sobre el comportamiento dinámico de elementos estructurales de concreto reforzado con fibras metálicas se recomienda hacer un análisis económico, donde se evalué el costo-beneficio en la implementación de este proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACI, Seccional Colombiana. (2010). Seminario de concreto fibro-reforzado. Bogotá.
- Alfonso, J.R., Badillo, O.O., (2011) Evaluación de la capacidad de disipación de energía de concreto con fibras metálicas y de caucho de desecho de llanta. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Bekaert S.A. (2005). Product Data Sheet Dramix RC 65/60 BN. Zwevegem, Bélgica: Ann Lambrechts.
- Buyle-Bodin, F., Madhkhan, M., 2002. Seismic behaviour of steel fibre reinforced concrete piles. *Mat. Struct.* 35, 402–407.
- Cardona, L. (Octubre de 2010). Concreto con fibras de acero: aplicaciones. ACI Seccional Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Ding, Y., Kusterle, Wolfgang., 1999. Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research* 29, 1827–1834.
- Dora, A.G.K., Hamid, N.H.A., 2012. Seismic Performance of SFRC Beam-Column Joint with Corbel under Reversible Lateral Cyclic Loading. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* 4, 76–80.
- Ferdinand P. Beer, E. R. (1982). *Mecánica de Materiales*. Connecticut: Mc Graw Hill.
- Gallego, M., & Sarria, A. (2010). *El Concreto y los Terremotos*. Bogotá: Asocreto.
- Ioan Olariu, A. M. (1992). Seismic Behaviour of Steel Fiber Concrete Beam-Column. *Earthquake Engineering, Teth World Conference* , 10.
- Kay, D., & Hamid, A. (2012). Seismic Performance of SFRC Beam-Column Joint with Corbel Under Reversible Lateral Cyclic Loading . *International Journal of Engineering and Technology* , 5.
- Maccaferri. (s.f.). *Fiber Reinforced Concrete. Origin of the Species*. Recuperado el 4 de Mayo de 2012, de <http://www.maccaferri.co.uk/PAGES00560.html>
- Marmol, P. (2010). *Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas* . Madrid : Universidad Politécnica de Madrid.

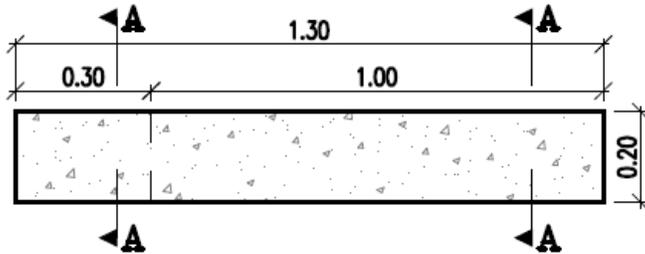
- Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites* 31, 601–605.
- Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P., 2000. Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and Concrete Research* 30, 593–597.
- Shakya, K., Watanabe, K., Matsumoto, K., Niwa, J., 2012. Application of steel fibers in beam– column joints of rigid-framed railway bridges to reduce longitudinal and shear rebars. *Construction and Building Materials* 27, 482–489.
- Sika S.A. (2010). *Concreto reforzado con fibras*. Sika Informaciones Técnicas , 1-26.
- Wight, J., 2011. *Earthquake-Resistant Design of Coupling Beam Elements Incorporating High-Performance Fiber Reinforced Concrete*.
- Zollo, Ronald F. 1997. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2): 107-122.

8. ANEXOS

ANEXO 1- DETALLADO ESTRUCTURAL DE LAS VIGAS

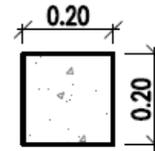
GEOMETRÍA PLANTA

ESCALA: 1/10 PLIEGO



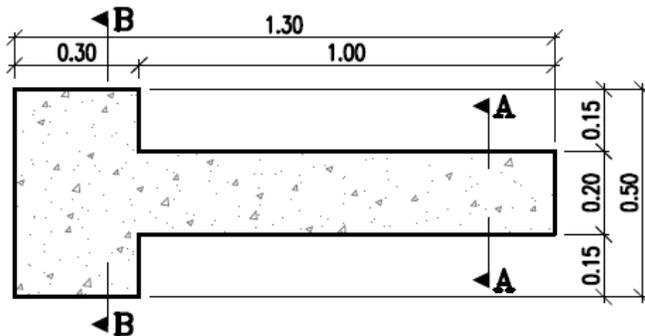
GEOMETRÍA CORTE A-A

ESCALA: 1/10 PLIEGO



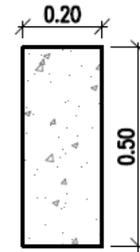
GEOMETRÍA ALZADO

ESCALA: 1/10 PLIEGO



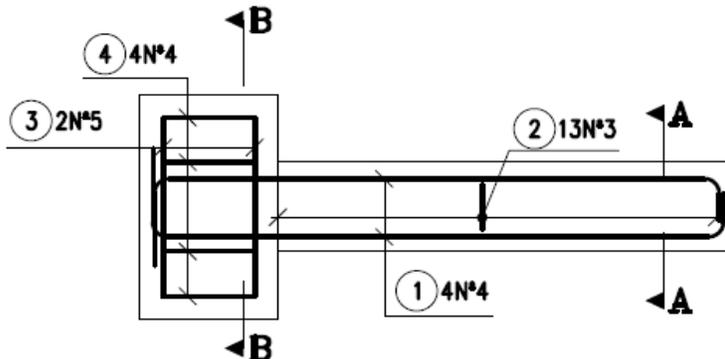
GEOMETRÍA CORTE B-B

ESCALA: 1/10 PLIEGO



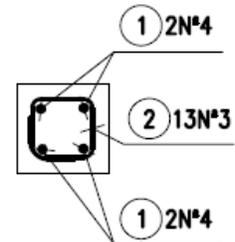
ARMADO ALZADO

ESCALA: 1/10 PLIEGO



ARMADO CORTE A-A

ESCALA: 1/10 PLIEGO



DESPIECE

POSC.	No.	N° PIEZAS	LONGITUD PARCIAL (m)	FORMA L=(cm)	LONGITUD TOTAL (m)
1	4	4	1.54		6.16
2	3	13	0.76		9.88
3	5	2	1.53		3.06
4	4	4	1.06		4.24

RESUMEN

No.	LONGITUD TOTAL (m)	PESO kg/m	PESO Kg
5	3.06	1.56	4.77
4	10.40	1.00	10.40
3	9.88	0.56	5.53
PESO TOTAL			20.70 kg

CONCRETO

ELEMENTO	TIPO
VIGA	$f'c = 210 \text{ Kgf/cm}^2$ (21MPa)

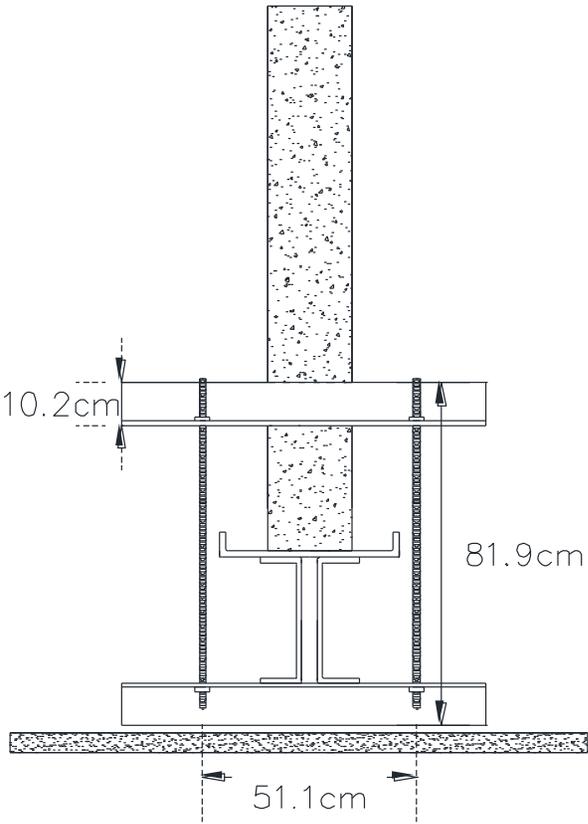
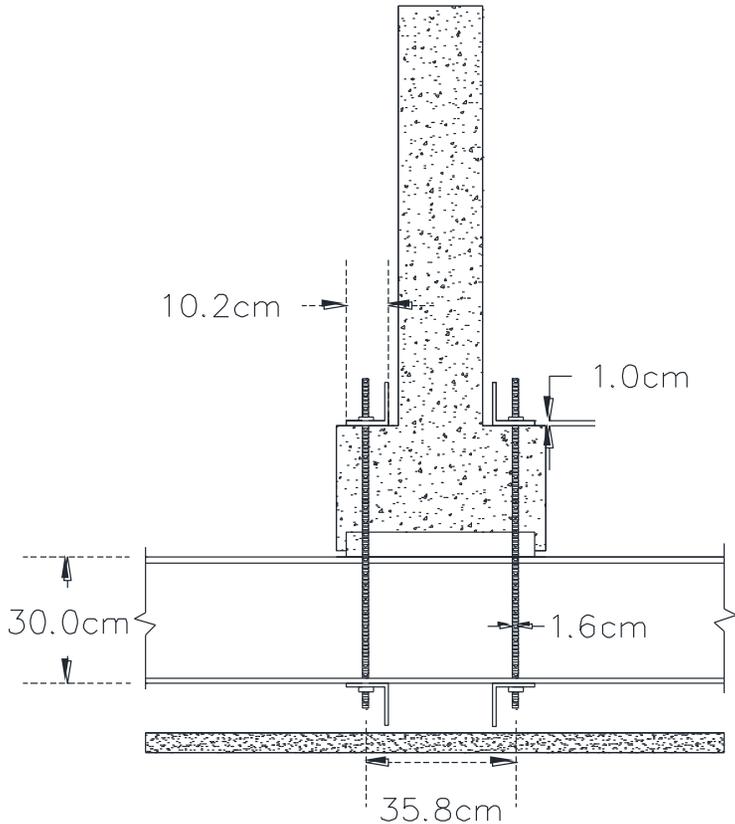
ACEROS

TIPO	RESISTENCIA
ACERO DE REFUERZO CORRUGADO GRADO 60	$f_y = 4200 \text{ Kgf/cm}^2$ (420MPa)

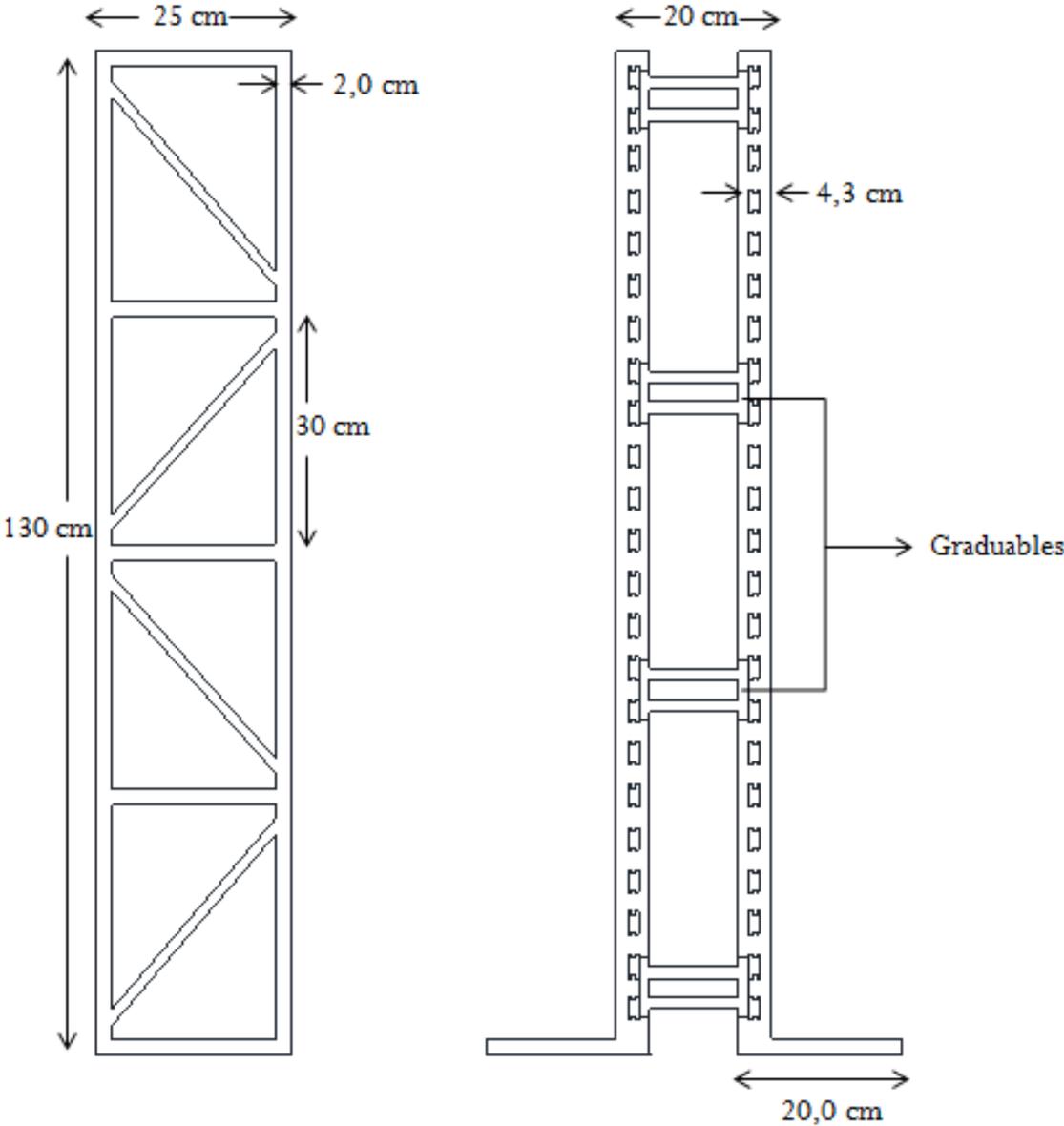
**DE ACUERDO CON LA CLASIFICACIÓN ASTM.*

RECUBRIMIENTOS:
AL BORDE: 30mm

ANEXO 2- DETALLADO EMPOTRAMIENTO



ANEXO 3. – DETALLE DE LA CERCHA PARA SOSTENER LVDTs



ANEXO 4 – FICHA TÉCNICA FIBRAS METÁLICAS



Description: Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-65/60-BN is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.

- Applications:**
- slabs on vibrocompacted piles
 - liquid tight floors
 - industrial floors
 - overlays
 - piles
 - suspended ground slabs
 - composite slabs
 - segmental linings
 - cellar walls
 - pavements
 - jointless floors
 - jointless floors on vibrocompacted piles
 - outdoor slabs
 - foundation slabs

Geometry:

Length (l) 60 mm
Diameter (d) 0,90 mm

Performance class: 65
Aspect ratio (= l/d): 67
3200 fibres/kg

Tensile strength:

- on the wire: 1000 N/mm²
- low carbon conforms to EN 10016-2 - C90

Coating: None

Approvals:

Conforms to **ASTM A820**

Product Belgium **ATG 04/1857**

The Netherlands **22702**

Turkey **TS 10513**

Czech Republic **C.070-021415**

Quality System in Belgium, Brazil, Czech, Turkish and Chinese plants

Product Poland **AT-15-2117/2001**

Romania **007-01/068-2003**

Germany **Z-3.71-1745**

Slovak Republic **1402A/02/07711/C/C04**

Technical data:
For industrial floors, floors on vibrocompacted piles, jointless floors... ask for specialized documentation.

PRODUCT DATA SHEET BEKAERT

Recommendations - mixing

1. General

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m ³)	
	pour	pump
8	110	80
16	70	55
32	40	45

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended

2. Fibre addition

Bags are non-degradable and may not be thrown into the concrete.



2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete

2.2. Truckmixer

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 60 kg/min
- ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)

2.3. Automatic dosing

- ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3,5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

Recommendations - storage

Protect the pallets against rain

Do not stack the pallets on top of each other

Delivered in non water-soluble bags of 20 kg on pallet (3200 kg)

big bag 1100 kg

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwagaam - Belgium
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. NV Bekaert SA 2016

ANEXO 5- EQUIPO DE TRABAJO



Yo Daniel Mauricio Ruíz Valencia, he revisado y aprobado el presente de trabajo de gradopara optar por el título de ingeniero civil.

Firma

Diciembre 3 de 2012

Yo María Patricia León Neira, he revisado y aprobado el presente trabajo de gradopara optar por el título de ingeniero civil.

Firma

Diciembre 3 de 2012