

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE CONCRETO
CON FIBRAS METÁLICAS Y DE CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA



JAVIER RICARDO ALFONSO RODRÍGUEZ
OSCAR ORLANDO BADILLO PERALTA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
DICIEMBRE 2011

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE CONCRETO
CON FIBRAS METÁLICAS Y DE CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA



JAVIER RICARDO ALFONSO RODRÍGUEZ
OSCAR ORLANDO BADILLO PERALTA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR: ING. DANIEL MAURICIO RUIZ VALENCIA
CODIRECTOR: ING. MARÍA PATRICIA LEÓN NEIRA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
DICIEMBRE 2011

REGLAMENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Art. 23 de la resolución No. 13 del 6 de Julio de 1964

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque las tesis no contengan ataques o polémicas puramente personales; antes bien, se ve en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.



AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, por el apoyo y consejos dados a lo largo de la carrera y aún más en esta última etapa, sin su apoyo y colaboración incondicionales los resultados no habrían sido los obtenidos.

A los directores del presente trabajo de grado, el Ingeniero Daniel Mauricio Ruiz y la Ingeniera María Patricia León, por su orientación, ofrecimiento y soporte a lo largo del desarrollo del presente trabajo de grado.

A las empresas SIKA Colombia S.A. y BEKAERT S.A., por su ofrecimiento al suministrar algunos de los materiales necesarios para desarrollar el presente trabajo de grado.

A la Pontificia Universidad Javeriana por la formación académica y personal brindada a lo largo de nuestro proceso de aprendizaje, igualmente por el suministro de materiales y equipos empleados para el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo y tiempo durante la planeación y ejecución del presente trabajo de grado.

CONTENIDO

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 20 |
| 1 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 21 |
| 2 OBJETIVOS..... | 23 |
| 2.1 OBJETIVOS GENERALES | 23 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 23 |
| 3 MARCO TEÓRICO | 24 |
| 3.1 TENACIDAD..... | 24 |
| 3.2 CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA..... | 24 |
| 3.2.1 Composición | 25 |
| 3.2.2 Problemática de las llantas como residuos..... | 27 |
| 3.2.3 Disposición y manejo de las llantas..... | 29 |
| 3.3 CONCRETO HIDRÁULICO ADICIONADO CON CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA 34 | |
| 3.3.1 Historia..... | 34 |
| 3.3.2 Concreto adicionado con caucho de llanta en estado fresco..... | 35 |
| 3.3.3 Concreto adicionado con caucho de llanta en estado endurecido..... | 36 |
| 3.4 FIBRAS METÁLICAS..... | 42 |
| 3.4.1 Definición | 42 |
| 3.4.2 Historia | 43 |
| 3.4.3 Clasificación..... | 44 |
| 3.4.4 Tenacidad | 48 |
| 3.4.5 Dosificación y mezclado | 52 |
| 3.5 ENSAYOS DE TENACIDAD | 53 |
| 3.5.1 Placa circular (ASTM C – 1550)..... | 53 |
| 3.5.2 Placa cuadrada (EFNARC)..... | 59 |
| 3.5.3 Resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC)..... | 63 |
| 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 67 |
| 4.1 DISEÑO DE MEZCLA | 67 |
| 4.2 TIRAS DE CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA | 69 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3 | FIBRAS METÁLICAS..... | 70 |
| 4.4 | ENSAYOS DE LABORATORIO..... | 71 |
| 4.4.1 | Caracterización..... | 71 |
| 4.4.2 | Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad | 71 |
| 4.4.3 | Absorción de energía | 72 |
| 5 | RESULTADOS | 76 |
| 5.1 | ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN..... | 76 |
| 5.2 | ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD | 78 |
| 5.3 | ENSAYOS DE PLACA CIRCULAR | 80 |
| 5.4 | ENSAYOS DE PLACA CUADRADA..... | 85 |
| 5.5 | ENSAYOS DE RESISTENCIA FLEXURAL Y TENSIÓN RESIDUAL EN VIGAS | 89 |
| 6 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 95 |
| 6.1 | ENSAYOS DE PLACA CIRCULAR | 95 |
| 6.2 | ENSAYOS DE PLACA CUADRADA..... | 97 |
| 6.3 | ENSAYOS DE RESISTENCIA FLEXURAL Y TENSIÓN RESIDUAL | 100 |
| 7 | CONCLUSIONES..... | 105 |
| 8 | RECOMENDACIONES | 107 |
| 9 | REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA..... | 108 |
| 10 | ANEXOS | 112 |



*EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE CONCRETO
CON FIBRAS METÁLICAS Y DE CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA*

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 - Componentes generales de las llantas (Castro, 2007)..... | 25 |
| Tabla 2 – Elementos químicos que componen la llanta (Castro, 2007) | 25 |
| Tabla 3 – Destinación de las llantas en Estados Unidos (EPA, 2010) | 28 |
| Tabla 4 – Diseño de mezcla..... | 67 |
| Tabla 5 – Número de ensayos de resistencia a la compresión por tipo de mezcla | 72 |
| Tabla 6 – Distribución de ensayos de absorción de energía por tipo de mezcla | 72 |
| Tabla 7 – Resultados ensayos de laboratorio, agregado fino y agregado grueso | 76 |
| Tabla 8 – Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días de fundida..... | 78 |
| Tabla 9 – Variación en porcentaje de la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla sin adición | 78 |
| Tabla 10 - Categorías de resistencia residual (EFNARC, 1993)..... | 92 |
| Tabla 11 – Resultados ensayos resistencia flexural y tensión residual | 92 |
| Tabla 12 – Energía absorbida y carga máxima en ensayos de placa circular | 96 |
| Tabla 13 – Requisitos de absorción de energía (EFNARC, 1993)..... | 97 |
| Tabla 14 – Energía absorbida en ensayos de placa cuadrada | 98 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Sección transversal de una llanta (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006)..... | 26 |
| Figura 2 – Mecanismos de absorción de energía fibra/matriz (Zollo, 1996)..... | 49 |
| Figura 3 – Esquema placa circular (ASTM C 1550-10)..... | 54 |
| Figura 4 – Esquema montaje placa circular (ASTM C 1550-10)..... | 55 |
| Figura 5 – Esquema placa cuadrada (EFNARC)..... | 59 |
| Figura 6 – Esquema montaje ensayo placa cuadrada (EFNARC)..... | 60 |
| Figura 7 – Esquema viga (EFNARC)..... | 63 |
| Figura 8 – Corte y orientación de vigas obtenidas de panel de hormigón proyectado (EFNARC, 1993)..... | 63 |
| Figura 9 – Esquema montaje de ensayo resistencia flexural en viga (EFNARC)..... | 64 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 – Asentamiento con diferentes porcentajes de caucho (Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008) | 36 |
| Gráfico 2 – Densidad con diferentes porcentaje de caucho (Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008)..... | 37 |
| Gráfico 3 – Curva carga-desplazamiento cilindros en concreto con adición de caucho (Toutanji, 1996)..... | 37 |
| Gráfico 4 – Resistencia a la compresión como función del porcentaje de caucho (Toutanji, 1996) | 38 |
| Gráfico 5 – Curva esfuerzo a la compresión vs deformación unitaria (Topçu, 1995) | 38 |
| Gráfico 6 – Curva carga-desplazamiento de vigas sin adición y con adición de caucho (Toutanji, 1996)..... | 40 |
| Gráfico 7 – Curva carga-desplazamiento muestra de concreto control y muestra con adición de caucho (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004) | 40 |
| Gráfico 8 – Resistencia a la compresión promedio de concreto de alta resistencia adicionado con fibras metálicas en diferentes porcentajes (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009)..... | 46 |
| Gráfico 9 – Resistencia a la compresión de concreto adicionado con diferentes porcentajes de fibras metálicas (ACI, Seccional Colombiana, 2010)..... | 46 |
| Gráfico 10 – Resistencia a la compresión de concreto adicionado con fibras con diferente relación de aspecto (ACI, Seccional Colombiana, 2010) | 47 |
| Gráfico 11 – Comparación de la resistencia a la compresión de concretos adicionados con diferentes porcentajes de fibras metálicas (Ding & Wolfgang, 1999)..... | 48 |
| Gráfico 12 – Promedio de curvas carga-desplazamiento de concretos de alta resistencia, reforzados y sin reforzar, con diferentes contenidos de fibras (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009) | 51 |
| Gráfico 13 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002) | 58 |
| Gráfico 14 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002) | 58 |
| Gráfico 15 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla sin adición (Canals i Llopart, 2002) | 58 |
| Gráfico 16 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002) | 62 |
| Gráfico 17 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002) | 62 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 18 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla sin adición (Canals i Llopart, 2002) | 62 |
| Gráfico 19 – Resultados de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002) | 65 |
| Gráfico 20 – Resultados de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002) | 66 |
| Gráfico 21 – Análisis granulométrico agregado fino | 76 |
| Gráfico 22 – Análisis granulométrico agregado grueso | 77 |
| Gráfico 23 - Granulometría combinada, 60% A.F. – 40% A.G. | 77 |
| Gráfico 24 - Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a 28 días de fundida | 78 |
| Gráfico 25 – Variación del módulo de elasticidad en las mezclas de concreto | 79 |
| Gráfico 26 – Variación del peso unitario en las mezclas de concreto | 80 |
| Gráfico 27 - Resultados de ensayo de placa circular | 82 |
| Gráfico 28 - Resultados de ensayo de placa cuadrada | 87 |
| Gráfico 29 - Determinación de la carga máxima P _{0,1} a partir de la curva carga/deflexión (EFNARC, 1993) | 90 |
| Gráfico 30 – Determinación de la resistencia flexural de vigas adicionadas con tiras de caucho | 90 |
| Gráfico 31 - Determinación e la resistencia flexural de vigas adicionadas con fibras metálicas, F1 (15 kg/m ³) | 91 |
| Gráfico 32 - Determinación de la resistencia flexural de vigas adicionadas con fibras metálicas, F2 (30 kg/m ³) | 91 |
| Gráfico 33 – Resultado de ensayos de resistencia flexural y tensión residual en vigas | 94 |
| Gráfico 34 - Resultado de ensayos de placa circular | 95 |
| Gráfico 35 - Energía absorbida en ensayos de placa circular | 96 |
| Gráfico 36 – Carga máxima alcanzada en ensayo de placa circular por tipo de mezcla | 96 |
| Gráfico 37 – Resultados de ensayos de placa cuadrada | 97 |
| Gráfico 38 – Energía absorbida en ensayos de placa cuadrada | 99 |
| Gráfico 39 – Carga máxima alcanzada en ensayo de placa cuadrada por tipo de mezcla | 99 |
| Gráfico 40 – Curva carga-deflexión y clasificación de tensión residual en ensayos de viga | 100 |
| Gráfico 41 – Categorías de tensión residual por tipo de mezcla | 101 |
| Gráfico 42 - Carga máxima P _{0,1} por tipo de mezcla | 102 |
| Gráfico 43 - Resistencia flexural por tipo de mezcla | 102 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 – Apilamiento de llantas en el mundo | 27 |
| Ilustración 2 – Quema de llantas al aire libre (Soluciones frente a la polución de neumáticos, 2011)..... | 28 |
| Ilustración 3 – Reutilización de llantas en el mundo | 30 |
| Ilustración 4 – Trituración de caucho..... | 32 |
| Ilustración 5 – Ensayo de tensión indirecta (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004)..... | 39 |
| Ilustración 6 – Microfibras (Sika S.A., 2010)..... | 45 |
| Ilustración 7 – Macrofibras, ejemplos de geometrías (Sika S.A., 2010) | 45 |
| Ilustración 8 – Tipos de fibras metálicas (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009)..... | 50 |
| Ilustración 9 – Adición manual de fibras (Cardona, 2010) | 52 |
| Ilustración 10 – Dosificación automática de fibras (Marson Franco, 2010)..... | 52 |
| Ilustración 11 – Fibras metálicas y sintéticas empleadas (Canals i Llopart, 2002) | 56 |
| Ilustración 12 – Montaje de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002) | 56 |
| Ilustración 13 – Probeta circular sin adición (Canals i Llopart, 2002)..... | 57 |
| Ilustración 14 – Probeta circular adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002) | 57 |
| Ilustración 15 – Falla de probetas luego de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002)..... | 57 |
| Ilustración 16 – Montaje de ensayo de placa cuadrada (Canals i Llopart, 2002) | 60 |
| Ilustración 17 – Falla de probetas luego de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002)..... | 61 |
| Ilustración 18 – Montaje de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas (Canals i Llopart, 2002)..... | 65 |
| Ilustración 19 – Asentamiento registrado por tipo de mezcla | 68 |
| Ilustración 20 – Proceso de curado | 68 |
| Ilustración 21 – Cincha de llanta | 69 |
| Ilustración 22 – Troquel empleado para el corte de las tiras de caucho | 69 |
| Ilustración 23 – Tiras de caucho de desecho de llanta..... | 70 |
| Ilustración 24 – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta | 70 |
| Ilustración 25 – Fibras metálicas Dramix RC_65-60_BN..... | 70 |
| Ilustración 26 – Concreto adicionado con fibras metálicas..... | 70 |
| Ilustración 27 – Resultado de ensayo de viga UNI 12390 (Aiello & Leuzzi, 2010)..... | 71 |
| Ilustración 28 – Celda de carga empleada en ensayos de placa circular | 73 |
| Ilustración 29 – Deformímetro empleado en ensayo de placa circular | 73 |
| Ilustración 30 – Estructura de apoyo ensayo placa circular (ASTM C 1550-10)..... | 74 |
| Ilustración 31 – Marco de apoyo ensayo placa rectangular (EFNARC)..... | 75 |
| Ilustración 32 – Montaje ensayo placa rectangular (EFNARC)..... | 75 |
| Ilustración 33 – Montaje ensayo de resistencia flexural en viga (EFNARC) | 75 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 34 – Probetas circulares, luego del ensayo | 83 |
| Ilustración 35 – Falla probeta circular C3..... | 84 |
| Ilustración 36 – Probetas ensayadas y montaje de placa circular | 84 |
| Ilustración 37 – Probetas falladas luego del ensayo de placa cuadrada | 88 |
| Ilustración 38 – Proceso de corte, vigas (EFNARC) | 89 |
| Ilustración 39 – Probetas de vigas luego del ensayo de resistencia flexural y tensión residual | 93 |
| Ilustración 40 – Falla típica cilindro de concreto adicionado con caucho | 103 |
| Ilustración 41 – Desprendimiento de las tiras de caucho de la matriz de concreto..... | 103 |
| Ilustración 42 – Falla típica de placa cuadrada de concreto adicionado con caucho..... | 104 |
| Ilustración 43 – Falla típica de placa circular de concreto adicionado con caucho | 104 |
| Ilustración 44 – Estado final de las fibras metálicas, luego de ensayo de placa circular (Nótese la pérdida del anclaje en los extremos) | 104 |

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción gracias a su manejabilidad, resistencia y a la facilidad que este tiene para adoptar diferentes formas. El concreto en estado endurecido tiene un comportamiento frágil y de baja tenacidad, la cual se define como la capacidad de disipar energía, debido a esto el concreto se refuerza con materiales que le confieran mayor tenacidad sin afectar de manera significativa su resistencia y manejabilidad.

Diferentes materiales han sido probados y empleados en el mundo como adición al concreto con el fin de otorgarle una mayor capacidad de disipar energía. Fibras metálicas y sintéticas, son ampliamente usadas, también existen otros materiales menos utilizados que cumplen la misma función como lo son: el caucho, las fibras de vidrio, las fibras de carbono y las fibras naturales.

Diferentes estudios realizados, han demostrado que el caucho como adición al concreto presenta una mejora significativa en la tenacidad, adicionalmente el uso del caucho proveniente del desecho de llantas, por su conformación no solo mejora la tenacidad del concreto (Topçu, 1995) sino también le da al caucho una mejor disposición final mitigando sus efectos ambientales al ser empleado en edificaciones sostenibles (Buendía, Oviedo, y Ruiz, 2008).

Algunos de los materiales con los cuales se busca mejorar la tenacidad del concreto han sido estudiados de manera independiente, no se han realizado estudios comparativos entre diferentes fibras y el caucho. Por otra parte, los ensayos que miden la tenacidad (área bajo la curva fuerza desplazamiento) realizados a mezclas de concreto adicionadas con caucho, han sido principalmente en probetas tipo viga, no se han realizado estudios en probetas tipo placas los cuales son ampliamente utilizados para el análisis de la tenacidad y sobretodo la distribución bidimensional de las fibras que resultan en estados de flexión biaxial. (Farrés & Serrat, 2007). El comportamiento del concreto adicionado con fibras de caucho debe ser más estudiado, haciendo un análisis comparativo con otras fibras adicionadas usualmente al concreto para conocer las posibles aplicaciones de este material en diferentes construcciones civiles.

1 JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es uno de los materiales más empleados en el campo de la construcción, debido a sus propiedades mecánicas y a su capacidad de adoptar diferentes formas. Es el material con el mayor porcentaje de participación en gran cantidad de obras civiles (Meyer, 2009), por lo tanto cualquier adición a este implicaría un consumo masivo de la misma.

La capacidad de disipación de energía de una estructura de concreto depende de la tenacidad del material (área bajo la curva fuerza - desplazamiento); a mayor disipación de energía se obtienen mayores deformaciones y por lo tanto fallas dúctiles, comportamiento deseado de una estructura ante un evento sísmico (Gallego & Alberto, 2006). El concreto simple es un material frágil, el cual se deforma poco ante grandes esfuerzos, sino por el contrario es quebradizo; diferentes materiales han sido estudiados como adiciones al concreto simple con el fin de mejorar su tenacidad, las fibras metálicas (Taylor, Lydon, y Barr, 1997) y las tiras de caucho (Topçu, 1995) de llanta han reportado en ambos casos resultados favorables, el principal estudio de estas adiciones se enfoca en la mayoría de los casos en aplicaciones para pisos industriales, túneles y pavimentos. A excepción de la investigación realizada por Buendía, Oviedo y Ruiz en el 2008; no se ha realizado un estudio desde el punto de vista sísmico que permita concluir sobre el comportamiento de estos concretos ante tales eventos.

La investigación es pertinente en el país ya que se encuentra en una zona sísmicamente activa, en la interacción de tres placas tectónicas, por lo cual es imprescindible el análisis del comportamiento sísmico de las estructuras. Desde hace un tiempo, es de gran importancia la innovación y el estudio de materiales que sean aptos para tales condiciones, pues permiten afrontar eventos sísmicos con mayor seguridad, lo cual disminuye los daños y pérdidas que se generan usualmente.

A diferencia del concreto simple, el concreto adicionado con fibras metálicas es capaz de resistir esfuerzos luego de que la matriz de concreto falla, las fibras mantienen la integridad del material, permitiéndole resistir esfuerzos luego de haber alcanzado la resistencia máxima (Nataraja, Dhang, & Gupta, 2000), esta mejora de tenacidad conferida por las fibras depende de la dosificación, factores geométricos (relación de esbeltez) y mecánicos (módulo de elasticidad) de las mismas.

El caucho de desecho de llantas es otro material que mejora algunas propiedades del concreto simple, estudios realizados a nivel mundial muestran que esta adición aumenta la tenacidad del concreto aunque disminuye su resistencia a la compresión, tensión y dureza (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004). Por otra parte, la fabricación masiva de llantas debido al auge automotor, la corta vida útil de este material en comparación con su ciclo de vida y su difícil disposición final, han generado un problema ambiental a nivel mundial; como ya se

mencionó, el concreto es el material más utilizado en construcción, utilizar el caucho de desecho de llanta como adición al concreto puede contribuir como una solución a este problema ambiental debido al gran volumen que estos materiales representan (Topçu, 1995).

Para los estudios correspondientes a la caracterización de las fibras metálicas, fibras sintéticas y caucho de desecho de llanta como adición al concreto, los ensayos más utilizados son los de resistencia a la compresión ASTM C39 (NTC 637), resistencia a la tracción indirecta ASTM C496 (NTC 722) y resistencia a la flexión ASTM C1609 (NTC 2871). También existen ensayos especiales que priorizan el estudio de la tenacidad a flexo-tracción, como el ensayo de placa rectangular y viga EFNARC (*European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry*), y el ensayo de placa circular ASTM C1550-10 (*Round Determinate Panel Test, RDP*) (Garcia et al., 2004).

Si bien se han realizado gran cantidad de investigaciones para caracterizar el caucho y las fibras comerciales (plásticas y/o metálicas) como adición al concreto a nivel internacional únicamente, a excepción de la investigación realizada por (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008); no se han realizado análisis comparativos, entre el concreto adicionado con estos materiales y menos con fines de aplicación para sistemas de resistencia sísmica. Teniendo en cuenta que existen ensayos normalizados de placa y vigas para el concreto adicionado con fibras, se elabora la presente propuesta para comparar el desempeño y la capacidad de disipación de energía del concreto adicionado con caucho y con fibras metálicas, dado que dicha disipación podría ser beneficiosa desde el punto de vista del comportamiento sísmico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Evaluar la capacidad de disipación de energía en placas y vigas de concreto adicionado con fibras metálicas y tiras de caucho de desecho de llanta.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el ensayo de placa circular según la norma ASTM C1550 - 10 en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.
- Caracterizar las mezclas de concreto por medio de ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.
- Comparar la tenacidad y la resistencia residual de concreto adicionado con fibras metálicas y tiras de caucho de desecho de llanta a partir de ensayos de viga, placa circular y rectangular.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 TENACIDAD

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Esta propiedad es de importancia en ingeniería cuando se considera la capacidad de un material de soportar un impacto sin que se produzca la fractura (Smith, 2004).

En general, una estructura nueva debe ser servible bajo condiciones normales, segura bajo situaciones de sobre carga y estable bajo las peores condiciones de carga. Mientras que para el cumplimiento de los requerimientos de servicio se realiza una evaluación por medio de estados límites de fisuración y pequeñas deflexiones, los requerimientos de seguridad y tenacidad son evaluados en términos de los estados límites de resistencia y ductilidad (Memari, Motlagh, & Scanlon, 2000). La capacidad para absorber energía de los materiales que usualmente son adicionados al concreto como las fibras, ha sido reconocida desde hace bastante tiempo como el mayor y más importante beneficio de su incorporación al concreto convencional; gran cantidad de ensayos se han ejecutado con el fin de caracterizar directamente la capacidad de absorber energía de estos componentes tanto en situaciones de compresión, tensión y flexión, siendo este último el más empleado al ser el que representa más realísticamente las condiciones en las que se encontrarán estos materiales en situaciones reales (Gopalaratnam, 1995); cuantitativamente, la tenacidad corresponde al área bajo la curva fuerza-desplazamiento.

Esta propiedad es de gran importancia dentro del análisis sísmico de las edificaciones, ya que una edificación con gran capacidad de absorción de energía frente a una con poca capacidad tendrá un comportamiento diferente ante movimientos sísmicos, puesto que en el momento en que los elementos estructurales con mayor tenacidad fallen, éstos permanecerán unidos, no caerán grandes pedazos de concreto que puedan poner en peligro a las personas que ocupan la edificación, es vital en estos casos que los elementos estructurales disipen energía por medio de mecanismos de falla, los cuales para el concreto adicionado con fibras corresponde a la fisuración, fluencia del refuerzo principal, quebramiento de la matriz de concreto, desprendimiento, falla y elongación de las fibras adicionadas, mientras que para el concreto sin fibras corresponde únicamente a la fisuración, fluencia del refuerzo principal y el quebramiento de la matriz de concreto.

3.2 CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA

El caucho es un elastómero de origen natural y sintético, es la materia prima de la llanta y de muchos otros materiales, para mejorar sus propiedades elásticas, de resistencia y durabilidad el caucho es vulcanizado, proceso por el cual se calienta el caucho añadiéndole azufre. La

vulcanización es un proceso irreversible, lo cual imposibilita la recuperación de las materias primas. El auge automotor, entre otros desarrollos ha producido un alto incremento en el uso del caucho, generando problemas ambientales debido a la poca reutilización y reciclaje que tiene el caucho de llanta (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008).

3.2.1 Composición

En la **Tabla 1** - Componentes generales de las llantas **Tabla 1**, se muestran los componentes generales de la llanta y en la **Tabla 2**, se muestran los elementos químicos de la llanta, esta está compuesta además de caucho por fibra textil y encordado metálico, principalmente acero.

Tabla 1 - Componentes generales de las llantas (Castro, 2007)

| Componentes | Tipo de Vehículo | | Función |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | Automóviles % en peso | Camiones % en peso | |
| Caucho | 48 | 45 | Estructural - deformación |
| Negro humo (carbono) | 22 | 22 | Mejora oxidación |
| Óxido de zinc | 1,2 | 2,1 | Catalizador |
| Material Textil | 5 | 0 | Esqueleto estructural |
| Acero | 15 | 25 | Esqueleto estructural |
| Azufre | 1 | 1 | Vulcanización |
| Otros | 12 | - | Juventud |

Según la Cámara de comercio de Bogotá en su documento *Guía para el manejo de llantas usadas* del 2006, los materiales que componen la llanta pueden subdividirse en los siguientes grupos:

- **Caucho:** Caucho natural, caucho de butadienoestireno, caucho polibutadieno, caucho isobuteno-isopropeno y caucho de isobutenoisopropeno halogenado, compuestos azufrados, resinas fenólicas, hidrocarburos aromáticos, nafténicos y para finicos, crudospesados.
- **Textiles:** Poliéster, nylon, entre otros.
- **Pigmentos:** Óxidos de zinc y titanio, negro de humo, entre otros.
- **Antioxidantes y rellenos:** Ácidos grasos, sílica, otros materiales inertes.

Tabla 2 – Elementos químicos que componen la llanta (Castro, 2007)

| Elemento | | Porcentaje [%] |
|-----------|---|----------------|
| Carbono | C | 70 - 83 |
| Hidrógeno | H | 5 - 7,5 |

| | | |
|-----------|----|-----------|
| Oxígeno | O | 5 |
| Azufre | S | 1,2 - 1,5 |
| Nitrógeno | N | 0,5 - 1,8 |
| Zinc | Zn | 1,2 - 2,7 |
| Cobre | Cu | 1 - 2 |
| Hierro | Fe | 5-18 |

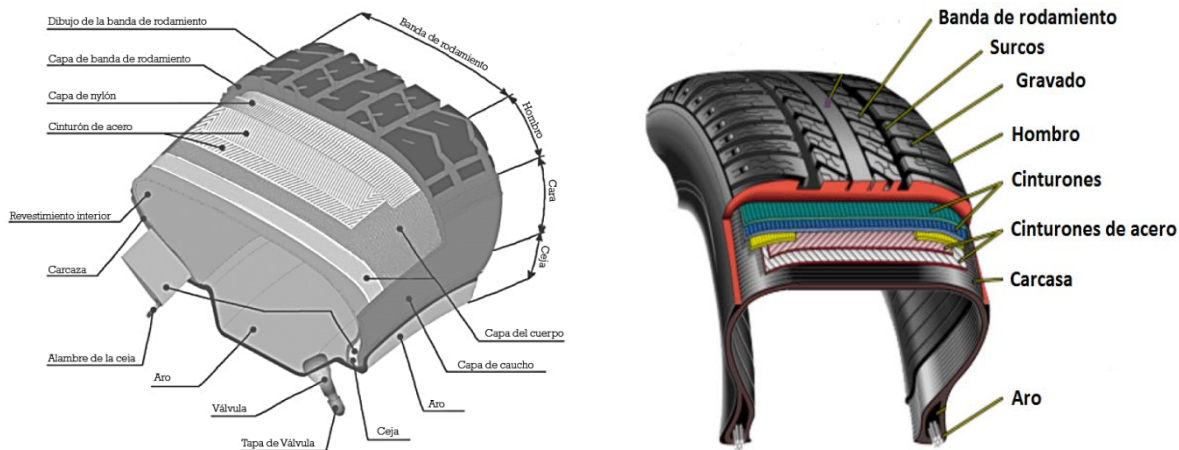


Figura 1 – Sección transversal de una llanta (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006)

Las partes de la llanta, según (ICONTEC, 2010) en la NTC 1304, se describen a continuación:

- **Aro:** Parte de la llanta que la asegura firmemente al rin, de manera que no presente deslizamiento en condiciones normales de uso (Figura 1). Está formada por alambres de acero recubiertos y unidos por compuestos de caucho.
- **Banda de rodamiento:** Parte de la llanta que está en contacto con el suelo (Figura 1).
- **Barra protectora:** Saliente lateral sobre el costado de la llanta, que tiene como fin protegerla de golpes u otros daños (Figura 1).
- **Carcasa:** Parte interna de la llanta formada por lonas de cuerdas de material apropiado, recubiertas y unidas con compuestos de caucho (Figura 1). La carcasa puede estar reforzada en su parte superior con cinturones.
- **Cinturones (absorbentes):** Lonas angostas diseñadas para aumentar la resistencia al impacto y proporcionar estabilidad a la llanta (Figura 1).
- **Grabado:** Espacio entre las costillas adyacentes o los bloques en el patrón rodante (Figura 1).
- **Hombro:** Borde lateral de la banda de rodamiento, cuya forma puede ser en arco o en ángulo (Figura 1).

3.2.2 Problemática de las llantas como residuos

Para la fabricación de llantas se requieren grandes cantidades de recursos, multitud de insumos de diferentes orígenes como: energía, agua, hidrocarburos, textiles, acero, azufre, entre otros; además del manejo y la disposición que se tiene actualmente en el mundo, implican un gran impacto sobre el medio ambiente. En la actualidad, las llantas no son recicladas en su totalidad y pasan a ser amontonadas en depósitos, rellenos, dispuestas en las laderas de ríos, utilizadas en reencauche o quemadas. En Bogotá, se generan 25.000 toneladas de llantas usadas anualmente (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006). En Colombia, las llantas no están consideradas como residuo peligroso; sin embargo, éstas se componen de sustancias peligrosas, que al no tener un manejo adecuado puede generar un impacto en la salud pública.



(a) – Volúmenes de apilamiento (EPA, 2010)



(b) - (Reciclaje de neumáticos, 2009)

Ilustración 1 – Apilamiento de llantas en el mundo

Apilar las llantas en depósitos al aire libre ha sido la disposición más utilizada históricamente en el mundo como se muestra en la Ilustración 1, pero esta disposición genera grandes problemas consigo. La forma de las llantas produce estancamiento del agua, lo que genera un ambiente favorable para la proliferación de vectores como mosquitos y roedores provocando problemas en la salud pública. Otro riesgo que se puede generar son los incendios en lugares de grandes acopios sin las apropiadas medidas de control (EPA, 2010).



Ilustración 2 – Quema de llantas al aire libre (Soluciones frente a la polución de neumáticos, 2011)

La quema de llantas a cielo abierto (**Ilustración 2**) es el procedimiento que más afecta el medio ambiente y la salud, debido los componentes derivados del petróleo que componen las llantas, estos generan emisiones con altos contenidos de contaminantes tales como monóxido de carbono (CO), óxido de azufre (SOx), óxido de nitrógeno (NOx) y material particulado. También incluyen, hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dioxinas, furanos, cloruro de hidrógeno, benceno, bifenilos policlorados (PCBs), y metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo, y vanadio, entre otros; estas emisiones generan impactos en la salud en las personas que se encuentran expuestas ante estos eventos. Efectos agudos y crónicos, los cuales pueden incluir irritación en la piel y ojos, irritaciones del sistema respiratorio y de las membranas mucosas, hasta efectos mutagénicos como cáncer. Además, en el medio ambiente la quema de llantas produce residuos aceitosos que afectan el suelo y el agua freática, y contribuyen al calentamiento global afectando la capa de ozono (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

Las llantas, debido a su forma son difíciles de compactar, ocupan un gran volumen y tienden a subir a la superficie cuando son colocadas en rellenos sanitarios como disposición final, es por eso que este método no es ampliamente usado en el mundo, especialmente es zonas rurales donde no existen centros de acopio ni el control sobre este desecho. En zonas rurales, las llantas son botadas en laderas de ríos o potreros, lo cual genera los mismos problemas que la disposición con apilamiento a aire libre (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008).

En la Tabla 3, **Tabla 3; Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra los principales destinos que tienen las llantas usadas anualmente, en los Estados Unidos.

Tabla 3 – Destinación de las llantas en Estados Unidos (EPA, 2010)

| Destinación | Estados Unidos | |
|---------------------|----------------|----------------|
| | Cantidad [Ton] | Porcentaje [%] |
| Combustión | 950,000 | 39% |
| Rellenos sanitarios | 920,000 | 38% |
| Ing. Civil | 225,000 | 9% |
| Reciclaje | 180,000 | 7% |
| Exportación y otros | 135,000 | 6% |
| Total | 2,410,000 | 100% |

3.2.3 Disposición y manejo de las llantas

Debido a las problemáticas que se suscitan por la disposición final de llantas después de su ciclo de vida útil, combinado con la cantidad en la que son desechadas en el mundo anualmente, se han desarrollado procedimientos alternos para darle un manejo adecuado a las llantas diferentes de los ya mencionados. En la *Guía para el manejo de llantas usadas*, de la Cámara de Comercio de Bogotá (2006), se propone aplicar el método de las cuatro R, rechazar, reducir, reutilizar y reciclar.

Rechazar el consumo de llantas es un mecanismo que debe ser ejercido por el consumidor, ya que antes de comprar el producto se debe analizar si realmente se necesita, para esto es importante identificar los productos en cuya elaboración, manejo o disposición final no se emplean insumos que impacten negativamente en los recursos naturales, en el caso de las llantas se encuentran diversas marcas, calidades, costos y procesos de fabricación que puede ser limpios o contaminantes.

Para reducir el desecho de las llantas, es necesario tener presente el ciclo de vida útil de acuerdo con la calidad de fabricación, además, mejorar los cuidados, operación y mantenimiento de las llantas y esto solo se logra al educar a la población que posee autos; en la *Guía para el manejo de llantas usadas* se indica el manejo y mantenimiento que las llantas deben tener durante su ciclo de vida, como la rotación de las mismas en vehículos de cuatro ruedas.

Existen varias formas de reutilizar las llantas (Ilustración 3) tales como: muros de contención, base para taludes, parques infantiles, amortiguamiento para embarcaciones en muelles, estabilización del manto impermeable con estructuras de cauchos amarrados entre si, chimeneas de gas metano en rellenos sanitarios, rompeolas, arrecifes artificiales, plantaciones de árboles, protección de equipos, instalaciones de entrenamiento, control de erosión, vías de acceso para tractores, vías de acceso extremo, entre otros (Domingo Carraza, et al., citado en Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008).



(a) - Viveros (Johnson, 2009)



(b) - Escalones
(Cabarella, 2008)



(c) - Parques (CGN Buenas Noticias, 2011)



(d) - Muros (Earthships: construcción con
neumáticos y tierra, 2011)

Ilustración 3 – Reutilización de llantas en el mundo

Diferentes investigaciones se han desarrollado en el mundo sobre el reciclaje de las llantas, el primero y más común en ser usado es el reencauche, también son ampliamente usadas como combustible en el proceso de producción de cemento, ya que al producirse a tan altas temperaturas desintegra todos los componentes dañinos que afectan a la atmósfera. Por otro lado, se ha desarrollado un proceso en donde se pueden recuperar las materias primas de la llanta y materiales los cuales estas pueden ser utilizadas. A continuación, se expone la destinación y algunos de los procesos en los cuales se reciclan las llantas y sus componentes.

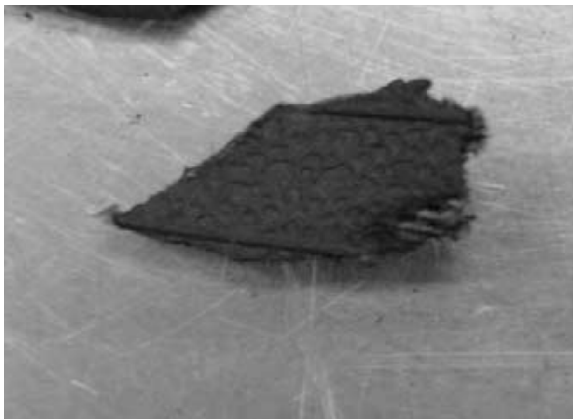
3.2.3.1 Trituración del caucho

El procedimiento inicial del manejo del caucho de desecho de llanta es la trituración, para esto se implementa en la mayoría de los casos dos métodos: molienda mecánica y molienda criogénica, procesos en los cuales se reduce el tamaño de las llantas con el fin de separar el caucho de elementos como el acero y las fibras textiles.

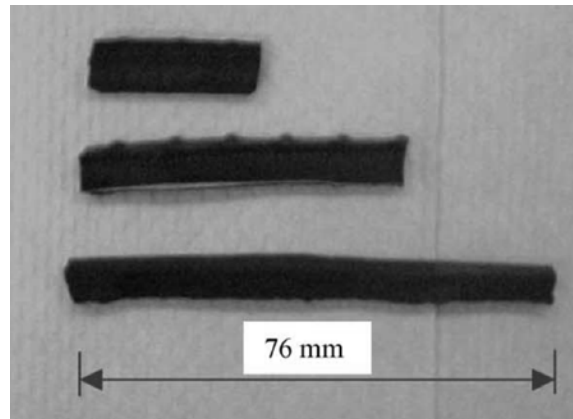
La molienda mecánica es el procesamiento más común, consiste en pasar la llanta por varias cuchillas en cascada, las cuales van triturando progresivamente la llanta hasta tener como resultado pequeñas partículas con diferentes gradaciones, durante esta molienda se ejecutan varios procesos magnéticos que separan el acero presente en la llanta. Esta molienda se realiza a temperatura ambiente y dependiendo del tamaño final de las partículas se puede extraer las fibras y el acero.

La molienda criogénica consiste en congelar las llantas enteras con nitrógeno líquido, lo cual lleva al caucho a un estado extremadamente frágil, después son golpeadas para obtener el tamaño deseado. Si se desea, el acero puede ser retirado con imanes al igual que en la molienda mecánica. Aunque el caucho cambie de estado, al regresar a temperatura ambiente no se pierden ni se alteran las propiedades (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

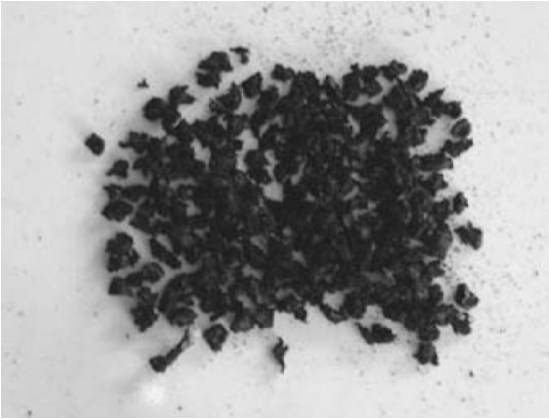
En la **Ilustración 4** se muestra el resultado de diferentes procesos de trituración, de las cuales se obtienen diferentes gradaciones y formas de caucho, el cual es empleado en diferentes aplicaciones a nivel industrial y artesanal.



(a) – Desecho de llanta en forma de “chips”
(25,4 x 25,4 x 5,0)mm (Li, Stubblefield,
Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004)



(b) – Tiras de caucho de desecho de llanta
(Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008)



(c) – Caucho inferior a 6.35mm
(Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008)



(d) – Desecho de llanta triturada
(Aiello & Leuzzi, 2010)

Ilustración 4 – Trituración de caucho

3.2.3.2 *Llantas reencauchadas*

El reencauche consiste en renovar la banda de rodamiento de las llantas gastadas (Castro, 2007), mientras que el resto de la llanta se encuentre en buen estado, con el fin de aumentar el ciclo de vida útil. El reencauche se emplea por lo general en llantas de tamaño mediano y grande (buses, camiones y aviones) ya que para automóviles y camionetas, este procedimiento no es rentable frente al precio de los neumáticos nuevos. Las llantas reencauchadas, pueden ser utilizadas a la misma velocidad de una llanta nueva, sin perder seguridad, esfuerzo y comodidad, además, dan el mismo kilometraje comparadas con las nuevas, a un menor costo por kilómetro; también, el costo de una llanta reencauchada para camión es 50% menor que el de una nueva, con este proceso se ahorran más de 400 millones de galones de petróleo al año, lo cual hace que sea un procedimiento muy empleado en todo el mundo, debido a sus beneficios.

Los vehículos que generalmente son reencauchados son: buses de servicio escolar y público, vehículos del gobierno, militares y del servicio postal, aviones de carga y de guerra, camiones y vehículos de despacho, flotas de taxis, vehículos de policía, vehículos industriales, carros de carreras, ambulancias, equipos para fincas (tractores), entre otros. El procedimiento incluye los siguientes pasos:

- Inspección inicial
- Pelado de la carcaza
- Preparación de la carcaza
- Relleno de la carcaza
- Corte y cementado de banda
- Cementado de carcaza
- Embandado
- Vulcanización
- Inspección final y terminado

Las llantas reencauchadas deben cumplir todas las características de seguridad y estándares de calidad, según la normativa de cada país.

3.2.3.3 Llantas como combustible

La aplicación principal de las llantas desde la década de 1970, en los Estados Unidos, Europa y Japón y otros países, ha sido como recurso energético complementario (EPA, 2010), entre las aplicaciones están los hornos cementeros, las calderas industriales y las plantas de generación de energía eléctrica.

Las llantas tienen un contenido calorífico de 7800 a 8600 kilocalorías por kilogramo (kcal/kg), mientras que el carbón contiene entre 5500 a 7200 kcal/kg., según la capacidad del horno, las llantas como combustible, pueden ser empleadas enteras; en otros casos, estas deben fraccionarse en trozos más pequeños llamados CDL (combustible derivado de la llanta).

Las ventajas que se obtienen por utilizar desecho de llanta como combustible son innumerables, como la preservación de recursos energéticos fósiles, no renovables y la recuperación del valor energético de la llanta, lo cual, a combustión completa a alta temperatura y con el uso de filtros, implica que la contaminación del aire producido por este proceso es mínima; también, el uso de desecho de llantas tiene un impacto beneficioso, al reducir la producción de óxidos de nitrógeno (NOx), gracias a que la combustión se realiza a temperaturas más bajas comparado con los combustibles tradicionales (Quezada, et al., citado en Buendía, Oviedo, y Ruiz, 2008).

Diferentes empresas ofrecen el reciclaje de llantas usadas para ser convertidas en caucho en polvo o grano de caucho reciclado (GCR), que será destinado a numerosos usos como asfaltos, pistas atléticas, parques infantiles, etc. El proceso supone la incorporación del caucho en polvo o en pedazos (GCR). A pesar de su mayor costo, el GCR como agregado al pavimento puede hasta duplicar la vida útil de la vía, debido a que el caucho le confiere propiedades de elasticidad ante las variaciones de temperatura. También reduce el ruido de los vehículos que transitan por la vía (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008).

3.2.3.4 Llantas en asfaltos

Uno de los mayores usos que actualmente se le está dando a las llantas usadas es como adición al pavimento asfáltico tradicional, debido a los buenos resultados en el desempeño de este material a escala mundial. El caucho debe ser triturado, estar libre de acero y fibra textil, el cual es llamado grano de caucho reciclado (GCR) antes de su incorporación en las mezclas asfálticas. Este procedimiento se ha realizado por más de 30 años y ha sido promovido activamente en los últimos 20 años en los Estados Unidos (EPA, 2010).

3.2.3.4.1 *Asfalto modificado convencional*

Este tipo de asfalto consiste en la mezcla de caucho (entre un 2% a un 15%) con respecto a los agregados, junto con estos últimos, antes de adicionar el asfalto. Las principales ventajas de este asfalto son que no requiere de maquinaria especializada ya que se mezcla con los agregados de manera simple; además, esta mezcla asfáltica disminuye la permeabilidad, mejorando la vida útil. Por otra parte, la adición de GCR mejora las características geológicas del asfalto a diferentes temperaturas, la principal desventaja es que en el proceso de almacenamiento del asfalto, la segregación de los agregados que naturalmente está entre el 2% y el 4%, aumenta con la presencia del caucho llegando hasta un 25%, lo cual disminuye la calidad, la homogeneidad del producto y la vida útil de almacenamiento (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

3.2.3.4.2 *Asfalto modificado químicamente*

A diferencia del asfalto modificado convencionalmente, en el asfalto químicamente modificado, el caucho es mezclado directamente con el pavimento, lo cual implica una mayor homogeneidad, la vida útil de este pavimento incrementa entre el 58% y el 230%, con respecto al pavimento con mezcla asfáltica convencional (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

El caucho de llanta reciclado es ampliamente usado en actividades artesanales, industriales, y cada vez es más utilizado en campos como la ingeniería civil, entre otras. Los estudios sobre este material en diferentes aplicaciones también se extiende en el mundo, en el caso de esta investigación lo es como adición al concreto.

3.3 CONCRETO HIDRÁULICO ADICIONADO CON CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA

Como respuesta a la problemática ambiental y aprovechando las propiedades del caucho de desecho de llanta, además de otros usos ya mencionados dentro de la ingeniería civil, este material se ha utilizado como adición al concreto hidráulico, buscando mejorar la tenacidad del concreto y otras propiedades.

3.3.1 Historia

El uso de caucho como residuo de llanta se ha empleado desde la década de los 70, como respuesta al problema ambiental a escala mundial y como alternativa de materiales que puedan mejorar las propiedades del concreto (La adición de partículas de neumáticos reciclados en el concreto, 2011), los estudios para esa época demostraron que adicionar caucho de desecho de llanta al concreto mejora ciertas propiedades; como los son la ductilidad, peso y tenacidad, pero también se reducen otras propiedades del concreto como la resistencia a la compresión, manejabilidad entre otros. Los primeros estudios que fueron realizados por Rad en 1976

mostraron que el concreto adicionado con caucho pierde cerca del 35% de la resistencia a la compresión, concluye además que este tipo de concreto puede ser usado en elementos no estructurales.

Las investigaciones de adiciones de llantas desde 1970, se han realizado principalmente con base en granos de caucho reciclado (GCR) y tiras de caucho reciclado (TCR), reemplazando algún porcentaje del volumen de los agregados del concreto; para obtener estas formas, el caucho debe ser triturado o cortado por medio de procesos mecánicos, principalmente (Topçu, 1995).

La mayoría de estudios están dirigidos a caracterizar las propiedades mecánicas y en menor medida la respuesta dinámica. Los ensayos se han ejecutado según la normativa de cada país, generalmente, en cilindros que cumplen con la relación 2:1 en altura-diámetro, en cubos con aristas de igual tamaño, vigas o viguetas estandarizadas (Khatib & Bayomy, 1999).

La falla del concreto es frágil, pero con el uso de esta adición, se logra que el concreto trabaje en la zona elástica, a pesar de que el concreto convencional tenga una falla explosiva, éste presenta un rango plástico muy pequeño. El concreto adicionado con caucho posee un rango plástico mayor, deformándose aun después de haberse fisurado, lo que mejora su ductilidad. Se tiene además, una gran absorción de cargas dinámicas por su resistencia a la propagación de grietas y una gran resistencia a los impactos por la disipación de energía (Topçu, 1995). Aunque en el concreto se mejoren algunas propiedades con la adición del caucho, también se ven reducidas otras propiedades, la propiedad del concreto adicionado con caucho que más se ve afectada, es la resistencia mecánica, factor que limita la inclusión de este material en el mercado. La reducción en la resistencia, se debe básicamente a la poca adherencia entre la pasta de cemento y el caucho (La adición de partículas de neumáticos reciclados en el concreto, 2011), factor primordial para la mejora de tenacidad.

3.3.2 Concreto adicionado con caucho de llanta en estado fresco

El comportamiento en estado fresco del concreto adicionado con caucho, presenta una reducción en la manejabilidad medida en términos del asentamiento, pero éste no es progresivo con respecto al porcentaje de adición de caucho, además, según los estudios esta disminución en el asentamiento no afecta significativamente la trabajabilidad del concreto. En el **Gráfico 1**, se muestra el comportamiento en el asentamiento del concreto a medida que se aumenta el porcentaje de caucho como remplazo de los agregados. Se ha encontrado que con adiciones del 50% en volumen de agregado grueso el asentamiento se disminuye a aproximadamente 2,5 cm (Cairns, et al., citado en Buendía, Oviedo y Ruiz, 2008).

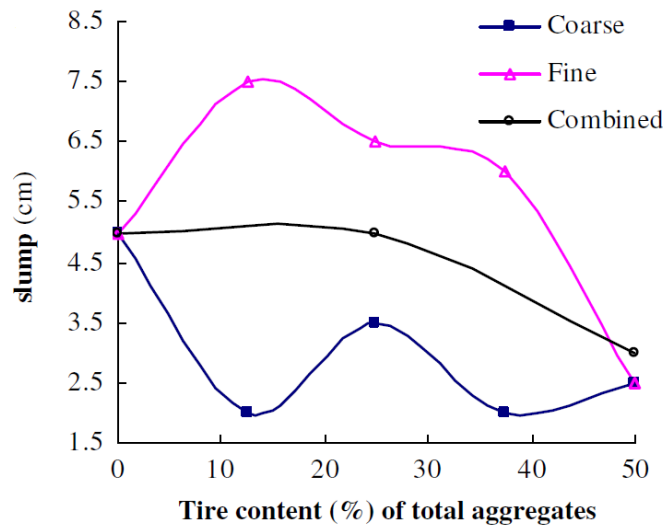


Gráfico 1 – Asentamiento con diferentes porcentajes de caucho (Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008)

Por otro lado, la segregación y exudación son muy similares a las del concreto normal, pero por contener caucho de desecho de llanta, es posible que se presente segregación de sus componentes, ya que por su baja densidad este puede salir a flote durante el estado fresco, aunque no es factor de ocurrencia, es recomendable realizar algún tratamiento superficial que aumente su rugosidad y por lo tanto la fricción con las demás partículas y la pasta o su peso específico. Por otra parte, no existe reacción del caucho con ninguna sustancia dentro del concreto que genere una adición de aire a la mezcla o genere una reacción que altere el comportamiento del concreto (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008).

3.3.3 Concreto adicionado con caucho de llanta en estado endurecido

Las propiedades del concreto con adiciones de caucho de desecho de llantas en estado endurecido, se ven afectadas en diferentes proporciones. La compresión, tensión, flexión y módulo de elasticidad decaen con el aumento en porcentaje del caucho, pero aumenta la plasticidad y con esto su nivel de disipación de energía.

El peso específico del concreto también se reduce; el concreto es un material heterogéneo y anisotrópico, puesto que es una combinación de diferentes materiales y depende de las propiedades de cada uno de estos. Al adicionar caucho de llanta, que posee una densidad inferior a la del agua, se reduce el peso específico del concreto a medida que se aumenta la cantidad de éste, como es muestra a continuación, en el **Gráfico 2**, se presenta un comportamiento inversamente proporcional entre el peso unitario y el porcentaje de reemplazo de agregados por caucho.

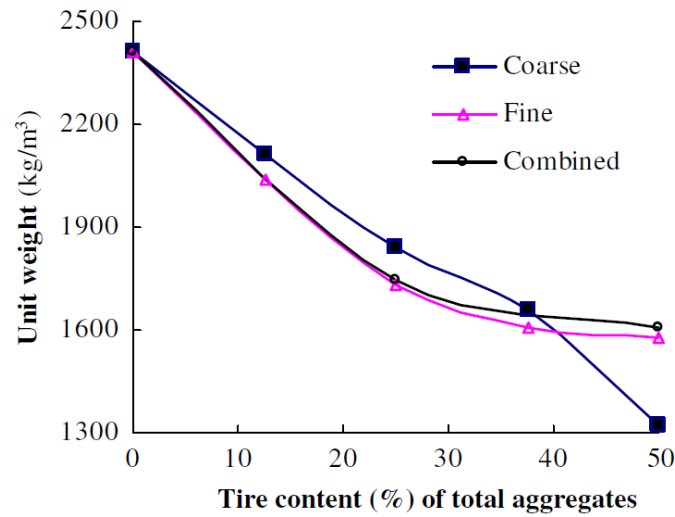


Gráfico 2 – Densidad con diferentes porcentaje de caucho (Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008)

3.3.3.1 Resistencia a la compresión del concreto adicionado con caucho de desecho de llanta

La resistencia a la compresión es una de las propiedades que más se ve afectada con la adición de caucho. El remplazo de agregado mineral por agregado de caucho, y la baja adherencia entre la pasta de cemento y el caucho, son los posibles factores que afecten la resistencia del concreto. Según Toutanji (1996), la resistencia a la compresión del concreto se reduce hasta en un 75% con adición del 100% de caucho en chips como reemplazo del agregado grueso y en un 60% con una adición del 50%, esto se muestra en el **Gráfico 3**.

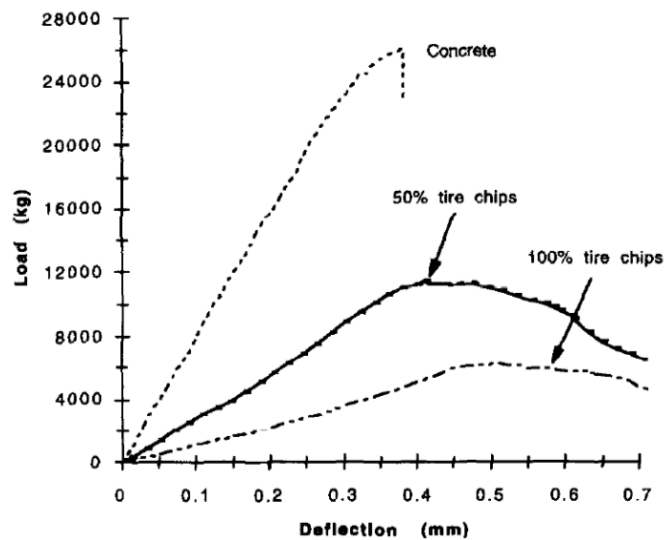


Gráfico 3 – Curva carga-desplazamiento cilindros en concreto con adición de caucho (Toutanji, 1996)

En este mismo estudio, Toutanji comprobó que a medida que se incrementaba el porcentaje de caucho en forma de “chips”, la resistencia a la compresión disminuía progresivamente, como se muestra en el Gráfico 4.

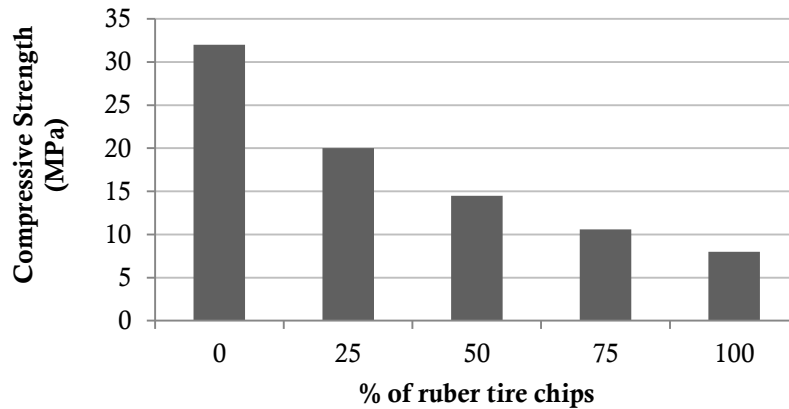


Gráfico 4 – Resistencia a la compresión como función del porcentaje de caucho (Toutanji, 1996)

Igualmente, Topçu en su investigación de 1995, analizó el comportamiento de concretos adicionados con diferentes porcentajes y formas de caucho a niveles de esfuerzo y deformación. En el Gráfico 5, se expone el resultado de este análisis, en donde se utilizó concreto sin adición (NC), concreto con caucho en trozos de 0 a 1 mm (FR) y concreto con caucho en trozos de 1 a 4 mm (CR), variando para cada mezcla los porcentajes de reemplazo de volumen de agregado, por caucho.

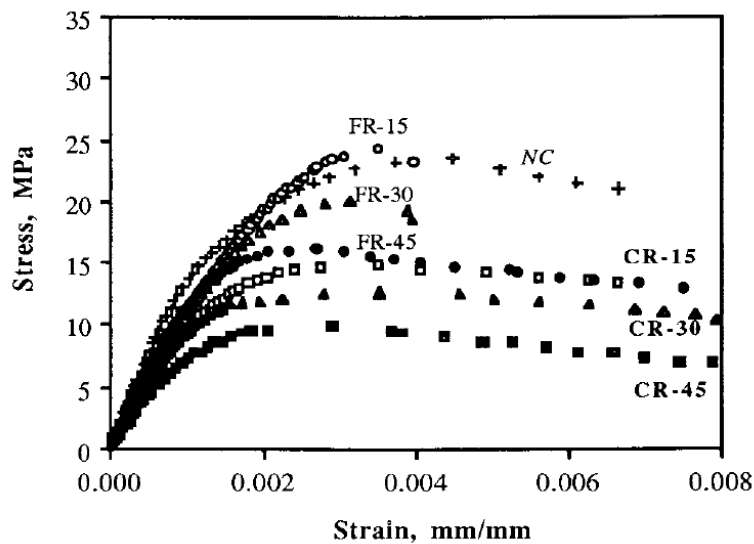


Gráfico 5 – Curva esfuerzo a la compresión vs deformación unitaria (Topçu, 1995)

3.3.3.2 Resistencia a la tensión del concreto adicionado con caucho de llanta

La carga es aplicada a lo largo de la dirección axial, generando una fuerza que hace que la muestra falle a tracción. El concreto con adición de caucho alcanza una deformación considerable sin la desintegración, mientras que el concreto sin adición de caucho de llantas se desintegra en el momento en que la carga máxima es alcanzada. Otros estudios, también demuestran que la resistencia a la tensión disminuye hasta un 36% y varía según el tipo (forma) y la cantidad de caucho adicionado (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004), en la **Ilustración 5**, se muestra el ensayo de tensión indirecta ejecutado en esta investigación.



Ilustración 5 – Ensayo de tensión indirecta (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004)

3.3.3.3 Resistencia a la flexión del concreto adicionado con caucho de llanta

Según lo observado por Toutanji en 1996, la resistencia a la flexión en vigas con adición de caucho de desecho de llanta se redujo (**Gráfico 6**), pero sin llegar a niveles tan altos como los alcanzados en la resistencia a la compresión. Como máximo, los especímenes llegan a perder un 35% de su resistencia a la flexión cuando se cambia totalmente (100%) el agregado mineral por agregado de caucho y un 18% cuando se reemplaza parcialmente (50%). El concreto adicionado con caucho de desecho de llantas, presenta una falla dúctil, permitiendo una mayor disipación de energía o aumento en la tenacidad, en comparación a concretos sin adición, el cual presenta muy bajas deformaciones plásticas. El concreto adicionado con caucho alcanza grandes deformaciones sin que la carga disminuya representativamente.

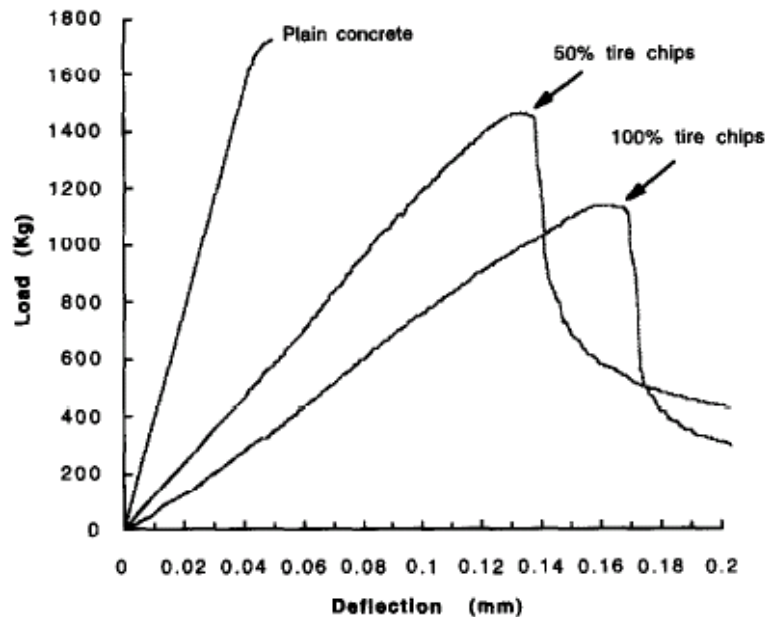


Gráfico 6 – Curva carga-desplazamiento de vigas sin adición y con adición de caucho (Toutanji, 1996)

Como se observa en la Gráfico 7, la energía absorbida (área bajo la curva fuerza-desplazamiento) por el concreto adicionado con caucho es mucho mayor que el concreto sin adición, gracias a la capacidad del agregado de caucho de desecho de llanta para experimentar deformación plástica y de soportar las cargas después del agrietamiento del concreto, debido a sus características de bajo módulo de elasticidad logra disipar energía.

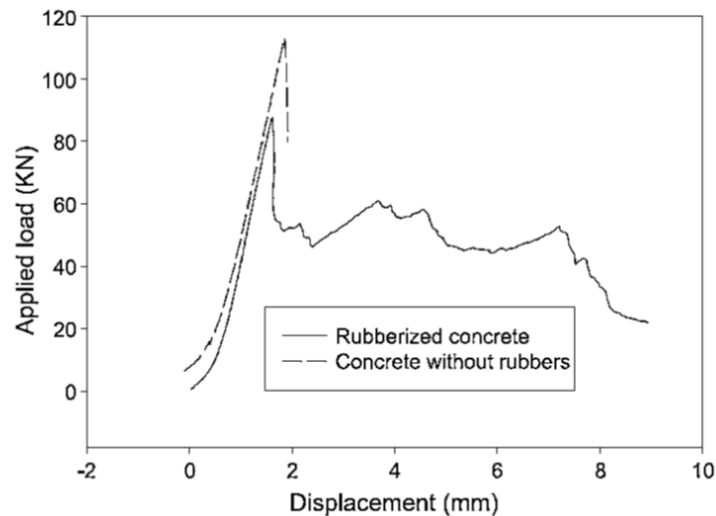


Gráfico 7 – Curva carga-desplazamiento muestra de concreto control y muestra con adición de caucho (Li, Stubblefield, Garrick, Eggers, Abadie, & Huang, 2004)

3.3.3.4 Adherencia

Algunos autores según sus investigaciones, dan al caucho un buen calificativo de adherencia con la matriz de concreto, pero estos mismos recomiendan mejorar la superficie del caucho haciéndola más rugosa, para que de esta manera mejore la adherencia caucho-cemento hidratado y así evitar que la resistencia disminuya significativamente (Hernández-Olivares, Barluenga, Bollati, & Witoszek, 2002). El típico tratamiento para mejorar la adherencia de la matriz de concreto con el caucho es sumergirlo en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) (Ganjian, Khorami, & Maghsoudi, 2009), por el contrario otros autores establecen que el NaOH y soluciones de silicatos no cambian significativamente la resistencia a la compresión (Albano et al., citado en Khaloo, Dehestani y Rahmatabadi, 2008)

Con lo descrito anteriormente se sabe que se presenta cierta adherencia entre el caucho y el concreto dependiendo de su forma, al mejorar esta propiedad, se generan mejoras en términos de resistencia a la flexión, principalmente. Con los tratamientos superficiales (al caucho), se presentan reducciones menores en la resistencia a la compresión y además se evita la segregación del caucho por su baja densidad.

3.3.3.5 Otras características del concreto adicionado con caucho de desecho de llanta

3.3.3.5.1 Fragilidad

El concreto es un material frágil y al ser cargado, se quiebra ante bajas deformaciones; para un material resistente, la mayor parte de la energía disipada se desarrolla en la zona plástica, mientras que para un material frágil, la mayor parte de la energía disipada se desarrolla sobre zona elástica. Por este problema, se incorpora al concreto un material con mayor capacidad de deformación, con el fin de reducir la fragilidad, aumentando su capacidad de absorción de energía en la zona plástica; es deseable que el concreto posea una mayor ductilidad. Con la adición de caucho de desecho de llantas, el concreto se comporta como un material más dúctil que el concreto sin adición y logra el paso de un estado elástico a plástico, absorbiendo mayor energía después de fracturarse.

3.3.3.5.2 Resistencia al impacto

“La resistencia del concreto al impacto aumenta con la cantidad y el tamaño de caucho adicionado, gracias a las propiedades que posee este material para absorber energía” (Topçu & Avcular, 1997).

Insonorización: “el caucho de llanta le genera al concreto propiedades moderadas de insonorización” (Tantala, Leopore, & Zandi, 1996). No solo sirve como barrera acústica, sino que además en los asfaltos adicionados con caucho empleados en carreteras, se genera una reducción sonora resultado de la disminución de la fricción de las llantas con la vía.

Resumiendo los análisis anteriores, al remplazar el agregado grueso por caucho, se genera una reducción en la resistencia a la compresión, tensión y flexión. La reducción de la resistencia a la compresión es mayor que la reducción de la resistencia a flexión y a su vez mayor que la resistencia a la tensión. A medida que se agrega más contenido de caucho a la mezcla se reducen más las propiedades. La dureza de un concreto normal aumenta con la adición de caucho, el caucho aporta dureza en el momento de la falla, ya que no deja proliferar las grietas; de este modo el concreto adicionado absorbe mejor las cargas dinámicas. Un concreto adicionado con caucho tiene la propiedad de absorber y disipar energía bajo condiciones dinámicas, sin generar daños. La mejor forma de adición de llantas al concreto es en tipología de fibra y no de grano, ya que presenta menores reducciones de las características primordiales del concreto (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008). Actualmente, se sugiere que el concreto adicionado con llantas se utilice en barreras de desplome en los caminos y carreteras, en barreras de sonidos (las propiedades del caucho generan una moderada insonorización) y de absorción de vibración y en cercas y postes agrícolas (Topçu, 1995).

Por otro lado, dentro de los antecedentes no se encontraron investigaciones en donde se hayan realizado ensayos de placa en concreto adicionado con caucho de desecho de llanta, las probetas utilizadas en las diferentes investigaciones han sido cilindros y vigas principalmente. Como se comentó en la justificación y planteamiento del problema, los ensayos de placa estandarizados más empleados son: el ensayo de placa rectangular y viga EFNARC (*European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry*) y el ensayo de placa circular ASTM C1550-10 (*Round Determinate Panel Test, RDP*) (García, Agulló, Aguado, & Canals, 2004). Estos ensayos tiene una ventaja, ya que en estos, las fibras (caucho, metálicas, sintéticas, etc.) no tienden a alinearse como pasa en los ensayos de vigueta.

3.4 FIBRAS METÁLICAS

3.4.1 Definición

La norma ASTM C 1018-97, define 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”. Desde los años 70, se han empleado las fibras metálicas como adición al concreto, pues desde entonces se han realizado gran cantidad de estudios que han confirmado que aunque la adición de este tipo de fibras incrementa el costo del concreto, las fibras confieren mejores propiedades mecánicas a la mezcla, como lo es la tenacidad, resistencia a la flexión, control del agrietamiento, entre otros. El incremento en dichas propiedades se adquiere con un impacto en la manejabilidad de la mezcla, la cual disminuye con el incremento de fibras en la mezcla; los procesos de mezclado, compactación y colocación se vuelven más exigentes, los cuales son determinantes para garantizar la correcta distribución aleatoria de las fibras en toda la

mezcla. La dosificación, relación de aspecto y tipología de las fibras son variables que determinan notablemente la mejora en las propiedades anteriormente mencionadas.

3.4.2 Historia

El uso de diferentes tipos de fibras como adición al concreto se ha venido empleando desde tiempos antiguos; por su parte, los romanos emplearon cabello de animales y paja para fortalecer los morteros cementicios y los ladrillos de barro respectivamente, con los que se construyó el Coliseo en Roma. A comienzos del siglo XX, fibras de asbesto fueron empleadas en el concreto, pero debido a sus implicaciones en la salud de las personas, no fueron muy acogidas. Los primeros estudios realizados sobre fibras de acero fueron realizados por Graham en 1911, los cuales se enfocaron en la resistencia y estabilidad del concreto (Mármol, 2010); luego en 1920, Griffith realizó los primeros estudios científicos. Durante la Primera Guerra Mundial, en 1940, fibras de acero rectas se utilizaron para reparar pistas de aeropuertos en Estados Unidos. Luego en Europa, en 1963, se inician los estudios para analizar las fibras como refuerzo del concreto, por parte de los científicos industriales italianos: Romualdi, Batson y Mandel, (Macafferri, 2011), publicaron algunos artículos que impulsaron el interés por el concreto reforzado con fibras, en el marco de la búsqueda de materiales compuestos (Zollo, 1996). En esta época, se estudiaron otras fibras de diferentes materiales que podrían adicionarse al concreto como las fibras de vidrio y de polipropileno, las cuales, hoy en día todavía se encuentran en estudio.

Romualdi y Batson, iniciaron el estudio científico del concreto reforzado con fibras (FRC), propusieron que el incremento en la resistencia a la flexión y la tenacidad que refleja el concreto adicionado con fibras metálicas es producto de la habilidad que las fibras tienen de resistir las fisuras. Posteriormente, en 1964, Romualdi y Mandel, mostraron que la resistencia que se obtiene hasta la aparición de la primera fisura depende directamente del espaciamiento entre las fibras, lo que indica que el comienzo de las pequeñas fisuras internas que dan cabida posteriormente a una fractura, puede retardarse mediante la adición de fibras y de esta manera obtener un incremento en la resistencia a la flexión y en la tenacidad; de esta manera, Chang y Chai en 1995, concluyen que este incremento en resistencia es función del contenido de fibras y su relación de aspecto, indican igualmente que es necesaria la realización de estudios que tengan en cuenta tales parámetros, en donde se realicen ensayos en probetas que contengan diferentes tipos y contenido de fibras.

Ya en 1970, se construye el primer pavimento con fibras en EE. UU y en 1990, se inicia la comercialización de fibras de acero, las cuales llegan a Colombia a finales de la década; luego en el año 2002, se fabrican los primeros pisos industriales con concreto adicionado con fibras metálicas en el país (ACI, Seccional Colombiana, 2010). La primera norma de fibras en Colombia se establece en 2004, *NTC 5214, Fibras de acero para refuerzo de concreto*.

3.4.3 Clasificación

Como resultado de las propiedades que las fibras le confieren al concreto, estas son empleadas como adición al concreto destinado a diferentes usos, como lo son los túneles, la minería, los pisos, los pavimentos, prefabricados, entre otros; se destacan principalmente en el campo de los pisos industriales, pues es en donde se tiene la mayor demanda comercial de fibras (Sika S.A., 2010). Estas fibras pueden ser clasificadas principalmente en dos grupos:

- *Por material:* Fibras metálicas, sintéticas, de vidrio o naturales.
- *Por funcionalidad, geometría y dosificación:* Microfibras, macrofibras.

3.4.3.1 Clasificación por materiales

Dependiendo de la necesidad, diferentes materiales pueden componer las fibras, las más populares son (Sika S.A., 2010):

- *Fibras metálicas:* Estas fibras son de acero (generalmente de bajo contenido de carbón) y tienen usualmente una relación de aspecto (relación entre la longitud y el diámetro) que varía entre 20 y 100.
- *Fibras sintéticas:* Estas fibras pueden estar compuestas por acrílico, aramida, carbón, polipropileno, poliestileno, nylon, poliéster, etc.
- *Fibras de vidrio:* Estas fibras compuestas por vidrio, la mayoría son resistentes a los álcalis.
- *Fibras naturales:* Pueden ser de origen de coco, sisal, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc. El diámetro de estas fibras varía entre 0,2 y 0,5 mm, con valores de absorción superiores al 12%.

3.4.3.2 Clasificación por funcionalidad, geometría y dosificación

Actualmente, existen dos tipos principales de fibras dependiendo de su finalidad, las cuales pueden ser microfibras o macrofibras.

3.4.3.2.1 Microfibras

Este tipo de fibras se emplea para evitar la fisuración del concreto en estado fresco o antes de las 24 horas. Se dosifica en el concreto en pequeños porcentajes de volumen, los cuales oscilan entre 0,03 a 0,15%. Las fibras más conocidas son las fibras de polipropileno cuya dosificación en peso varía entre 0,3 a 1,2 kg/m³. Estas fibras tienen diámetros entre 0,023 a 0,05 mm, las cuales pueden ser fibriladas o mono fibriladas.



Ilustración 6 – Microfibras (Sika S.A., 2010)

3.4.3.2.2 *Macrofibras*

Las macrofibras tienen la finalidad de prevenir la fisuración en estado endurecido, al reducir el ancho de fisura, en caso de que se presente y en tal caso que la estructura fisurada funcione adecuadamente. Las dosificaciones varían entre 0,2 y 0,8% del volumen de concreto; en términos de peso varían dependiendo de la densidad del material, la dosificación de las fibras de acero varía de 20 a 50 kg/m³ y la de las fibras sintéticas de 2 a 9 kg/m³. Las macrofibras más empleadas son las mencionadas anteriormente, con diámetros entre 0,05 y 2,0 mm, con una relación de aspecto (L/d) de 20 a 100.



Ilustración 7 – Macrofibras, ejemplos de geometrías (Sika S.A., 2010)

La resistencia a la compresión del concreto no se ve afectada en mayor medida con la adición de fibras, en algunos casos se ve incrementada como se presenta en el estudio realizado por Holschemacher, Mueller, & Ribakov en el 2009, en donde se analizaron tres mezclas adicionadas con dos configuraciones de fibras diferentes (dos rectas con anclajes en las puntas y diferentes esfuerzos últimos de tensión, F1 y F2, y una corrugada F3); en otros casos permanece constante

como se indican en algunos documentos del ACI (ACI, Seccional Colombiana, 2010) y el estudio realizado por Ding & Wolfgang en 1999. A continuación, se ilustran los resultados que se reportan en dichos estudios.

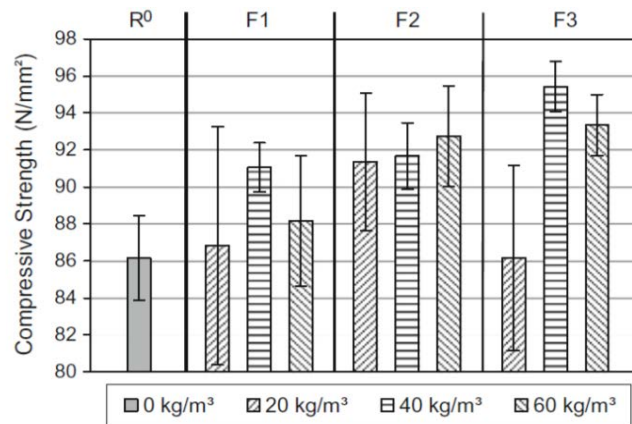
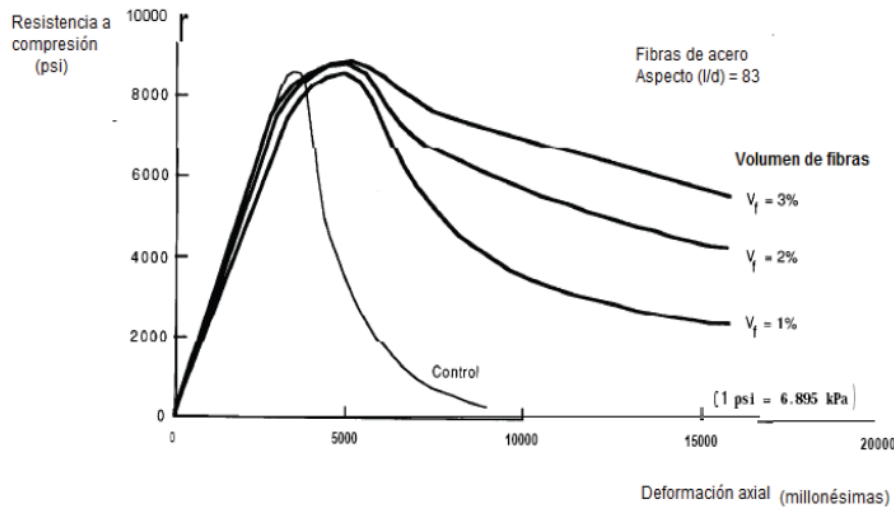


Gráfico 8 – Resistencia a la compresión promedio de concreto de alta resistencia adicionado con fibras metálicas en diferentes porcentajes (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009)

Como se puede observar, en el **Gráfico 8**, en este estudio se obtuvo un incremento en la resistencia a la compresión, para fibras rectas y corrugadas, igualmente la resistencia a la compresión incrementó aleatoriamente con mayores porcentajes de fibras.

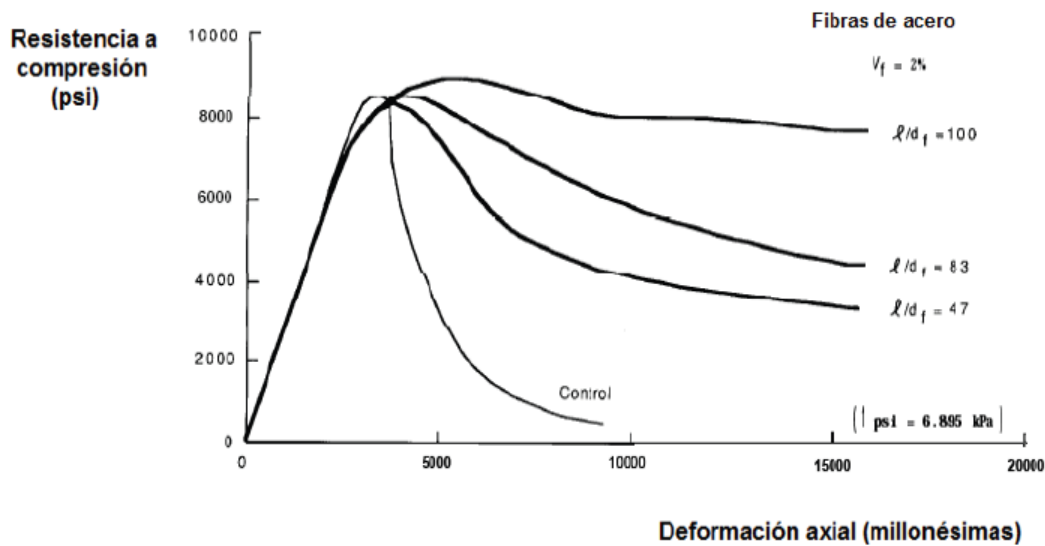


**Efecto del contenido de fibras en la curva
Esfuerzo-deformación del concreto (ACI 544.4R)**

Gráfico 9 – Resistencia a la compresión de concreto adicionado con diferentes porcentajes de fibras metálicas (ACI, Seccional Colombiana, 2010)

Por su parte, la ACI reporta que para mezclas de concreto adicionadas con diferentes porcentajes de fibras metálicas, 1, 2 y 3% con relación de aspecto 83 (**Gráfico 9**) y diferentes relaciones de aspecto, 47, 83 y 100 con porcentaje de adición de fibras del 2% (**Gráfico 10**), se obtienen

resistencias a la compresión muy similares. Aun así, en este estudio, en ambos casos se tiene un incremento gradual de la resistencia a la compresión en función de la deformación, pues como se observa en ambas gráficas, para el mayor porcentaje de adición de fibras de acero (3%) y la mayor relación de aspecto (100), se obtienen las mayores resistencias a la compresión a grandes deformaciones. El comportamiento de las mezclas adicionadas con fibras, como lo muestran los resultados, es mejor en comparación a la mezcla sin adición en la totalidad de los casos, lo que comprueba que la adición de fibras de acero al concreto mejora la resistencia a la compresión a grandes deformaciones.



**EFFECTO DEL ASPECTO DE LAS FIBRAS EN LA CURVA
ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DEL CONCRETO
(ACI- 544.4R-88)**

Gráfico 10 – Resistencia a la compresión de concreto adicionado con fibras con diferente relación de aspecto (ACI, Seccional Colombiana, 2010)

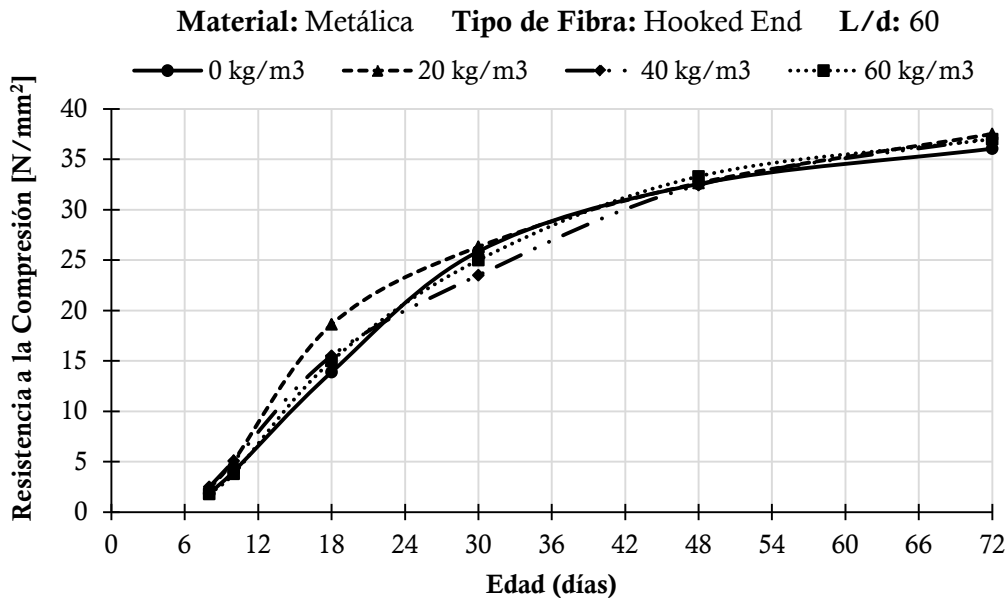


Gráfico 11 – Comparación de la resistencia a la compresión de concretos adicionados con diferentes porcentajes de fibras metálicas (Ding & Wolfgang, 1999)

Como consecuencia de la adición de fibras al concreto, la resistencia a la compresión varía de una manera muy leve; en bajas dosificaciones, esta afectación es despreciable, como se puede observar en el **Gráfico 11**, resultado del estudio de Ding y Wolfgang en 1999, a diferentes edades, la mezcla analizada, la cual incluía el mismo tipo de fibra en diferentes dosificaciones, registró resistencias muy similares en edades de 30, 48 y 72 días.

3.4.4 Tenacidad

La tenacidad es la propiedad del concreto que mejor se ve influenciada por la adición de fibras al concreto, pues son éstas las que permiten que el concreto soporte cargas luego de que el agrietamiento de la matriz cementicia ha iniciado. Gran cantidad de estudios han comprobado este incremento, con la elaboración de ensayos en probetas como los son placas circulares, placas cuadradas y vigas, mediante metodologías estandarizadas como los procedimientos descritos en las normas EFNARC y ASTM.

Un parámetro que influye en gran medida en la mejora de la tenacidad del concreto y que es de gran importancia en el momento de seleccionar un tipo de fibra determinado, corresponde al anclaje que la fibra tenga en la matriz de concreto, ya que la fibra es la encargada de resistir el agrietamiento. Esta debe ser capaz de soportar los esfuerzos de tensión, por lo tanto, su composición, dimensiones, y forma son de vital importancia. A continuación se ilustran (**Figura**

2) los diferentes mecanismos por los cuales diferentes tipos de fibras resisten los esfuerzos de tensión.

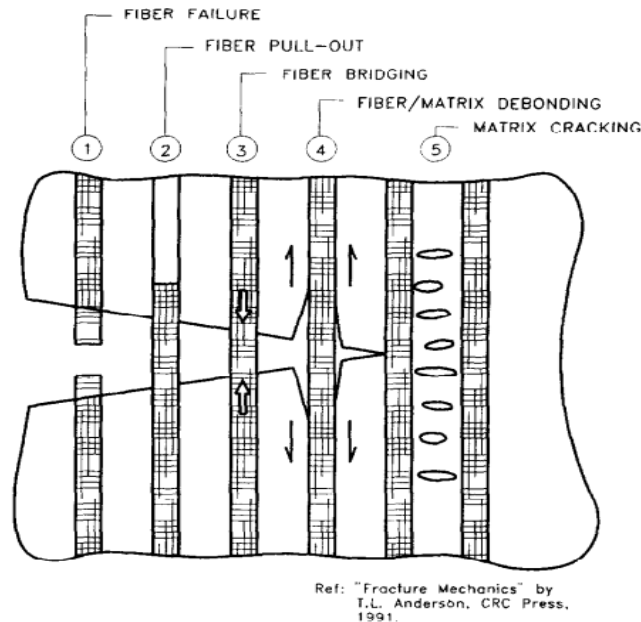


Figura 2 – Mecanismos de absorción de energía fibra/matriz (Zollo, 1996)

Los mecanismos de absorción de energía fibra/matriz, descritos por Zollo (1996) corresponden a:

1. **Falla de la fibra:** En este caso, la fibra absorbe la energía llegando a su resistencia máxima, resultado de una buena adherencia con la matriz cementicia.
2. **Desprendimiento de la fibra:** La fibra pierde la adherencia con la matriz cementicia, por lo tanto no absorbe gran cantidad de energía pues no desarrolla su resistencia última.
3. **Alargamiento de la fibra:** La fibra no alcanza su resistencia última, pero fluye, disipando energía sin fracturarse.
4. **Falla de la matriz cementicia:** En este caso, se presenta una buena adherencia fibra-matriz, pero la fibra supera la resistencia de la matriz, haciendo que esta última falle.
5. **Fisuramiento de la matriz cementicia:** Se presentan diferentes fallas en la matriz cementicia, al igual que alargamiento de la fibra; en este caso la matriz cementicia y la fibra disipan energía.

Los tipos de mecanismos de absorción de energía se desarrollarán dependiendo de las propiedades geométricas y de los materiales que componen las fibras. Las macrofibras que se comercializan actualmente tienen diferentes formas (lisas, rugosas), diferentes formas de anclarse al concreto y diferentes dimensiones, como se muestra en la **Ilustración 8**, estas características determinan en gran medida el comportamiento del concreto ante diferentes situaciones de carga.

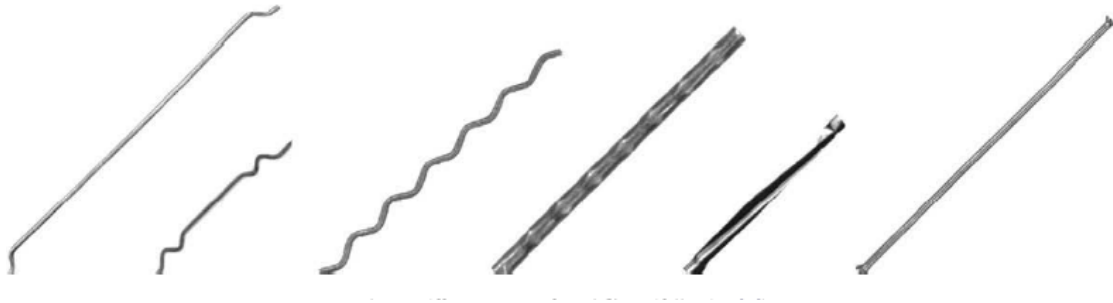


Ilustración 8 – Tipos de fibras metálicas (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009)

Varios estudios se han realizado con el fin de analizar el comportamiento de las fibras como adición del concreto reforzado y sin reforzar, teniendo en cuenta diferentes dimensiones y propiedades mecánicas de las fibras. Es el caso del estudio realizado por Holschemacher, Mueller, & Ribakov (2009), en donde se realizaron ensayos de flexión en vigas empleando fibras en cuatro dosificaciones (0, 20, 40 y 60 kg/m³), tres diferentes tipos de fibras con dos configuraciones diferentes (dos rectas con anclajes en las puntas y diferentes esfuerzos últimos de tensión, F1 y F2, y una corrugada, F3), en tres mezclas diferentes, una sin refuerzo principal, otra con dos barras No. 6mm y finalmente una con 2 barras No. 12mm.

A continuación (**Gráfico 12**), se ilustran los resultados de esta investigación. En donde se comprueba que el comportamiento de las fibras como adición al concreto depende tanto de su dosificación como de sus dimensiones, igualmente es importante analizar su comportamiento con el concreto reforzado. En este caso, las fibras rectas con mayor esfuerzo último de tensión (F2) fueron aquellas que registraron mayor tenacidad, seguidas por las fibras rectas con menor esfuerzo último de tensión (F1) y finalmente las fibras corrugadas (F3), presentaron la más baja tenacidad. La adición de fibras, en presencia de refuerzo convencional no incrementó en gran medida la tenacidad de las mezclas, pues se registró un comportamiento similar para los tres tipos de fibras; aún así, es importante resaltar que en la totalidad de los casos, el incremento del porcentaje de adición de fibras es proporcional al incremento de tenacidad de la mezcla.

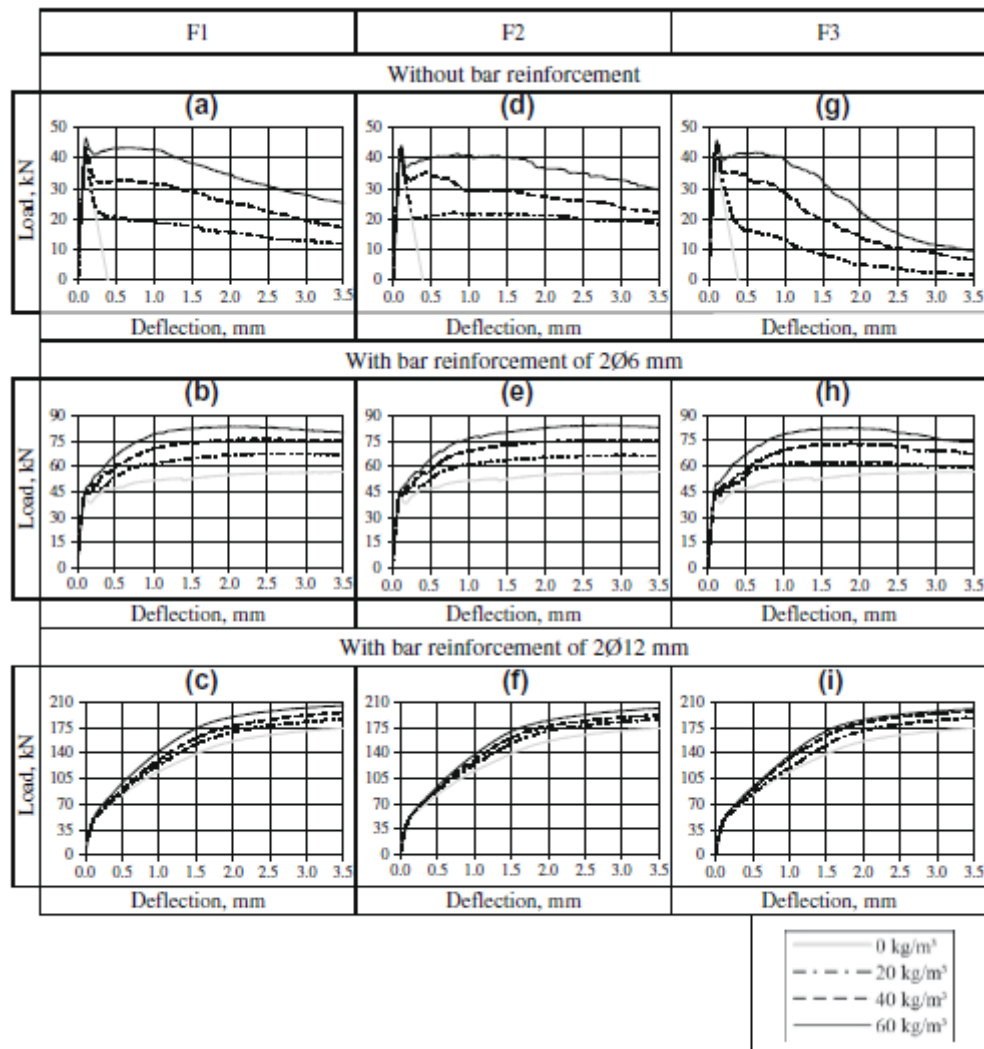


Gráfico 12 – Promedio de curvas carga-desplazamiento de concretos de alta resistencia, reforzados y sin reforzar, con diferentes contenidos de fibras (Holschemacher, Mueller, & Ribakov, 2009)

Por otro lado, se puede observar que las vigas con refuerzo principal, registran un incremento gradual en la resistencia a la flexión en función de la deformación, sin caídas súbitas de carga como se presenta en la mezcla sin este refuerzo, lo cual indica que es deseable manejar mezclas con refuerzo principal y fibras, pues estas últimas corresponden a un complemento de la mezcla que aporta mayor tenacidad, es importante mencionar que la mezcla adicionada únicamente con fibras presenta un comportamiento inferior, en términos de carga, con aquellas mezclas con refuerzo principal, lo que indica que las fibras no son capaces de reemplazar este tipo de refuerzo.

3.4.5 Dosificación y mezclado

Las fibras metálicas, dependiendo de su relación de aspecto vienen en diferentes presentaciones, sueltas o en grupos de varias fibras unidas con materiales solubles en agua, dependiendo de esto, previo a la adición de estas a la mezcla se deben separar o no, por medio de procesos de vibrado. La adición de las fibras a la mezcla puede presentar algunos problemas por su incorrecta inclusión, ya que se recomienda adicionarlas de manera gradual, manualmente (Ilustración 9), por medio de bandas transportadoras (Ilustración 9) o con dosificadoras automáticas (Ilustración 10), con el fin de evitar la aglomeración de las mismas, en formas conocidas como “erizos”, lo que imposibilita a las fibras desarrollar su potencial en la mezcla.



Ilustración 9 – Adición manual de fibras (Cardona, 2010)

La problemática de aglomeración de fibras, depende tanto de las propiedades de las fibras como las propiedades de la mezcla, la relación de esbeltez de las fibras, curvas granulométricas discontinuas, tamaños máximos de agregados muy grandes y tiempos de mezclado extensos, corresponden a algunas de las razones de la aglomeración de fibras en la mezcla, que se puede presentar, tanto al inicio como al final del mezclado (ArcelorMittal, 2010).



Ilustración 10 – Dosificación automática de fibras (Marson Franco, 2010)

Las fibras se incluyen y se mezclan en el concreto tal como los agregados, estas se pueden incluir con los agregados o al final de la mezcla, pero en ninguno de los casos como el componente principal de la mezcla (Bekaert S.A., 2005). Se requiere de un mezclado adicional por un tiempo de entre 3 a 10 minutos, dependiendo del tipo de fibra, para garantizar su correcta dispersión en la mezcla.

3.5 ENSAYOS DE TENACIDAD

Actualmente se encuentran normalizados varios ensayos que buscan cuantificar por medio de diferentes procedimientos la capacidad de disipación de energía de probetas de concreto de diversas geometrías, lo cual permite realizar comparaciones de probetas con diferentes propiedades y adiciones, dando cabida a un análisis más certero de estas mezclas de concreto. Algunos de estos ensayos son el de placa circular (ASTM C-1550), placa cuadrada (EFNARC) y resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC, ASTM C-1609, ASTM C-1018). Estos ensayos, se han empleado en gran cantidad de estudios debido a que el tipo de falla obtenida surge por la combinación de esfuerzos (flexión y tracción), en los que se encuentran sometidos los revestimientos, en los que se usa el concreto lanzado reforzado con fibras como lo es en túneles y minería (Cengiz & Turanli, 2004). Los ensayos de placa circular y rectangular, según (Farrés & Serrat, 2007), son más realistas para la caracterización de revestimientos de hormigón proyectado adicionado con fibras sometidos a cargas puntuales, puesto que se tiene en cuenta el reparto bidimensional de la carga apareciendo un estado de flexión biaxial de respuesta, tal como se presenta en los pisos industriales sobre los que se almacena gran cantidad de mercancía ubicada en estructuras que transfieren este tipo de cargas. Por otra parte, el ensayo de viga es empleado para determinar la tensión residual y el módulo de rotura en vigas sometidas a flexión pura, condición de carga que es importante dentro del análisis global de cargas de una estructura de concreto, además este parámetro que se emplea para caracteriza el concreto como lo es el ensayo de resistencia a la compresión (NRMCA, 2010).

3.5.1 Placa circular (ASTM C – 1550)

El ensayo de placa circular desarrollado por la ASTM en el año 2002, es el resultado de tres años de investigación, el cual analiza el comportamiento post-fisuración del concreto fibroreforzado, proyectado y fundido en sitio (Bernard, 2003). Es un ensayo que determina la tenacidad flexural de probetas circulares de concreto fibroreforzado apoyadas sobre tres pivotes ubicados simétricamente en una circunferencia de 750 mm. El desempeño de las probetas mediante esta norma, es cuantificado en términos de energía absorbida entre el inicio de la carga, aplicada en el punto central de la probeta, y una deflexión en esta punto de 40 mm (la normativa recomienda que la deflexión al final del ensayo sea de por lo menos 45 mm). La carga se debe aplicar a una

velocidad constante de $4,0 \pm 1,0$ mm/min. El ensayo se realiza a los 28 días de fundida la probeta.

3.5.1.1 Dimensiones de la probeta

La probeta del ensayo de placa circular ASTM C – 1550 corresponde a una placa circular de 800 mm de diámetro y 75 mm de espesor (Figura 3).

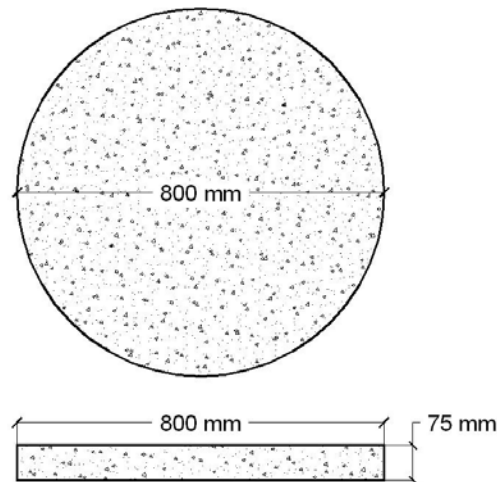


Figura 3 – Esquema placa circular (ASTM C 1550-10)

3.5.1.2 Montaje y elemento de carga

La probeta se soporta en tres pivotes ubicados simétricamente circunscritos en una circunferencia de 750 mm de diámetro, dichos soportes deben ser capaces de soportar una carga de 100 kN aplicada verticalmente en el centro de la probeta, se debe garantizar que los soportes sean lo suficientemente rígidos para no desplazarse en dirección radial ni vertical. La carga debe ser transmitida a través de un elemento cilíndrico de 50 ± 5 mm de diámetro con una punta esférica de $80 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ de diámetro. La Figura 4 ilustra el esquema del montaje del ensayo sugerido por la normativa.

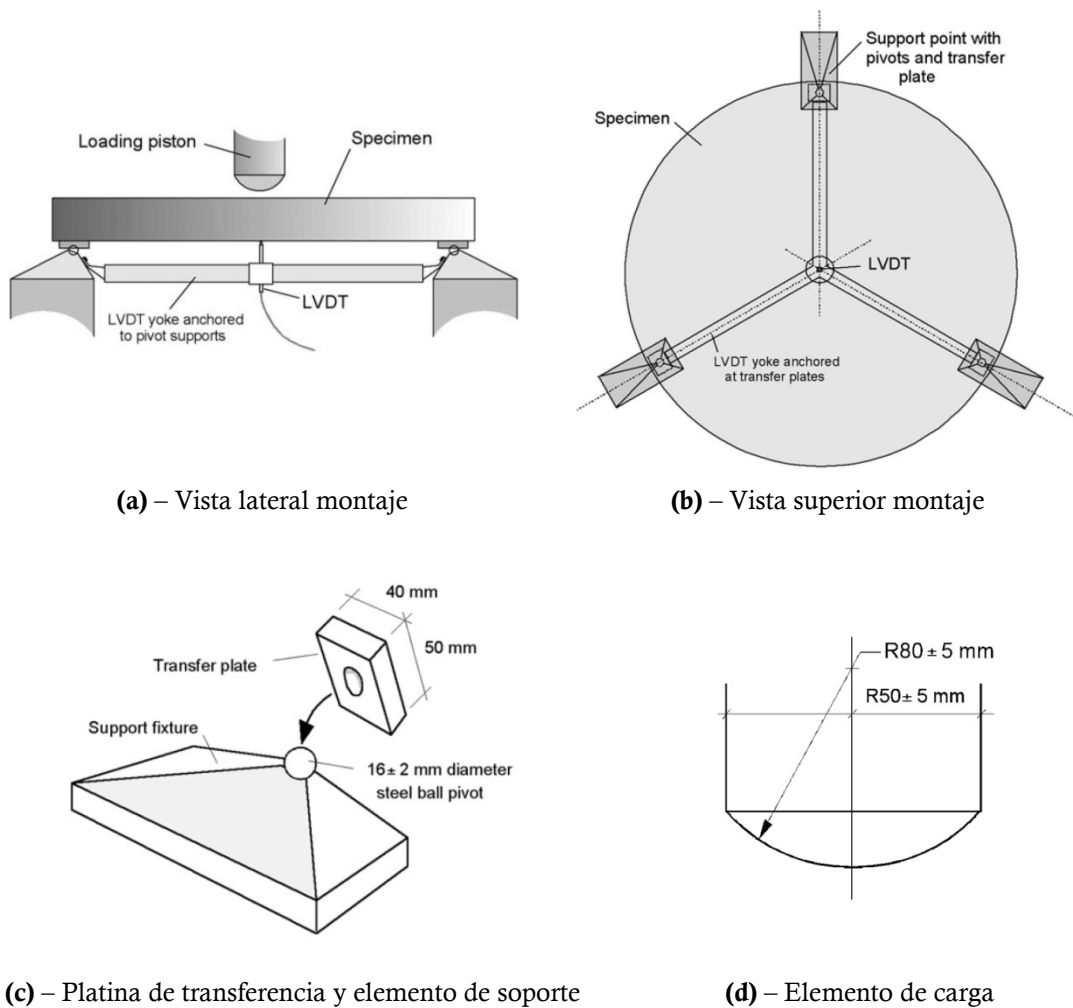


Figura 4 – Esquema montaje placa circular (ASTM C 1550-10)

3.5.1.3 Investigaciones realizadas

Gran cantidad de ensayos de placa circular se han realizado a nivel mundial, con el fin de evaluar la tenacidad de diferentes mezclas de concreto, como es el caso, de las investigaciones realizadas por García, et al, en el 2004, Canals i Llopart en el 2002, entre otras. Canals i Llopart evaluó la tenacidad de diferentes mezclas de concreto mediante el ensayo de placa circular australiano (RDP Test); una mezcla de concreto sin adición, una mezcla adicionada con fibras sintéticas en una dosificación de $4,5 \text{ kg/m}^3$ y una mezcla adicionada con fibras metálicas en una dosificación de 25 kg/m^3 , las cuales se muestran en la Ilustración 11.

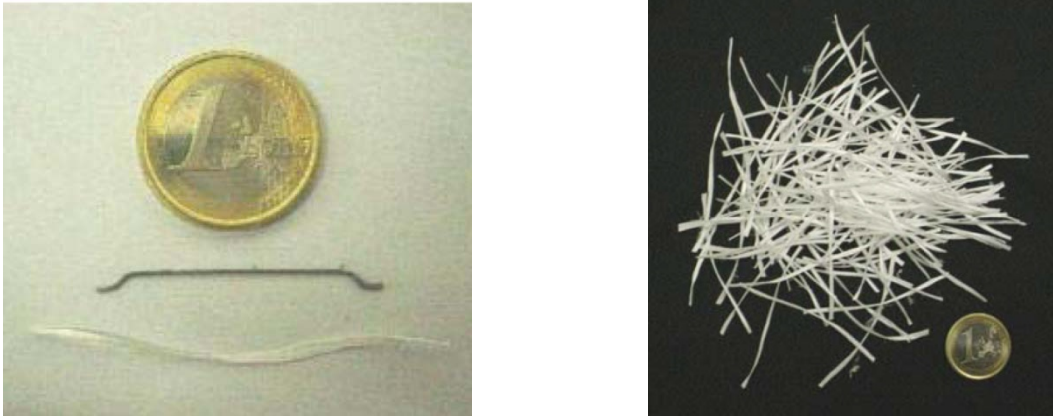


Ilustración 11 – Fibras metálicas y sintéticas empleadas (Canals i Llopart, 2002)

En esta investigación, se realizó el montaje (Ilustración 12) de acuerdo a la normativa australiana; resultado de la condición de apoyo, la falla de las probetas fue en tres grietas en dirección radial (Ilustración 15) debido a su condición isostática (Canals i Llopart, 2002).

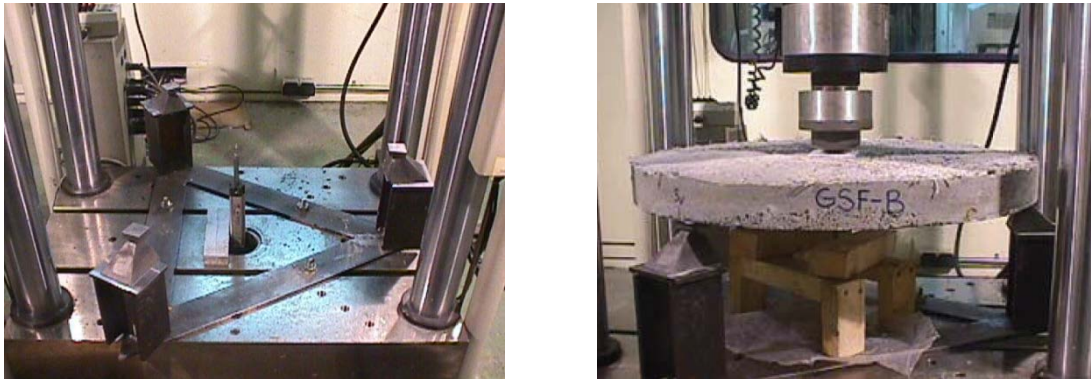


Ilustración 12 – Montaje de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002)

En la Ilustración 13, se observa la falla de una probeta sin adición luego del ensayo de placa circular (RDP Test), y en la Ilustración 14, se evidencia la falla de una probeta adicionada con fibras sintéticas. El comportamiento para la mezcla sin adición es frágil, mientras que para la mezcla adicionada con fibras sintéticas, la falla obtenida es soportada por las fibras, que impiden el desprendimiento de la placa.



Ilustración 13 – Probeta circular sin adición
(Canals i Llopart, 2002)



Ilustración 14 – Probeta circular adicionada con
fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002)

La totalidad de las placas registraron tres grietas radiales, a excepción de una probeta adicionada con fibras metálicas (Ilustración 15 – (c)), en donde se evidenció una falla longitudinal compuesta por dos grietas radiales; en este caso, según la normativa se debe descartar la probeta al obtener este tipo de falla.



(a) – Probeta adicionada con
fibras metálicas
(3 grietas radiales, falla ideal)



(b) – Probeta sin adición
(3 grietas radiales)



(c) – Probeta adicionada con
fibras metálicas
(2 grietas radiales)

Ilustración 15 – Falla de probetas luego de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002)

El estudio da como resultado una disipación de energía para un desplazamiento a 40 mm de aproximadamente 385 Julios para la mezcla con fibras metálicas (Gráfico 13), aproximadamente 250 Julios para la mezcla con fibras sintéticas (Gráfico 14) y 10 Julios para la mezcla si adición (Gráfico 15), para la deformación última, que en último caso, se alcanza entre los 2 y 3 mm de deformación. Como se evidencia en las gráficas y en los resultados, las mezclas adicionadas con fibras, disipan gran cantidad de energía luego de la fractura, pues son estas las que se encargan de aportar tenacidad al material, en comparación a la mezcla sin adición la cual falla súbitamente.

La carga máxima, para las tres mezclas es similar, entre 20 y 25 kN, luego de esta, para las mezclas con adición se tiene un pequeño incremento de carga.

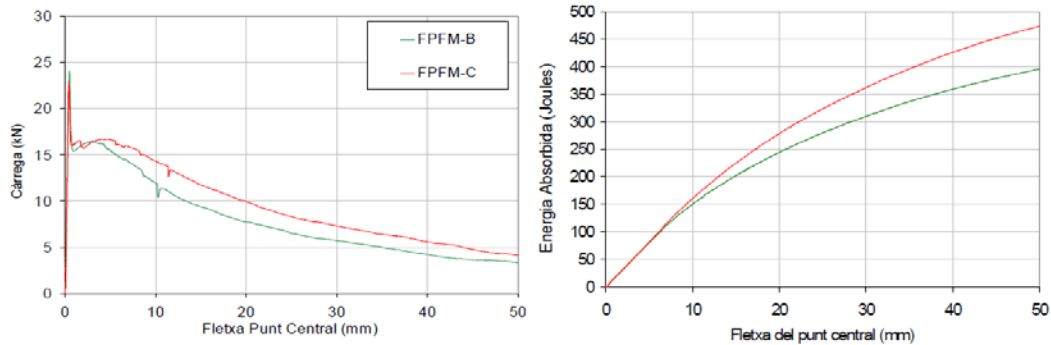


Gráfico 13 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002)

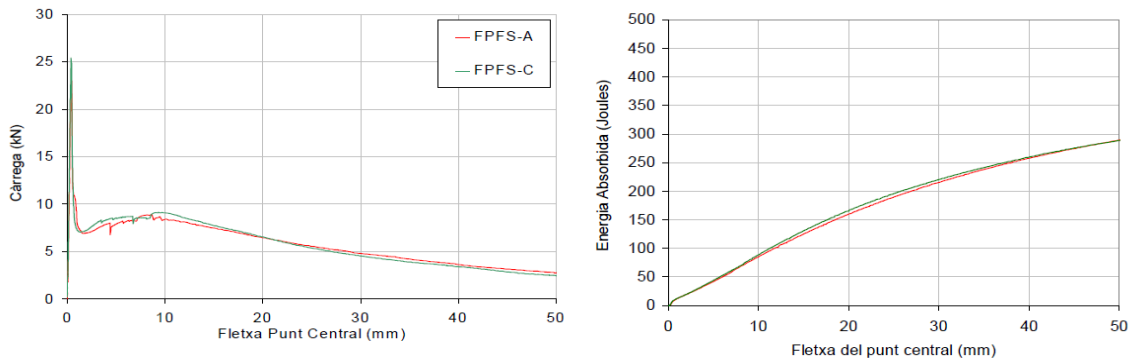


Gráfico 14 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002)

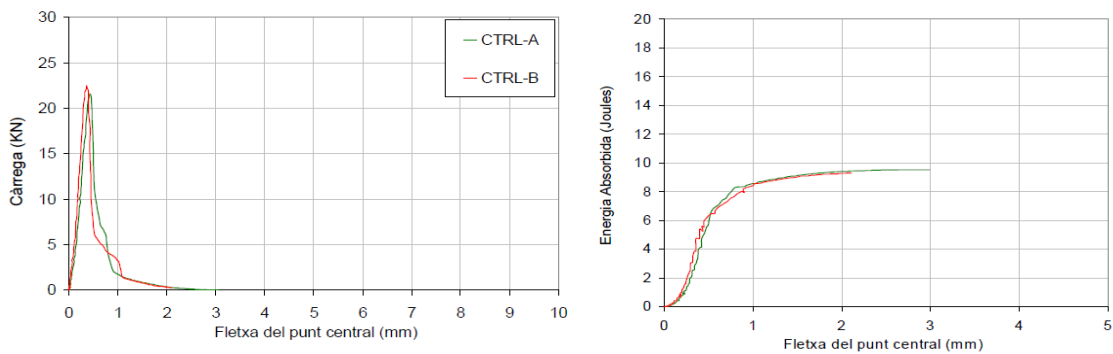


Gráfico 15 – Resultados de ensayo de placa circular, mezcla sin adición (Canals i Llopart, 2002)

3.5.2 Placa cuadrada (EFNARC)

El ensayo de placa cuadrada es un ensayo que determina la tenacidad flexural de probetas cuadradas de concreto fibroreforzado (fundidas en sitio o proyectadas), la probeta se debe apoyar sobre un marco que soporte sus cuatro bordes. El desempeño de las probetas mediante esta norma, es cuantificado en términos de energía absorbida entre el inicio de la carga, aplicada en el punto central de la probeta, por medio de una superficie de contacto cuadrada, y una deflexión central de 25 mm. La carga se debe aplicar a una velocidad constante de 1,5 mm/min. El ensayo se realiza a los 28 días de fundida la probeta.

3.5.2.1 Dimensiones de la probeta

La probeta del ensayo de placa cuadrada (EFNARC) corresponde a una placa cuadrada de 600 mm de lado y 100 mm de espesor (Figura 5)

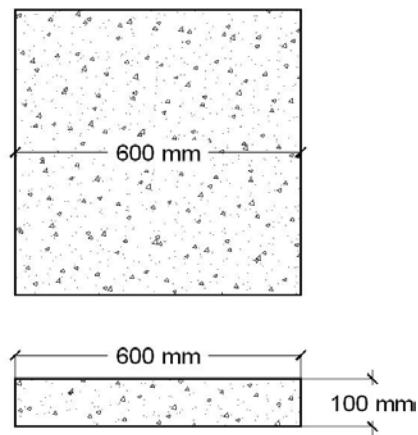


Figura 5 – Esquema placa cuadrada (EFNARC)

3.5.2.2 Montaje y elemento de carga

La probeta se debe soportar en un marco cuadrado con un ancho de 100 mm en el cual se apoya cada uno de los cuatro bordes de la placa, se debe garantizar que el marco sea lo suficientemente rígido para no deformarse en dirección vertical ni horizontal. La carga debe ser transmitida a través de una superficie de contacto cuadrada de 100 mm de lado. La Figura 6 ilustra el montaje del ensayo.

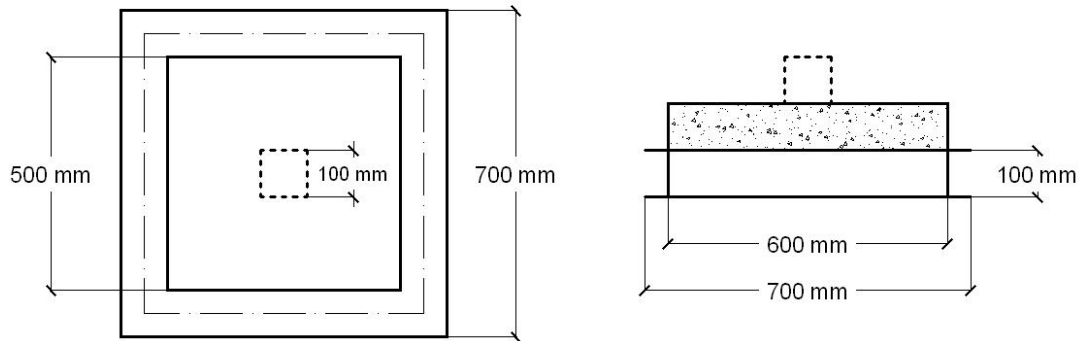


Figura 6 – Esquema montaje ensayo placa cuadrada (EFNARC)

3.5.2.3 Investigaciones realizadas

El ensayo de placa cuadrada (EFNARC) tiene una gran cobertura a nivel mundial, se emplea para analizar la tenacidad de mezclas de concreto adicionadas con fibras, Cengiz y Turanlı en 2003 y Canals i Llopart en 2002 realizaron investigaciones sobre este tipo de ensayo empleando mezclas de concreto con diferentes tipos de fibras. Canals i Llopart evaluó la tenacidad de diferentes mezclas de concreto mediante el ensayo de placa cuadrada (EFNARC); una mezcla de concreto sin adición, una mezcla adicionada con fibras sintéticas en una dosificación de $4,5 \text{ kg/m}^3$ y una mezcla adicionada con fibras metálicas en una dosificación de 25 kg/m^3 , las cuales se muestran en la Ilustración 11.

En esta investigación, se realizó el montaje (Ilustración 16) de acuerdo a la normativa europea; resultado de la condición de apoyo, la falla de las probetas fue en diferentes grietas, generalmente en forma de equis (Ilustración 17) debido a su condición hiperestática (Canals i Llopart, 2002).

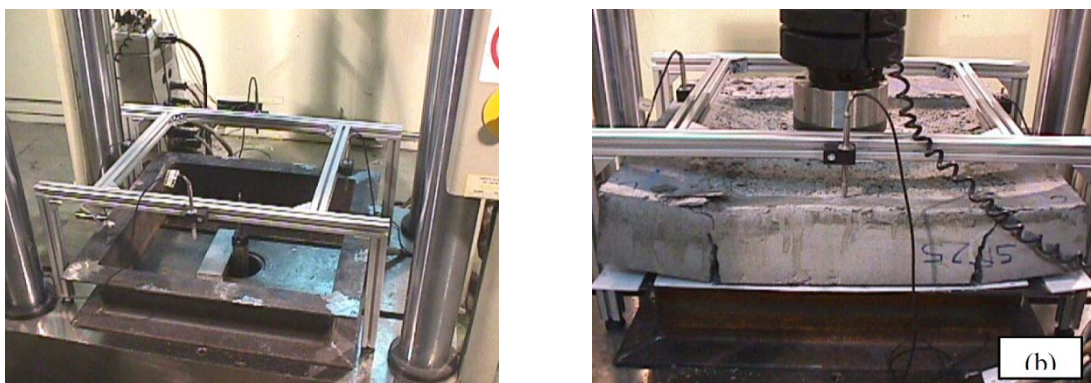
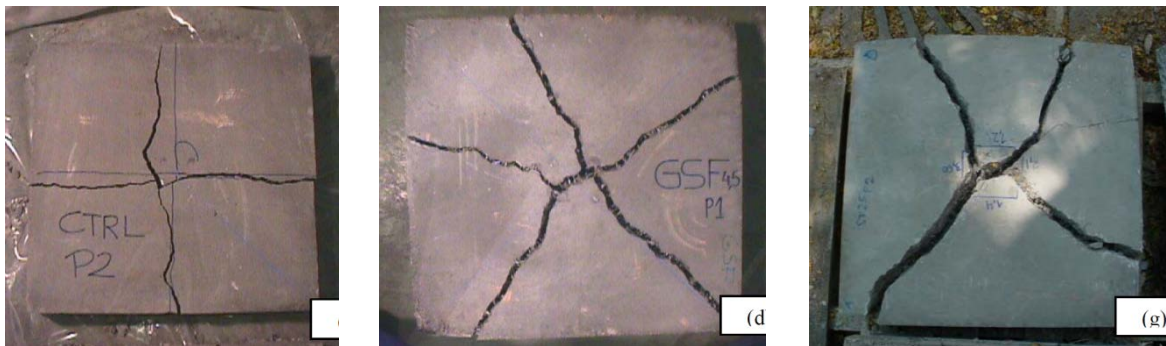


Ilustración 16 – Montaje de ensayo de placa cuadrada (Canals i Llopart, 2002)

En la Ilustración 17 – (a), se observa la falla de una probeta sin adición luego del ensayo de placa cuadrada, y en la Ilustración 17 – (b) y (c), se evidencia la falla de probetas adicionadas con fibras sintéticas y metálicas, respectivamente. El comportamiento para las mezclas es similar al reportado en los ensayos de placa circular, en donde la mezcla sin adición es frágil, mientras que en las mezclas adicionadas con fibras sintéticas y metálicas, disipan energía (*ver numeral 3.5.1.3*).

La totalidad de las placas registraron grietas en forma de equis, con un comportamiento aleatorio, a excepción de la mezcla sin adición, en donde la falla que se obtiene se genera desde el centro de la placa a los puntos medios de cada lado.



(a) – Probeta sin adición

(b) – Probeta adicionada con fibras sintéticas

(c) – Probeta adicionada con fibras metálicas

Ilustración 17 – Falla de probetas luego de ensayo de placa circular (Canals i Llopart, 2002)

El estudio da como resultado una disipación de energía para una deformación de 25 mm de aproximadamente 800 Julios para la mezcla con fibras metálicas (Gráfico 16), aproximadamente 650 Julios para la mezcla con fibras sintéticas (Gráfico 17) y 20 Julios para la mezcla si adición (Gráfico 18), para la deformación última, que en último caso, se alcanza a los 2 mm de deformación. Como se evidencia en las gráficas y en los resultados, las mezclas adicionadas con fibras, disipan gran cantidad de energía luego de la fractura, pues son estas las que se encargan de aportar tenacidad al material, en comparación a la mezcla sin adición la cual falla súbitamente. La carga máxima, para las tres mezclas varía entre 20 y 45 kN, la cual se alcanza aproximadamente en los primeros 5 mm de deformación.

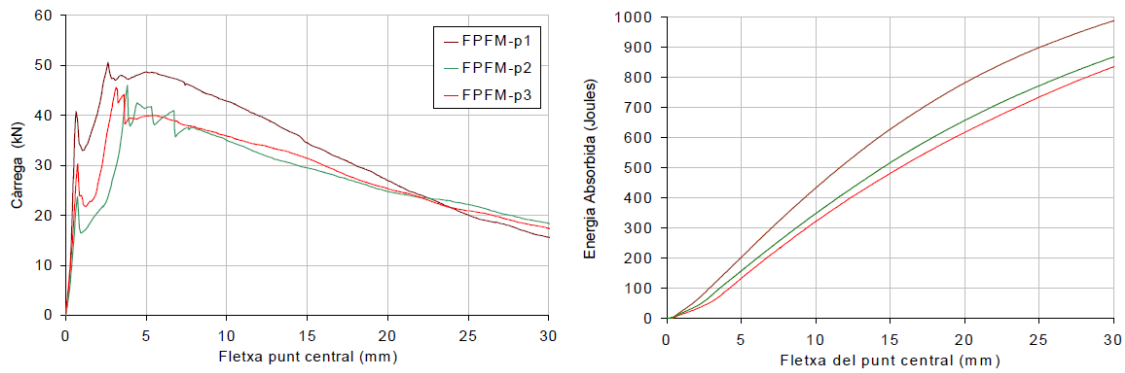


Gráfico 16 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002)

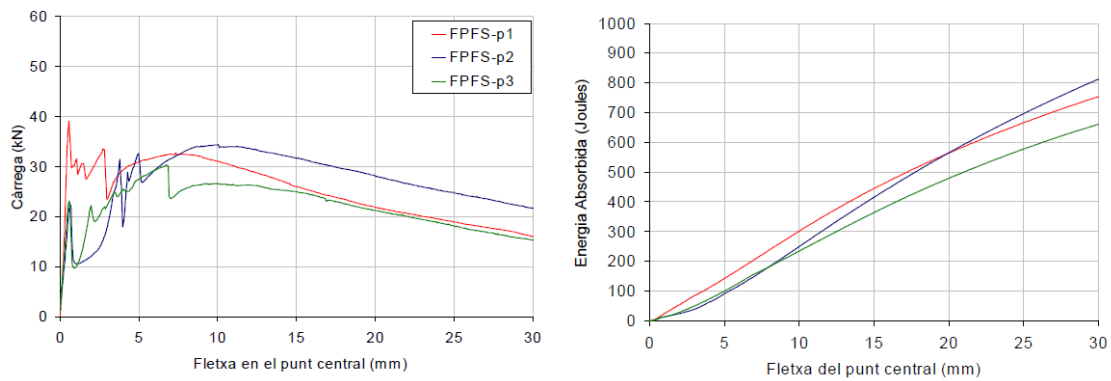


Gráfico 17 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002)

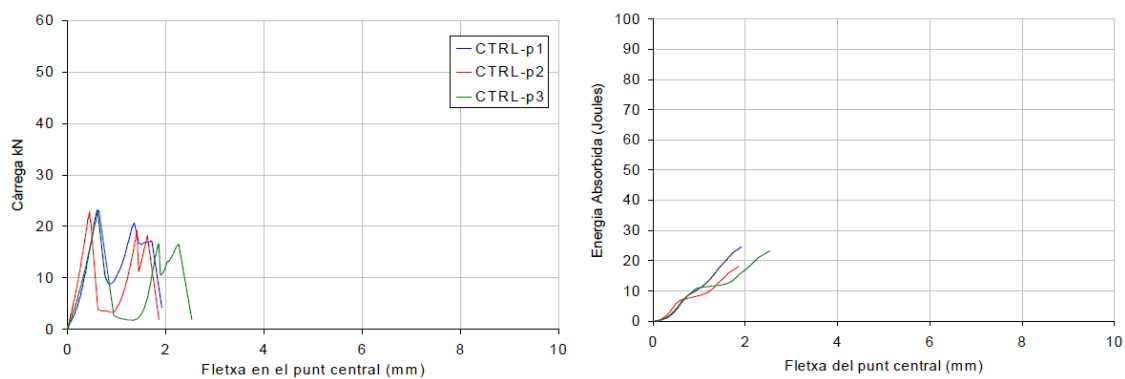


Gráfico 18 – Resultados de ensayo de placa cuadrada, mezcla sin adición (Canals i Llopart, 2002)

3.5.3 Resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC)

El ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC) es un ensayo que determina la tenacidad flexural de probetas rectangulares de concreto fibroreforzado (fundidas en sitio o proyectadas), las cuales deben estar soportadas en los extremos. El desempeño de las probetas mediante esta norma, es cuantificado en términos de energía absorbida entre el inicio de la carga, aplicada en los tercios medios de la probeta, y una deflexión central de 4 mm. La carga se debe aplicar a una velocidad constante de $0,25 \pm 0,05$ mm/min hasta alcanzar una deflexión de 0,5 mm; luego la velocidad puede incrementarse a $1,0 \pm 0,05$ mm/min hasta llegar a una deflexión final de 4 mm. El ensayo se realiza a los 28 días de fundida la probeta.

3.5.3.1 Dimensiones de la probeta

La probeta del ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC) corresponde a una viga de 75 mm de alto, 125 de ancho y 600 mm de largo, como lo ilustra la Figura 7.

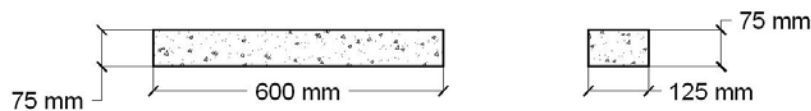


Figura 7 – Esquema viga (EFNARC)

En la Figura 8, se puede observar la orientación sugerida en la normativa europea, para obtener las vigas del ensayo de resistencia flexural y tensión residual (EFNARC) a partir de una placa cuadrada EFNARC de 600 mm de lado.

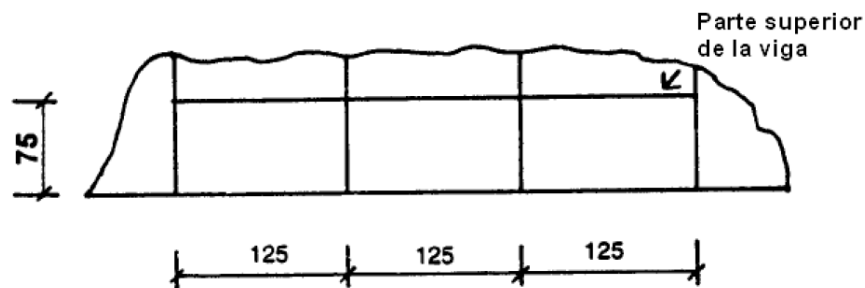


Figura 8 – Corte y orientación de vigas obtenidas de panel de hormigón proyectado (EFNARC, 1993)

3.5.3.2 Montaje y elementos de carga

La probeta se debe soportar en los extremos, sobre dos apoyos separados por una distancia de 450 mm entre sí, la carga debe ser transmitida a través de dos puntos, ubicados en los tercios medios de la longitud entre apoyos; los elementos de soporte y carga deben tener una superficie de contacto redondeada con un radio de 10 – 20 mm. La **Figura 9** ilustra el esquema del montaje del ensayo.

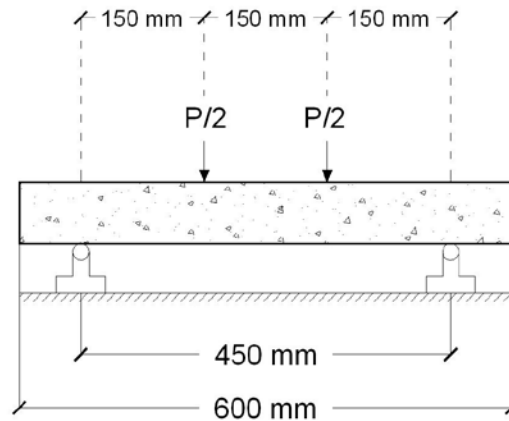


Figura 9 – Esquema montaje de ensayo resistencia flexural en viga (EFNARC)

3.5.3.3 Investigaciones realizadas

Ensayos de resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC) se han realizado mundialmente; Canals i Llopart evaluó la tenacidad de diferentes mezclas de concreto con diferentes tipos de fibras mediante este ensayo; una mezcla adicionada con fibras sintéticas en una dosificación de $4,5 \text{ kg/m}^3$ y una mezcla adicionada con fibras metálicas en una dosificación de 25 kg/m^3 , las cuales se muestran en la Ilustración 11.

En esta investigación, se realizó el montaje (Ilustración 18) de acuerdo a la normativa europea; resultado de la condición de apoyo, la falla de las probetas se presenta en el centro de la luz.

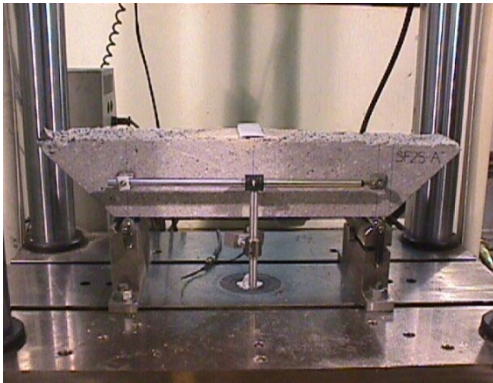


Ilustración 18 – Montaje de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas (Canals i Llopart, 2002)

El comportamiento para las mezclas adicionadas con fibras metálicas y sintéticas, es similar al reportado en los ensayos de placa circular y cuadrada, en donde las mezclas adicionadas con fibras sintéticas y metálicas, disipan energía (ver numeral 3.5.1.3 y 3.5.2.3).

El estudio da como resultado una disipación de energía para una deformación de 4 mm de aproximadamente 40 Julios para la mezcla con fibras metálicas (Gráfico 19), aproximadamente 30 Julios para la mezcla con fibras sintéticas (Gráfico 20). Como se evidencia en las gráficas y en los resultados, las mezclas adicionadas con fibras, disipan gran cantidad de energía luego de la fractura, pues son estas las que se encargan de aportar tenacidad al material. La carga máxima, para las dos mezclas es similar, varía entre 25 y 35 kN, esta se alcanza antes de una deformación de 0,5mm.

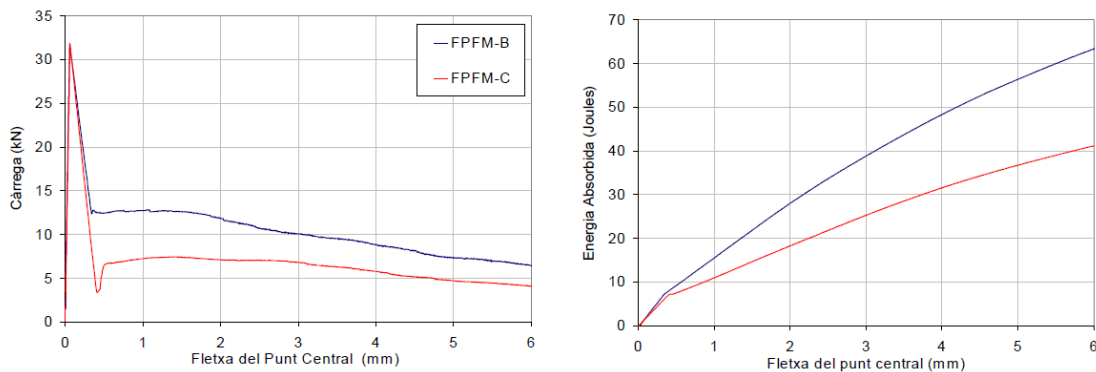


Gráfico 19 – Resultados de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas, mezcla adicionada con fibras metálicas (Canals i Llopart, 2002)

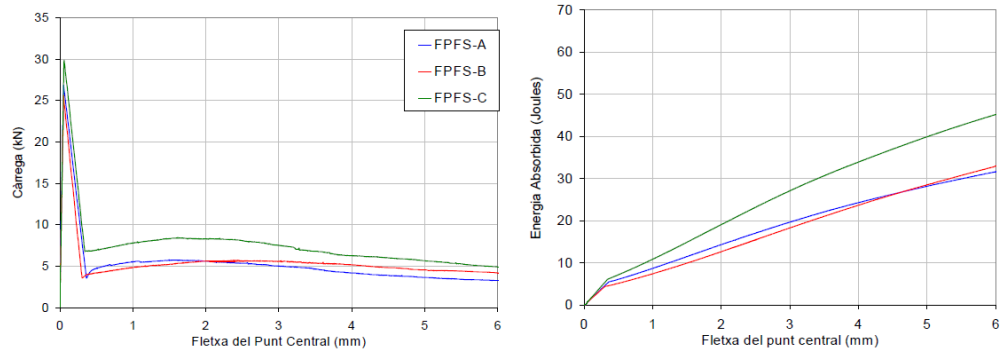


Gráfico 20 – Resultados de ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas, mezcla adicionada con fibras sintéticas (Canals i Llopart, 2002)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 DISEÑO DE MEZCLA

Se realizaron diferentes mezclas de concreto con el fin de evaluar los parámetros de tenacidad, estas se diseñaron con base en el procedimiento descrito por (Sánchez de Guzmán, 1996) para una resistencia promedio de 280 kg/cm² (4000 psi), conservando el mismo asentamiento, en la Tabla 4 se indica la distribución en peso por metro cúbico, de cada uno de los materiales empleados, en donde:

- N: Concreto sin adición
- C: Concreto adicionado con tiras de caucho en remplazo del 10% del volumen de agregado grueso
- F1: Concreto adicionado con fibras metálicas en una dosificación de 15 kg/m³
- F2: Concreto adicionado con fibras metálicas en una dosificación de 30 kg/m³

Tabla 4 – Diseño de mezcla

| Tipo de mezcla | Cemento [kg/m ³] | Agua [l/m ³] | Relación A/C | A. Grueso [kg/m ³] | A. Fino [kg/m ³] | Caucho [% Vol del A.G.] | Fibras metálicas [kg/m ³] | Aditivo [% cemento] |
|----------------|------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| <i>N</i> | 513 | 241 | 0,47 | 539 | 809 | - | - | - |
| <i>C</i> | 513 | 241 | 0,47 | 489 | 809 | 10 | - | 0,15 |
| <i>F1</i> | 513 | 241 | 0,47 | 539 | 809 | - | 15 | 0,15 |
| <i>F2</i> | 513 | 241 | 0,47 | 539 | 809 | - | 30 | 0,15 |

En el presente estudio se emplearon dos tipos de adiciones: tiras de caucho y fibras metálicas, en las mezclas de concreto realizadas se modificó el tipo de adición y el porcentaje de la misma, obteniendo finalmente tres mezclas diferentes, las cuales presentaron comportamientos diferentes en términos de tenacidad.

Con el fin obtener resultados comparativos el asentamiento se mantuvo constante en las mezclas de concreto, partiendo del asentamiento de 19 cm obtenido en la mezcla neutra. Dado que las fibras empleadas, tiras de caucho y fibras metálicas, reducen la manejabilidad, se empleó un aditivo reductor de agua (Sika ViscoCrete 2100) para mantener el asentamiento constante en 19 cm \pm 2,5 cm (Ilustración 19) y poder analizar los resultados de los ensayos de absorción de energía en conjunto, este aditivo se empleó en una dosificación con base en el peso del cemento.



(a) – Asentamiento mezcla con caucho (16.5 cm)



(b) – Asentamiento mezcla con fibras 1 (20.3 cm)



(c) – Asentamiento mezclas con fibras 2 (17.8 cm)

Ilustración 19 – Asentamiento registrado por tipo de mezcla

El proceso de curado fue similar para todas las probetas (cilindros, placas circulares, placas cuadradas y vigas), las cuales se mantuvieron luego de ser desencofradas en una cámara de curado hasta la fecha del ensayo a una temperatura promedio de 23°C y una humedad relativa del 100%, como se muestra en la Ilustración 20.



(a) – Panel de control de cámara de curado



(b) – Cilindros en cámara de curado



(c) - Placas circulares, cuadradas y vigas en cámara de curado

Ilustración 20 – Proceso de curado

4.2 TIRAS DE CAUCHO DE DESECHO DE LLANTA

En el primer tipo de mezcla (C), se incluyeron fibras de caucho en reemplazo del agregado grueso en un porcentaje de 10%, siguiendo los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas por (Buendía, Oviedo, & Ruiz, 2008) y (Topçu, 1995), en donde luego de analizar el caucho en diferentes formas (trozos de diferentes tamaños y tiras de diferentes longitudes) y dosificaciones, se concluyó que el porcentaje y dimensiones adecuadas corresponden a tiras de caucho de 5cm x 0,4cm x 0,4cm (Ilustración 23) en un porcentaje de reemplazo del 10% del volumen de agregado grueso. Este tipo de fibras no se encuentran industrializadas, razón por la cual fue necesario elaborarlas para esta investigación; para obtener las tiras de caucho de desecho de llanta, se utilizaron los laterales de llantas de camiones, los cuales son cortados a mano y luego lavados únicamente con agua, posteriormente los laterales de las llantas son cortados en tiras de aproximadamente 5 cm de ancho y 3 m de largo llamadas “Cincha” (Ilustración 21), luego, estas tiras se cortaron empleando un troquel (Ilustración 22) con el cual se obtenían fibras con las dimensiones mencionadas anteriormente.



Ilustración 21 – Cincha de llanta



Ilustración 22 – Troquel empleado para el corte de las tiras de caucho

Las tiras de caucho, luego del proceso de corte, no tuvieron ningún proceso adicional con el fin de mejorar la adherencia con el concreto, estas fueron lavadas con agua y luego adicionadas directamente a la mezcla (Ilustración 24). En investigaciones anteriores, las fibras fueron recubiertas con pasta de cemento, tratadas con una solución de NaOH, entre otras; aún así, en el estudio realizado por Albano et al. (citado en Khaloo, Dehestani y Rahmatabadi, 2008) se concluye que estos tratamientos sobre el caucho previos a su inclusión a la mezcla, no presentan mayores mejorías en términos de resistencia a la compresión. Por su parte, la inmersión del caucho en pasta de cemento con el fin de mejorar la adherencia del mismo con el concreto,

incrementa los costos de la mezcla, además de afectar el aporte ambiental de incluir caucho al concreto.



Ilustración 23 – Tiras de caucho de desecho de llanta



Ilustración 24 – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta

4.3 FIBRAS METÁLICAS

Las fibras metálicas empleadas en esta investigación fueron fibras Dramix (Ilustración 25) de 60 mm de largo (l), diámetro de 0,9 mm (d), relación de aspecto (l/d) de 67 y resistencia a la tracción de 1000 N/mm^2 . Se emplearon dos dosificaciones diferentes, 15 kg/m^3 y 30 kg/m^3 , estos porcentajes, bajos con respecto a los empleados usualmente (entre 20 y 60 kg/m^3) (Ilustración 26). La hoja técnica de las fibras se encuentra en el *Anexo 1*.



Ilustración 25 – Fibras metálicas Dramix RC_65-60_BN



Ilustración 26 – Concreto adicionado con fibras metálicas

Los porcentajes de fibras metálicas fueron seleccionados con la finalidad de poder realizar una comparación con la mezcla de concreto adicionada con tiras de caucho de desecho de llanta, que según algunos estudios en los que se han realizado ensayos de viga con este tipo de mezcla (adicionada con trozos de caucho de desecho de llanta) presentaba baja capacidad de absorción de energía. Aiello y Leuzzi (2010), analizaron el caucho de desecho de llantas como adición al concreto en remplazo de un porcentaje del agregado grueso (25, 50 y 75%) y fino (15, 30, 50, 75%), en vigas de 250mm x 250mm x 900mm, de la norma *UNI 12390 (2003)*, de la *Entidad Nacional Italiana de Unificación*, lo cual se muestra en la Ilustración 27.



Ilustración 27 – Resultado de ensayo de viga UNI 12390 (Aiello & Leuzzi, 2010)

4.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Inicialmente, se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar los agregados y el cemento que se emplearía; luego, se realizaron ensayos para conocer el desempeño del concreto adicionado con los dos tipos de fibras, en términos de absorción de energía, analizados por medio de tres tipos de ensayos diferentes.

4.4.1 Caracterización

Para caracterizar los materiales que se emplearían en el diseño de mezcla se ejecutaron ensayos de masa unitaria (ASTM/C 29), análisis granulométrico (ASTM/C 33) y absorción (ASTM/C 127/128) sobre cada uno de los agregados y masa unitaria del cemento (ASTM/C 188).

4.4.2 Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en cilindros con el fin de garantizar la resistencia de las mezclas del concreto simple, del concreto adicionado con fibras de caucho y del concreto adicionado con los dos porcentajes de fibras metálicas. Para esto se realizaron ensayos a 28 días para cada tipo de mezcla, para un total de doce (12) ensayos, en la Tabla 5 se muestra la distribución de ensayos de resistencia a la compresión por cada tipo de mezcla.

Tabla 5 – Número de ensayos de resistencia a la compresión por tipo de mezcla

| Tipo de Mezcla | <i>N</i> | <i>C</i> | <i>F1</i> | <i>F2</i> | Total de Ensayos |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------------|
| Número de Ensayos | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |

4.4.3 Absorción de energía

Se realizaron tres tipos de ensayos con el fin de conocer la capacidad de absorción de energía de las tres mezclas en análisis, estos fueron: placa circular (ASTM C 1550-10), placa cuadrada (EFNARC) y resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC). Debido a que las propiedades del concreto dependen de una extensa cantidad de factores y estas pueden variar en gran medida, se elaboraron tres (3) probetas para cada ensayo con el fin de obtener resultados representativos; de esta manera, se elaboraron en total nueve (9) probetas para ejecutar ensayos de absorción de energía, tres por cada tipo de ensayo, como se muestra en la Tabla 6. Estos ensayos se realizaron a los 28 días de fundida.

Tabla 6 – Distribución de ensayos de absorción de energía por tipo de mezcla

| Tipo de Mezcla | Tipo de Ensayo | | |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| | Placa Circular ASTM C 1550-10 | Placa Cuadrada EFNARC | Resistencia Flexural y Tensión Residual en Vigas EFNARC |
| <i>C</i> | 3 | 3 | 3 |
| <i>F1</i> | 3 | 3 | 3 |
| <i>F2</i> | 3 | 3 | 3 |
| <i>Total</i> | 9 | 9 | 9 |
| Total de Ensayos - Absorción de Energía = 27 | | | |

4.4.3.1 Placa circular (ASTM C – 1550)

Actualmente, este ensayo no se encuentra estandarizado en el país, por lo tanto, para el cumplimiento de uno de los objetivos específicos del presente trabajo de grado se elaboró el montaje respectivo de acuerdo a la norma ASTM C 1550-10 y de esta manera poder implementarlo en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana. Para esto fue necesario elaborar la estructura de apoyo, según la normativa que rige este ensayo, descrita en el marco teórico, *numeral 3.5.1.2*, en los *Anexos 2* se ilustran los planos sobre los cuales fueron elaborados los elementos del montaje, se indican sus dimensiones, espesores y cantidades, adicionalmente se muestra el modelo 3D, el cual se compone de dos partes: la estructura superior

donde se apoya la placa, y la estructura inferior en forma de triángulo que soporta la totalidad de la carga.

Con el fin de cumplir la tolerancia al desplazamiento del montaje de placa circular, se elaboró un modelo digital empleando el software SAP 2000 ® (v 8.0), el cual incluía las propiedades geométricas y mecánicas de la estructura de soporte y las cargas a las cuales se vería sometida durante la ejecución del ensayo, en el *Anexo 3* se presenta un esquema del modelo de la estructura de soporte y los paraleles de apoyo, en donde se indica la deformación vertical esperada.

Para este ensayo, se realizó la instrumentación tanto de carga como de deformación, se empleó una celda de carga (Ilustración 28) ubicada en la parte superior de la placa y un deformímetro (Ilustración 29) ubicado en el centro de la parte inferior de la placa, los datos registrados a partir de esta instrumentación fueron confrontados con los datos registrados por la MTS, maquina que fue empleada para el ensayo.



Ilustración 28 – Celda de carga empleada en ensayos de placa circular



Ilustración 29 – Deformímetro empleado en ensayo de placa circular

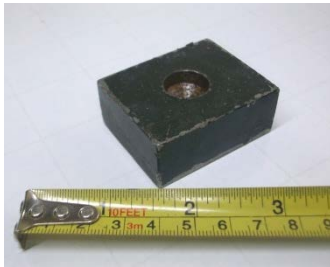
De acuerdo a los esquemas sugeridos por la normativa y análisis en elementos finitos, se elaboró la estructura de apoyo (Ilustración 30), la cual permitió obtener satisfactoriamente las fallas deseadas en las placas circulares, lo que se mostrará en el capítulo 5.



(a) – Vista lateral montaje



(b) – Vista superior montaje



(c) – Platina de transferencia



(d) – Elemento de soporte



(e) – Elemento de carga

Ilustración 30 – Estructura de apoyo ensayo placa circular (ASTM C 1550-10)

4.4.3.2 Placa cuadrada (EFNARC)

Para este ensayo fue necesario elaborar el marco de apoyo y un cubo macizo de acero como aplicador de carga de acuerdo a la normativa europea EFNARC, estos se muestran en la Ilustración 31 y la Ilustración 32. Las lecturas de carga y deformación se registraron con la maquina universal con la cual se realizó el ensayo.

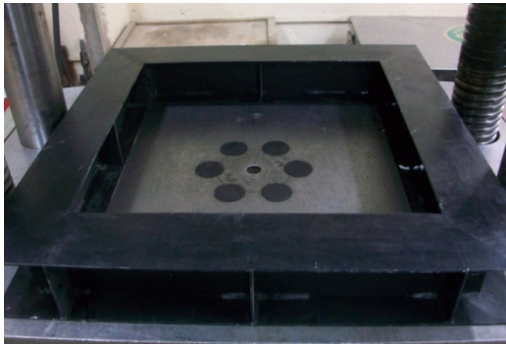


Ilustración 31 – Marco de apoyo ensayo placa rectangular (EFNARC)

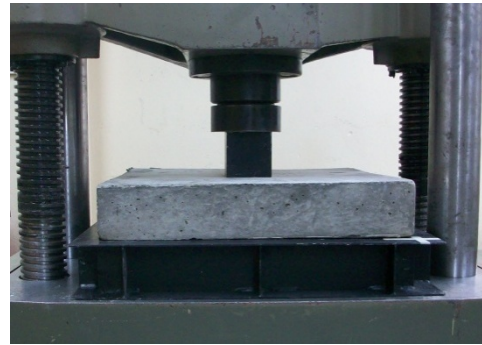


Ilustración 32 – Montaje ensayo placa rectangular (EFNARC)

4.4.3.3 Resistencia flexural y tensión residual en vigas (EFNARC)

Para los ensayos de resistencia flexural y tensión residual en vigas, se realizó la instrumentación tanto de carga como de deformación, se empleó una celda de carga y dos deformímetros ubicados en la parte central a cada lado de la viga Ilustración 33.

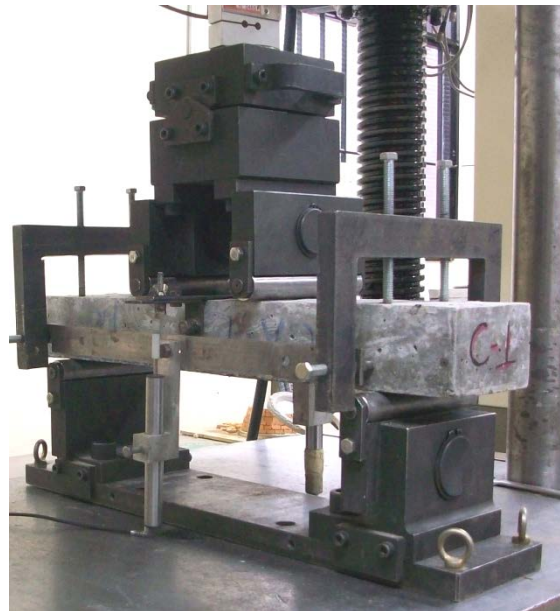


Ilustración 33 – Montaje ensayo de resistencia flexural en viga (EFNARC)

5 RESULTADOS

5.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Luego de realizados los ensayos de masa unitaria, análisis granulométrico y absorción sobre cada uno de los agregados se realizó el diseño de las mezclas de concreto base.

Tabla 7 – Resultados ensayos de laboratorio, agregado fino y agregado grueso

| | Agregado Fino | Agregado Grueso |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Peso específico aparente | 2.49 | 2.35 |
| Peso específico aparente (S.S.S) | 2.53 | 2.43 |
| Peso específico nominal | 2.59 | 2.54 |
| Absorción (%) | 1.6 | 3.1 |
| Peso específico del cemento | | |
| | 2,94 kg/cm ³ | |

Con el fin de conocer la proporción adecuada de los agregados, se realizó un análisis granulométrico para cada uno de estos, teniendo en cuenta los límites para cada tamaño de tamiz expuestos en la ASTM C 33 y de esta manera tener un material con una buena gradación. En el Gráfico 21 y Gráfico 22 , se exponen los resultados.

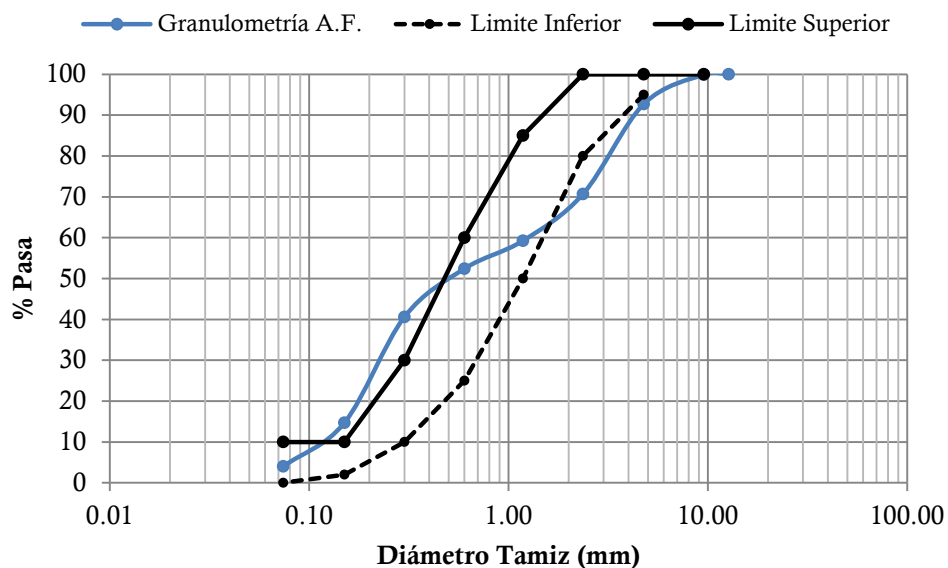


Gráfico 21 – Análisis granulométrico agregado fino

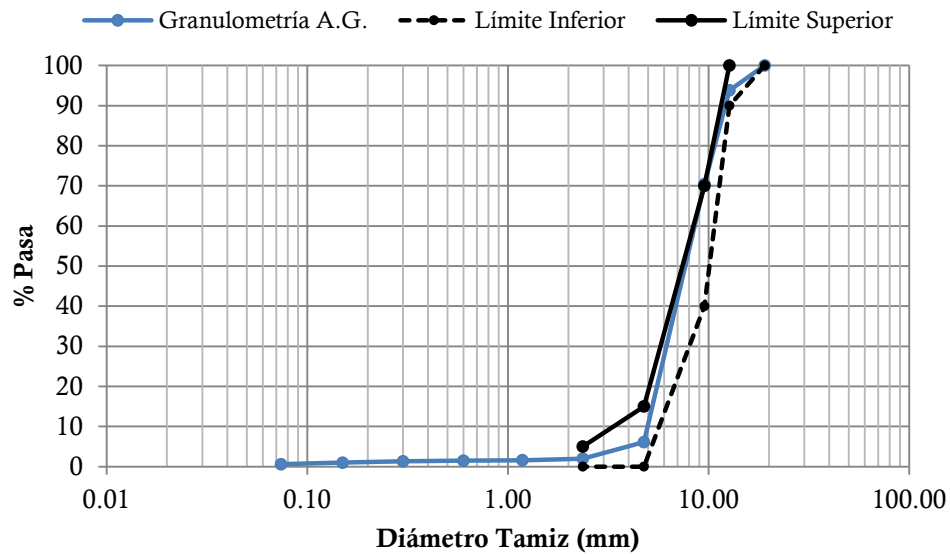


Gráfico 22 – Análisis granulométrico agregado grueso

Obtenidas las granulometrías de cada uno de los agregados, se optó por una combinación de 60% para el agregado fino y 40% para el agregado grueso, con el fin de cumplir los límites sugeridos para agregados con tamaño máximo de 1,9 cm (3/4”). En el Gráfico 23, se expone la granulometría final combinada.

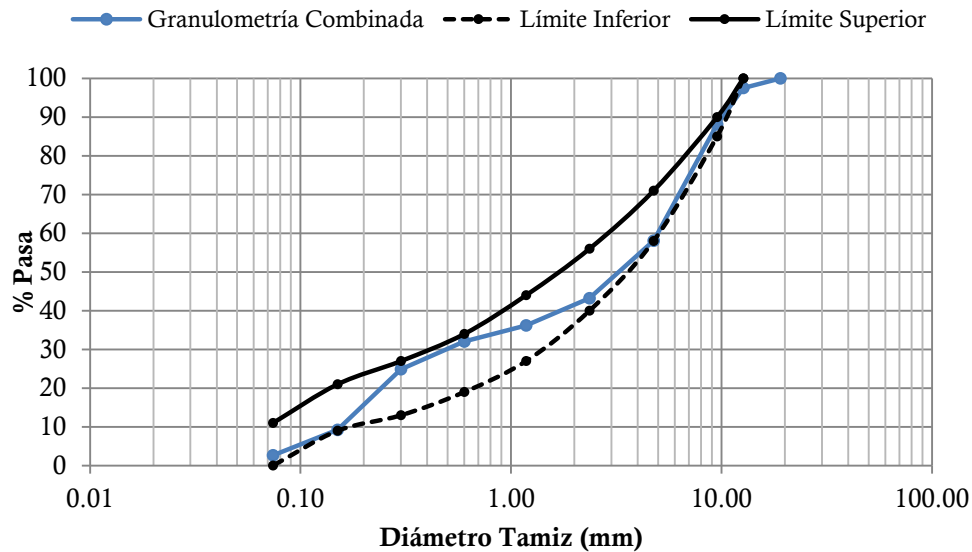


Gráfico 23 - Granulometría combinada, 60% A.F. – 40% A.G.

Se puede observar entonces, que la gradación final, cumple con los límites de la norma ASTM C 33, registrando para algunos tamaños, valores cercanos a los límites.

5.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

Se ejecutó un total de doce ensayos de resistencia a la compresión con el fin de controlar y verificar la resistencia a la compresión del concreto simple, concreto adicionado con tiras de caucho y concreto adicionado con los dos porcentajes de fibras metálicas. En la Tabla 8, se exponen los resultados obtenidos en estos ensayos y en la Tabla 9, se indica la variación en porcentaje de la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla sin adición.

Tabla 8 – Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 28 días de fundida

| Tipo de Mezcla | <i>N</i> | <i>C</i> | <i>F1</i> | <i>F2</i> |
|---------------------------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Resistencia a la compresión [kg/cm ²] | 368.8 | 338.4 | 446.1 | 355.6 |

Como se puede observar, la mezcla que mayor resistencia a la compresión a los 28 días de fundida registró, fue la mezcla F1, seguida por la mezcla N, la mezcla F2 y finalmente la mezcla, C. De esta manera, se obtuvo un incremento del 21% de la mezcla F1, una reducción del 4% para de la mezcla F2 y del 8% para de la mezcla C, con respecto a la mezcla sin adición.

Tabla 9 – Variación en porcentaje de la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla sin adición

| Tipo de Mezcla | <i>N</i> | <i>C</i> | <i>F1</i> | <i>F2</i> |
|-------------------------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Variación en la resistencia a la compresión [%] | 0% | -8% | 21% | -4% |

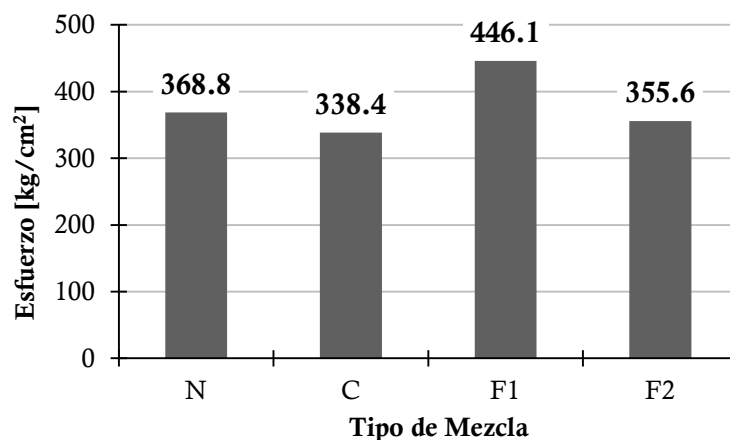


Gráfico 24 - Resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a 28 días de fundida

Luego de obtenidos estos resultados, se puede resaltar que la mezcla de concreto adicionado con tiras de caucho presentó una ligera pérdida en la resistencia a la compresión, cercana al 8% con respecto a la mezcla de concreto sin adición alguna.

Los resultados de resistencia a la compresión se vieron afectados debido al manejo de humedad que se dio a los agregados empleados en las mezclas, este parámetro no fue controlado de manera estricta, dando cabida a variaciones en la relación agua/cementante, lo que implicó variaciones en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

Se registraron variaciones en el módulo de elasticidad de las mezclas de concreto analizadas (Gráfico 25), en comparación con la mezcla sin adición, este parámetro disminuyó ligeramente para la mezcla C, en 1%; caso contrario fue el de las dos mezclas adicionadas con fibras metálicas, se registró un aumento del 5% y del 2% para las mezclas F1 y F2 respectivamente.

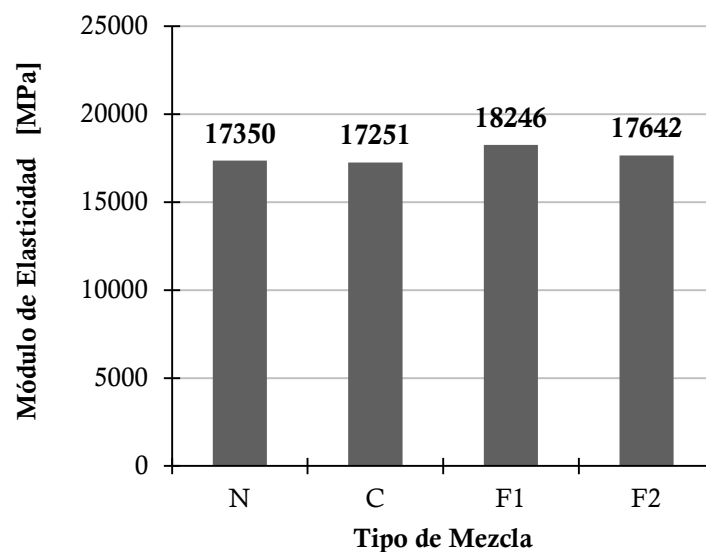


Gráfico 25 – Variación del módulo de elasticidad en las mezclas de concreto

El peso unitario es un parámetro que también se tuvo en cuenta dentro del análisis de las muestras (**Gráfico 26**), su variación es menor, pero luego de realizados los ensayos se obtuvo que para la mezcla adicionada con caucho se genera una ligera reducción de este parámetro, mientras que para las mezclas adicionadas con fibras metálicas se genera un ligero aumento, mayor para la mezcla F2.

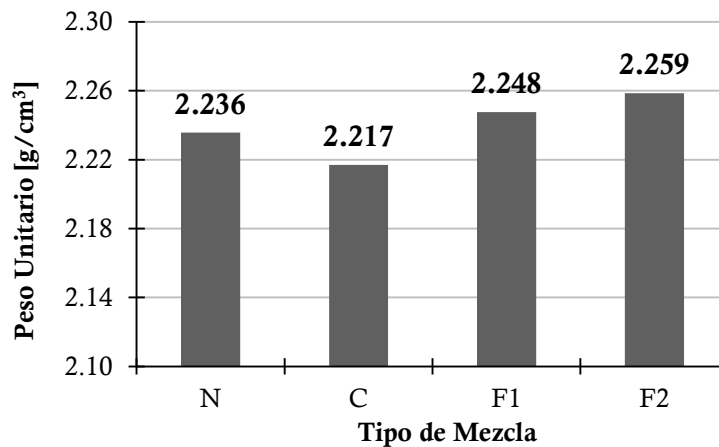


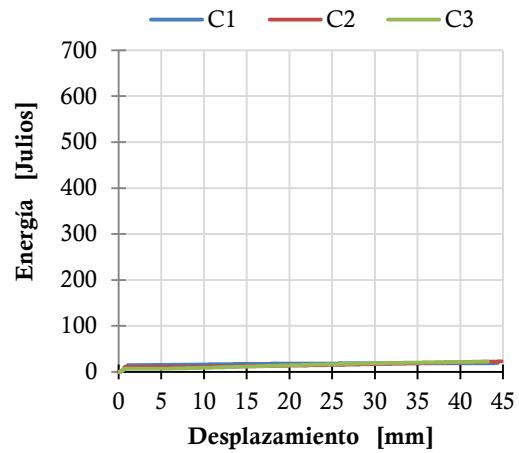
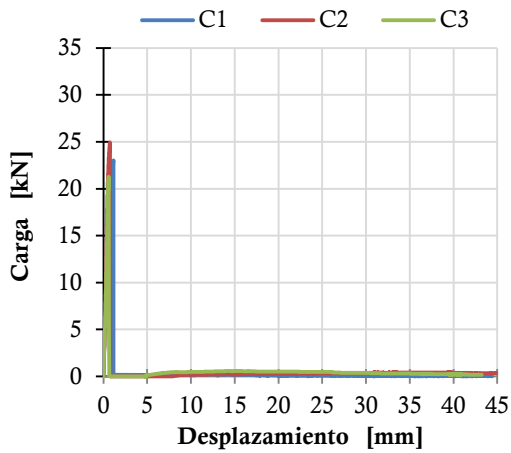
Gráfico 26 – Variación del peso unitario en las mezclas de concreto

5.3 ENSAYOS DE PLACA CIRCULAR

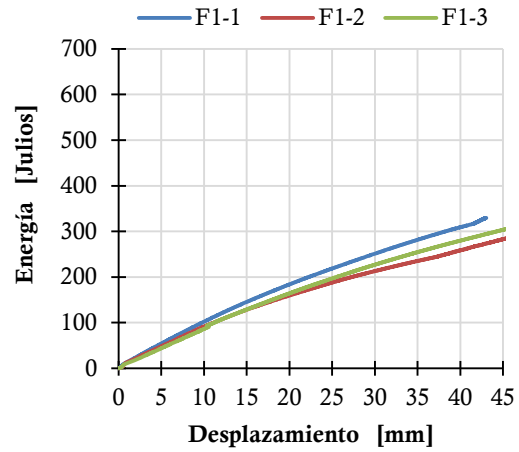
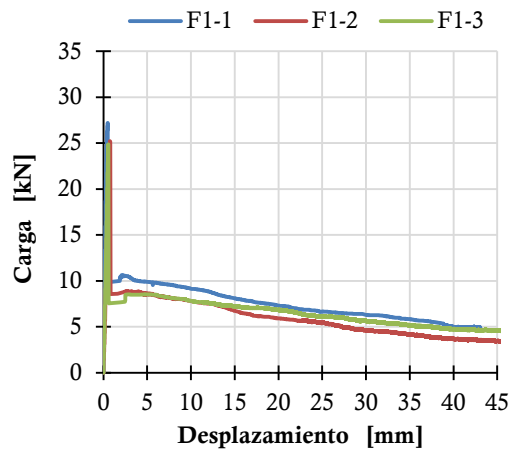
Se ejecutó un total de nueve ensayos de placa circular, los cuales mostraron un comportamiento diferente para la mezcla adicionada con tiras de caucho de desecho de llanta y las mezclas adicionadas con fibras metálicas, en la Gráfico 27 se exponen los resultados obtenidos, la curva carga-desplazamiento y la curva de evolución de energía absorbida por la placa para cada tipo de mezcla.

En el caso de la mezcla C (Gráfico 27 (a)), se observa que para la totalidad de las probetas, la disipación de energía es mínima; en el estudio realizado por Canals i Llopart (2002), se evaluaron placas circulares de concreto simple (sin adición) donde la energía disipada a 40 mm fue en promedio de 10 Julios, y en la presente investigación en la mezcla C, se obtuvo una energía disipada a 40 mm de 20 Julios aproximadamente, lo cual indica que el aporte a nivel de tenacidad, dado por el caucho es muy pequeño. También se puede observar que en la curva carga-desplazamiento, se registra el momento en el que se alcanza la carga máxima, aproximadamente en 25 kN, y luego se genera la fisura de la placa, punto desde donde se presenta una caída brusca de carga cercana al 100% de la carga máxima.

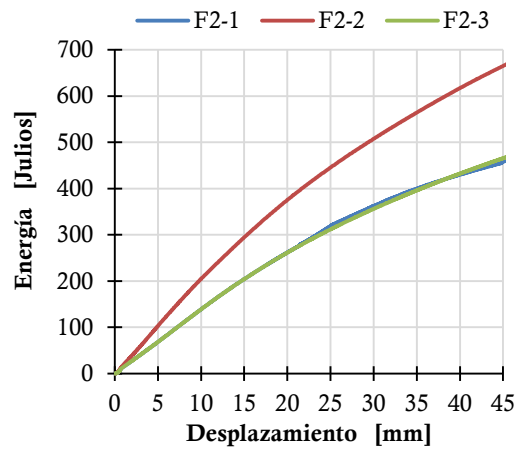
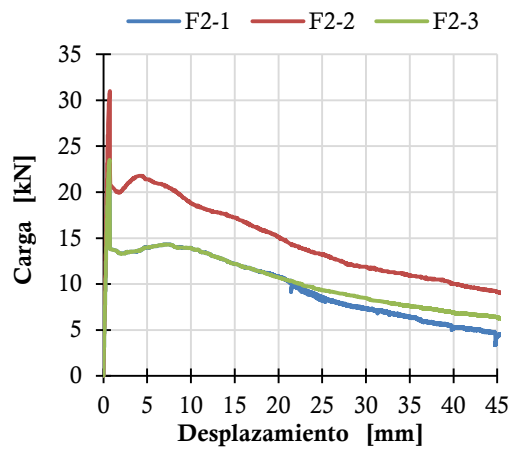
La mezcla F1 (Gráfico 27 (b)), para un desplazamiento de 40 mm disipó una energía promedio cercana a los 270Julios, el comportamiento de las tres probetas fue similar durante el ensayo lo que se evidencia tanto en la curva carga-desplazamiento como en la curva de evolución de energía absorbida durante el ensayo. Luego de alcanzada la carga máxima, 25 kN, se registró una caída de carga cercana al 60% de la carga máxima, producto de la fisuración de la placa, después de esto se presentó una reducción gradual de la carga, hasta llegar a un valor aproximado de 5 kN.



(a) – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta (C)



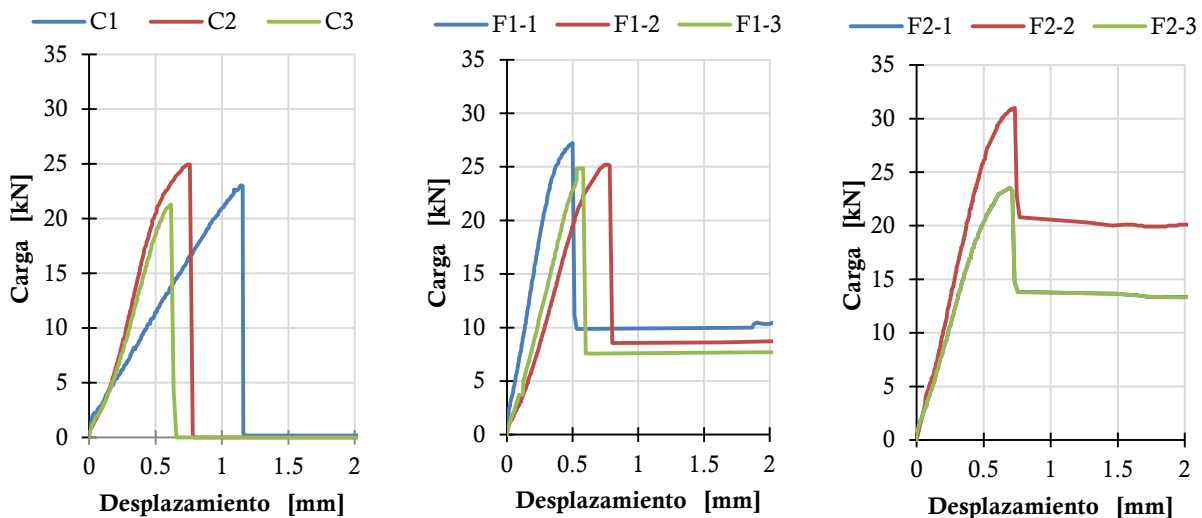
(b) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 15 kg/m³ (F1)



(c) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 30 kg/m³ (F2)

El comportamiento de la mezcla F2 (Gráfico 27 (c)), es cualitativamente similar al registrado por la mezcla F1; para un desplazamiento de 40 mm dispó una energía promedio cercana a los 525 Julios, el comportamiento para dos de las probetas fue similar durante el ensayo. La probeta F2-2, registró una mayor disipación de energía a lo largo de todo el ensayo. Luego de la primera fractura registrada a 26 kN aproximadamente, las probetas con comportamiento similar registraron una caída de carga cercana al 42% de la carga máxima, después de esto se presentó una reducción gradual de la carga, hasta llegar a un valor de cercano a los 5 kN.

El Gráfico 27 (d), corresponde a un acercamiento de las gráficas carga-desplazamiento de la totalidad de los ensayos de placa circular, detallando el comportamiento de las placas en los primeros 2 mm de desplazamiento, a partir de las cuales, es posible observar que la carga máxima y la caída súbita se registran antes del primer milímetro de desplazamiento.



(d) – Zona de carga máxima por tipo de mezcla

Gráfico 27 - Resultados de ensayo de placa circular

En el resto de las ocho probetas se obtuvieron tres grietas radiales, algunas de ellas mejor distribuidas que otras, en la Ilustración 34, se exponen algunas probetas ya falladas del ensayo de placa circular.



(a) – Probeta C1 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(b) – Probeta C2 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(c) – Probeta C3 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(d) – Probeta F1-1



(e) – Probeta F1-2



(f) – Probeta F1-3



(g) – Probeta F2-1



(h) – Probeta F2-2



(i) – Probeta F2-3

Ilustración 34 – Probetas circulares, luego del ensayo

En la gran mayoría de los casos, en los ensayos de placa circular se registraron tres grietas radiales en las probetas, únicamente en una de las probetas (C3, Ilustración 35), se registraron dos grietas radiales, esta probeta, según la normativa debe ser descartada; en el numeral 7.5 de la norma

ASTM C 1550 – 10 se indica que para cada análisis se deben elaborar mínimo tres probetas, y se debe obtener al menos dos ensayos exitosos, los cuales corresponden a aquellos ensayos en los que al menos dos probetas fallan con tres grietas radiales, de esta manera, para la mezcla de concreto adicionado con caucho se descarta la probeta C3 y se realiza el análisis únicamente con dos probetas.



Ilustración 35 – Falla probeta circular C3

En la Ilustración 36, se observan tres vistas del montaje del ensayo de placa circular, en donde se muestran cada uno de los elementos que conforman el montaje: la estructura de apoyo, los parales de apoyo, el deformímetro, los elementos de soporte, las platinas de transferencia, la probeta a ensayar, el elemento de carga y la celda de carga.



(a) – Vista frontal



(b) – Vista inferior



(c) – Vista superior

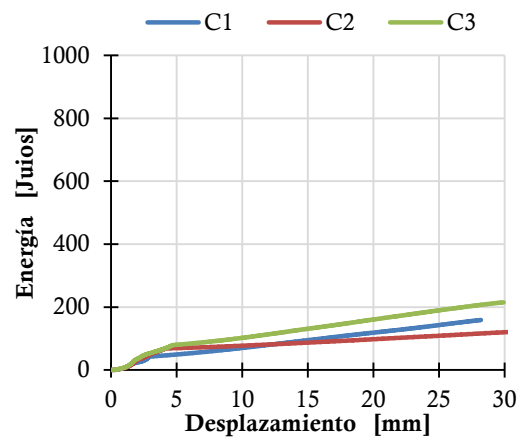
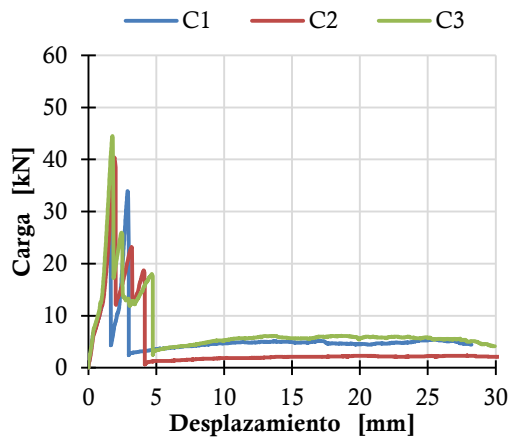
Ilustración 36 – Probetas ensayadas y montaje de placa circular

5.4 ENSAYOS DE PLACA CUADRADA

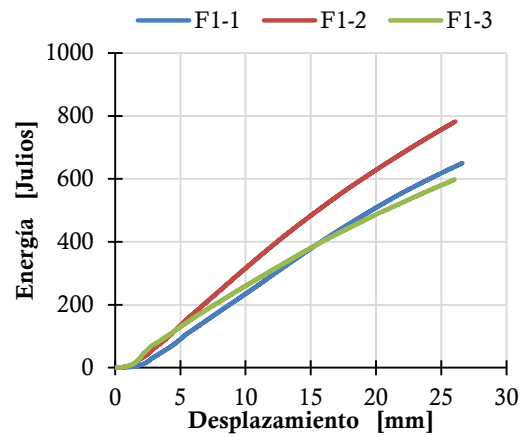
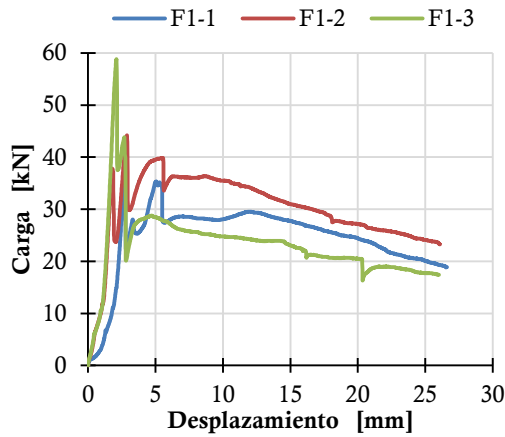
Se ejecutó un total de nueve ensayos de placa cuadrada, obteniendo resultados diferentes para la mezcla adicionada con tiras de caucho de desecho de llanta y las mezclas adicionadas con fibras metálicas, al igual que para las placas circulares. En el Gráfico 28, se exponen los resultados obtenidos, la curva carga-desplazamiento y la curva de evolución de energía absorbida por la placa para cada tipo de mezcla. Cabe notar, que no se tienen resultados de la probeta F2-1 debido a fallas técnicas presentadas durante la ejecución del ensayo, ya que hubo una pérdida de energía eléctrica en la Universidad, que generó la pérdida de los datos del ensayo de esta probeta.

En el caso de la mezcla C (Gráfico 28 (a)), se observa que para la totalidad de las probetas, la disipación de energía es muy baja; en el estudio realizado por Canals i Llopart (2002), se evaluaron placas cuadradas de concreto simple (sin adición) donde la energía disipada a 25 mm fue en promedio de 20 Julios, y en la presente investigación en la mezcla C, se obtuvo una energía disipada a 25 mm de 190 Julios aproximadamente, la cual es significativamente mayor que la obtenida en las placas de concreto simple en la investigación realizada por Canals i Llopart. También se puede observar que en la curva carga-desplazamiento, se registran diferentes caídas de carga, por lo general tres caídas, asociadas cada una a fisuraciones generadas en la placa; luego de la última caída de carga se registra una carga baja, cercana al 7,5% de la carga máxima que fue en promedio de 40kN, luego, la carga incrementa muy poco con el desplazamiento, llegando a una carga residual de 5 kN.

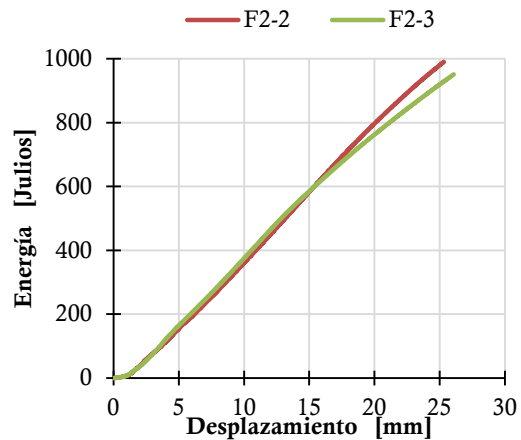
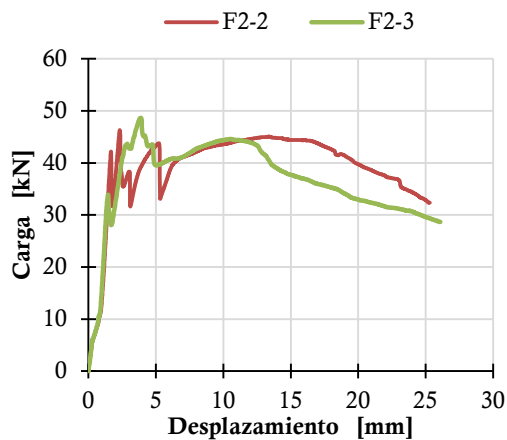
La mezcla F1 (Gráfico 28 (b)), para un desplazamiento de 25 mm disipó una energía promedio cercana a los 650 Julios, el comportamiento de las tres probetas fue similar durante el ensayo, a excepción de la probeta F1-2, esto se evidencia tanto en la curva carga-desplazamiento como en la curva de evolución de energía absorbida durante el ensayo. Luego de alcanzada la carga máxima, cercana a los 47 kN en promedio, al igual que en la mezcla C, se registran diferentes caídas de carga, por lo general tres caídas, asociadas cada una a fisuraciones generadas en la placa; luego de esto, se registra se registran cargas que van disminuyendo con el desplazamiento, hasta llegar a una carga residual cercana al 45% de la carga máxima. En términos de energía cabe notar que la energía absorbida por la probeta que presenta la carga máxima en la primera fisura (F1-3) es superada por las otras dos probetas (F1-1 y F1-2), debido a que en estas últimas, las fibras contribuyen a que se genere una disminución menos acentuada de la carga.



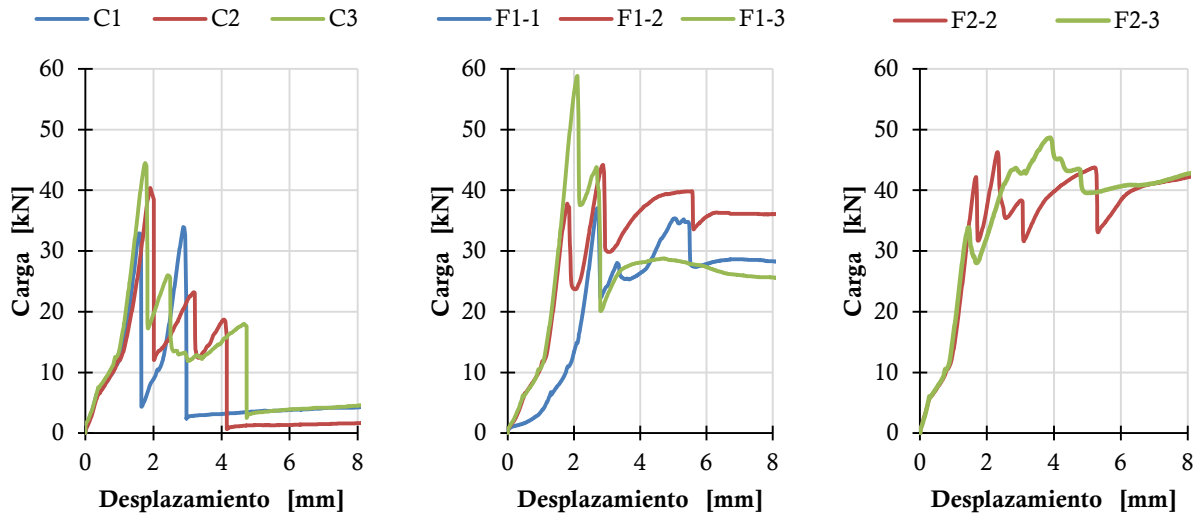
(a) – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta (C)



(b) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 15 kg/m³ (F1)



(c) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 30 kg/m³ (F2)



(d) – Zona de carga máxima alcanzada en el ensayo de placa cuadrada, por tipo de mezcla

Gráfico 28 - Resultados de ensayo de placa cuadrada

El comportamiento de la mezcla F2 (Gráfico 28 (c)), es sensiblemente diferente al registrado por la mezcla F1; para un desplazamiento de 25 mm se disipó una energía promedio cercana a los 950 Julios, en términos de energía el comportamiento de las probetas fue bastante similar durante el ensayo. Luego la primera fisura, en la probeta F2-2, se registran pequeñas caídas de carga hasta desplazamientos de 5 mm, a partir de este punto la carga es soportada por las fibras, generando un aumento progresivo cercano a la carga máxima. Por otro lado, en la probeta F2-3, luego de la primera fisura, se registra un incremento de carga notorio hasta llegar a la carga máxima, después de alcanzada esta carga, las fibras soportan las cargas en un comportamiento similar a la probeta F2-2. Finalmente, ambas probetas llegan a una carga residual de aproximadamente 30 kN.

El Gráfico 28 (d), corresponde a un acercamiento de las gráficas carga-desplazamiento de la totalidad de los ensayos de placa circular, detallando el comportamiento de las placas en los primeros 8 mm de desplazamiento, a partir de las cuales es posible observar que la primeras fisuras se registran antes de los dos milímetros de desplazamiento, y la totalidad de las fisuras se desarrolla antes de los 6 mm.

La falla de las placas cuadradas, en la mayoría de los casos fue en forma de equis, con algunas otras grietas secundarias, en la Ilustración 37 se exponen las fallas obtenidas.



(a) – Probeta C1 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(b) – Probeta C2 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(c) – Probeta C3 (luego de ser separada para su mejor manipulación)



(d) – Probeta F1-1



(e) – Probeta F1-2



(f) – Probeta F1-3



(g) – Probeta F2-2



(h) – Probeta F2-3

Ilustración 37 – Probetas falladas luego del ensayo de placa cuadrada

5.5 ENSAYOS DE RESISTENCIA FLEXURAL Y TENSION RESIDUAL EN VIGAS

Se ejecutaron en total, nueve ensayos de resistencia flexural y tensión residual en vigas. Se elaboró una placa cuadrada (EFNARC) por cada tipo de mezcla, a partir de la cual se obtuvieron tres vigas por cada placa, siguiendo el procedimiento descrito en la normativa. En la Ilustración 38, se exponen este proceso.



(a) – Placa cuadrada previa al corte de vigas



(b) – Proceso de corte de placa cuadrada

Ilustración 38 – Proceso de corte, vigas (EFNARC)

La resistencia flexural se calcula a partir de la curva carga-deflexión de la siguiente manera, se determina la parte recta inicial de la curva, basándose en datos hasta el 50% de la carga máxima, y se traza una recta paralela desplazada 0,1 mm horizontalmente en el eje de la deflexión. La resistencia flexural se calcula a partir de la primera carga máxima ($P_{0,1}$) obtenida hasta el punto (incluido) en el que la recta desplazada 0,1 mm corta la curva carga-deformación, la resistencia flexural se calcula como una resistencia elástica a la tracción equivalente.

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

Donde $P_{0,1}$ según se define arriba (en kN)

L es la longitud entre apoyos (45 cm)

b es el ancho real de la viga (nominal: 12,5 cm)

d es la altura real de la viga (nominal: 7,5 cm)

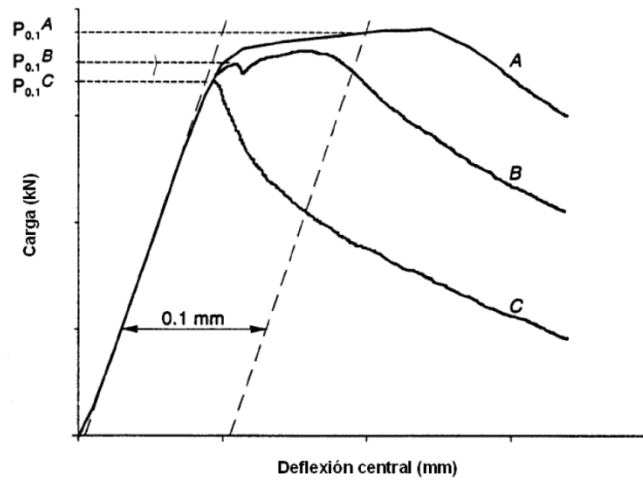


Gráfico 29 - Determinación de la carga máxima $P_{0,1}$ a partir de la curva carga/deflexión (EFNARC, 1993)

En los Gráfico 30, 31 y 32, se exponen las curvas carga-deflexión obtenidas de los ensayos realizados luego de obtener la carga máxima $P_{0,1}$ de las mismas.

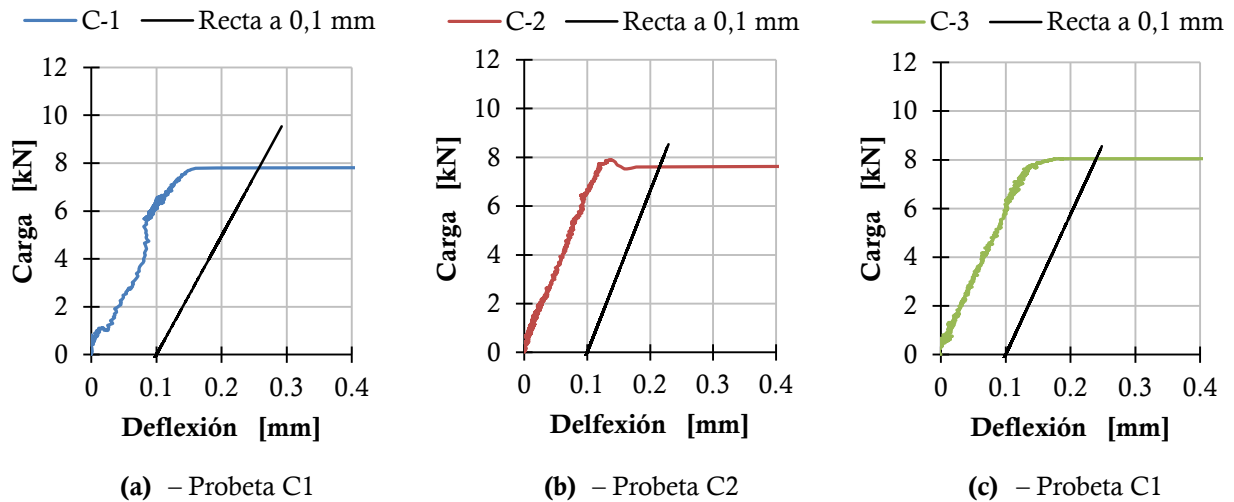


Gráfico 30 – Determinación de la resistencia flexural de vigas adicionadas con tiras de caucho

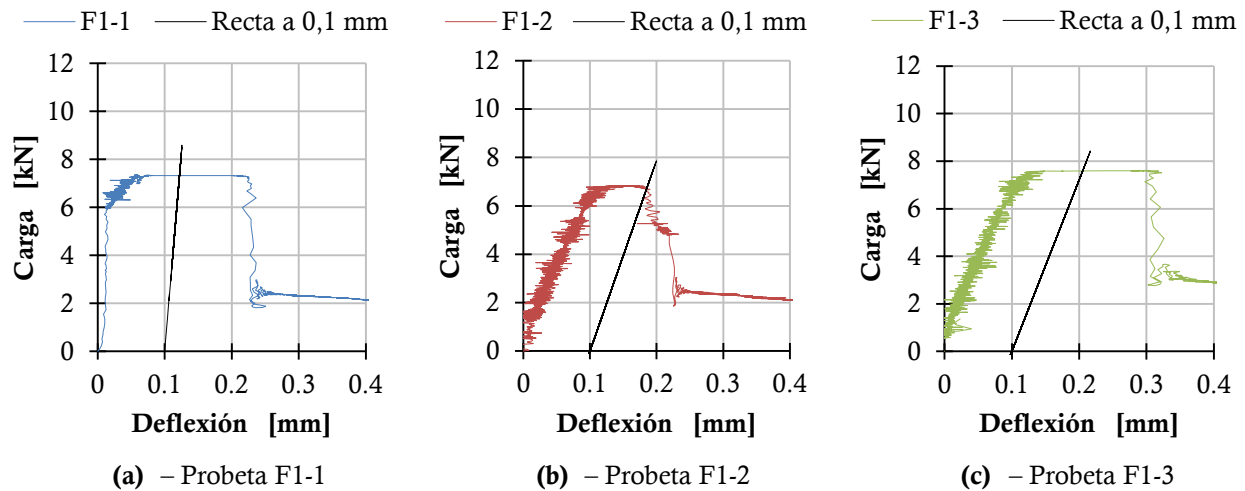


Gráfico 31 - Determinación de la resistencia flexural de vigas adicionadas con fibras metálicas, F1 (15 kg/m³)

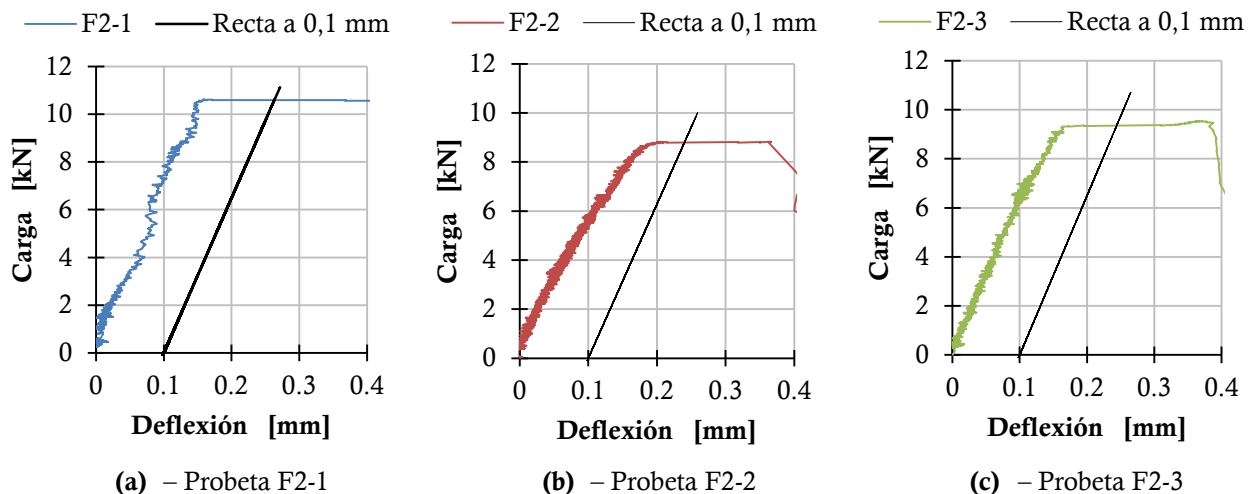


Gráfico 32 - Determinación de la resistencia flexural de vigas adicionadas con fibras metálicas, F2 (30 kg/m³)

Obtenidas las cargas máximas $P_{0,1}$ de los ensayos realizados, se calcula la resistencia flexural de cada una de las probetas. En la Tabla 10, se exponen las categorías de tensión residual descritas en la normativa europea EFNARC y en la Tabla 11 se expone la resistencia flexural y la categoría de tensión residual obtenida por cada ensayo.

Tabla 10 - Categorías de resistencia residual (EFNARC, 1993)

| Deflexión mm | Tensión residual [MPa] por categoría de resistencia | | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 |
| 1 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
| 4 | 0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 |

Tabla 11 – Resultados ensayos resistencia flexural y tensión residual

| | C1 | C2 | C3 | F1-1 | F1-2 | F1-3 | F2-1 | F2-2 | F2-3 |
|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| Carga Máxima $P_{0,1}$ [kN] | 7.77 | 7.88 | 8.05 | 7.34 | 6.83 | 7.61 | 10.62 | 8.80 | 9.41 |
| Resistencia Flexural [MPa] | 4.92 | 4.54 | 4.81 | 4.31 | 3.92 | 4.51 | 6.23 | 5.43 | 6.04 |
| Categoría de Tensión Residual | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |

Los resultados del ensayo de resistencia flexural y tensión residual en vigas, se indican en el Gráfico 33, en donde se muestra la curva carga deflexión y la curva de clasificación de tensión residual para cada una de las mezclas analizadas, individualiza en 5 categorías la tenacidad de las vigas, en donde la categoría 0 corresponde a la clasificación más baja de tenacidad y la categoría 4 la más alta.

Para la mezcla C (Gráfico 33 – (a)), el comportamiento de las tres probetas es muy similar, se observa que la carga máxima en la totalidad de los casos, se mantiene constante durante el primer milímetro de deflexión en un valor cercano a los 8 kN, luego de esto se presenta una falla súbita y la carga disminuye a valores inferiores de 1 kN, una reducción del 88% de la carga máxima, manteniéndose constante hasta el final del ensayo. Para las tres probetas, la categoría de tensión residual corresponde a la clasificación más baja, la categoría 0, planteada por EFNARC.

Para la mezcla F1 (Gráfico 33 – (b)), se presenta un comportamiento similar para las probetas F1-1 y F1-2, mientras que la probeta F1-3 presenta un comportamiento superior, en cuanto a la carga. A su vez, la carga máxima cercana a los 7,5 kN, se mantiene en niveles de deflexión más bajos (en comparación a la mezcla C) antes de la caída de carga, cerca a los 0,3 mm; luego la carga se mantiene constante hasta el final del ensayo, terminando con una resistencia residual de 2 kN para las probetas F1-1 y F1-2 y de 3 kN para la probeta F1-3. Por otra parte, la categoría de tensión residual para tres probetas corresponde a la categoría 1.

Para la mezcla F2 (Gráfico 33 – (c)), se presenta un comportamiento similar para las probetas F2-2 y F2-3, mientras que la probeta F2-1 presenta un comportamiento inferior, en cuanto a la carga, luego de 0,5 mm de deflexión. A su vez, la carga máxima cercana a los 10 kN, se mantiene en niveles de deflexión más bajos (en comparación a la mezcla C) antes de la caída de carga, cerca a los 0,5 mm; luego la carga se mantiene constante hasta el final del ensayo, terminando con una resistencia residual de 4,5 kN para las probetas F2-2 y F2-3 y de 3 kN para la probeta F2-1. Por otra parte, la categoría de tensión residual para las probetas F2-2 y F2-3 corresponde a la categoría 3, mientras que para la probeta F2-1 corresponde a la categoría 1.

En la Ilustración 39, se muestran las vigas después de los ensayos de resistencia flexural y tensión residual.

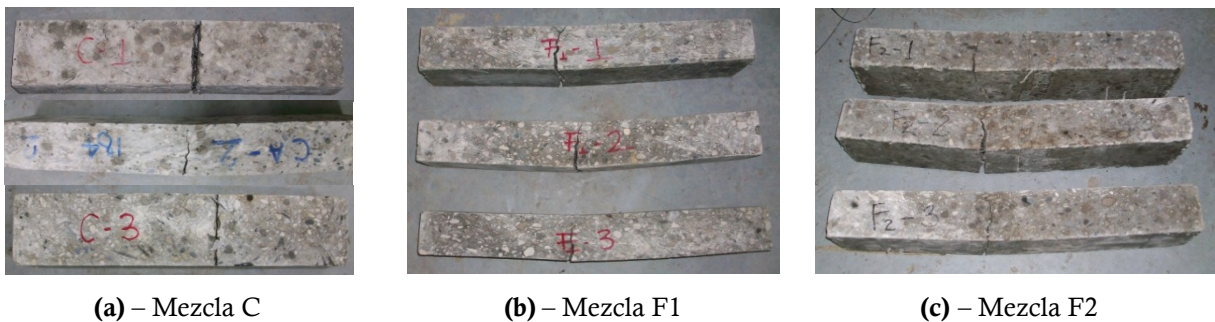
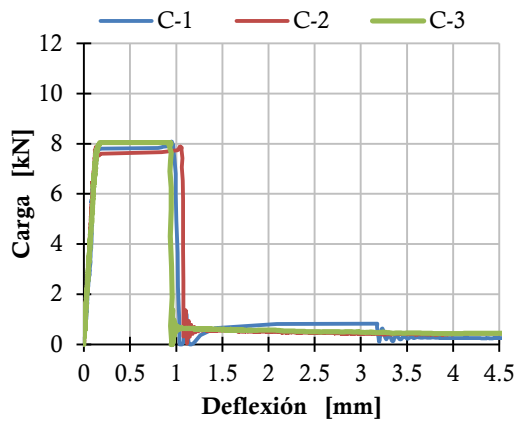
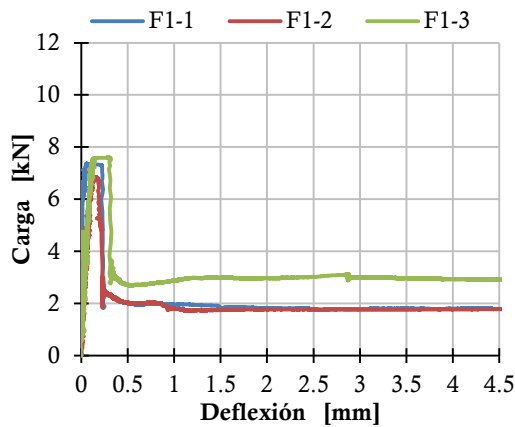
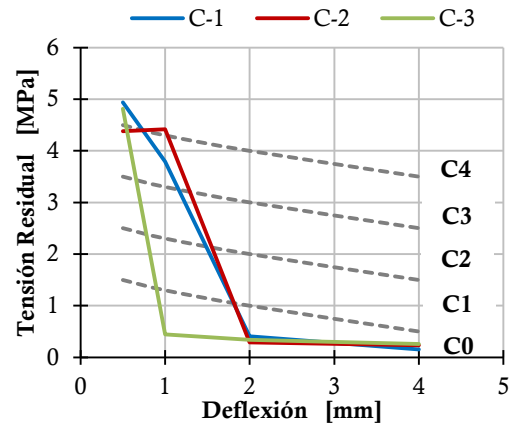


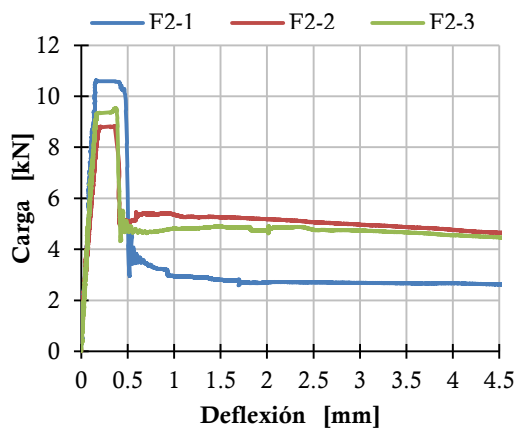
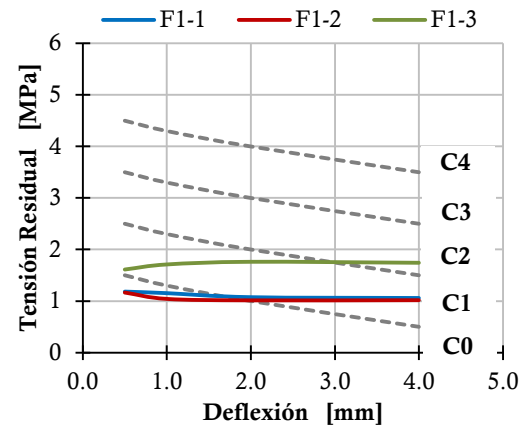
Ilustración 39 – Probetas de vigas luego del ensayo de resistencia flexural y tensión residual



(a) – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta (C)



(b) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 15 kg/m³ (F1)



(c) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 30 kg/m³ (F2)

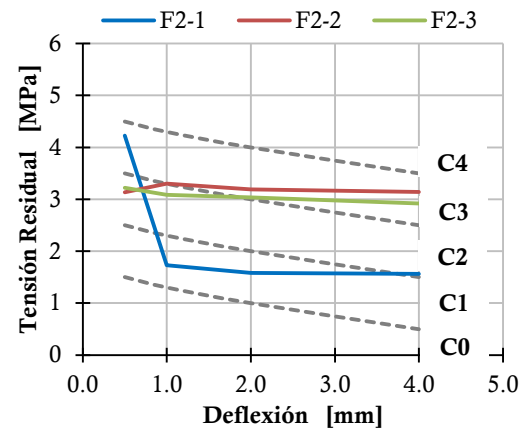


Gráfico 33 – Resultado de ensayos de resistencia flexural y tensión residual en vigas

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados, se tiene un comportamiento muy similar en cuanto a la absorción de energía de las mezclas de concreto, los resultados indican que la mezcla adicionada con caucho, en la totalidad de los ensayos, fue la mezcla que menor tenacidad reflejó, seguida por la mezcla adicionada con fibras metálicas con una dosificación 15 kg/m³ y finalmente, la mezcla adicionada con fibras metálicas con una dosificación de 30 kg/m³ fue la que mayor tenacidad reflejó.

6.1 ENSAYOS DE PLACA CIRCULAR

En el Gráfico 34, se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de placa circular realizados sobre las tres mezclas analizadas. En este ensayo, la mezcla C fue aquella que presentó la menor absorción de energía, seguida de la mezcla F1 y finalmente, la mezcla F2 fue aquella que registró la mayor absorción de energía. Cabe resaltar, que la dispersión de los datos registrados para las probetas de las dos primeras mezclas (C y F1) fue baja, mientras que para la mezcla F2, el comportamiento en términos de energía de la probeta F2-2 fue superior a las otras dos, generando mayor dispersión de los datos.

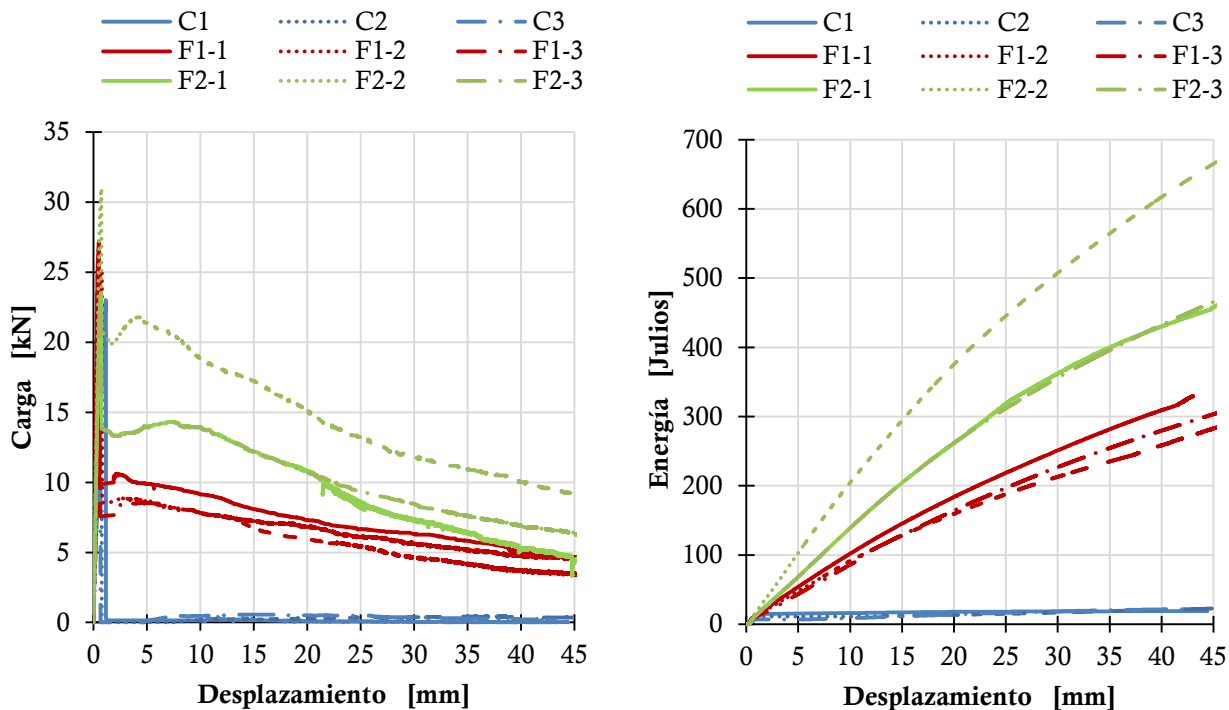


Gráfico 34 - Resultado de ensayos de placa circular

Como se puede inferir de la Tabla 12 y Gráfico 36, la carga máxima obtenida en las mezclas de concreto fue similar (presentó una variación menor al 4%), lo que indica que independientemente del tipo de fibra y dosificación de la misma, este parámetro no varía notablemente. Por otra parte, en este tipo de ensayo, el comportamiento de las probetas después de la carga máxima es notablemente diferente entre las mezclas, pues luego de alcanzada esta carga, se presenta una caída importante de carga, seguida de un comportamiento determinado por las fibras en las grietas. Este comportamiento se ve reflejado en el Gráfico 35, en donde se indica la energía disipada a 40 mm de desplazamiento para cada tipo de mezcla, la mezcla F1 disipó aproximadamente 14 veces más energía que la mezcla C, mientras que la mezcla F2, disipó cerca del doble de energía que la mezcla F1.

Tabla 12 – Energía absorbida y carga máxima en ensayos de placa circular

(a) – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta (C)

| Energía Absorbida a 40 mm [Julios] | C1 | C2 | C3 | PROMEDIO |
|------------------------------------|------|------|------|----------|
| | 18.9 | 20.9 | 21.5 | 20.4 |
| Carga Máxima [kN] | 23.0 | 24.9 | 27.2 | 25.1 |

(b) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 15 kg/m³ (F1)

| Energía Absorbida a 40 mm [Julios] | F1-1 | F1-2 | F1-3 | PROMEDIO |
|------------------------------------|-------|-------|-------|----------|
| | 309.1 | 229.1 | 279.7 | 272.6 |
| Carga Máxima [kN] | 25.2 | 25.2 | 24.9 | 25.1 |

(c) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 30 kg/m³ (F2)

| Energía Absorbida a 40 mm [Julios] | F2-1 | F2-2 | F2-3 | PROMEDIO |
|------------------------------------|-------|-------|-------|----------|
| | 430.1 | 617.1 | 432.4 | 524.7 |
| Carga Máxima [kN] | 23.5 | 31.0 | 23.5 | 26.0 |

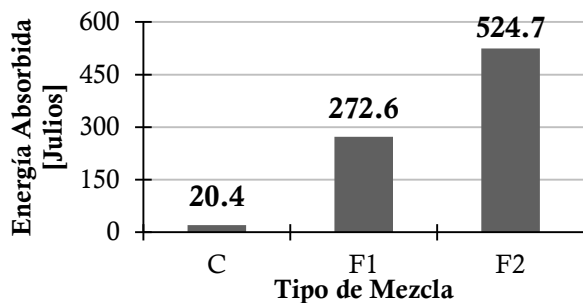


Gráfico 35 - Energía absorbida en ensayos de placa circular

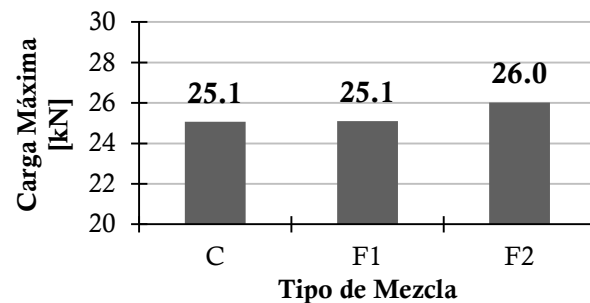


Gráfico 36 – Carga máxima alcanzada en ensayo de placa circular por tipo de mezcla

6.2 ENSAYOS DE PLACA CUADRADA

En el Gráfico 37 y 38, se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de placa cuadrada realizados sobre las tres mezclas analizadas. En este ensayo, la mezcla C fue aquella que presentó la menor absorción de energía, seguida de la mezcla F1 y finalmente, la mezcla F2 fue aquella que registró la mayor absorción de energía. Cabe resaltar, que la dispersión de los datos registrados para las probetas de las mezclas C y F2 fue baja, mientras que para la mezcla F1, el comportamiento en términos de energía de la probeta F1-2 fue superior a las otras dos, generando mayor dispersión de los datos.

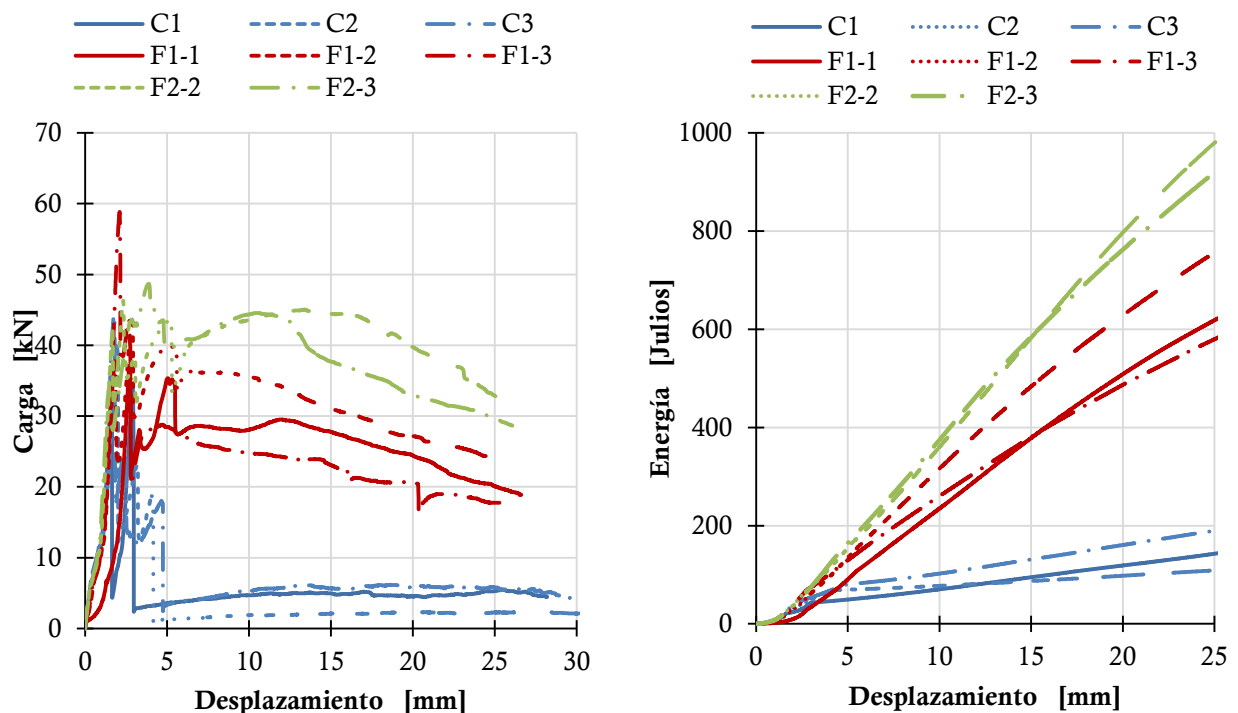


Gráfico 37 – Resultados de ensayos de placa cuadrada

Según la normativa EFNARC, es posible clasificar en tres categorías diferentes las placas cuadradas según su tenacidad, a continuación en la Tabla 13 se expone dicha clasificación.

Tabla 13 – Requisitos de absorción de energía (EFNARC, 1993)

| Clasificación de Tenacidad | a | b | c |
|------------------------------------|-----|-----|------|
| Energía Absorbida a 25 mm [Julios] | 500 | 700 | 1000 |

Acorde con la clasificación anteriormente mencionada, se tiene en la Tabla 14 la clasificación de cada una de las probetas ensayadas, según su energía absorbida durante el ensayo. La totalidad de las probetas de la mezcla C se clasifican en la categoría *a*, la cual indica una baja absorción de energía, menor a los 500 Julios. Por otro lado, dos de las tres probetas de la mezcla F1 se clasifican en la categoría *b*, la cual indica una absorción de energía media, entre 500 y 700 Julios. Finalmente, la totalidad de las probetas de la mezcla F2 se clasifican en la categoría *c*, la cual indica una alta absorción de energía, entre 700 y 1000 Julios. Con respecto a las dosificaciones empleadas de fibras metálicas, es importante mencionar que aunque los porcentajes empleados (15 kg/m^3 y 30 kg/m^3) son bajos con respecto a los empleados usualmente (entre 20 kg/m^3 y 60 kg/m^3), se clasifican en categorías diferentes y en el caso de la mezcla F2, esta se ubica en la categoría más alta.

Tabla 14 – Energía absorbida en ensayos de placa cuadrada

(a) – Concreto adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta (C)

| Energía Absorbida a 25 mm [Julios] | C1 | C2 | C3 | PROMEDIO |
|-----------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| | 142.9 | 108.9 | 189.8 | 147.2 |
| Clasificación EFNARC | a | a | a | a |
| Carga Máxima [kN] | 33.9 | 40.4 | 44.5 | 39.6 |

(b) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 15 kg/m^3 (F1)

| Energía Absorbida a 25 mm [Julios] | F1-1 | F1-2 | F1-3 | PROMEDIO |
|-----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| | 618.4 | 756.3 | 579.6 | 651.4 |
| Clasificación EFNARC | b | c | b | b |
| Carga Máxima [kN] | 37.1 | 44.2 | 58.8 | 46.7 |

(c) – Concreto adicionado con fibras metálicas, 30 kg/m^3 (F2)

| Energía Absorbida a 25 mm [Julios] | F2-2 | F2-3 | PROMEDIO |
|-----------------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | 979.1 | 918.9 | 949.0 |
| Clasificación EFNARC | c | c | c |
| Carga Máxima [kN] | 46.3 | 48.7 | 47.5 |

La carga máxima alcanzada, como se observa en el Gráfico 39 en las mezclas F1 y F2 fue similar, pero en la mezcla C se presentó una variación cercana al 20%, esta variación puede deberse a la generación aleatoria de grietas en las placas, resultado de la condición hiperestática de apoyo.

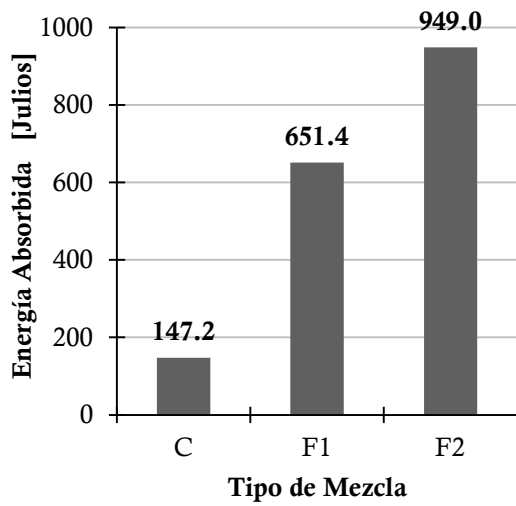


Gráfico 38 – Energía absorbida en ensayos de placa cuadrada

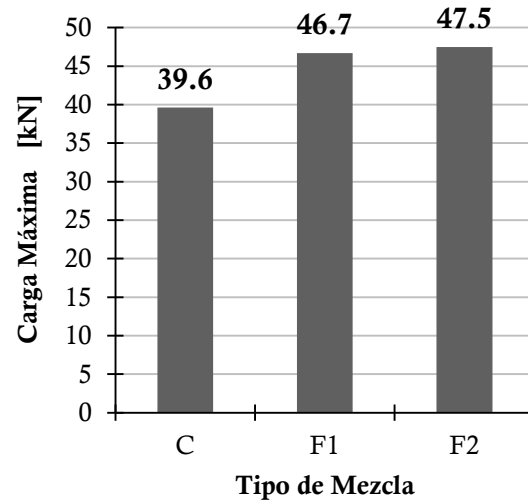


Gráfico 39 – Carga máxima alcanzada en ensayo de placa cuadrada por tipo de mezcla

6.3 ENSAYOS DE RESISTENCIA FLEXURAL Y TENSION RESIDUAL

En el Gráfico 40, se ilustra la curva carga-desplazamiento de las tres mezclas analizadas con la cual se obtiene la resistencia flexural y tensión residual en vigas.

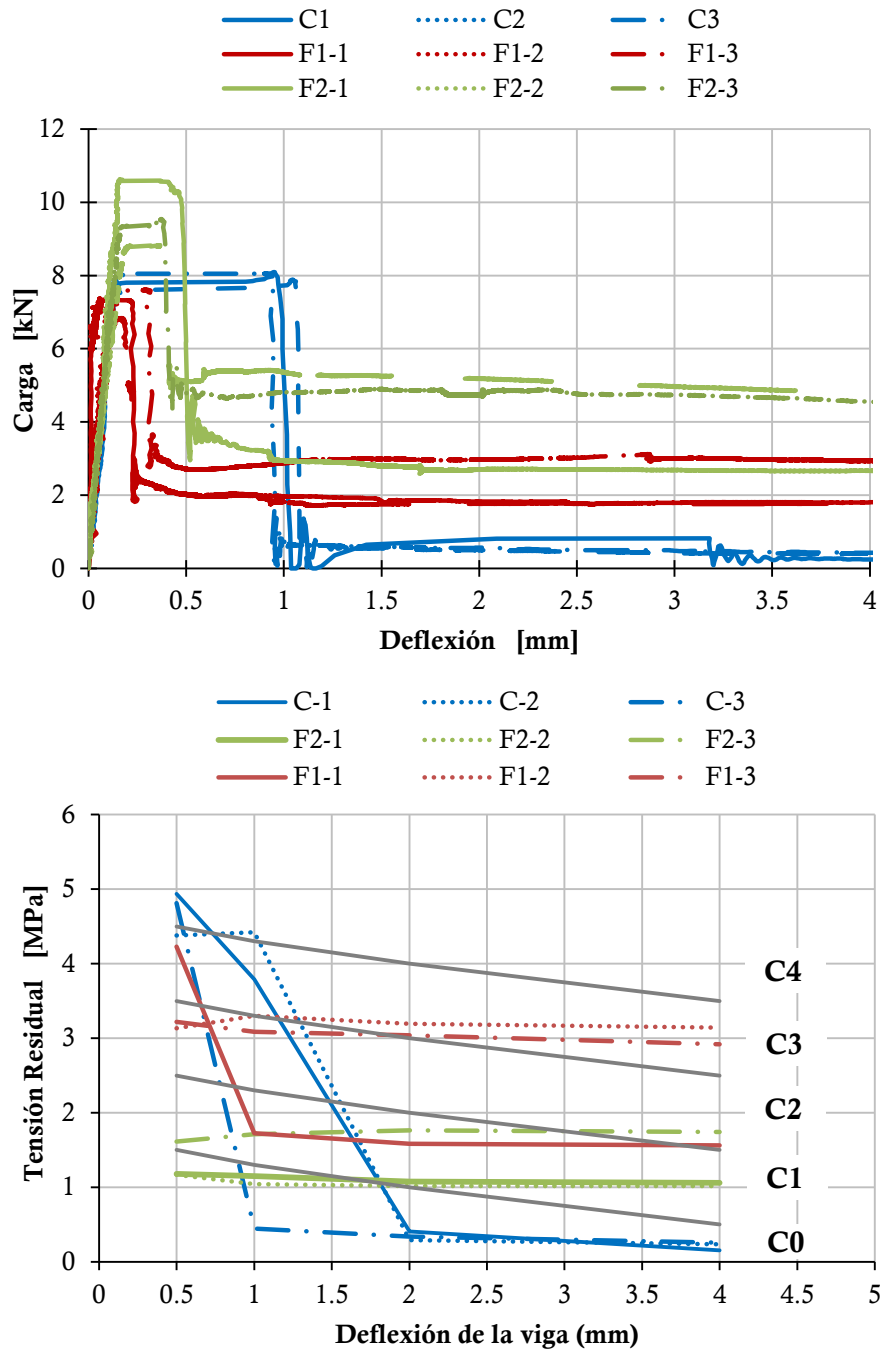


Gráfico 40 – Curva carga-deflexión y clasificación de tensión residual en ensayos de viga

En este ensayo, la mezcla C fue aquella que presentó la menor absorción de energía, con base en la clasificación de tensión residual obtenida (categoría 0), seguida de la mezcla F1 (categoría 1) y finalmente, la mezcla F2 (categoría 3) fue aquella que registró la mayor absorción de energía como se muestra en el Gráfico 41. Cabe resaltar, que la dispersión de los datos registrados para las probetas de las mezclas C fue baja, mientras que para las mezclas F1 y F2, el comportamiento en términos de energía de las probetas F1-3 y F2-1 fue superior e inferior, respectivamente a las otras dos probetas de cada tipo de mezcla, lo que generó una mayor dispersión en los datos.

La carga máxima $P_{0,1}$ en este ensayo para las probetas de la mezcla C presentó un comportamiento intermedio (7,9 kN) con respecto a las mezclas F1 y F2, las cuales presentaron la menor (7,26 kN) y mayor (9,61 kN) carga máxima respectivamente, como se evidencia en la Gráfico 42.

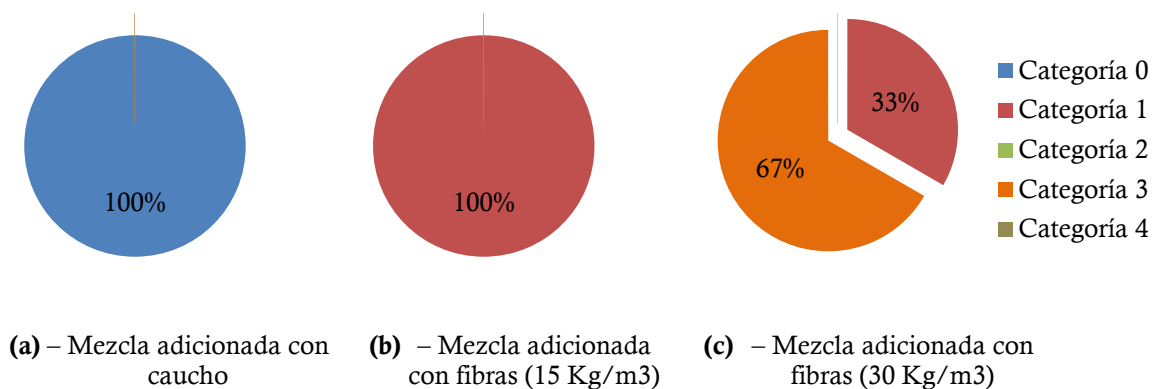


Gráfico 41 – Categorías de tensión residual por tipo de mezcla

A partir de los resultados obtenidos (Gráfico 40 y Gráfico 43), es posible inferir que el desempeño de las tres mezclas analizadas es similar para el parámetro de resistencia flexural, la mezcla F2 obtiene el mayor valor, seguido por la mezcla C y finalmente, se encuentra la mezcla F1. Aún así, aunque la mezcla adicionada con caucho manifiesta una mayor resistencia flexural, en la totalidad de las probetas se registró la categoría de tensión residual más baja, cero; mientras que para las mezclas F1 se registró la categoría de tensión residual 1 para la mezcla F2 se registró la categoría de tensión residual 3 como se expresa en el Gráfico 41.

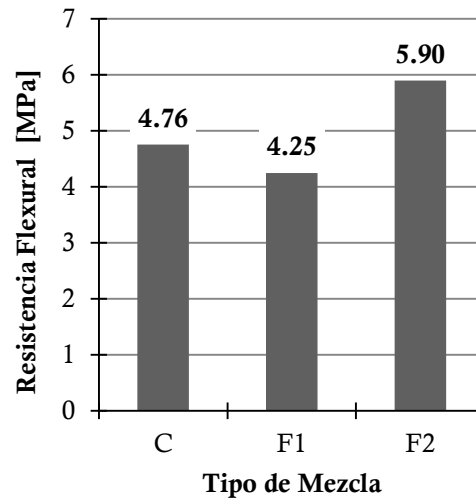
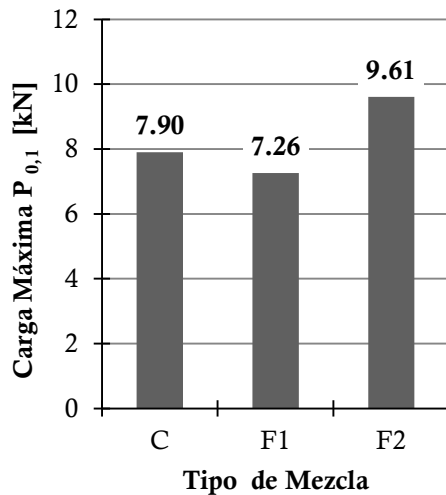


Gráfico 42 - Carga máxima $P_{0,1}$ por tipo de mezcla **Gráfico 43** - Resistencia flexural por tipo de mezcla

Es posible inferir a partir de los resultados obtenidos en los tres tipos de ensayos (placa circular, placa cuadrada y viga), que aunque la totalidad de las probetas alcanzaron una carga a la flexión máxima similar, la mezcla adicionada con caucho luego de haber alcanzado este punto tiene una caída significativa en términos de carga hasta el final del ensayo, lo cual indica que esta mezcla posee una resistencia residual baja, en comparación a las mezclas adicionadas con fibras metálicas, las cuales soportar mayores cargas luego de esta caída.

En los ensayos de placa circular y cuadrada, el comportamiento de las mezclas es similar, en donde la mezcla tipo C registra la menor energía disipada, la mezcla tipo F1 disipa mayor energía y la mezcla tipo F2 es aquella que registra la máxima absorción de energía. La carga máxima para los ensayos de placa circular se alcanza a deformaciones menores que para los ensayos de placa cuadrada, aun así, en los ensayos de placa cuadrada, se registran múltiples fallas hasta deformaciones de 5,0mm.

En los ensayos de viga, es importante resaltar, que aunque las cargas máximas, se registran a deformaciones similares, la falla de las probetas de las mezclas adicionadas con fibras metálicas se presenta a deformaciones menores que la falla de las probetas de la mezcla adicionada con caucho; lo cual significa que para este tipo de mezcla la carga máxima se mantiene a deformaciones mayores (menor a 1,0 mm) disipando mayor energía antes de la falla. Aunque la fractura de los tres tipos de mezcla es súbita, la caída de carga para la mezcla tipo C es mayor, llegando a niveles de carga residual muy bajos; de esta manera, la energía disipada después de la falla es mínima, por el contrario, las mezclas tipo F1 y F2, disipan muchas más energía luego de la falla.

El mecanismo de absorción de energía de las fibras en las mezclas de concreto analizadas es un factor determinante para el aporte de tenacidad de las fibras; para el caso de las tiras de caucho de desecho de llanta, en la mayoría de los ensayos, se observó que las tiras se desprendían de la matriz de concreto (**Ilustración 40** y **Ilustración 41**) debido a su poca adherencia, las tiras empleadas (resultado del proceso de corte de los laterales de llantas de camiones) presentaba cierta rugosidad en superficie, aún así, esta no fue suficiente, tal como se puede observar a continuación.



Ilustración 40 – Falla típica cilindro de concreto adicionado con caucho

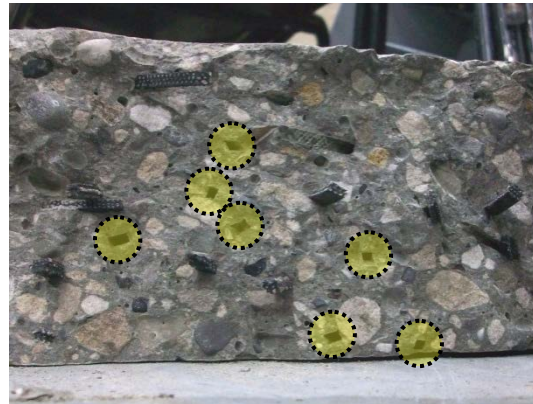


Ilustración 41 – Desprendimiento de las tiras de caucho de la matriz de concreto

Aún así, las tiras de caucho de llanta, en las zonas de agrietamiento aportaban cierta resistencia al concreto, como se muestra en la Ilustración 42 y en la **Ilustración 43**, pues estas se estiraban un poco antes de desprenderse de la matriz de concreto.



Ilustración 42 – Falla típica de placa cuadrada de concreto adiccionado con caucho



Ilustración 43 – Falla típica de placa circular de concreto adiccionado con caucho

Por otra parte, las fibras metálicas presentaron muy buena adherencia con el concreto, aún así estas no fallaron, sino por el contrario se desprendieron de la matriz de concreto; en muchas ocasiones los anclajes (pliegues en los extremos) de las fibras se perdieron por completo, como se evidencia en la **Ilustración 44**, lo cual indica que la fibra trabajó aportando tenacidad al concreto.



Ilustración 44 – Estado final de las fibras metálicas, luego de ensayo de placa circular (Nótese la pérdida del anclaje en los extremos)

7 CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de placa circular, placa cuadrada y tensión residual en vigas, es posible concluir que dada la configuración de la adición de caucho empleada, el aporte en términos de tenacidad al concreto, es bajo, debido a la poca adherencia presentada entre los dos materiales. En el primer tipo de ensayo, la muestra C (concreto adicionado con caucho de desecho de llanta) registró una energía absorbida a los 40 mm de desplazamiento de 20.4 Julios, mientras que las mezcla F1 (15 kg/m³ de fibras metálicas) y F2 (30 kg/m³ de fibras metálicas), registraron una energía absorbida superior a los 270 Julios. Por otro lado, en el segundo tipo de ensayo se registró para la muestra C una energía absorbida a los 25 mm de desplazamiento de 147.2 Julios, mientras que la mezcla F1 registró una energía de 651.4 Julios; por su parte, la mezcla F2 registró una energía de 949 Julios.
- Las tiras de caucho no fallaron sino que por el contrario, se desprendieron de la matriz de concreto, generando un mecanismo de falla que no aporta tenacidad al concreto como se evidencia en los resultados mostrados. La baja compatibilidad de deformaciones entre el concreto y las tiras de caucho permitía que estas se desprendieran, pues al ser deformadas su sección transversal disminuye y por lo tanto se pierde el contacto con la matriz de concreto. El tamaño de las fibras empleadas implica que pocas fibras trabajen en la zona de falla de las probetas, y en el momento en el que se desprenden de la matriz de concreto se genera un vacío que reduce la sección transversal.
- Se implementó exitosamente el ensayo de placa circular según la norma ASTM C1550-10 en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana; la modelación elaborada en elementos finitos del montaje del ensayo, permitió la correcta ejecución de los mismos, obteniendo resultados que cumplieron los requisitos de carga y deformación descritos por la normativa, esta indica que la falla de las placas debe corresponder a la generación de tres grietas radiales a una deformación menor a 1 mm. Esto se consiguió en ocho de las nueve placas circulares ensayadas, gracias a la correcta disposición del montaje.
- El módulo de elasticidad no se vio afectado con la adición de tiras de caucho y fibras metálicas, permaneció constante, ya que presentó una variación menor al 5% con respecto a la mezcla sin adición.
- Las fibras metálicas, en las dos dosificaciones empleadas, demostraron capacidad de disipación de energía en los ensayos de placa circular, placa cuadrada y resistencia flexural y tensión residual en vigas. Demostración de esto, es el comportamiento luego de la primera fisura

obtenido en los ensayos realizados, en donde a diferencia de la mezcla adicionada con caucho, no se presenta una caída súbita, sino por el contrario una disminución de carga, que finalmente termina con una resistencia residual no menor al 20% de la carga máxima.

- La mezcla F2, presentó un mejor comportamiento en términos de tenacidad que la mezcla F1, ya que en los tres tipos de ensayos realizados (placa circular, placa cuadrada y tensión residual en vigas), reportó la máxima absorción de energía con respecto a las mezcla F1, como resultado de la presencia de un mayor número de fibras en las grietas generadas durante el ensayo.
- El ensayo de placa circular es más sensible a las variaciones de espesor de la probeta, y debido a la condición isostática de apoyo es posible que algunas probetas no fallen de acuerdo a lo descrito por la normativa (tres grietas radiales), lo cual exige un mayor control en el proceso de fundida de la placa.
- Dada la condición de apoyo del ensayo de placa circular, el cual induce tres grietas radiales definidas, es posible obtener resultados comparativos para diferentes mezclas de concreto, con una baja dispersión, siendo más confiable en cuanto a los resultados obtenidos en comparación al ensayo de placa cuadrada.
- La tenacidad de las mezclas analizadas se vio reflejada en el número de grietas generadas durante los ensayos de placa cuadrada. La mezcla C, presentó cuatro grietas definidas que partían del centro de la placa a los puntos medios de sus bordes, la mezcla F1, correspondiente a un material más dúctil que la mezcla C, se presentó un mayor número de grietas y aún más para la mezcla F2, razón por la cual esta última es la mezcla que disipa mayor cantidad de energía, 31% superior a la energía absorbida por la mezcla F1 y 85% superior a la energía absorbida por la mezcla C.
- Dada la configuración del ensayo de placa cuadrada, se tendrá una mayor energía absorbida en comparación al ensayo de placa circular en probetas de la misma mezcla de concreto, puesto que se genera un mayor número de grietas, lo que permite que mayor cantidad de fibras trabajen, aportando tenacidad a la mezcla. Para la mezcla C, en el primer ensayo se obtuvo una energía disipada de 20.4 Julios y en el segundo una energía de 147.2 Julios, una variación del 86%. Por otro lado, en la mezcla F1 en el primer ensayo se obtuvo una energía disipada de 272.2 Julios y en el segundo una energía de 651.4 Julios, una variación del 58%. Finalmente, en la mezcla F2 en el primer ensayo se obtuvo una energía disipada de 524.7 Julios y en el segundo una energía de 949 Julios, una variación del 45%.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda, con el fin de obtener una mayor absorción de energía en mezclas adicionadas con caucho de desecho de llanta, emplear otra tipología de fibra, dado que la forma empleada en esta investigación no permitió alcanzar una alta tenacidad, puesto que las fibras no desarrollaron su potencial debido a la baja adherencia con el concreto. El uso de fibras de menor sección transversal (mayor relación de esbeltez) aumentaría el área de contacto entre el caucho y la matriz de concreto, mejorando su comportamiento.
- Debido a que en el ensayo de placa circular, se generan grietas en la zona en donde se debe ubicar la instrumentación que mide la deformación de la placa, se recomienda emplear un elemento con mayor área transversal en el punto de contacto con la probeta, el cual puede ser una platina acoplada a este, u otro elemento no deformable que impida el ingreso del deformímetro en las grietas generadas durante el ensayo.
- Con el objetivo de analizar la tenacidad de las mezclas de concreto por medio del ensayo de placa circular, se recomienda realizar una clasificación donde se indiquen diferentes rangos, que permitan identificar si la mezcla tiene baja, media o alta capacidad de absorción de energía. Esta clasificación debe ser el resultado del análisis de un gran número de ensayos que permita identificar los rangos de tenacidad.

9 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ACI, Seccional Colombiana. (2010). Seminario de concreto fibro-reforzado. Bogotá.
- Aiello, M., & Leuzzi, F. (2010). Waste Tyre Rubberized Concrete: Properties at Fresh and Hardened State. *Waste Management* , 1696–1704.
- ArcelorMittal. (2010). *FAQ*. Recuperado el 03 de Diciembre de 2011, de <http://www.arcelormittal.com/distributionsolutions/wiresolutions/steelfibres/faq/language/ES>
- ASTM International. (30 de Octubre de 2009). *C 29 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate* . Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (30 de Agosto de 2011). *C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates* . Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (30 de Agosto de 93). *C 127 Standard Test Method for Specific Gravity and Absortion of Coarse Aggregate* . Pennsylvania, Estados Unidos.
- Bekaert S.A. (2005). *Product Data Sheet Dramix RC 65/60 BN*. Zwevegem, Bélgica: Ann Lambrechts.
- Bernard, S. (2003). Release of New ASTM Round Panel Test. *Shotcrete* , 20-23.
- Buendía, R., Oviedo, O. I., & Ruiz, D. M. (2008). *Estudio del concreto hidráulico adicionado con tiras de caucho de desecho de llanta en elementos estructurales de una unidad de vivienda básica*. Bogotá, Colombia.
- Cabanella, L. (Agosto de 2008). *Infojardin*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2011, de <http://www.infojardin.com/foro/showthread.php?p=3684817>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). *Guía para el manejo de llantas usadas*. Bogotá: Kimpres Ltda.
- Canals i Llopart, G. (2002). *Estudi relatiu a l'efecte de la incorporació de fibres sintètiques polimèriques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida*. Barcelona, España.
- Cardona, L. (Octubre de 2010). Concreto con fibras de acero: aplicaciones. *ACI Seccional Colombiana* . Bogotá, Colombia.

- Castro, G. (2007). *Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos*. Buenos Aires: Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.
- Cengiz, O., & Turanli, L. (2004). Comparative Evaluation of Steel Mesh, Steel Fibre and High-Performance Polypropylene Fibre Reinforced Shotcrete in Panel Test. *Cement and Concrete Research* , 1357-1364.
- CGN Buenas Noticias. (30 de Agosto de 2011). Recuperado el 23 de Noviembre de 2011, de Con Llantas, construyen parque ecológico para escolares de Boca del Monte: <http://cgnnoticiasdeguatemala.wordpress.com/2011/08/30/con-llantas-construyen-parque-ecologico-para-escolares-de-boca-del-monte/>
- Chang, D.-I., & Chai, W.-K. (1995). Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures. *Nuclear Engineering and Design* , 156, 201-207.
- Ding, Y., & Wolfgang, K. (1999). Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research* , 1827-1834.
- Earthships: construcción con neumáticos y tierra. (12 de Junio de 2011). Recuperado el 25 de Noviembre de 2011, de Ecococos: <http://ecococos.blogspot.com/2011/02/earthships-construccion-con-neumaticos.html>
- EFNARC. (1993). *Especificación europea para hormigón proyectado* , 19.
- EPA, U. (2010). *Guía aplicaciones de reciclaje y gestión de las llantas de desecho en EE.UU y México*. Washington, DC.
- Farrés, J., & Serrat, M. (2007). Ensayo de placa para la evaluación de la tenacidad del hormigón proyectado con fibras: Revisión crítica de las técnicas de ensayo. *Anales de construcciones y materiales avanzados* , Vol. 6, 43-53.
- Gallego, M., & Alberto, S. (2006). *El concreto y los terremotos*. Instituto del concreto.
- Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber Replacement for Aggregate and Filler in Concrete. *Construction and Building Materials* , 1828–1836.
- García, T., Agulló, L., Aguado, A., & Canals, G. (2004). *Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado*. Barcelona, España: Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio.
- Gopalaratnam, V. S. (1995). On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. *Cement & Concrete Composites* , 17, 239-254.

- Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., & Witoszek, B. (2002). Static and Dynamic Behaviour of Recycled Tyre Tubber-filled Concrete. *Cement and Concrete Research* , 1587–1596.
- Holschemacher, K., Mueller, T., & Ribakov, Y. (2009). Effect of Steel Fibers on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. *Materials and Design* , 2604-2615.
- ICONTEC. (21 de Junio de 2000). *NTC 174 Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto* . Colombia.
- ICONTEC. (2010). *NTC1304. LLantas neumáticas. Definiciones, clasificación, designación y rotulado*. Bogotá.
- Johnson, D. (26 de Agosto de 2009). *Exitoso proyecto privado de agricultura ecológica reciclando llantas*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2011, de El Espíritu del Tiempo: <http://elespiritudeltiempo.org/blog/exitoso-proyecto-privado-de-agricultura-ecologica-reciclando-llantas/>
- Khaloo, A., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste Management* , 2472-2482.
- Khatib, Z., & Bayomy, F. (1999). Rubberized Portland Cement Concrete . *Journal of Materials in Civil Engineering* .
- La adición de partículas de neumáticos reciclados en el concreto. (2011).
- Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., & Huang, B. (2004). Development of Waste Tire Modified Concrete. *Cement and Concrete Research* , 2283-2289.
- Macaferri. (2011). *Fibre Reinforced Concrete. Origin of the Species*. Recuperado el 9 de Noviembre de 2011, de Macaferri UK: <http://www.macaferri.co.uk/PAGES00560.html>
- Mármol, P. C. (2010). *Hormigones con fibras de acero. Características mecánicas*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Marson Franco, B. L. (24 de Septiembre de 2010). Manejo de concreto fibroreforzado para obras de infraestructura. *RC 2010* . Cartagena, Colombia.
- Memari, A. M., Motlagh, A. Y., & Scanlon, A. (2000). Seismic Evaluation of an Existing Reinforced Concrete Framed Tube Building Based on Inelastic Dynamic Analysis. *Engineering Structures* , 621-637.
- Meyer, C. (2009). The Greening of the Concrete Industry. *Cement and Concrete Composites* , 31, 601-605.

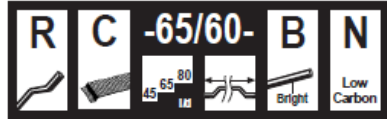
- Nataraja, M., Dhang, N., & Gupta, A. P. (2000). *Toughness Characterization of Steel Fiber-reinforced Concrete by JSCE Approach*. India: Pergamon.
- NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association. (2010). El concreto en la práctica ¿Qué, por qué y cómo?
- Rad, P. F. (1976). *Rubberized Concrete*. Lehigh Valley: Envo Publ Co.
- Reciclaje de neumáticos*. (25 de Agosto de 2009). Recuperado el 28 de 11 de 2011, de Oponeo: <http://www.oponeo.es/articulo/reciclaje-de-neumaticos>
- Sánchez de Guzmán, D. (1996). *Tecnología del concreto y el mortero* (3 ed.). Bhandar.
- Sika S.A. (2010). Concreto reforzado con fibras. *Sika Informaciones Técnicas* , 1-26.
- Smith, W. F. (2004). *Ciencia e ingeniería de materiales* (3ra ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Soluciones frente a la polución de neumáticos*. (23 de Noviembre de 2011). Recuperado el 2011 de Noviembre de 25, de Eco Actualidad: <http://www.ecoactualidad.com/planeta-saludable/soluciones-frente-a-la-polucion-de-neumaticos/>
- Tantala, M. W., Leopore, J. A., & Zandi, I. (1996). *Quasi Elastic Behaviour of Rubber Included Concrete*. 12th International Conference on Solid Waste technology and Management.
- Taylor, M., Lydon, F. D., & Barr, B. I. (1997). *Toughness Measurements on Steel Fiber-reinforced High Strength Concrete*. Elsevier.
- Topçu, Í. B. (1995). *The Properties of Rubberized Concretes*. Eskişehir, Turquía: Pergamon.
- Topçu, Í. B., & Avcular, N. (1997). Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material. *Cement and Concrete Research* , 1135-1139.
- Toutanji, H. (1996). The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates. *Cement & Concrete Composites* , 135-139.
- Zollo, R. F. (1996). *Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development*. Miami, EE. UU.: Elsevier.

10 ANEXOS

ANEXO 1 – Hoja técnica fibra metálica Dramix RC – 65 60 – BN



Dramix®



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 - C9D

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 Belgian, Brazilian, Czech, Turkish and Chinese plants Product Poland AT-15-2117/2001 Romania 007-01/068-2003 Germany Z-3.71-1745 Slovak Republic 1402A/02/0771/1/C/C04 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

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

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 | 60 | 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

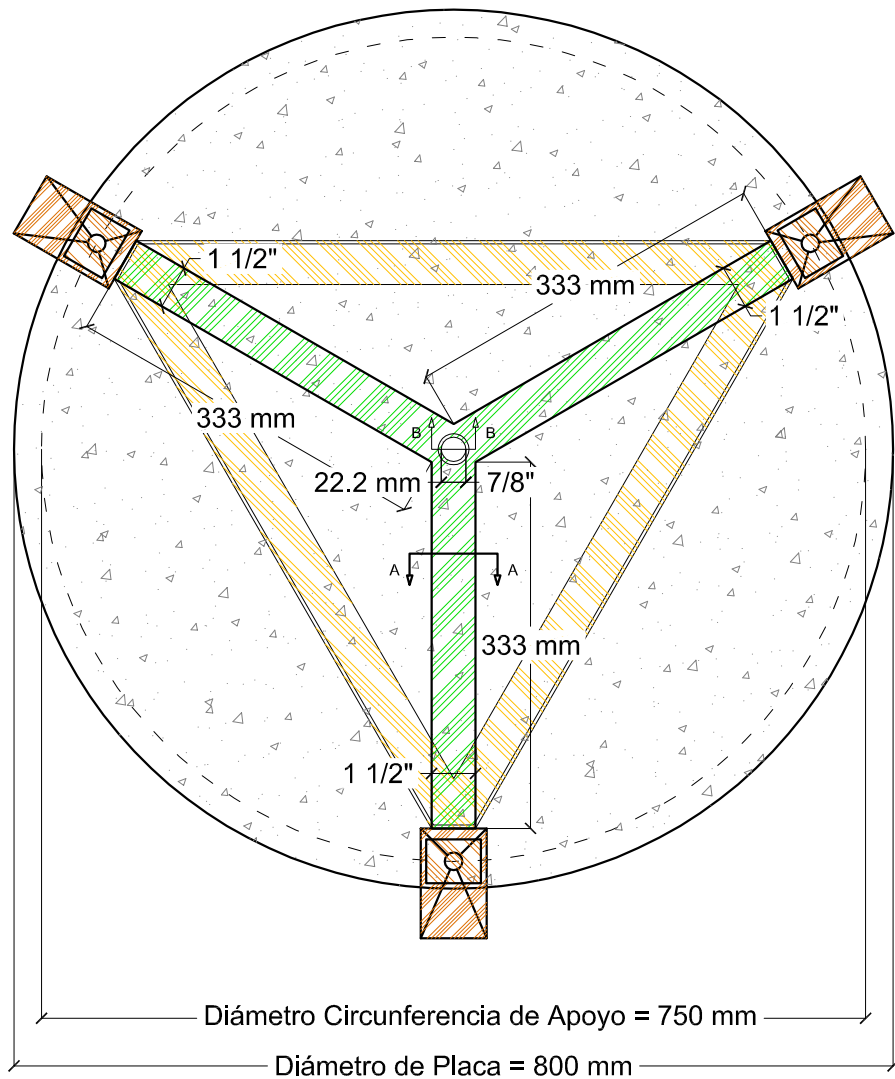
| | | | |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <p>Protect the pallets against rain</p> | <p>Do not stack the pallets on top of each other</p> | <p>Delivered in</p> <p>non water-soluble bags of 20 kg on pallet 1200 kg</p> | <p>big bag 1100 kg</p> |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|

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

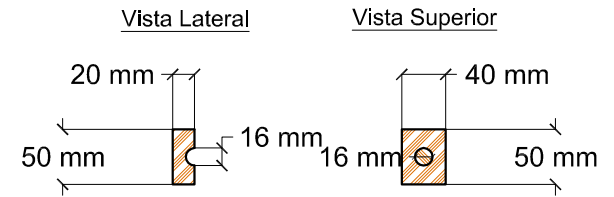
Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. N.V. Bekaert S.A. 2005

www.apamabe - 02/2005
 Resp. editor: Ann Lambrechts, Lauwe

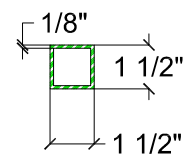
ANEXO 2
Elementos de Apoyo (Ensayo Placa Circular)



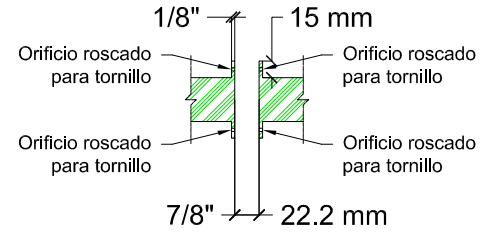
Elemento de Apoyo 1
(Cantidad = 3)



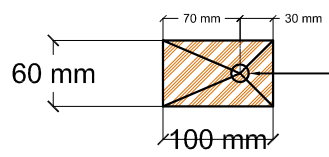
Detalle Sección A - A



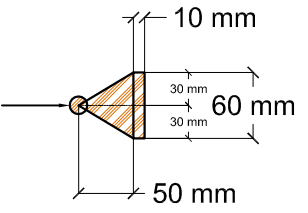
Detalle Sección B - B



Vista Superior

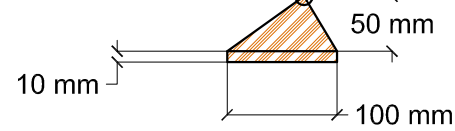


Vista Frontal

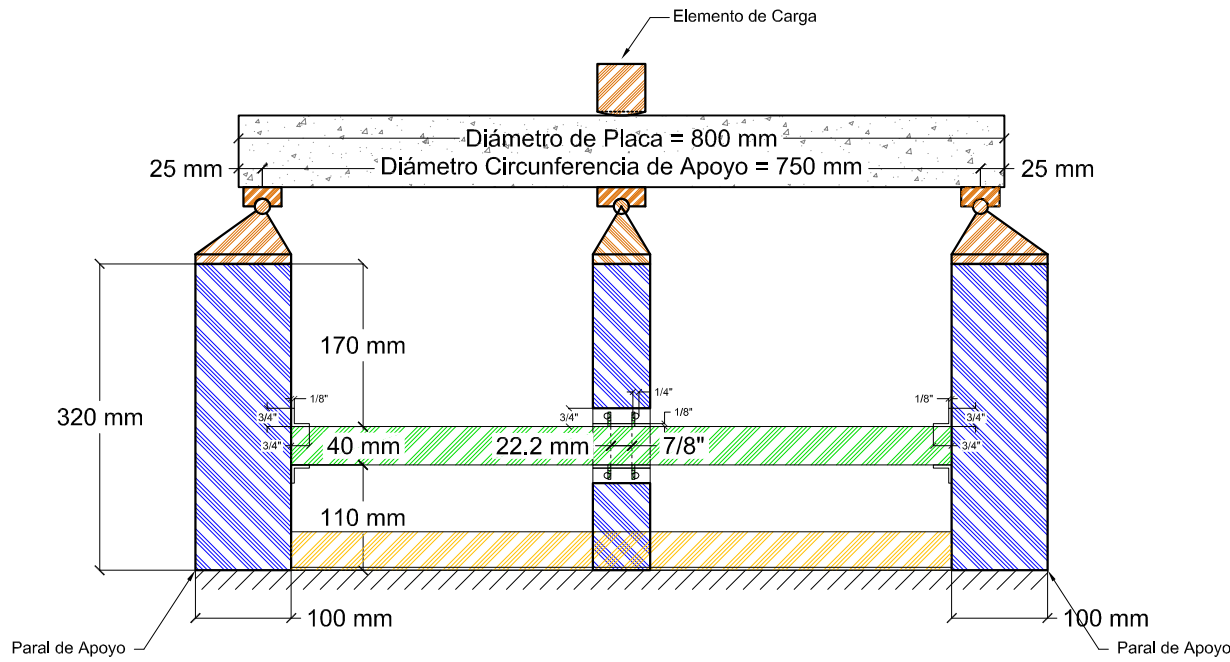


Elemento de Apoyo 2
(Cantidad = 3)

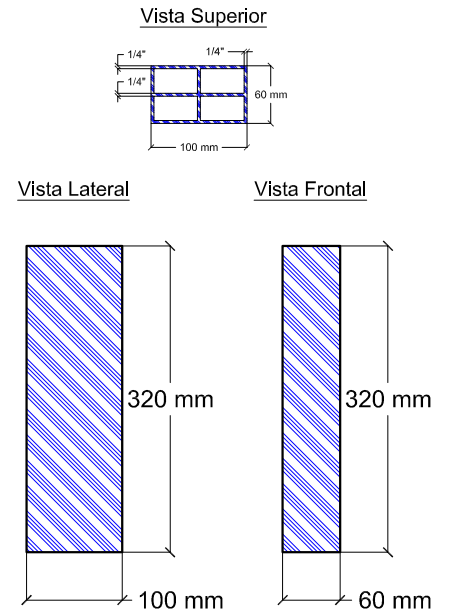
Vista Lateral



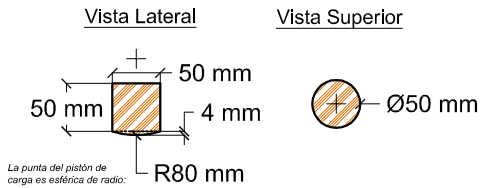
Elementos de Carga y Parales de Apoyo (Ensayo de placa circular)



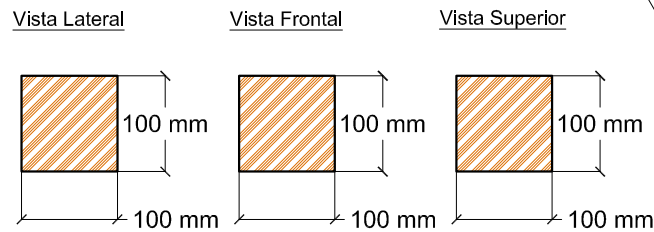
Detalle Paral de Apoyo (Cantidad = 3)



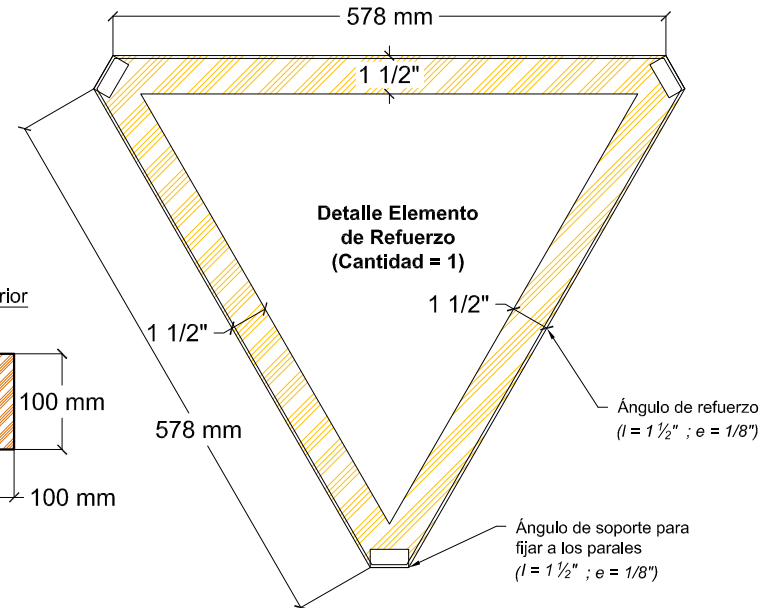
Detalle Elemento de Carga 1 (Cantidad = 1)



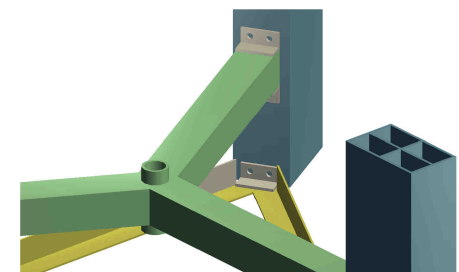
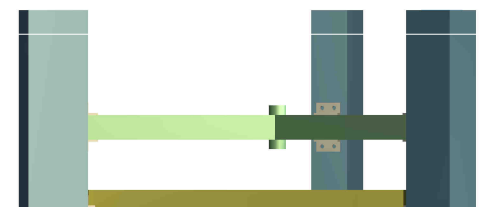
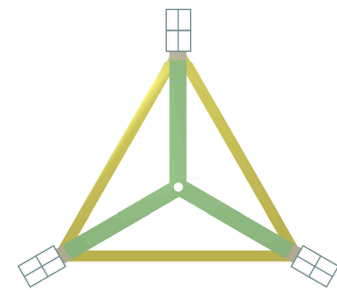
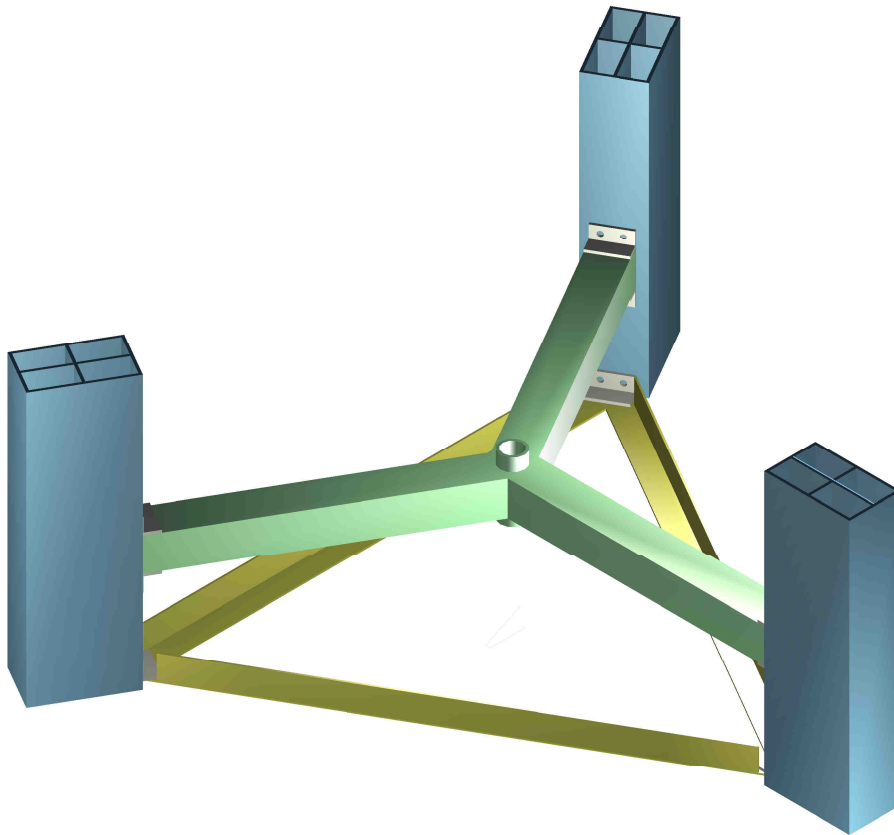
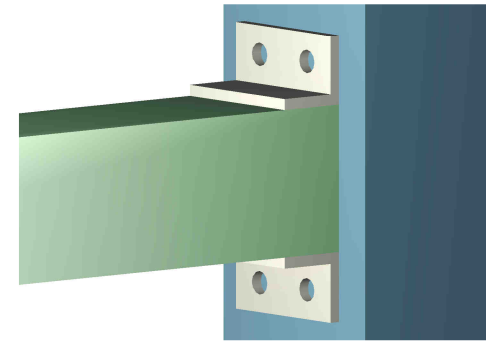
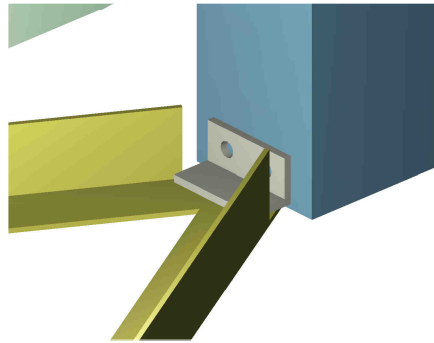
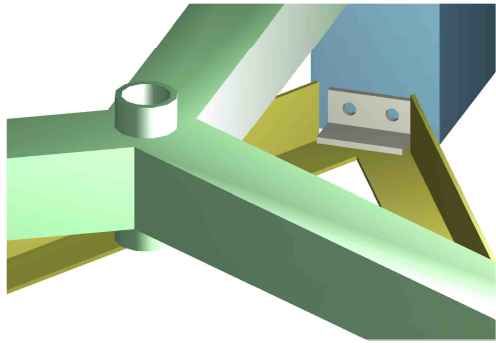
Detalle Elemento de Carga 2 (Cantidad = 1)



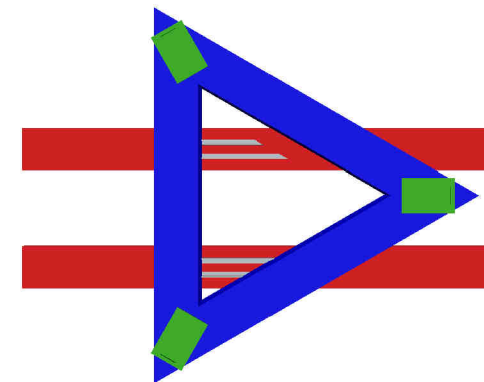
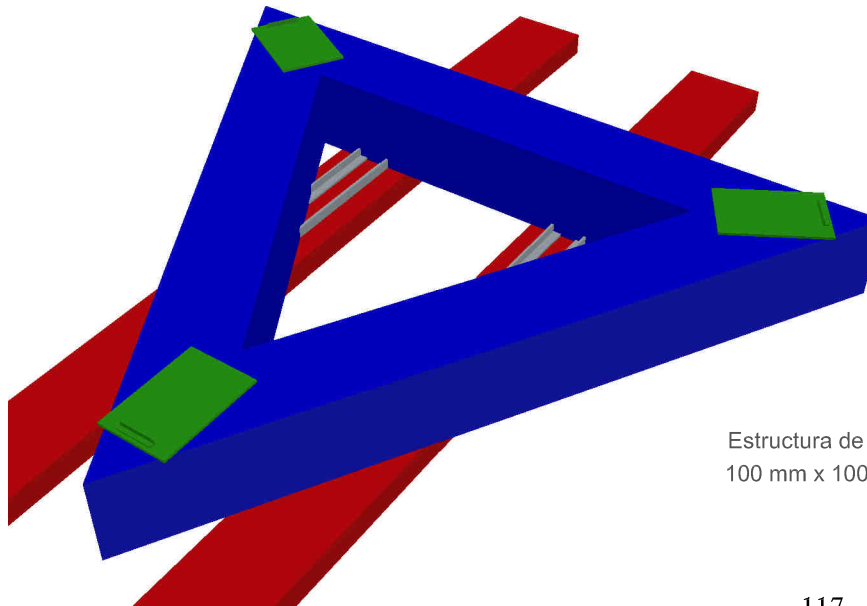
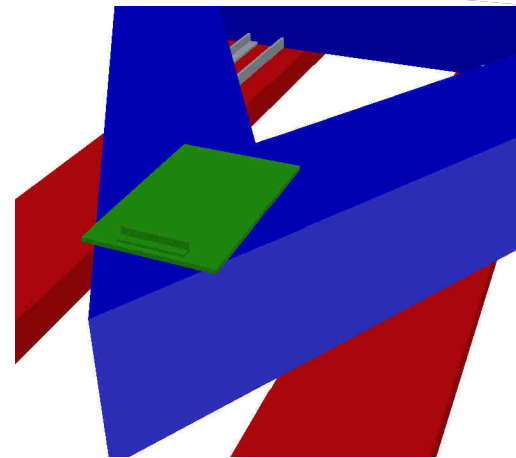
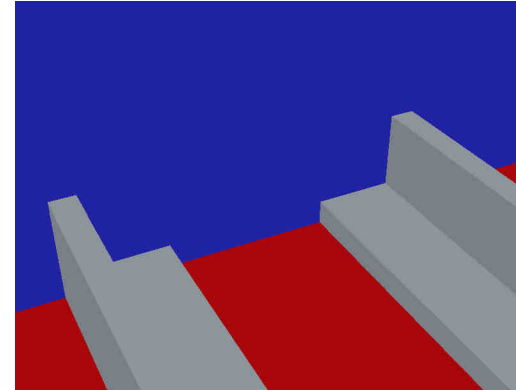
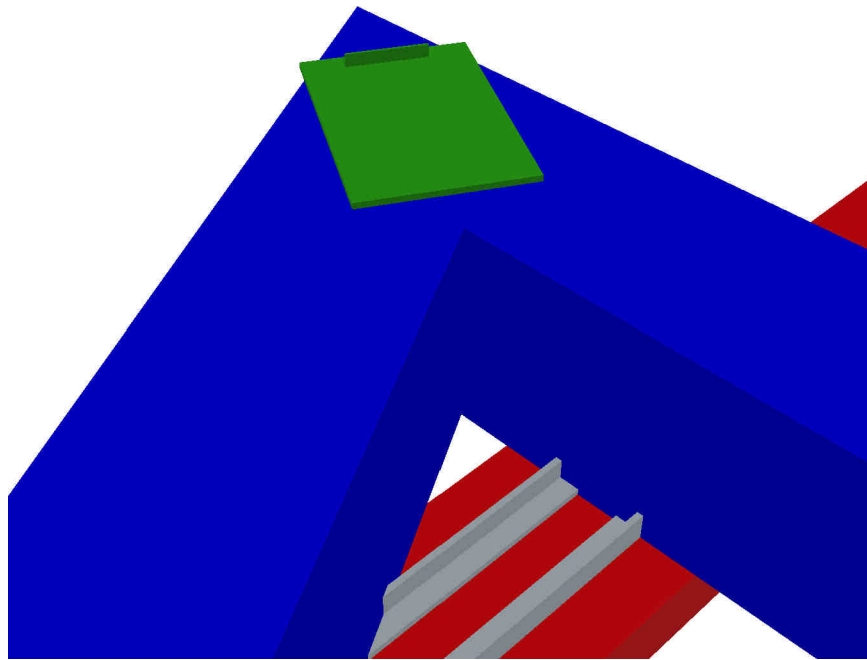
Detalle Elemento de Refuerzo (Cantidad = 1)



**Modelo 3D Soporte Placa
(Ensayo de placa circular)**

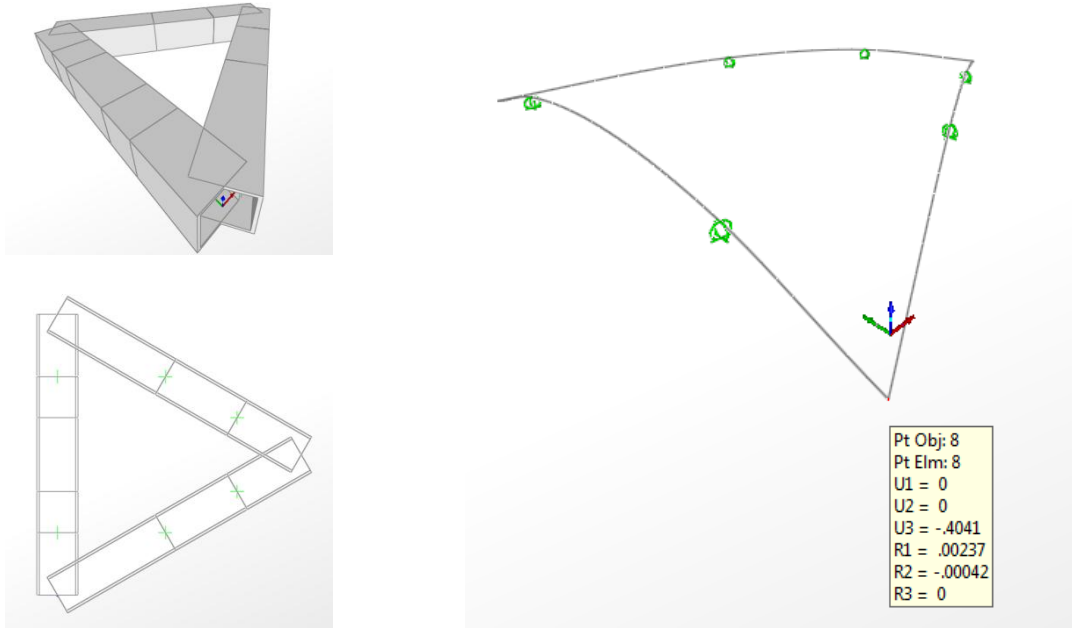


**Modelo 3D Estructura Placa
(Ensayo de placa circular)**

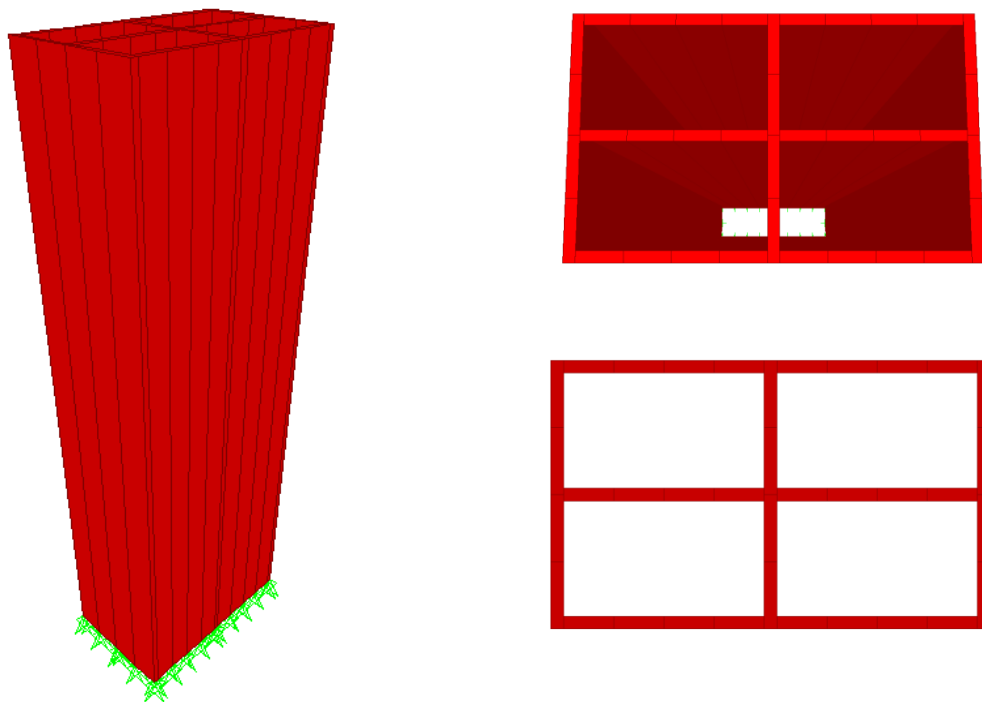


Estructura de Apoyo
100 mm x 100 mm x 3 mm

ANEXO 3 – Diseño por elementos finitos montaje de ensayo de placa circular



(a) Estructura de soporte (Carga 100kN, Deformación máxima 0.4mm)



(b) Esquema columna montaje placa circular