



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN
DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS
MEDIANTE EL ENSAYO DE DOBLE
PUNZONAMIENTO**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ZÁRATE GARNICA GABRIELA IRENE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2014





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/124/14

Señorita
GABRIELA IRENE ZÁRATE GARNICA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. CARLOS AIRE UNTIVEROS, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

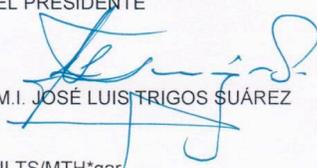
**"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS
MEDIANTE EL ENSAYO DE DOBLE PUNZONAMIENTO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ESTADO DEL ARTE
- II. ENSAYO BARCELONA DE DOBLE PUNZONAMIENTO
- III. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL
- IV. RESULTADOS
- V. ANÁLISIS COMPARATIVO: ENSAYO BARCELONA Y ENSAYO DE FLEXIÓN
- VI. CONCLUSIONES
- REFERENCIAS
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 6 de octubre del 2014.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue realizado gracias al financiamiento del Fondo de Investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Proyecto Interno 2569). Los materiales usados en este trabajo fueron donados por Cemex, Basf y Bekaert.

Agradezco especialmente a mi tutor, Dr. Carlos Aire, por su apoyo constante, sus consejos y la confianza en mi trabajo. Por la orientación, dedicación e interés que me brindó durante la realización de esta tesis.

También quiero agradecer el apoyo y la contribución en el desarrollo del proyecto y la realización de los ensayos a quienes trabajan en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

A la UNAM por mi formación académica, al brindarme los conocimientos necesarios e indispensables para mi formación profesional.

Le agradezco profundamente a mis padres, Irene y Julio, por apoyarme en todo momento, por todo lo que me han inculcado, por brindarme su amor, cariño, confianza y comprensión y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación a lo largo de mi vida, sin ellos nada hubiera sido posible.

A mi abuela Esperanza, en donde quiero que este, siempre la llevo en mi corazón. Le agradezco que siempre haya creído en mi, su cariño y sus cuidados.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
ANTECEDENTES.....	6
OBJETIVOS	9
HIPÓTESIS.....	10
METODOLOGÍA.....	10
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS	11
1.3 ENSAYOS A TRACCIÓN.....	14
1.3.1 <i>Tracción directa</i>	14
1.3.2 <i>Tracción indirecta</i>	16
1.4 ENSAYOS DE FLEXIÓN	17
1.4.1 <i>Ensayo de flexión en vigas</i>	18
1.4.2 <i>Ensayos de paneles</i>	20
CAPÍTULO 2. ENSAYO BARCELONA DE DOBLE PUNZONAMIENTO.....	22
2.1 INTRODUCCIÓN	22
2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO BARCELONA	22
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO BARCELONA.....	24
2.4 VALIDACIÓN DEL ENSAYO BARCELONA.....	27
2.5 IMPLEMENTACIÓN	29
2.6 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS	31
CAPÍTULO 3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	40
3.1 INTRODUCCIÓN	40
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	40
3.2.1 <i>Materiales</i>	41
3.2.2 <i>Dosificación de los concretos</i>	42
3.2.3 <i>Fabricación</i>	43
3.2.3.1 <i>Moldes</i>	43
3.2.3.2 <i>Cadena circunferencial con extensómetro</i>	44
3.2.3.3 <i>Discos de carga, de apoyo y de montaje</i>	44
3.2.3.4 <i>Procedimiento de fabricación especímenes de concreto</i>	46
3.2.4 <i>Almacenamiento y curado</i>	49
3.2.5 <i>Preparación de los especímenes</i>	49
3.2.5.1 <i>Cilindros para ensayos a compresión</i>	49
3.2.5.2 <i>Extracción de testigos</i>	50
3.2.6 <i>Conteo de fibras</i>	50
3.2.6.1 <i>Trituración de las probetas</i>	51
3.2.6.2 <i>Extracción y conteo de fibras</i>	52
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	53
4.1 PESO UNITARIO, REVENIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE	53
4.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	53
4.4 ENSAYO BARCELONA.....	55
4.4.1 <i>Generalidades</i>	55
4.4.2 <i>Modo de falla</i>	55
4.4.3 <i>Curvas fuerza vs desplazamiento y tenacidad vs desplazamiento</i>	56
4.4.4 <i>Conteo de fibras</i>	61

4.4.5	Análisis de resultados	65
4.4.5.1	Carga Máxima	65
4.4.5.2	Resistencia Máxima	66
4.4.5.3	Resistencia Residual	69
4.4.5.4	Tenacidad	74
4.5	ENSAYO DE FLEXIÓN	77
4.5.1	Generalidades	77
4.5.2	Modo de falla	80
4.5.3	Curvas fuerza y tenacidad vs flecha	80
4.5.4	Análisis de resultados	82
4.5.4.1	Carga máxima	82
4.5.4.2	Resistencia máxima y residual	83
4.5.4.3	Tenacidad	85
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS COMPARATIVO: ENSAYO BARCELONA Y ENSAYO DE FLEXIÓN		86
5.1	INTRODUCCIÓN	86
5.2	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TENACIDAD DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN Y BARCELONA	89
5.2.1	Probetas moldeadas de 150 mm vs Flexión	90
5.2.2	Probetas moldeadas de 100 mm vs Flexión	98
5.2.3	Probetas testigo de 150 mm vs Flexión	106
5.2.4	Probetas testigo de 94 mm vs Flexión	113
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		122
6.1	ENSAYO BARCELONA	122
6.2	ENSAYO DE FLEXIÓN	123
6.3	ANÁLISIS COMPARATIVO	124
6.4	CONCLUSIONES GENERALES	124
REFERENCIAS		126
ANEXOS		129
A-1	.....	129
A-2	.....	130
A-3	.....	131

Introducción

Antecedentes

El desarrollo de materiales nuevos e innovadores ha sido importante para el progreso de la sociedad desde los primeros tiempos. La evolución de la especie humana ha demostrado que hacer y utilizar herramientas está entre sus prioridades.

En la actualidad, el avance tecnológico ha permitido que existan materiales diseñados para responder a las nuevas necesidades de la sociedad o que mejoren las cualidades de los ya existentes.

El concreto, desde su aparición, ha sido fundamental para el desarrollo de la humanidad. Es el material más utilizado en la construcción por lo que los avances tecnológicos que se han tenido en su diseño y elaboración, son de vital importancia.

El concreto es una mezcla en proporciones determinadas de cemento, agregados y agua, en algunas ocasiones se le añaden aditivos químicos, fibras o algún otro material cementante. Fue utilizado por primera vez en Roma, donde unieron elementos de mampostería mediante morteros de cal y ceniza volcánica. Con la caída del imperio romano, dejó de utilizarse como material de construcción y no fue hasta mediados del siglo XVIII que se usó nuevamente.

El concreto tiene la característica de ser relativamente resistente a la compresión pero débil en tensión. El concreto sin refuerzo se agrieta fácilmente cuando es sometido a fuerzas de tracción¹. Este problema fue resuelto, a mediados del siglo XIX, con la incorporación de varillas de acero. La introducción del concreto reforzado marcó la historia del concreto, ya que a partir de ahí se desarrolló significativamente. En 1920 se introdujo el uso del concreto pretensado. Desde ese acontecimiento, el mayor avance tecnológico se dio, en los años sesenta, con la introducción del concreto reforzado con fibra.

A pesar de que el concreto reforzado con fibra se considera como un material moderno, su uso data de tiempos antiguos. No se tiene una fecha exacta de cuando se usaron las fibras por primera vez como material de refuerzo en la construcción, sin embargo, hay evidencias arqueológicas que indican que en Babilonia y Egipto se usaron fibras vegetales y paja combinadas con arcilla para elaborar estructuras. Esta técnica de construcción quedó en el olvido hasta que en el siglo XX se realizaron investigaciones de materiales reforzados con fibra.

¹ La tracción se define como el esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a alargarlo. En el desarrollo de la presente tesis se usará el término "tracción" como un sinónimo de "tensión".

El desarrollo y uso de las fibras se dio a partir de 1960 cuando se incorporaron, principalmente, las fibras de acero y las de vidrio para fabricar concreto. También hay fibras de materiales como: polipropileno, fibras de carbono, de poliéster, naturales, etc. Por lo general, las fibras se presentan de forma discontinua y se adicionan al concreto de manera aleatoria. Éstas deben cumplir con ciertas características importantes para un buen comportamiento como son: deben presentar una buena adhesión con la matriz y compatibilidad con el aglomerante, alto módulo de elasticidad, una buena proporción en la mezcla que permita mezclar, transportar y colocar además de un precio accesible.

En un inicio las fibras de acero eran redondas y lisas, se obtenían cortando alambre a la longitud deseada. Actualmente, tienen una superficie áspera, extremos en gancho, ondulados o rizados. Vienen en manojos unidos con una goma soluble en agua, que facilita su manejo y mezclado. Las fibras de acero tienen un alto módulo de elasticidad que al mezclarse con el concreto producen un material con propiedades estructurales adecuadas.

El comportamiento de las fibras de acero está determinado por diversos factores. La longitud de fibra y forma de la sección transversal controlan el comportamiento de las fibras en la matriz cementante. La resistencia a tracción y adherencia controlan el comportamiento del concreto bajo una carga.

El funcionamiento de las fibras comienza cuando el concreto sufre los primeros agrietamientos, antes de esto, no aportan resistencia. Al agregar fibras al concreto, éste incrementa algunas propiedades como: la capacidad de soportar deformaciones, la resistencia a tensión, la resistencia al impacto, flexión, la resistencia a la propagación de fisuras y su resistencia residual post-fisuración. Además de que aportan ductilidad que ayuda a absorber energía antes de la falla.

Durante los últimos años el concreto reforzado con fibra (CRF) ha sido indispensable para la construcción, se ha utilizado en el revestimiento de túneles, construcción de pisos industriales, pavimentos, concretos lanzados para la estabilidad de taludes, cubiertas para puentes, entre otros. Sin embargo, su uso ha sido orientado principalmente a conseguir un material más dúctil y al control de la fisuración. Hay numerosas investigaciones encaminadas a esto, dejando a un lado su aportación estructural que permita incorporarlo de una forma más eficiente al cálculo y diseño de estructuras.

El interés por el uso del CRF está en continuo aumento, potenciando su uso para fines estructurales. Existen varios temas que deben estudiarse con mayor profundidad, esto con el objetivo de ampliar el campo de aplicación donde las fibras adquieran una mayor responsabilidad estructural.

La tracción es un aspecto fundamental del comportamiento mecánico del CRF. Éste puede relacionarse con los mecanismos de falla de adherencia y de la interfaz friccional

que se desarrollan entre la matriz y las fibras. Se puede caracterizar la resistencia de fractura a tracción con la relación que existe entre el esfuerzo de tensión y la respuesta de apertura de fisura.

La absorción de energía es otro parámetro que caracteriza el comportamiento del CRF. Ésta se calcula integrando el área bajo la curva carga vs desplazamiento que se obtiene de los ensayos. La capacidad de soportar una carga en estado de fisuración es proporcional a la absorción de energía.

Existen varios ensayos que ayudan a caracterizar el comportamiento a tracción del CRF. El ensayo de tracción uniaxial es el más directo para determinar la tensión en materiales frágiles, sin embargo, es un ensayo complicado de realizar. Resulta difícil hacer una aplicación de una fuerza a tensión pura, además de los inconvenientes que conlleva la sujeción de la probeta y la estabilidad del ensayo.

También existen los ensayos a tracción indirecta. El ensayo brasileño es uno de los más empleados para evaluar la resistencia a tracción debido a su fácil aplicación. Sin embargo, es considerado como un ensayo inapropiado para el concreto con fibras (Carmona *et al.*, 1998) por tres razones. El área de carga para grandes deformaciones (por ejemplo, el estado de post-fisuración de probetas de CRF) aumenta continuamente lo que conduce a un incremento en la carga aun cuando la matriz ya está fisurada. Además, el ensayo es inestable bajo el control de desplazamiento y la longitud del cilindro permite que la fisura se inicie dentro de ella, lo que dificulta medir la apertura de fisura y el control de estabilidad.

A principios de la década de los 70, como una alternativa al ensayo brasileño, se desarrolló el ensayo de doble punzonamiento para determinar la resistencia a tracción indirecta del concreto convencional. Este ensayo presenta varias ventajas como son el poder realizarlo en una prensa convencional utilizando la configuración del ensayo en compresión y el uso de una probeta estandarizada, sin embargo, tiene la dificultad de la aleatoriedad de la ubicación de los planos de rotura y la complejidad de derivar expresiones de resistencia indirecta a la tracción a partir de la geometría y la carga última. Por lo que se han hecho investigaciones y se han propuesto modificaciones para resolver dichos problemas.

Con el objetivo de disponer de un ensayo adecuado para la caracterización del CRF y tomando en cuenta el ensayo de doble punzonamiento propuesto por Chen en 1970, Aguado *et al.* en el 2005 desarrollaron un ensayo a tracción indirecta denominado ensayo Barcelona. El ensayo fue validado en la Universidad Politécnica de Cataluña con la implementación de una amplia campaña experimental, con la cual se definieron la geometría y las características del ensayo.

El ensayo Barcelona de doble punzonamiento es un ensayo de tracción indirecta para concreto reforzado con fibra que consiste en la aplicación de una carga de

compresión sin excentricidad en ambas caras (superior e inferior) de una probeta cilíndrica de iguales dimensiones (150 mm), mediante un disco de carga de acero con un diámetro cuatro veces menor que el de la probeta. Las probetas pueden ser moldeadas o bien probetas testigos obtenidas de elemento ya existentes. Este método de ensayo fue estandarizado como norma española por la AENOR (Asociación Española de Normalización) como la norma UNE 83515 – AENOR para caracterizar el concreto reforzado con fibra.

Con el fin de ampliar las aplicaciones del ensayo Barcelona, se planteó un proyecto de investigación desarrollado en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el cual se exploran y correlacionan los diferentes parámetros experimentales.

Los primeros factores a tomar en cuenta son el tipo y la cantidad de fibras. La cantidad de fibras se mide en kg/m^3 y proporciona la masa de fibras que hay por unidad de volumen en el concreto. El tipo de fibra utilizada influye en el rendimiento del concreto reforzado con fibra, siendo las más utilizadas las de acero y sintéticas.

Otra factor a considerar es el tamaño de la probeta, entre más pequeño se facilita su manejo, aplicabilidad en el laboratorio y la extracción de testigos. Lo que permite que sea un ensayo práctico y útil para la inspección, mantenimiento y/o reparación de estructuras. Se seleccionó una probeta de dimensiones estándar de uso común en aplicaciones de control de calidad.

Tradicionalmente, el comportamiento del CRF una vez fisurado se ha analizado mediante ensayos en vigas prismáticas donde se mide el ancho de fisura o bien la deformación vertical. Sin embargo, estos ensayos presentan algunas desventajas además de que ofrecen una alta dispersión a diferencia de la que se obtienen con el ensayo Barcelona.

Objetivos

El principal objetivo de esta investigación es el de implementar el método de prueba del ensayo Barcelona, como una metodología para la caracterización del comportamiento a tracción del CRF como una alternativa a los métodos de prueba de flexión en vigas.

Se realizará una correlación de los resultados obtenidos en el ensayo Barcelona y los obtenidos de la prueba de flexión en vigas de 150 x 150 x 600 mm utilizando la metodología descrita en la norma americana ASTM C1609. Esta correlación tiene como objetivo demostrar la viabilidad del ensayo Barcelona.

Además se evaluará la influencia del tamaño del diámetro de la probeta, la cuantía y el tipo de fibra en los resultados del ensayo Barcelona para lo cual se utilizarán probetas de 100 y 150 mm de diámetro obtenidas de cilindros moldeados y testigos de 94 y 150 mm.

Hipótesis

Se pretende implementar la metodología del ensayo Barcelona y se demostrará la viabilidad del ensayo. Se espera que los resultados del ensayo Barcelona arrojen coeficientes de variación bajos y que para el caso de la resistencia residual, ésta aumente a medida que se incrementa la cantidad de fibra y que los valores más altos se den en el caso de probetas con fibras de acero. Además que el mecanismo de falla no se vea influenciado por el tamaño ni el tipo de probeta.

Para los ensayos de flexión, se espera una variabilidad de resultados alta, mucho mayor a la esperada para los ensayos Barcelona. La revisión bibliografía presenta resultados con una variabilidad del orden de 20%.

Metodología

El procedimiento que se siguió para desarrollar la línea de investigación queda descrito en la estructura de la presente tesis. En primer lugar se realiza una recopilación de información acerca de los principales métodos para caracterizar el comportamiento a tracción del concreto reforzado con fibra. Se destaca el método de prueba ensayo Barcelona y las pruebas en vigas a flexión.

Se implementó una campaña experimental que se realizó para evaluar la influencia del tamaño del diámetro de la probeta en los resultados del ensayo Barcelona. Los estudios se realizaron empleando 40, 60 y 80 kg/m³ de fibras de acero y 2, 5, 7 y 9 kg/m³ de fibra sintética (0.2, 0.5, 0.7 y 0.9%) en probetas testigos de 94 y 150 mm de diámetro y probetas moldeadas de 100 y 150 mm. También se ensayaron a flexión vigas de 150 x 150 x 600 mm para comparar los resultados de ambos ensayos.

Posteriormente, se hizo un extenso análisis de los resultados obtenidos. Se desarrollaron las correlaciones entre los resultados de tenacidad. Para cada una de ellas se presentan figuras y los coeficientes de variación. Finalmente, se presentan las conclusiones.

Capítulo 1. Estado del Arte

1.1 Introducción

En las últimas décadas el CRF ha sido utilizado en diversas aplicaciones con poca responsabilidad estructural, sin embargo, actualmente su aplicación se ha extendido y se ha llegado a usar en la fabricación de dovelas y elementos prefabricados.

La utilización de las fibras se ha incrementado debido a los beneficios que aportan, como son: control de las fisuras, resistencia al impacto, al fuego, a la flexión, aumento de la tenacidad, entre otros. La contribución de las fibras en el incremento de la tenacidad es uno de los beneficios más importantes de su uso en el concreto.

Existen varias normas que rigen el comportamiento del concreto reforzado con fibra. En general, estos ensayos se basan en vigas cargadas a los tercios, en donde se determina la resistencia a primera fisura y la resistencia a falla por flexión.

El objetivo de este capítulo es mencionar y describir de manera resumida algunos de los ensayos que existen para caracterizar el comportamiento y la resistencia a tracción del concreto reforzado con fibra mediante ensayos de tracción directa, tracción indirecta y flexión. Se explican brevemente las variables más representativas de cada uno, así como las ventajas y desventajas.

1.2 Concreto reforzado con fibras

Según el ACI 116R-00, que trata sobre la terminología del cemento y concreto, el concreto reforzado con fibras (CRF) es un material compuesto que consiste esencialmente de cemento hidráulico, agua, agregados finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas orientadas aleatoriamente.

La norma ASTM C 1116 (Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete) define a las fibras como: "Filamentos finos y elongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de concreto fresco". Así mismo, el ACI 544 (Fiber-Reinforced Concrete) considera como fibras para el concreto los filamentos discontinuos de acero, las fibras sintéticas, las de vidrio y las naturales.

Dependiendo de su naturaleza, las fibras pueden ser naturales o artificiales, tienen como objetivo reforzar la masa del cemento incrementando la resistencia a la tracción disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad. Además de que la adición de fibras disminuye los efectos de la contracción por fraguado y aumenta la resistencia al

impacto y a la fatiga. La dosificación de las fibras dependerá del tipo de fibra y la finalidad del concreto.

Las fibras más utilizadas son las de acero, aunque también las hay sintéticas como lo son las de acrílico, aramida, nylon poliéster, polietileno y de polipropileno. La elección del tipo de fibras a utilizar depende del tipo de aplicación que se va a realizar. Las fibras de acero se utilizan para mejorar la resistencia a tracción, flexión, fatiga y la capacidad de absorción de energía. Mientras que las microfibras de polipropileno buscan un control de fisuración y se utilizan en concretos resistentes a choques o impactos.

El comportamiento del CRF, al ser un sistema compuesto de diversos materiales, depende de las propiedades de sus componentes y de la interacción física, química y mecánica que existe entre ellos. Para un comportamiento óptimo, las fibras deberán estar distribuidas de manera homogénea en la matriz.

El principal propósito de usar fibras en el concreto es el de capitalizar la fuerza, unión y rigidez de la matriz. El uso de fibras en matrices frágiles o débiles a la tensión incrementa su ductilidad, ya que el esfuerzo último de la matriz es menor que el de las fibras, por lo tanto, la matriz falla antes que la capacidad última de las fibras se alcance. Las fibras cosen la fisura y contribuyen a la disipación de la energía.

El CRF presenta múltiples ventajas, una de ellas es la mejora de la resistencia a la corrosión. Esto es debido al control de fisuras que se produce que ayuda a disminuir la entrada de agua. En cuanto a ventajas estructurales, mejora la resistencia a tracción, flexión y corte, además del aumento de la resistencia al impacto, abrasión y fatiga. Ayuda a controlar la fisuración, mejora la durabilidad, aumenta la resistencia a temprana edad y es de fácil y rápida aplicación.

El interés por el uso del CRF está en continuo aumento en México y cada vez son más diversas sus aplicaciones. Una de ellas es en la construcción de túneles y taludes como refuerzo secundario permitiendo eliminar el uso de malla. La ventaja es que el concreto lanzado con fibras puede seguir el contorno de una excavación sin que se produzcan oquedades, como sí ocurre cuando se utilizan las mallas produciendo grietas en el concreto lanzado y lo que a su vez produce oxidación. Un caso de esta aplicación son los túneles del Río Grijalva, en Chiapas, donde se reemplazó el uso de malla por concreto reforzado con fibras de acero Dramix (Bekaert), en la figura 1.1 se muestran algunas imágenes.



Figura 1.1 Túnel Grijalva, Chiapas, México, shotcrete fibras Dramix RC65/35BN (Bekaert)

El uso de las macrofibras sintéticas es frecuente en el refuerzo de pisos industriales, comerciales y pistas de aeropuertos. En la figura 1.2 se muestran algunos ejemplos del uso de macrofibras Tuf-Strand (Euclid).



a) Centro de Distribución Cerveceros, Tuf-Strand SF:3.5 kg/m³



b) Pavimento Planta de Concreto, Tuf-Strand SF:4.5 kg/m³

Figura 1.2 Aplicaciones fibras sintéticas, Tuf-Strand SF (Euclid)

El aumento de aplicaciones que se le han dado al CRF ha hecho que se produzca una evolución en los métodos de ensayo y que el comportamiento mecánico del CRF se describa con el uso de parámetros poco acostumbrados como el de la tenacidad (absorción de energía) o resistencia residual además de la resistencia a tensión.

1.3 Ensayos a tracción

Probablemente el aspecto más importante del comportamiento mecánico del CRF es el de tracción, ya que es una medida de su comportamiento frente a la fisuración. Este comportamiento está relacionado con los mecanismos de falla por adherencia y de interfaz friccional que se desarrollan en la interfaz de la matriz y las fibras.

Por lo general, este comportamiento se caracteriza mediante la respuesta de apertura de fisura, la cual varía dependiendo el tipo y cantidad de fibra. También se puede caracterizar utilizando el parámetro de absorción de energía, que se obtiene de la integración del área bajo la curva carga vs desplazamiento. Cuanto mayor sea la capacidad del concreto para soportar una carga en estado de fisuración, mayor será la absorción de energía de la probeta.

1.3.1 Tracción directa

El ensayo de tracción uniaxial es el método más directo para estudiar el comportamiento a tensión de materiales frágiles. Sin embargo, resulta difícil hacer una aplicación de una fuerza a tensión pura, sin excentricidad y sin los esfuerzos secundarios que inducen las prensas o los mecanismos de empotramiento.

Además de que no se obtienen resultados precisos, ya que al principio la deformación del concreto aumenta homogéneamente pero cerca de la carga pico, se localiza dentro de una región plana una fisura. La región fuera de la fisura se descarga mientras que la fisura continua abriéndose. Por lo tanto, la respuesta de carga vs desplazamiento normalmente exhibe un comportamiento incorrecto a causa de la gran región de descarga.

Los ensayos a tracción directa utilizan diferentes tipos de agarres para simular las condiciones de empotramiento o giro. Lo más conveniente es utilizar unas placas metálicas a ambos extremos de la probeta con la ayuda de un adhesivo a base de resinas epoxi. Estas placas sirven para conectar la probeta con la prensa y al mismo tiempo facilitan el reparto de las tensiones en los extremos de la probeta, pudiendo suponer una distribución de tensiones uniforme.

Por lo general, el ensayo de tracción directa consiste en una probeta cilíndrica que es sometida a un esfuerzo de tensión hasta llegar a la rotura. Se instrumenta con transductores de desplazamiento tipo LVDT montados en ambos lados del espécimen para medir la abertura de la fisura. Durante todo el ensayo se registran los datos de la evolución de las cargas y el alargamiento. En la figura 1.3 se muestra un esquema de la configuración del ensayo.

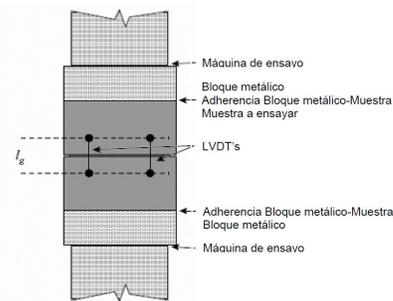


Figura 1.3 Configuración de ensayo de tracción uniaxial

Debido a las dificultades asociadas con la aplicación de una fuerza de tensión pura, no existe algún ensayo normalizado para tracción directa. Actualmente, se trata de controlar la deformación utilizando prismas con secciones centrales reducidas como los especímenes en forma de *hueso de perro* (dog-bone specimens) y las probetas con ranuras. Estos ensayos han tenido resultados satisfactorios para la caracterización del concreto reforzado con fibras

El ensayo en especímenes con forma de *hueso de perro* consiste en una probeta de sección transversal reducida en la zona central como se muestra en la figura 1.4. La geometría en forma de hueso asegura que la fisura ocurra dentro de la zona donde la sección ha sido reducida y evita que la rotura se presente en las zonas de sujeción de la probeta. En este ensayo se registra la deformación de la probeta durante la realización del mismo, para lo cual se utilizan LVDTs ubicados en la sección reducida.



Figura 1.4 Configuración del ensayo con espécimen en forma de hueso de perro (Reinhardt, 1998)

El ensayo de tracción uniaxial de cilindros con ranura perimetral, como se muestra en la figura 1.5, tiene como objetivo forzar la aparición de la fisura a lo largo del plano ranurado. De este ensayo se puede obtener la respuesta a tracción del CRF versus las relaciones de ancho de fisura. Además se puede calcular la energía de fractura como el área bajo la curva carga vs desplazamiento y eso entre el área de la sección transversal.

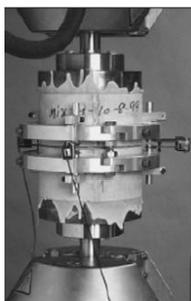


Figura 1.5 Configuración del ensayo de cilindro con ranura perimetral

La norma francesa RILEM TC 162 en el 2001, propuso recomendaciones para determinar la relación tensión-apertura de fisura basada en una probeta cilíndrica con ranura, como la que se muestra en la figura 1.6. Aunque su aplicación presenta dificultades como lo son la preparación de los cilindros y la fijación de la probeta, se le considera un ensayo estable y representativo del comportamiento a tracción del CRF.

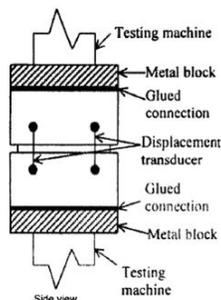


Figura 1.6 Ensayo tracción uniaxial de cilindro con ranura (RILEM TC 162)

1.3.2 Tracción indirecta

Debido a la complejidad que representa realizar los ensayos de tracción uniaxial directa, se ha propuesto una serie de ensayos de más fácil aplicación pero menos directos. El ensayo más común de tracción indirecta es el denominado ensayo brasileño. Ha sido estandarizado por varias normas como la ASTM C496, UNE 8330, NMX-C-163-1997-ONNCCE y RILEM CP C6.

Este ensayo consiste en someter a la probeta a una carga de compresión diametral. La fuerza de compresión se aplica en una sección a través de toda su longitud, en consecuencia, la probeta se fractura a tracción a lo largo del eje de carga, como se muestra en la figura 1.7. El ensayo se realiza controlando la carga, y finaliza cuando se alcanza la carga máxima.

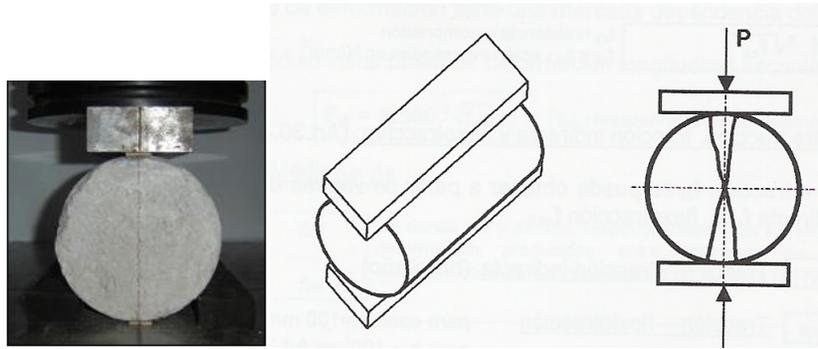


Figura 1.7 Ensayo brasileño - esquema de rotura y fisuración

El ensayo brasileño es inestable bajo control de desplazamiento; por el aplastamiento del cilindro en la zona de carga y por su longitud, resulta difícil realizar una medición de la apertura de fisura por lo que no se considera apropiado para el concreto reforzado con fibras. En 1998, Carmona *et al.*, propusieron modificaciones con el objetivo de solucionar estos problemas. Se redujo la longitud del cilindro y se implementó un sistema servo-controlado usando la apertura de fisura como variable de control. La modificación de este ensayo se muestra en la figura 1.8.



Figura 1.8 Ensayo Brasileño modificado (Carmona *et al.*, 1998)

1.4 Ensayos de flexión

Para los concretos reforzados con fibras, los ensayos de flexión son los más usados para caracterizarlos. Tradicionalmente, se realiza en vigas y paneles de sección cuadrada o circular. Se determina la resistencia máxima, resistencia residual y tenacidad.

Los ensayos se realizan sobre vigas en las que la carga se aplica al centro o a los tercios del claro. Las vigas son de sección transversal cuadrada con un claro mínimo tres veces la dimensión del peralte. Se pueden realizar en vigas con ranura para controlar la respuesta post-pico en la flexión. Existen otros procedimientos en los que se usan paneles de sección cuadrada o circular con aplicación de carga al centro de la sección.

A continuación se describe de forma breve los ensayos de flexión más utilizados.

1.4.1 Ensayo de flexión en vigas

Existen tres procedimientos estandarizados de ensayo de vigas de uso frecuente, la norma belga NBN B 15-238, la europea EFNARC 1996 y la americana ASTM C1609, en los que la carga se aplica a los tercios del claro. En la figura 1.9 se presenta un diagrama del dispositivo usado para desarrollar este tipo de ensayo y la instrumentación. Durante este ensayo se registra la carga y el desplazamiento en el centro de la viga, uno de los parámetros fundamentales a controlar es la velocidad de carga.

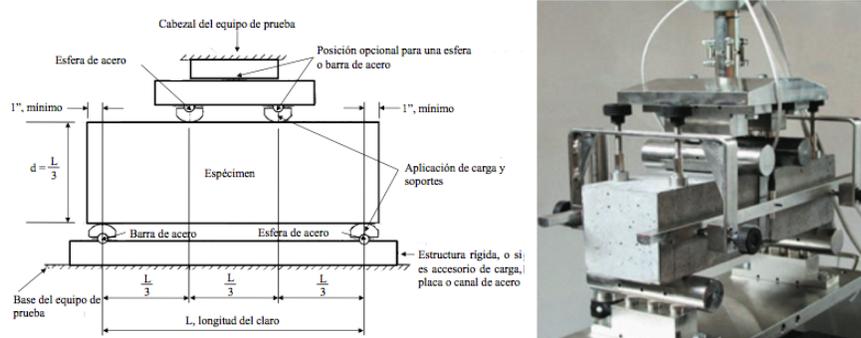


Figura 1.9 Ensayo de flexión con carga a los tercios (ASTM C1609)

Con este ensayo se grafica una curva carga vs flecha con la cual se obtienen los parámetros de resistencia a la primera fisura, resistencia residual y tenacidad. La tenacidad se determina como el área limitada en la curva carga vs flecha. La figura 1.10 muestra un esquema del comportamiento. Los resultados de este ensayo se pueden usar para comparar el comportamiento de mezclas de CRF o en investigación. También son útiles para el control de calidad, verificar el cumplimiento de especificaciones u obtener resistencias a flexión de miembros de CRF.

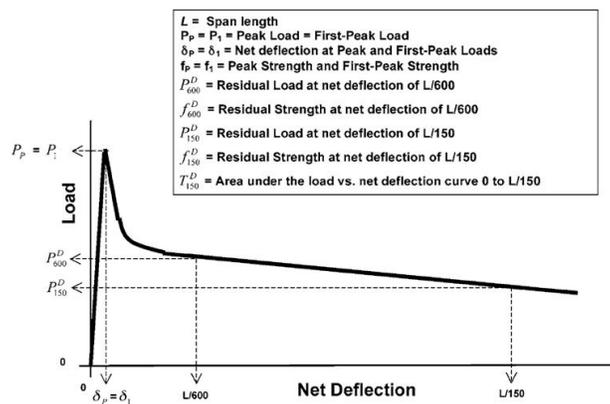


Figura 1.10 Curva típica carga vs flecha para determinar los parámetros del ensayo de flexión con carga a los tercios (ASTM C1609)

El ensayo de flexión en tres puntos definido por la recomendación de la RILEM TC 162 – TDF, actualmente la norma europea EN 14651, emplea vigas simplemente apoyadas, con ranura, es decir, con una muesca en el extremo inferior, que se someten a una carga central.

En la figura 1.11 se muestra el diagrama general del ensayo de acuerdo con la norma EN 14651, en la cual la viga simplemente apoyada está sujeta a una carga central que varía en el tiempo en función de la apertura de la muesca.

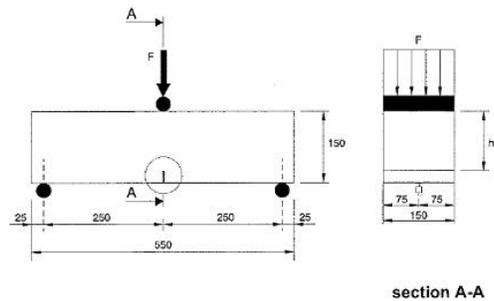


Figura 1.11 Diagrama del dispositivo para el ensayo de flexión en tres puntos (EN 14651)

El ensayo se puede realizar en vigas de 100 x 100 x 400 mm o 150 x 150 x 600 mm con una ranura central de 25 mm de profundidad. La EN 14651 señala que la viga debe tener un ancho y profundidad nominal de 150 mm y una longitud entre 550 y 700 mm.

El ensayo se realiza con control de apertura de fisura, CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), para lo cual se utilizan dos LVDTs y un extensómetro como se muestra en la figura 1.12. La carga y la apertura se registran durante todo el ensayo, con lo cual se puede obtener una curva típica carga vs CMOD como la que se muestra en la figura 1.13. Con este ensayo se pueden determinar la resistencia residual a ciertos valores de CMOD.



Figura 1.12 Instrumentación de ensayo de flexión en tres puntos (EN 14651)

Este ensayo es simple y debido al control de CMOD se asegura una propagación estable de la fisura. Además que con la curva carga vs CMOD o carga vs deflexión se pueden calcular relaciones tensión vs deformación o tensión vs ancho de fisura.

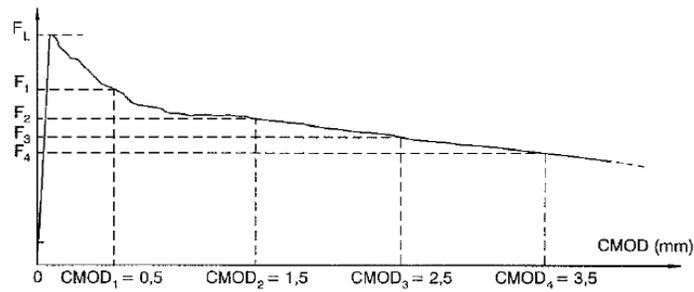


Figura 1.13 Curva típica carga vs CMOD (EN 14651)

1.4.2 Ensayos de paneles

Los ensayos de flexión en vigas presentan resultados con dispersiones relativamente altas. Por esta razón, una alternativa es el ensayo de paneles, que pueden ser de sección cuadrada o circular. En la figura 1.14 se muestran la configuración de este ensayo.

El ensayo de panel cuadrado EFNARC (EFNARC, 1996) es el ensayo en paneles más utilizado, consiste en aplicar una carga puntual al centro de un panel de 100 x 600 x 600 mm simplemente apoyado sobre cuatro líneas externas situadas en una base plana cuadrada de 500 x 500 mm.



Figura 1.14 Configuración del panel cuadrado (EFNARC, 1996)

El comportamiento del panel se evalúa con la medida de la carga máxima y la energía absorbida para una flecha central de 25 mm. La energía absorbida se calcula integrando el área bajo la curva carga vs desplazamiento. Como ya se ha mencionado, mientras mayor sea este valor, mayor será la capacidad para soportar carga en estado de fisuración.

Una de las ventajas del ensayo EFNARC del panel es que la superficie de rotura es mayor, por lo que los resultados se asemejan más a la realidad. Las estructuras reales se caracterizan por tener un alto grado de hiperestaticidad, en donde la redistribución de los

esfuerzos genera áreas de fractura mayores. Al ser especímenes con mayores áreas se obtiene resultados con menos dispersión. Sin embargo, este ensayo tiene una serie de defectos, el más importante es la dificultad que implica fabricar un panel con la base plana. Cuando la base no es plana, se deforma de manera impredecible, presentando múltiples picos en la capacidad de carga. Esto hace que el ensayo no sea tan atractivo para el control de calidad.

Una alternativa al ensayo de panel EFNARC es el Round Determinate Panel (RDP) (ASTM C1550, 2002), desarrollado por Bernard y Pircher (Bernard, 1999; Bernard y Pircher, 2001), propuesto para evaluar el comportamiento post-pico del CRF. Este ensayo pretende eliminar los defectos que se tienen en el ensayo de panel EFNARC.

Este ensayo consiste en aplicar una carga puntual central en un panel circular, que mide 75 x ϕ 800 mm, apoyada en tres puntos situados simétricamente en una circunferencia de diámetro de 750 mm, como se puede observar en la figura 1.15.



Figura 1.15 Ensayo de panel circular (ASTM C1550)

Al usar tres puntos de apoyo, se asegura que la distribución de la carga siempre esté condicionada en el panel, los planos de fisuración se encuentran bien definidos por lo que se puede predecir de manera más real la distribución de la carga.

Para evaluar el comportamiento del CRF se mide la capacidad de carga a la primera fisura y la capacidad de absorber energía para valores característicos del desplazamiento del punto medio del panel. Estos valores van desde los 5 mm hasta los 40 mm.

Por lo general, bajo la carga central puntual, el panel falla formando tres fisuras radiales que empiezan en el centro del panel y cortan cada uno de las secciones no apoyadas del panel.

El ensayo de panel de sección circular es una alternativa importante sobre las vigas y el panel de sección cuadrada EFNARC, los resultados presentan un coeficiente de variación en los parámetros de comportamiento de post-fisuración del 6 al 13% además de que tiene la ventaja de la simplicidad en la fabricación y en la configuración del ensayo. Sin embargo una de las desventajas es que es un ensayo de difícil aplicación sistemática debido al tamaño y peso del panel, que es de aproximadamente 90 kg.

Capítulo 2. Ensayo Barcelona de doble punzonamiento

2.1 Introducción

El comportamiento del CRF se evalúa principalmente utilizando las metodologías descritas por los ensayos de flexión en vigas, ya sea con o sin ranuras, con carga al centro o a los tercios del claro. Con estos ensayos se obtiene la resistencia a primera fisura, la resistencia residual y la tenacidad. Sin embargo, la bibliografía demuestra que los resultados obtenidos con estos ensayos presentan una variabilidad elevada que impide la generalización de estos métodos de ensayo para el control sistemático del comportamiento del CRF.

El ensayo Barcelona fue desarrollado por Aguado *et al.* (2005) con el objetivo de contar con un ensayo adecuado para el control sistemático del CRF. Éste es un ensayo de tracción indirecta basado en el *Double-Punching Test* (DPT) o ensayo de doble punzonamiento propuesto por Chen en 1970 y diseñado como una alternativa al ensayo Brasileño para determinar la resistencia a tracción del concreto.

En este capítulo se recopila información acerca del ensayo de doble punzonamiento con el objetivo de caracterizar el comportamiento a carga última y la resistencia a tracción del CRF. Se realiza una descripción y análisis de la metodología del ensayo.

Se analiza el comportamiento y el modo de rotura. Se describen los parámetros que caracterizan al ensayo con el objetivo de validar e implementar el ensayo Barcelona. Además, se realiza una serie de comparaciones entre los resultados de los estudios más importantes realizados hasta la fecha.

2.2 Descripción del ensayo Barcelona

El ensayo Barcelona, es un ensayo de tracción indirecta para CRF, que consiste en la aplicación de una carga que se transmite a través de dos punzones según el eje central de simetría de una probeta cilíndrica de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura (Figura 2.1). La relación entre el diámetro de la probeta cilíndrica y el punzón es de un cuarto.

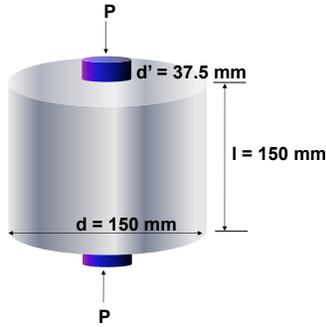


Figura 2.1 Ensayo Barcelona de doble punzonamiento

Es un método de prueba aprobado para caracterizar al CRF y su metodología se describe en la norma española UNE-83515 (2010). La norma señala que la probeta debe ser cilíndrica, con una altura aproximadamente igual a su diámetro. La dimensión normal de la probeta debe ser de 150 mm y puede obtenerse por:

- a) Moldeo directo de una probeta de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura.
- b) Moldeo directo de una probeta de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, con posterior corte a la mitad de la altura por un plano perpendicular al eje de simetría. Tras el corte, las bases de la probeta deben ser sensiblemente planas, sin irregularidades en la zona de contacto con los discos superiores a 2 mm y perpendiculares a su eje longitudinal con una desviación máxima de 5°.
- c) Extracción de testigo, de un diámetro no menor a 100 mm, siempre que se mantengan la relación de diámetro igual a la altura.

Antes de realizar el ensayo, se debe determinar el diámetro y la altura de la probeta. El diámetro D se obtiene como el promedio de dos diámetros perpendiculares medidos aproximadamente a la mitad de la altura de la probeta, como se muestra en la figura 2.2. La altura se obtiene como del promedio de los valores medidos en tres generatrices dispuestas en planta a aproximadamente 120°, como se aprecia en la figura 2.2. La diferencia entre la altura máxima y mínima medidas debe ser inferior a 3 mm, siendo la apreciación de las medidas, como mínimo de 1 mm.

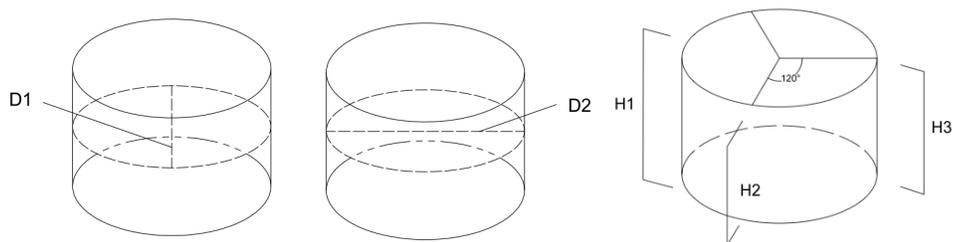


Figura 2.2 Determinación del diámetro y altura de la probeta

La norma UNE-83515 recomienda utilizar los discos de apoyo y los de montaje para asegurar el correcto centrado de los punzones sobre la probeta y así facilitar la manipulación y reducir el riesgo de errores. La probeta y los punzones deben de introducirse de forma centrada en la prensa de ensayo. La excentricidad máxima permitida entre el eje de la prensa y el disco de la probeta es de 5 mm. En la figura 2.3 se muestra un esquema de la posición de la probeta y los punzones.

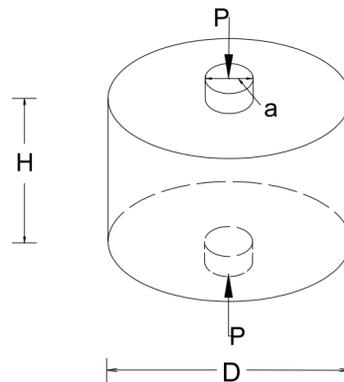


Figura 2.3 Posición de la probeta y los discos de carga (punzones)

La aplicación de la carga debe ser con una velocidad uniforme de descenso del pistón de la prensa de 0.5 ± 0.05 mm/min durante todo el ensayo. Se considerará como finalizado cuando la deformación circunferencial total desde el inicio del ensayo alcance como mínimo 6 mm. Durante todo el ensayo se registra de forma continua la carga aplicada y la elongación circunferencial y a partir de la curva que se genera de carga vs elongación circunferencial se determina la tenacidad mediante el área bajo la curva.

2.3 Características del ensayo Barcelona

El ensayo Barcelona somete a compresión axial a un cilindro mediante dos punzones de acero de un diámetro cuatro veces menor, dispuestos concéntricamente por encima y por debajo del cilindro. La carga aplicada produce un incremento de la tracción sobre los planos que contienen el eje del cilindro y la probeta se fractura a lo largo de estos planos. Por lo general, aparecen 3 fisuras radiales en la probeta ensayada, sin embargo también se pueden formar 2 ó 4 fisuras. La formación de estas fisuras aparece en por lo menos una de las caras de la probeta, se forman un mayor número de fisuras en la cara que está en contacto con la platina, que es la que realiza el movimiento de compresión. Bajo la carga de rotura, se forman dos superficies cónicas situadas debajo de los punzones de acero. Dichos conos penetran dentro del cilindro, lo cual resulta en un desplazamiento lateral de las secciones separadas por las fisuras radiales. En la figura 2.4 se puede observar un esquema del mecanismo de falla con la formación de los planos radiales y los conos de rotura.

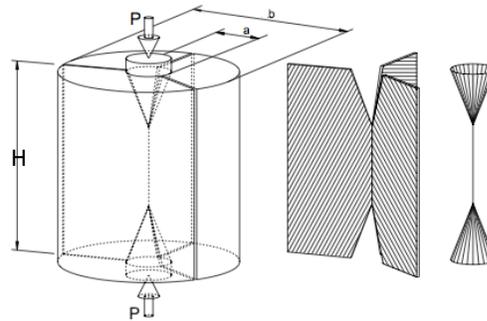


Figura 2.4 Esquema del mecanismo de falla

La rotura de la probeta ocurre cuando el estado tensional sobrepasa la resistencia del concreto. El modo de rotura de la probeta se puede explicar mediante dos tipos de rotura diferentes. La primera se da por el deslizamiento que ocurre entre los conos y los fragmentos de concreto y la segunda se produce por la separación de las secciones radiales fisuradas. Al aplicar la carga, primeramente se producen las fisuras radiales y por consecuencia comienza la separación, después el cono formado bajo los disco de carga se desplaza. En la figura 2.5 se puede observar un esquema del modo de rotura idealizado.

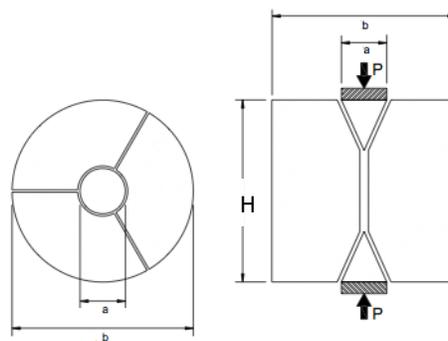


Figura 2.5 Mecanismo idealizado de rotura, vista en planta y longitudinal

El ensayo Barcelona se utiliza para obtener varias características y parámetros útiles para caracterizar el comportamiento del CRF. El registro continuo de la carga y la apertura circunferencial durante el ensayo, permite obtener la curva carga vs desplazamiento circunferencial que describe el comportamiento a tracción indirecta del material, útil para determinar la resistencia a la fisuración, resistencia residual y la tenacidad. En la figura 2.6 se muestra un diagrama típico de carga y energía vs desplazamiento circunferencial. La UNE 83515 especifica que la resistencia residual a tracción del concreto y la energía (tenacidad) se deben determinar para los valores de deformación circunferencial total de 2, 2.5, 4 y 6 mm.

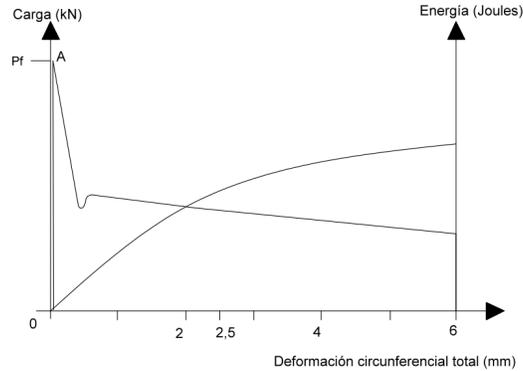


Figura 2.6 Curva de carga y energía vs deformación circunferencial

Para calcular los esfuerzos de tensión en el ensayo Barcelona se utiliza el método de puntales y tensores. Mediante este sistema se puede suplir la carencia que tiene el ensayo Barcelona de medir el total de todas las fisuras que aparecen en la cara de la probeta y calcular los esfuerzos que se producen en el ensayo en el momento post-fisuración. La formulación que se usa no depende del número de fisuras que se forman en la probeta (Saludes, 2006). En ella la carga P_f , corresponde al valor máximo obtenido en el diagrama carga vs deformación circunferencial total (punto A de la figura 2.6). La resistencia máxima de fisuración (f_{ct}), expresada en N/mm^2 , se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{ct} = \frac{4 P_f}{9 \pi a H} \quad [2.1]$$

donde:

- P_f es la carga que produce la fisuración, en N
- a es el diámetro del disco de aplicación de la carga, en mm
- H es la altura de la probeta, en mm

La resistencia residual a tracción del concreto f_{ctRx} , expresada en N/mm^2 , es la carga unitaria que corresponde a una deformación circunferencial Rx determinada y se obtiene según la expresión:

$$f_{ctRx} = \frac{4 P_{Rx}}{9 \pi a H} \quad [2.2]$$

donde:

- P_{Rx} es la carga correspondiente a una elongación circunferencial total Rx, en N

La tenacidad se expresa en Joules y es la energía que se debe transmitir a la probeta en el ensayo para que ésta alcance una deformación circunferencial determinada Rx. En este ensayo la tenacidad es el área, T_{Rx} , de la curva energía vs deformación circunferencial total hasta la deformación determinada Rx, que está relacionada con ella.

En la bibliografía existen otras expresiones útiles para determinar la resistencia a tracción en el ensayo de doble punzonamiento. En la tabla 2.1 se muestra un resumen de dichas expresiones, donde P es la carga de rotura y d , d' y l son las dimensiones correspondientes a la figura 2.1.

Tabla 2.1 Expresiones para calcular la resistencia a tracción (Aire *et al.*, 2013)

Autor	Expresión	Con base en:
Chen y Yuan (1980)	$f_t = \frac{P}{\pi \left(1.2 \frac{d}{2} l - \left(\frac{d'}{2} \right)^2 \right)}$	Un modelo de análisis límite aplicado al concreto como material elasto-plástico lineal con gran ductilidad
Chen y Yuan (1980)	$f_t = \frac{0.75P}{\pi \left(1.2 \frac{d}{2} l - \left(\frac{d'}{2} \right)^2 \right)}$	Con un análisis de elementos finitos considerando al concreto como un material elasto-plástico con endurecimiento por deformación y material frágil.
Marti (1989)	$f_t = 0.4 \frac{P}{4 \left(\frac{d}{2} \right)^2} \sqrt{1 + \frac{d}{\lambda d_a}}$	Basado en mecánica de fractura no lineal, d_a es el tamaño máximo del agregado y λ es un parámetro experimental que depende del material.
Bortolotti (1988)	$f_t = \frac{P}{\pi \left(1.2 \frac{d}{2} l - \left(\frac{d'}{2} \right)^2 \cot \alpha \right)}$	Criterio modificado de rotura de Coulomb para concreto
Molins et al. (2007)	$f_t = \frac{P}{9\pi l \frac{d'}{2}}$	Basada en análisis límite

2.4 Validación del ensayo Barcelona

Con el fin de validar el ensayo Barcelona, la Universidad Politécnica de Cataluña con Aguado *et al.* (2005) y Saludes *et al.* (2007) elaboró una serie de campañas experimentales para determinar los parámetros geométricos y las condiciones de carga para definir al ensayo.

Saludes *et al.* (2007) desarrollaron un proyecto experimental que consistió en estudiar la influencia de parámetros como el tipo y cantidad de fibras, esbeltez de la probeta, tamaño de los discos de carga y velocidad del ensayo. En la tabla 2.2 se presentan las características de las probetas ensayadas de CRF. Los ensayos se realizaron en probetas proporcionadas por la UTE línea 9 (Can Zam) y UTE Gorg (Gorg). Además en las tablas 2.3 y 2.4 se muestran las variables con observaciones y la relación de ensayos realizados.

Tabla 2.2 Características de las probetas ensayadas (Saludes et al., 2007)

Procedencia	Concreto	Fibra		
		Tipo	Densidad	Esbeltez
UTE Linea 9	HA-50	Wirand FF1	30 kg/m ³	59
UTE Gorg	HA-40	Wirand FF3	25 kg/m ³	66.6

Tabla 2.3 Variables consideradas en la campaña experimental (Saludes et al., 2007)

Variable	Valores	Observaciones
Superficie aplicación de carga	Plato de 38 mm de diámetro	$\phi_{\text{probeta}} = 4 \phi_{\text{plato}}$
	Plato de 50 mm de diámetro	$\phi_{\text{probeta}} = 3 \phi_{\text{plato}}$
Esbeltez/altura de la probeta	Esbeltez 2 (300 mm de altura)	
	Esbeltez 1 (150 mm de altura)	Obtención de dos probetas (mitad sup e inf) a partir de corte de una de 300 mm
Velocidad de ensayo	0.75 mm/min	Velocidad rápida
	0.75 mm/min	
	0.75 mm/min	
Excentricidad de la carga	Sin excentricidad	Realizado en probetas de 150 mm
	Un plato centrado y otro con 5 mm de excentricidad (1exc)	
	Excentricidad de 5 mm en los 2 platos (2exc)	
Posición de la probeta	Cara moldeada (mitad inf) o Cortada (mitad sup) sobre plato Inferior (pos1)	Realizado en probetas de 150 mm
	Cara cortada (mitad inf) o enrazada (mitad sup) sobre plato inferior (pos2)	

Tabla 2.4 Relación de ensayos considerados en la campaña experimental (Saludes et al., 2007)

ϕ_{plato} (mm)	Altura probeta (mm)	Velocidad ensayo (mm/min)	Excentricidad	Posición	Número de ensayos		
					HSF	CanZam	Gorg
50	300	0.5	No	-	-	2	2
38	300	0.5	No	-	-	2	2
38	150	0.5	No	Pos1	2	2	2
38	150	0.75	No	Pos1	-	2	2
38	150	0.25	No	Pos1	-	2	2
38	150	0.5	1exc	Pos1	-	2	2
38	150	0.5	2exc	Pos1	-	2	2
38	150	0.5	No	Pos2	-	2	2

Con los resultados obtenidos de esta campaña, se determinaron la energía disipada por los cilindros y el coeficiente de variación (C.V.) de los resultados, los cuales se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Coeficientes de variación máximos obtenidos por Saludes *et al.* (2007)

Parámetro	Valores de referencia	C. V. (%)
Esbeltez y altura de la probeta (h)	h = 150 mm	12
	h = 300 mm	15
Diámetro de plato de carga (a)	a = 38 mm (d/4)	15
	a = 50 mm (d/3)	36
Velocidad de desplazamiento del pistón de carga	0.25 mm/min	12
	0.50 mm/min	11
	0.75 mm/min	44

Después de analizar esos resultados, se definió que las dimensiones de la probeta fueran de 150 mm de diámetro (d) y 150 mm de altura (h) y que la aplicación de la carga fuera a través de un punzón de 37.5 mm de diámetro, equivalente a $d/4$, con control del ensayo mediante la deformación circunferencial del cilindro a una velocidad del actuador de 0.5 mm/min.

En años recientes, la AENOR (2008) aprobó la norma UNE 83515, *Concretos con fibras-Determinación de la resistencia a la fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción*, donde se especifican las condiciones mencionadas en los apartados anteriores.

2.5 Implementación

El protocolo de ensayo está establecido en la norma UNE 83515, incluye la preparación de la probeta, el montaje y la realización de la prueba.

Se pueden identificar tres elementos indispensables para la implementación del método, los cuales son: la cadena circunferencial con extensómetro, los punzones o discos de carga y los discos de montaje.

De acuerdo con la norma UNE 83515, se debe utilizar un transductor electrónico calibrado con un rango mínimo de 10 mm que abrace circunferencialmente a la probeta como se muestra en la figura 2.7. La cadena circunferencial con transductor o extensómetro debe colocarse a la mitad de la altura de la probeta. Su función es la de medir la deformación circunferencial total y registrar la apertura de fisura durante todo el ensayo para obtener la curva carga vs apertura circunferencial de la cual se extraen los valores de resistencia residual y tenacidad que especifica la norma.

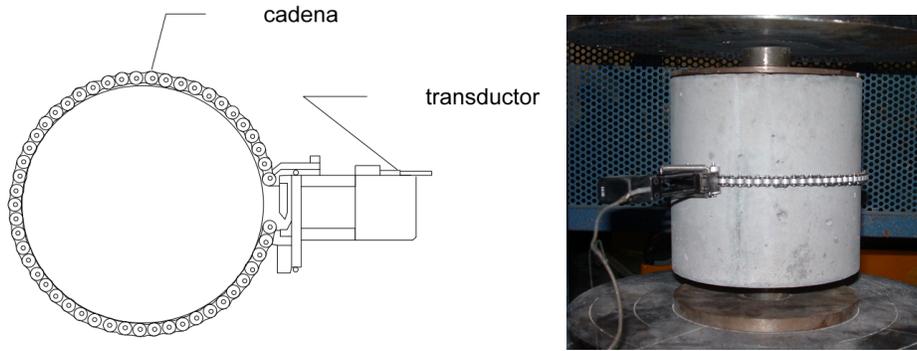
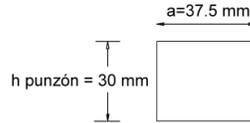


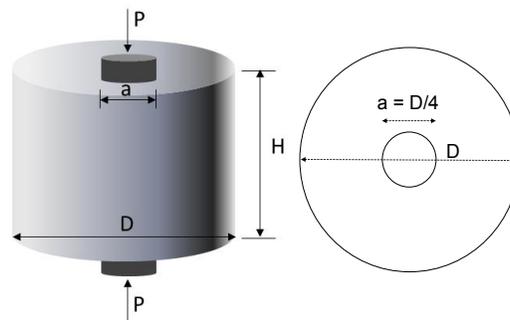
Figura 2.7 Cadena circunferencial y transductor

Los punzones son los que actúan como elementos de carga y están en contacto con las caras superior e inferior de la probeta. Deben ser de acero con una dureza no inferior a 55 HRC (Hardness Rockwell C). Las superficies de los discos deben ser planas y paralelas entre sí con un error inferior a 0.5 mm.

El diámetro de los discos debe ser $\frac{1}{4}$ del diámetro de la probeta (con una tolerancia de ± 0.2 mm) y con una altura igual o mayor a $\frac{1}{5}$ de la altura de la probeta o 15 mm. La tolerancia en la altura de los discos es de ± 0.5 mm. En la figura 2.8 se muestra un a) esquema del disco de carga (punzón) y b) la relación entre el diámetro del punzón y la probeta.



a) Esquema del disco de carga (punzón)



b) Relación entre el diámetro del punzón y la probeta

Figura 2.8 Disco de carga (punzón)

Se recomienda utilizar un disco de apoyo rígido de acero que sirva como plantilla para colocar en posición a la probeta. El diámetro del disco debe ser aproximadamente

igual al de la probeta ± 1 mm y una muesca de diámetro igual al del disco de carga ± 1.5 mm como se muestra en la figura 2.9.

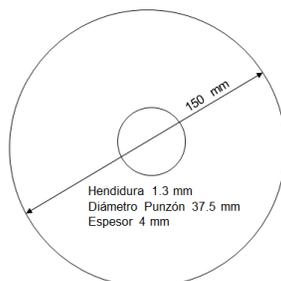


Figura 2.9 Disco de apoyo

Con el objetivo de asegurar el centrado del conjunto formado por la probeta y los discos de carga, se utiliza un disco de montaje. Este disco es de metal con un espesor de 4 mm y un diámetro aproximadamente igual al diámetro de la probeta y una guía de diámetro igual al del disco de carga, como se observa en la figura 2.10.

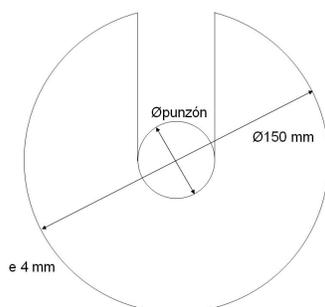


Figura 2.10 Disco de montaje

2.6 Comparación con otros métodos

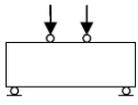
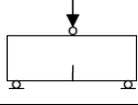
El ensayo Barcelona de doble punzonamiento presenta varias ventajas sobre los ensayos usados tradicionalmente para determinar la resistencia a tracción:

- Para la ejecución del ensayo se utiliza una prensa convencional, como la que se ocupa en los ensayos a compresión y que existe en la mayoría de los laboratorios. Además de que el procedimiento del ensayo es de gran facilidad comparado por ejemplo a los ensayos de vigas o paneles.
- Se utiliza un espécimen de menor volumen en comparación con otros métodos. Al emplear una menor cantidad de concreto, hay un ahorro económico, es más ecológico y facilita la manipulación del espécimen.
- Permite la extracción de muestras provenientes de estructuras ya existentes lo que es de gran ayuda para el control de calidad.

- El ensayo se realiza en probetas sin cabecear, al aplicar la carga directamente sobre la superficie de las caras de la probeta. En consecuencia se reduce el tiempo de preparación y hay una menor incidencia en el medio ambiente ya que no se utiliza un mortero de azufre.
- Presenta la facilidad de utilizar una prensa de menor capacidad ya que la magnitud de carga que se requiere para la rotura de la probeta es reducida.
- La rotura de la probeta no se limita a un plano determinado. Al presentarse varios planos de rotura se puede obtener una resistencia promedio a la tracción abarcando una mayor superficie, lo que reduce la dispersión de resultados.

A continuación, en la tabla 2.6 se presentan los principales ensayos utilizados para determinar las propiedades del CRF, en ella se muestran los coeficientes de variación y se observa que los resultados obtenidos del ensayo Barcelona de doble punzonamiento tienen una variabilidad menor.

Tabla 2.6 Características de los principales métodos de prueba para evaluar al CRF (Aire *et al.*, 2013)

Ensayo	Configuración	Dimensiones mm × mm × mm	Peso kg	Superficie de fractura m ²	C.V. %
ASTM C1018		100 × 100 × 350	8.4	0.0100	15
NBN 15-238		150 × 150 × 600	32.4	0.0255	12-20
EFNARC Viga		125 × 75 × 550	12.4	0.0094	20
RILEM 162-TDF		125 × 75 × 550	12.4	0.0094	10-25
EN A4651		150 × 150 × 550	29.7	0.0188	20-30
UNE 83515		150 × ϕ 150	6.4	0.0338	13

C.V. : Coeficiente de variación

Parte de la campaña experimental desarrollada en la Universidad Politécnica de Cataluña por el Grupo de Tecnología del Concreto consistió en realizar una contrastación de los resultados obtenidos con el ensayo Barcelona y los obtenidos de ensayos de flexión en vigas.

Saludes *et al.* (2007) realizaron una comparación de los resultados obtenidos con el ensayo Barcelona y el ensayo belga NBN B 15-238. Se fabricaron vigas y probetas cilíndricas con fibras de acero con contenido de 25 kg/m³ y plásticas de 5 y 6 kg/m³. En la tabla 2.7 se muestran las características y la dosificación del concreto utilizado.

Tabla 2.7 Dosificación del concreto empleado en la campaña de Saludes *et al.* (2007)

Características Técnicas Generales	
Tipo de concreto	HA-40/P/20/IIb-H
Tipo de cemento	I52.5R
Aditivo/relación	Viscocrete 20HE/0.8
Dosificación Tipo del Concreto	
Arena 0/5	746 kg
Gravilla 5/14	558 kg
Gravilla 15/22	559
Tiempo amasada	60 seg
Fibras	25 kg
Aditivo /relación	3.12 kg/0.78
I52.5R/relación a/c	400 kg/0.38

En la tabla 2.8 se presenta un resumen del programa de ensayos. Se emplearon fibras plásticas Barchip Kyodo de 48 mm de longitud y las fibra metálicas Wirand FF3 de 50 mm de longitud y 0.75 mm de diámetro.

Tabla 2.8 Programa de ensayos de Saludes *et al.* (2007)

Curado probeta (días)	N° probetas	Densidad fibras (kg/m³)	Tipo fibra
14	2	5	BarChip Kyodo
	2	6.5	BarChip Kyodo
28	3	5	BarChip Kyodo
	3	6.5	BarChip Kyodo
	3	25	Wirand FF#
	3	Sin fibras	Sin fibras

En cada ensayo se midieron y calcularon la carga máxima, la carrera del pistón, la apertura circunferencial de la probeta y la tenacidad. Las probetas se obtuvieron de la estación Bon Pastor del metro de Barcelona durante su construcción. En la tabla 2.9 se presenta una comparación de los resultados, en ella se observa que la variabilidad de los resultados del ensayo Barcelona es menor en comparación con los obtenidos en el ensayo Belga. En promedio, el coeficiente de variación para la carga máxima fue de 7.7% y de 17.3% para la tenacidad medida para una apertura circunferencial de 3 mm.

Tabla 2.9 Comparación de resultados a 28 días, del ensayo Barcelona y Belga en N mm

	P _{max} kN	Barcelona: TCOD (mm)				P _{max} kN	NBN 15-238: d (mm)			
		1	2	3	4		0.5	1.0	1.5	2.0
BK5	192	114.7	167.2	202.0	230.0	35.39	18.3	31.6	43.2	55.0
C.V. %	9.7	21.6	21.0	16.0	13.6	10.7	17.8	16.6	17.9	20.9
BK6.5	183.0	113.2	167.5	203.8	233.8	35.67	13.68	22.98	35.22	46.79
C.V. %	7.2	23.1	25.9	23.6	22.5	6.0	10.1	16.9	9.7	11.4
W25	191	116.3	173.3	209.8	236.0	44.16	18.32	31.57	43.23	55.03
C.V. %	6.2	11.1	11.5	12.2	13.1	20.8	25.9	26.8	24.7	24.6

En la figura 2.11 se muestra la relación que Saludes *et al.* (2007) establecieron con los resultados de la tenacidad del ensayo Barcelona y la energía absorbida del ensayo Belga.

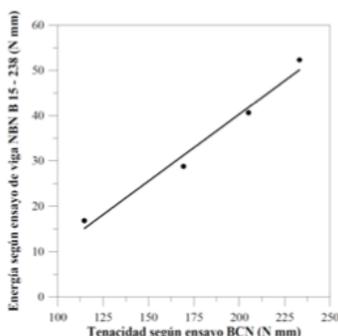


Figura 2.11 Regresión entre los resultados del ensayo Barcelona (BCN) y Belga (NBN)

En el 2008 Guardia y Molins realizaron una campaña experimental en la que compararon los resultados del ensayo Barcelona y el ensayo establecido en la EN 14651 (2005). Se fabricaron concretos de alta trabajabilidad, con y sin fibras, de resistencia convencional y de alta resistencia. Las dosificaciones de los concretos se presentan en la tabla 2.10. Se fabricaron seis concretos: dos de concreto en masa (A0 y B0) y cuatro de CRFA (A20, A40, B20 y B40). Se emplearon fibras de acero de alta resistencia de 60 mm de longitud y 0.75 mm de diámetro. Los concretos tenían una cantidad de 20 y 40 kg/m³ de fibras de acero. La resistencia media a compresión de las series A y B fue de 47.5 y 80.6 MPa.

Tabla 2.10 Dosificaciones de los concretos empleados en la campaña experimental de Guardia y Molins (2008)

Dosificación	Concreto Normal (A)		Concreto alta Resistencia (B)	
Cemento	152.5	334	152.5	432
Filler	Calizo	100	Calizo	130
Microsilice	-	-	-	43.2
Agua	Red Barcelona	167	Red Barcelona	183
Grava 12/20	Calizo	328	-	-
Gravilla 5/12	Calizo	447	Calizo	834
Arena 0/5	Calizo	337	Calizo	791
Arena 0/2	Calizo	602	-	-
Aditivo	Viscocrete 5920	4.008	Viscocrete 30TSG	6.48
Peso total		2,319		2,419,7

En la tabla 2.11 se muestran los valores medios de carga de los ensayos de flexión y Barcelona en función del CMOD y la elongación circunferencial. Los coeficientes de variación para el ensayo Barcelona están entre el 7 y 17% y los del ensayo de flexión se encuentran entre el 2 y 27%. En la figura 2.12 se muestran las curvas de carga vs CMOD y elongación circunferencial.

Tabla 2.11 Valores medios de carga para valores determinados de CMOD y elongación circunferencial

	Ensayo de Flexotracción (KN)					Ensayo Barcelona (KN)			
	LOP	0.5 mm	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm	Q _{max}	2 mm	4 mm	6 mm
A20	14.14	15.17	20.41	22.09	21.79	158.45	66.12	54.45	45.26
C.V. %	5.65 (4)	8.51 (4)	7.68 (4)	6.61% (4)	2.16 (4)	3.82 (6)	7.35 (8)	14.23 (8)	17.05 (8)
A40	13.99	21.62	28.18	28.14	28.65	154.44	88.57	71.73	59.05
C.V. %	4.09 (6)	8.18 (6)	7.09 (5)	9.32 (5)	9.07 (5)	4.99 (11)	7.29 (11)	9.65 (11)	11.72 (11)
B20	11.16	12.37	17.98	19.90	19.19	182.90	71.03	45.80	35.14
C.V. %	5.87 (6)	32.09 (6)	28.28 (6)	27.42 (6)	27.24 (6)	4.65 (4)	12.39 (5)	12.58 (5)	15.44 (5)
B40	13.32	23.27	29.25	27.73	26.50	164.87	109.05	72.93	60.92
C.V. %	7.67 (6)	23.91 (6)	15.18 (6)	12.69 (6)	12.25 (6)	10.55 (5)	10.76 (6)	15.44 (6)	8.75 (6)

Número de ensayos en paréntesis

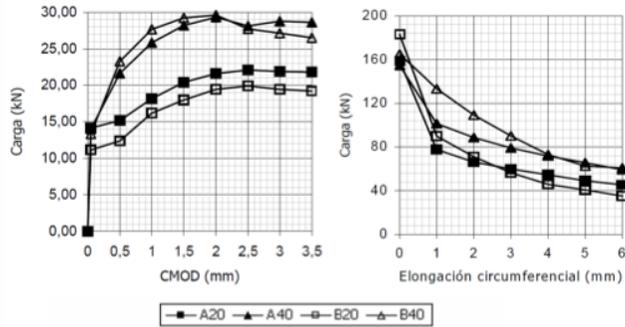


Figura 2.12 Curva de carga vs CMOD y $\Delta\phi$ obtenidos a flexión y BCN

Los resultados de la tenacidad media se obtuvieron como el área bajo la curva de carga en ambos ensayos. En la tabla 2.12 se muestran los resultados. La variabilidad de los resultados es muy similar en la serie A, mientras que para la serie B, las tenacidades obtenidas con los resultados a flexión presenta una mayor variabilidad que las obtenidas mediante el ensayo Barcelona. En la serie B20, el coeficiente de variación C. V. es del 29% a flexión y del 17% en el ensayo Barcelona. En la figura 2.13 se muestran las curvas de tenacidad vs CMOD y elongación circunferencial.

Tabla 2.12 Valores medios de tenacidad para valores determinados de CMOD y elongación circunferencial

	Ensayo de Flexotracción (N m)				Ensayo Barcelona (N m)		
	0.5 mm	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm	2 mm	4 mm	6 mm
A20	6.24	24.55	46.14	68.07	159.64	279.44	378.01
C.V. %	8.38 (4)	3.58 (4)	5.74 (4)	4.84 (4)	5.13 (8)	6.02 (8)	7.34 (8)
A40	8.91	34.61	63.17	91.75	200.89	360.09	490.89
C.V. %	8.39 (6)	7.50 (5)	6.72 (5)	6.92 (5)	5.15 (11)	5.81 (11)	6.41 (11)
B20	5.01	20.81	40.13	59.64	179.86	294.99	388.50
C.V. %	27.42 (6)	29.91 (6)	28.68 (6)	27.98 (6)	17.03 (5)	15.01 (5)	13.18 (5)
B40	8.79	36.50	65.65	92.85	250.39	431.47	556.19
C.V. %	21.78 (6)	18.87 (6)	15.95 (6)	14.82 (6)	6.52 (6)	7.28 (6)	9.29 (6)

Número de ensayos en paréntesis

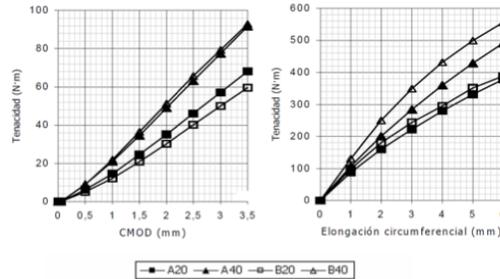


Figura 2.13 Curva de tenacidad vs CMOD y $\Delta\phi$ obtenidos a flexión y BCN

A partir de los resultados Guardia y Molins (2008) obtuvieron una correlación entre la resistencia residual a tracción del ensayo Barcelona con la resistencia residual calculada a partir del ensayo de flexión. En la figura 2.14 se comparan los valores de referencia f_{ctR} y se observa la tendencia que siguen los resultados.

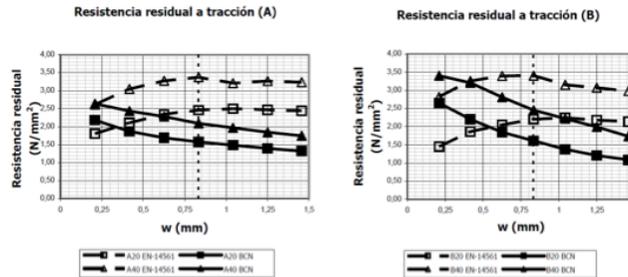


Figura 2.14 Resistencias residuales a tracción de los ensayos de flexión y Barcelona

La correlación que encontraron consiste en aplicar un factor de 1.5 a la resistencia residual obtenida mediante el ensayo Barcelona para una elongación circunferencial de valor de 2.5 mm. Con ello propusieron la siguiente expresión para evaluar la resistencia a tracción aportada por las fibras mediante el ensayo Barcelona:

$$f_{ct,R} = 1.5 f_{bcn,2.5}$$

Este método se aplicó a otros estudios con éxito y demostrando la aplicabilidad del ensayo Barcelona. Cabe mencionar que los resultados obtenidos por Guardia y Molins (2008) no fueron satisfactorios para todas las cuantías de fibras de acero ya que no se observaron diferencias significativas entre los resultados alcanzados con CRF de 40 y 60 kg/m³. Concluyeron que esto se debió a la orientación de las fibras durante el colado, lo que afecta la resistencia post-fisuración.

Las campañas experimentales que realizaron Aguado *et al.* (2005), Saludes *et al.* (2007) y Guardia y Molins (2008) arrojaron resultados con menor variabilidad para el control sistemático del CRF comparados con otros métodos de ensayo. Esto permitió que la AENOR aprobara la metodología del ensayo Barcelona como una norma de ensayo.

Recientemente, Aire et al. (2013), emprendieron nuevas campañas experimentales para obtener la correlación entre resultados del ensayo Barcelona (UNE 83515) obtenidos de cilindros moldeados de 100 y 150 mm y testigos de 93 y 153 mm de concreto empleando fibras de acero de cuatro longitudes diferentes (35, 40, 50 y 60 mm), relaciones de esbeltez similares (65) y manteniendo el contenido de fibra (30 kg/m³). También, realizaron ensayos de flexión en vigas (EN 15651) de 150 x 150 x 600 mm con ranura, para contrastar los resultados del ensayo Barcelona.

Se fabricaron cuatro series de concreto autocompactables. La tabla 2.13 presenta la dosificación de los materiales de los concretos fabricados. En todas se empleó cemento CEM I 52.5R, polvo de mármol (500 µm), arena (0 a 3 mm), Grava 2 y 6 (3 a 6 mm; y 6 a 12 mm), un aditivo superplastificante (ADVA), agua potable; y fibras de acero de dos fabricantes, Bekaert y Maccaferri. Para cada tipo de ensayo se fabricaron seis especímenes. La resistencia a compresión media de los concretos fue de 58 MPa.

Tabla 2.13 Dosificación de los materiales, en kg/m³

Cemento CEM I 52.5	Filler 500µm	Arena 0 – 3 mm	Grava 2 3 - 6 mm	Grava 6 6 - 12 mm	ADVA Flow 400	Agua
350	300	510	400	520	12	178

Los resultados permitieron establecer las correlaciones entre los resultados de cilindros moldeados y testigos, evaluar la variabilidad de los resultados de resistencia máxima y tenacidad del ensayo Barcelona, y contrastarlos con los resultados de resistencia máxima, y tenacidad del ensayo de flexión en vigas, para los valores de apertura circunferencial y apertura de fisura entre ambos ensayos, como se muestra en las tablas 2.14 a 2.16.

Tabla 2.14 Resultados de resistencia máxima- Probetas moldeadas y testigos

BCN fct	A1-35 mm		A2-40 mm		A3-50 mm		A4-60 mm	
	MPa	CV %	MPa	CV %	MPa	CV %	MPa	CV %
fct, 100	4.43	4.2	3.99	7.1	4.30	8.1	4.47	3.1
fct, 150	3.83	1.8	3.59	2.4	4.05	3.8	3.84	2.2
fct, 93	3.80	8.4	3.30	3.9	3.94	5.8	3.71	7.9
fct, 153	3.33	8.8	3.29	6.6	3.33	4.1	3.18	10.8

Tabla 2.15 Resistencia máxima promedio y correlación entre resultados de probetas y testigos

BCN	A1-35 mm	A2-40 mm	A3-50 mm	A4-60 mm	Promedio	D. E.	C. V.
Resistencia	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%
fct,max 150	3.83	3.59	4.05	3.84	3.83	0.188	4.91
fct,max 153	3.33	3.29	3.33	3.18	3.28	0.071	2.16
fct,max 100	4.43	3.99	4.30	4.47	4.30	0.220	5.12
fct,max 93	3.80	3.30	3.94	3.71	3.69	0.275	7.46
Relaciones	A1-35 mm	A2-40 mm	A3-50 mm	A4-60 mm	Promedio	D.E.	C.V.%
fct93/fct100	0.86	0.83	0.92	0.83	0.86	0.042	4.85
fct153/fct150	0.87	0.92	0.82	0.83	0.86	0.044	5.08
fct93/fct150	1.01	1.09	1.03	1.04	1.04	0.034	3.28

En las tablas 2.16 y 2.17 se presentan los valores equivalentes de cada ensayo, los cuales se emplean como referencia para hacer las comparaciones entre ambos métodos de prueba. La tabla 2.16 se basa en los valores $\Delta\phi$ del ensayo Barcelona y se busca el equivalente con el CMOD del ensayo de flexión o viceversa, según la tabla 2.17.

Tabla 2.16 Equivalencia entre la apertura circunferencial del ensayo Barcelona, el CMOD mediante en el ensayo de flexión, y apertura de fisura media

$\Delta\phi$, mm	1.0	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
CMOD, mm	0.8	1.6	2.0	3.2	4.0	4.0	4.8
W, mm	0.333	0.667	0.833	1.333	1.667	1.667	2.0

Tabla 2.17 Equivalencia entre el CMOD medido en el ensayo de flexión, apertura circunferencial del ensayo Barcelona y apertura de fisura media

CMOD, mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$\Delta\phi$, mm	0.625	1.25	1.875	2.5	3.125	3.75	4.375
W, mm	0.208	0.417	0.625	0.833	1.042	1.25	1.458

El análisis de comparación de las variables encontró que la apertura circunferencial del ensayo Barcelona corresponde a 1.25 veces la apertura de fisura del ensayo de flexión. Con esta correspondencia, se calcularon los valores de tenacidad para ambos ensayos y se obtuvieron las tendencias. Se concluyó que no existe un relación lineal entre los resultados ya que los coeficientes de correlación del análisis fueron del orden de 0.88 para los cilindros moldeados y de 0.70 para los testigos. El análisis de regresión cuadrática presentó coeficientes de correlación adecuados y menor dispersión. El coeficiente de correlación fue de 0.99 para los cilindros moldeados y de 0.98 para los testigos.

Capítulo 3. Investigación Experimental

3.1 Introducción

La presente investigación experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en ella se plantea la implementación del método a tracción indirecta de doble punzonamiento, Ensayo Barcelona, para caracterizar el comportamiento del CRF en términos de tenacidad y resistencia residual y así ampliar su aplicación.

La investigación radicó en evaluar variables como el diámetro y tipo de la probeta, la cuantía, esbeltez, longitud y tipo de fibra. Además, se contrastaron los resultados de vigas a flexión con los de los ensayos de tracción indirecta.

Para la implementación del programa de trabajo se aplicaron las metodologías descritas en la normativa europea UNE 83515 y la americana ASTM C 1609.

El planteamiento consistió en evaluar la influencia del diámetro de la probeta en los resultados del ensayo Barcelona, para lo cual se ensayaron probetas moldeadas y testigos extraídos de placas de concreto. Los diámetros de las probetas moldeadas fueron de 150 y 100 mm, y la de los testigos resultantes de 150 y 94 mm. Para contrastar los resultados se fabricaron probetas prismáticas de 150 x 150 x 600 mm.

Además se utilizaron dos tipos de fibra, acero y sintética, con diferentes contenidos de fibra. Se emplearon 40, 60 y 80 kg/m³ de fibras de acero manteniendo la longitud de 35 mm y la esbeltez del orden de 65; para el caso de fibra sintética se utilizó 2, 5, 7, 9 kg/m³ (0.2, 0.5, 0.7, 0.9%) con una longitud de 54 mm.

Con el objetivo de determinar experimentalmente la cuantía de fibras metálicas de los diferentes concretos estudiados, se emprendió una campaña de pruebas que comprendió en la trituración manual de las probetas de 150 mm (moldeadas y testigo) ensayadas y la determinación de la densidad de fibras en cada caso.

3.2 Programa Experimental

Se fabricaron siete mezclas de CRF: tres con fibras de acero y cuatro con fibras sintéticas. Para cada serie se moldearon cilindros, placas y vigas. Los cilindros moldeados fueron de 100 x 100 y de 150 x 150 mm y las placas de 650 x 650 x 200 mm. De las placas se extrajeron testigos de 94 y 150 mm. Las vigas fueron de 150 x 150 x 600 mm. Las fibras de acero y sintéticas que se utilizaron fueron suministradas por las empresas Bekaert y Basf, respectivamente. Por cada tipo de espécimen se ensayaron seis probetas.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presenta la campaña experimental del estudio con las variables consideradas.

Tabla 3.1 Campaña experimental, fibras de acero Bekaert (Dramix)

Mezcla	Fibra Acero						
	Marca	Tipo	Longitud, L mm	Diámetro, D mm	Esbeltez L/D	Cuantía kg/m ³	Dosis %
M1	Dramix	RC6535BN	35	0.55	55	40	0.3
M2	Dramix	RC6535BN	35	0.55	55	60	0.5
M3	Dramix	RC6535BN	35	0.55	55	80	0.7

Tabla 3.2 Campaña Experimental, fibras sintéticas Basf (MacMatrix)

Mezcla	Fibra Sintética				
	Marca	Tipo	Longitud, L mm	Cuantía kg/m ³	Dosis %
M4	MacMatrix	MM	54	2	0.3
M5	MacMatrix	MM	54	5	0.5
M6	MacMatrix	MM	54	7	0.7
M7	MacMatrix	MM	54	9	0.9

3.2.1 Materiales

Se usó cemento Portland compuesto CPC 40 RS, arena andesita con un módulo de finura de 3.1, grava caliza de 9.5 mm, un aditivo reductor de agua Pozzolith 322 N (se presenta la ficha técnica de este aditivo en el anexo A-1) y agua potable. La tabla 3.3 muestra los resultados de las pruebas realizadas en los agregados, y los valores corresponden al promedio de tres pruebas.

Se emplearon dos tipos de fibras, de acero y sintética. Las fibras Bekaert-Dramix (RC6535BN) son filamentos de acero, deformados y cortados en longitudes diferentes, estirados en frío con extremos conformados y encolado en peines. En el anexo A-2, se muestra una ficha técnica de la fibra Dramix RC6535 BN.

La fibra Basf-MacMatrix es una macrofibra sintética, estriada cien por ciento de polipropileno virgen, se usa como refuerzo secundario para control de retracción y agrietamiento plástica. Se anexa una ficha técnica de la fibra Basf-MacMatrix (Anexo A-3).

La tabla 3.4 muestra las características de las fibras y en la figura 3.1 una fotografía.

Tabla 3.3 Propiedades de los materiales

Característica	Arena	Grava
Densidad	2.2	2.6
Absorción, %	6.79	1.35
Peso volumétrico seco suelto, kg/m ³	1,250	1,432
Peso volumétrico seco compactado, kg/m ³	1,395	1,597

Tabla 3.4 Características de las fibras (Datos del fabricante)

Tipo de Fibra	L mm	D mm	L/D	R tracción N/mm ²	Módulo N/mm ²	# de Fibras por kg
RC6535BN	35	0.55	65	1,345	210	14,500
MacMatrix	54	-	-	586	-	44,950



Figura 3.1 Fibras Dramix y MacMatrix

3.2.2 Dosificación de los concretos

El diseño de mezclas se llevó a cabo de acuerdo con las recomendaciones del ACI 211.1 (“Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete”). El diseño se basó en pruebas preliminares que se realizaron en el laboratorio. Los parámetros que se utilizaron para el diseño fueron la resistencia a compresión, relación agua/cemento, revenimiento y tamaño de agregado grueso. Para este caso la resistencia deseada fue de 40 MPa, con una relación agua/cemento de 0.5 y un tamaño máximo de agregado de 9.5 mm (3/8”). En las tablas 3.5 y 3.6 se muestra la dosificación de las mezclas.

Tabla 3.5 Proporcionamiento de materiales (Fibra de Acero)

Mezcla	Fibra kg/ m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/m ³	Arena kg/m ³	Agua kg/m ³	Aditivo ml/m ³	Relación a/c
M1	40	428	855	662	214	2000	0.50
M2	60	428	855	662	214	2000	0.50
M3	80	428	855	662	214	3000	0.50

Tabla 3.6 Proporcionamiento de materiales (Fibra Sintética)

Mezcla	Fibra kg/m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/m ³	Arena kg/m ³	Agua kg/m ³	Aditivo ml/m ³	Relación a/c
M4	2	428	855	662	214	2000	0.50
M5	5	428	855	662	214	2000	0.50
M6	7	428	855	662	214	2000	0.50
M7	9	428	855	662	214	3000	0.50

3.2.3 Fabricación

En este apartado se presentan detalles de la fabricación de los moldes para el Ensayo Barcelona , así como de la cadena circunferencial con extensómetro, los punzones o discos de carga, los de apoyo y los de montaje. También se incluye el procedimiento de fabricación de los concretos.

3.2.3.1 Moldes

De acuerdo con la norma europea UNE 83515 para el Ensayo Barcelona, el diámetro de los cilindros debe ser de 100 mm y 150 mm. Por lo que se fabricaron seis moldes de ambos diámetros en el taller mecánico del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la figura 3.2 se muestran los moldes ya fabricados.



Figura 3.2 Moldes de 100 y 150 mm

3.2.3.2 Cadena circunferencial con extensómetro

Con el objetivo de implementar el ensayo Barcelona, el Grupo de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM fabricó una cadena circunferencial con extensómetro. En la figura 3.3 se muestra un esquema de las piezas que se utilizaron en el ensamblaje de la cadena con extensómetro.

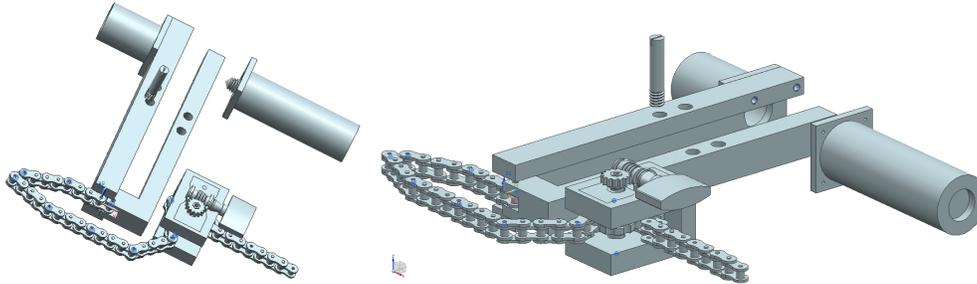


Figura 3.3 Esquema de fabricación de la cadena circunferencial y extensómetro

En la figura 3.4 se presentan las partes de la cadena y el extensómetro ya fabricados. Se realizó la calibración del dispositivo con el fin de obtener un factor de conversión de las lecturas de voltaje a milímetros.



Figura 3.4 Cadena circunferencial y extensómetro ya fabricados

3.2.3.3 Discos de carga, de apoyo y de montaje

Siguiendo las recomendaciones descritas por la UNE 83515, se fabricaron los punzones, los discos de apoyo y de montaje. El Taller Mecánico del Instituto de Ingeniería se encargó de la fabricación de éstos.

En la figura 3.5 se muestran los punzones fabricados para los ensayos de probetas de 150 mm. Para el caso de las probetas de 100 mm, los punzones se fabricaron con una base adicional con el fin de asegurar la estabilidad como se puede observar en la figura 3.6.



Figura 3.5 Punzones para probetas de 150 mm de diámetro



Figura 3.6 Punzón para probetas de 100 mm de diámetro

Como ya se mencionó en el capítulo 2, el disco de apoyo es un disco de acero de diámetro igual al de la probeta con una muesca al centro de diámetro igual al del disco de carga y sirve para poner en posición a la probeta de ensayo. En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran los discos de apoyo fabricados para las probetas de 150 mm de diámetro y 100 mm de diámetro, respectivamente.



Figura 3.7 Disco de apoyo para probetas de 150 mm de diámetro



Figura 3.8 Disco de apoyo para probetas de 100 mm de diámetro

En la figura 3.9 se presentan los discos de montaje fabricados. Estos discos son fundamentales ya que sirven para centrar la probeta y el disco de carga.



Figura 3.9 Discos de montaje para probetas de 150 mm y 100 mm respectivamente

3.2.3.4 Procedimiento de fabricación especímenes de concreto

El procedimiento de fabricación de los especímenes comenzó con pesar las cantidades de material señaladas en la dosificación haciendo la respectiva corrección de pesos por contenido de humedad y porcentaje de absorción. Para ello se utilizó una báscula y cubetas para almacenar el material ya pesado como se puede observar en la figura 3.10.



Figura 3.10 Materiales pesados

Una vez que los materiales estuvieron pesados, se procedió con la preparación de moldes, es decir, se limpiaron, armaron y se les aplicó una capa de aceite con el objetivo de facilitar el desmoldado.

Para cada serie de mezcla se fabricaron seis probetas de 150 x 150 mm y seis probetas de 100 x 100 mm para el Ensayo Barcelona, tres probetas de 150 x 300 mm para ensayo a compresión y una placa de 650 x 650 x 200 mm para la extracción de los testigos. En la tabla 3.7 se presenta un resumen y en la figura 3.11 se muestran los moldes utilizados.

Tabla 3.7 Especímenes por mezcla

Probeta Procedencia	Probeta Tipo	Ensayo Tipo	Número de Moldes	Dimensión Molde, en mm
Placa	Placa	Barcelona	1	650 × 650 × 200
Probetas Moldeadas	Cilindro	Barcelona	6	150 × 150
		Barcelona	6	100 × 100
		Compresión	3	150 × 300
	Viga	Flexión	6	150 x 150 x 600



Figura 3.11 Moldes cilíndricos y prismáticos

Los concretos se fabricaron utilizando una revolvedora de 0.100 m³ de capacidad. Para cada mezcla se fabricaron tres “tandas” para cubrir el volumen de concreto necesario para todos los moldes, cono de revenimiento y un 10% de desperdicio.

La fabricación y el procedimiento de mezclado se hizo de acuerdo con las recomendaciones del ACI. Se inició el procedimiento con la colocación de la grava, arena y el agua de absorción en la revolvedora, dejándose mezclar durante dos minutos para uniformizar la mezcla. Enseguida se incorporó el cemento e inmediatamente el agua restante. Se mezcla todo durante dos minutos y después se dejó un reposo un minuto para romper el falso fraguado. Posteriormente, se reinició el mezclado durante un minuto para después incorporar el aditivo y mezclar por un minuto más. Finalmente se añadió la fibra dejándose mezclar por dos minutos. En la figuras 3.12 y 3.13 se muestra la incorporación del aditivo y las fibras.



Figura 3.12 Incorporación de aditivo Pozzolith 322 N



Figura 3.13 Adición de fibras a la revolvedora

Al finalizar el mezclado, se hicieron las pruebas en estado fresco. Primero se realizó la prueba de revenimiento según la norma ASTM C 143 como se muestra en la figura 3.14 y después se realizaron las pruebas de peso unitario y contenido de aire con base en la norma ASTM C138/C138M.



Figura 3.14 Prueba de revenimiento

Después se procedió con el moldeado de los cilindros de 150 x 300 mm y el de la olla para las pruebas de contenido de aire y peso unitario. Su llenado se realizó en tres capas. El resto de los especímenes se moldeó en dos capas. La compactación se hizo en una mesa de vibrado durante 25 segundos por cada capa. En la figura 3.15 se muestra el moldeado y vibrado de algunos moldes. Finalmente se realizó el enrase de los especímenes procurando dejar una superficie lisa.



Figura 3.15 Moldeado y vibrado de especímenes

3.2.4 Almacenamiento y curado

Todos los especímenes fueron desmoldados a las 24 horas de haberse colado. Se almacenaron en la cámara húmeda bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa (23°C, 95% HR), de acuerdo con la norma ASTM C31/C31M. Los especímenes permanecieron ahí durante 28 días para después ser ensayados.

En el caso de las placas de 650 x 650 x 200 mm, el curado se realizó con ayuda de una membrana de yute humedecida con el objetivo de mantener la humedad hasta la realización de las pruebas.

3.2.5 Preparación de los especímenes

Los cilindros de 150 x 300 mm para ensayos a compresión y las placas de 650 x 650 x 200 mm requirieron una preparación previa a su ensayo

3.2.5.1 Cilindros para ensayos a compresión

El ensayo de resistencia a compresión, se realizó de acuerdo con la norma ASTM C39 para lo cual los cilindros de 150 x 300 mm necesitaron ser cabeceados con azufre para eliminar las posibles irregularidades de acabado y así asegurar la distribución uniforme de la carga al momento de aplicar la carga. El cabeceado se realiza de acuerdo con la norma ASTM C617.

Para realizar el ensayo se utilizó una prensa universal modelo SATEC con capacidad de 2.2 MN. La velocidad del ensayo fue de 250 kN/min.

3.2.5.2 Extracción de testigos

Para la extracción de las probetas testigo, se utilizaron las placas de 650 x 650 x 200 mm y una extractora de corazones como la que se muestra en la figura 3.16. Previo a la extracción se hizo una plantilla para ubicar los doce testigos. Una vez ubicados, la extractora se dispuso sobre una superficie horizontal para asegurar la verticalidad de la extracción. En la figura 3.16 también se muestra un detalle de la placa al término de la extracción.



Figura 3.16 Extracción de testigos y placa al término de la extracción

Después de la extracción, cada testigo fue recortado para obtener una altura igual a su diámetro, es decir de 94 y 150 mm, como lo indica la norma europea UNE 83515, que especifica que la probeta debe tener dimensiones tales que la altura sea igual al diámetro. Las actividades de corte se hicieron utilizando una cortadora de disco, en la figura 3.17 se muestra el procedimiento de corte.



Figura 3.17 Testigos extraídos y procedimiento de corte

3.2.6 Conteo de fibras

Para determinar la densidad de fibras metálicas de las probetas ensayadas de 150 mm (moldeadas y testigos) se realizaron una serie de actividades que a continuación se describen.

3.2.6.1 Trituración de las probetas

El proceso de trituración de las probetas comenzó por separar las caras de los especímenes ensayados por el plano de fisura que presentaba cada una. Para esto se utilizó un marro y un cincel. En la figura 3.18 se presenta un detalle de la fisura de una probeta y el procedimiento de separación.



Figura 3.18 Detalle de fisuración y procedimiento de separación

Una vez que las probetas estaban separadas se continuó a realizar un conteo de las fibras que se encontraban en las caras, también se registró la aparición de los conos de rotura. A continuación, en la figura 3.19, se muestra el procedimiento.



Figura 3.19 Detalle de conteo de fibras en caras y cono de rotura

Después se procedió a pulverizar las probetas con ayuda de una trituradora como la que se muestra en la figura 3.20. Todo esto con el fin de facilitar la extracción y el conteo de fibras.



Figura 3.20 Trituradora

3.2.6.2 Extracción y conteo de fibras

Para la extracción de la fibras se utilizó un imán, de esta forma se asegura que ninguna fibra quede olvidada. El procedimiento consistió en vaciar la probeta triturada en una malla o recipiente y hacer uso del imán. En la figura 3.21 se muestra el procedimiento y en la 3.22 un detalle de la probeta al término de la extracción de fibras.



Figura 3.21 Procedimiento de extracción y pesado de fibras



Figura 3.22 Probeta al término de la extracción de fibras

Finalmente se pesaron las fibras para obtener la cuantía en cada una de las mezclas estudiadas.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de los principales ensayos que se realizaron durante la campaña experimental.

4.1 Peso unitario, revenimiento y contenido de aire

Como ya se mencionó, a cada mezcla se le realizaron las pruebas en estado fresco de revenimiento, contenido de aire y peso unitario. La tabla 4.1 muestra los resultados de estas pruebas para cada una de las mezclas fabricadas.

Tabla 4.1 Resultados de pruebas en estado fresco

ID	Fibra Dramix RC6535 kg/m ³			Fibra MacMatrix kg/m ³			
	M1-40	M2- 60	M3-80	M4-2	M5-5	M6-7	M7-9
PU kg/m ³	2266	2280	2263	2239	2244	2264	2249
Rev cm	5.3	5.2	6.5	9.6	9.7	9.2	9.1
% Aire	3.2	3.1	2.8	2.3	2.1	2.1	2.2

La incorporación de fibras en el concreto no influye de forma significativa, es decir, los resultados obtenidos de revenimiento, contenido de aire y peso unitario son comparables a los valores que se obtiene en concretos simples. Sin embargo, en cada serie de mezclas, se observa un ligero descenso del revenimiento debido a la incorporación de fibra; a excepción de la mezcla M3-80 kg/m³ a la que se añadió 3,000 ml/m³ de aditivo a diferencia de las mezclas M1 y M2, a las que se añadió 2,000 ml/m³.

4.2 Ensayos de resistencia a compresión

Para obtener los resultados de resistencia a compresión se ensayaron 42 probetas en total: 21 de 150 x 300 mm y 21 de 100 x 200 mm; 3 probetas por serie. En las tablas 4.2 y 4.3 se muestran los resultados promedio para las mezclas con fibras metálicas y sintéticas respectivamente.

Tabla 4.2 Resultados promedio de resistencia a compresión (fibra metálica)

ID- kg/m ³	Edad días	Probeta 150 mm			Probeta 100 mm		
		f _c , MPa	Desv Est MPa	C. V. %	f _c , MPa	Desv Est MPa	C. V. %
M1-40	29	42	3.93	0.92	46	37.52	8.06
M2-60	29	39	17.13	4.30	44	12.72	2.87
M3-80	29	45	12.64	2.77	46	9.27	2.01
Promedio	29	42	11.23	2.66	45	19.84	4.31

Tabla 4.3 Resultados promedio de resistencia a compresión (fibra sintética)

ID- kg/m ³	Edad días	Probeta 150 mm			Probeta 100 mm		
		f _c , MPa	Desv Est MPa	C. V. %	f _c , MPa	Desv Est MPa	C. V. %
M4-2	28	40	3.80	0.95	42	7.95	1.89
M5-5	28	44	6.58	1.51	44	19.09	4.35
M6-7	28	39	6.14	1.56	41	13.51	3.32
M7-9	28	41	5.94	1.45	45	7.34	1.62
Promedio	28	41	5.62	1.37	43	11.97	2.80

A pesar de que el contenido y el tipo de fibra fue diferente para cada mezcla, y en algunos casos la edad del ensayo fue de 29 días, se puede decir que estos parámetros no afectan la resistencia a compresión, ya que los resultados son muy similares para todos los casos, como se muestra en la figura 4.1.

Se puede concluir que la resistencia a compresión depende de la resistencia de la matriz y de la edad de ensayo pero no del contenido o tipo de fibra. Se registró un ligero aumento de resistencia en los ensayos realizados a los 29 días para las mezclas M1, M2 y M3.

El aporte de las fibras se ve reflejado a partir de la aparición de las primeras fisuras en las probetas.

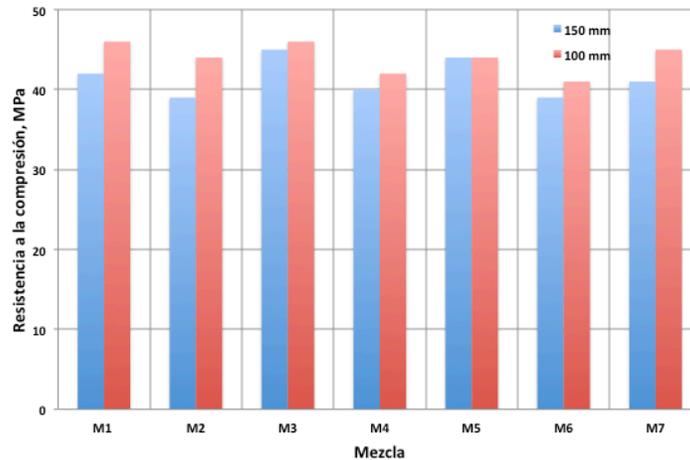


Figura 4.1 Resistencia a compresión promedio

4.4 Ensayo Barcelona

4.4.1 Generalidades

Como ya se mencionó en otros capítulos, los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM y el procedimiento de ensayo se describe en la norma UNE 83515. Para el ensayo se utilizó un equipo MTS con celda de carga de capacidad de 500 kN. Durante el ensayo se midió la apertura circunferencial con un extensómetro fijado en los extremos de la cadena circunferencial que se coloca a la mitad de la probeta. Los datos de carga y deformación circunferencial se almacenan durante todo el ensayo con ayuda del sistema de adquisición de datos. La carga se aplicó a una velocidad de 0.5 mm/min, lo que hace que se trate de un ensayo rápido.

En total se realizaron 168 ensayos Barcelona, 84 de probetas moldeadas divididas en 42 de 150 x 150 mm y 42 de 100 x 100 mm, y 84 de probetas testigos, en 42 de 150 x 150 mm y 42 de 94 x 94 mm.

4.4.2 Modo de falla

El modo de falla característico del ensayo Barcelona consiste en la formación de 2 a 3 grietas radiales principales en las caras de la carga, y grietas secundarias. Generalmente, las grietas principales comienzan en la cara de carga y se extienden por toda la longitud de la probeta, a diferencia de las secundarias que se presentan en una longitud menor. La figura 4.2 muestra el modo de falla típico observado en las probetas moldeadas y testigo.



Probetas testigo de 150 mm



Probeta moldeada de 150 mm

Figura 4.2 Modo típico de falla

4.4.3 Curvas fuerza vs desplazamiento y tenacidad vs desplazamiento

En las figuras de 4.3 a 4.10 se muestran las curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento circunferencial de los ensayos Barcelona de las probetas moldeadas de 150 y 100 mm, y testigos de 150 y 94 mm ensayados.

Se puede concluir, que para todas las mezclas de concreto fabricadas, las curvas fuerza vs desplazamiento circunferencial presentan un comportamiento muy similar sin importar el diámetro, tipo de probeta o de fibra empleada. Las curvas características muestran un desplazamiento casi nulo desde el inicio de la carga hasta que se alcanza la carga máxima, en esta etapa la probeta no presenta fisuras. Después de que se alcanza la carga máxima comienzan a aparecer las primeras fisuras, lo que se conoce como régimen del post-agrietamiento que se caracteriza porque las probetas presentan un ablandamiento. Finalmente la carga disminuye abruptamente hasta mantenerse constante, mientras que la apertura de fisura aumenta y es aquí cuando las fibras empiezan a trabajar.

En las curvas se puede observar que la resistencia residual depende del tipo y contenido de fibras en la mezcla.

La tenacidad es el resultado del área bajo la curva de carga vs desplazamiento circunferencial, representa la energía que es absorbida por la probeta durante el ensayo y se mide en Joules (Nm).

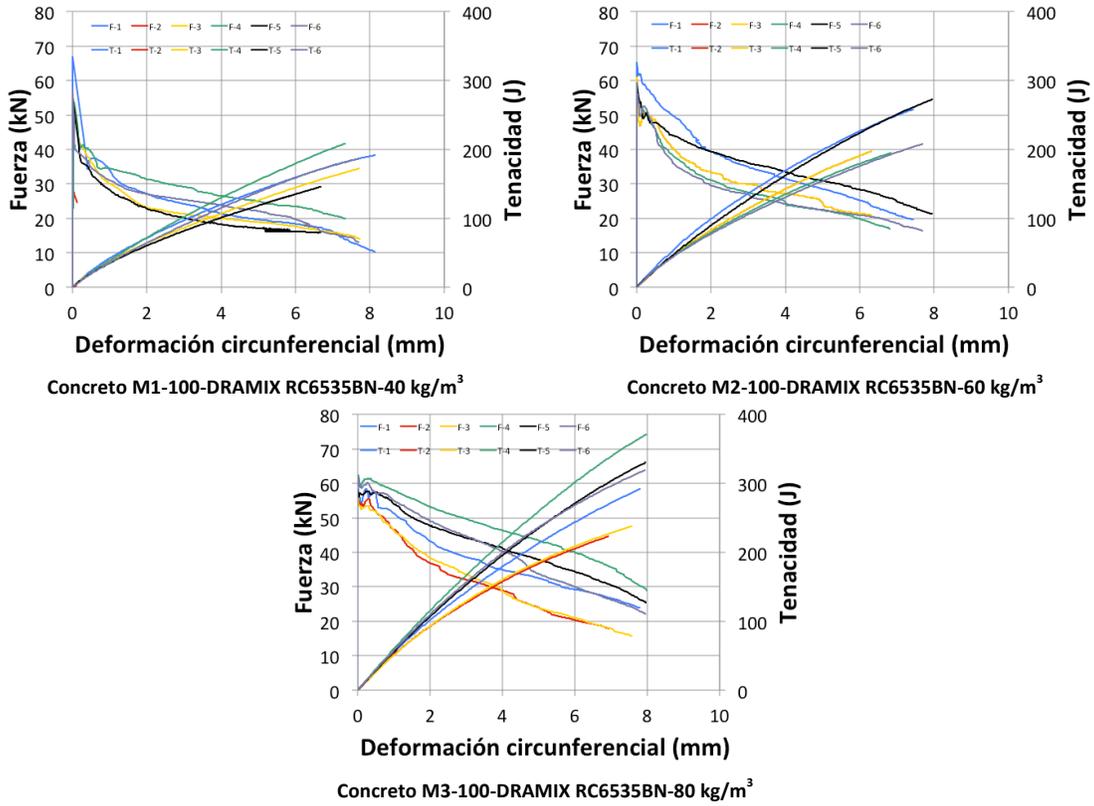


Figura 4.3 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (probeta 100 mm)

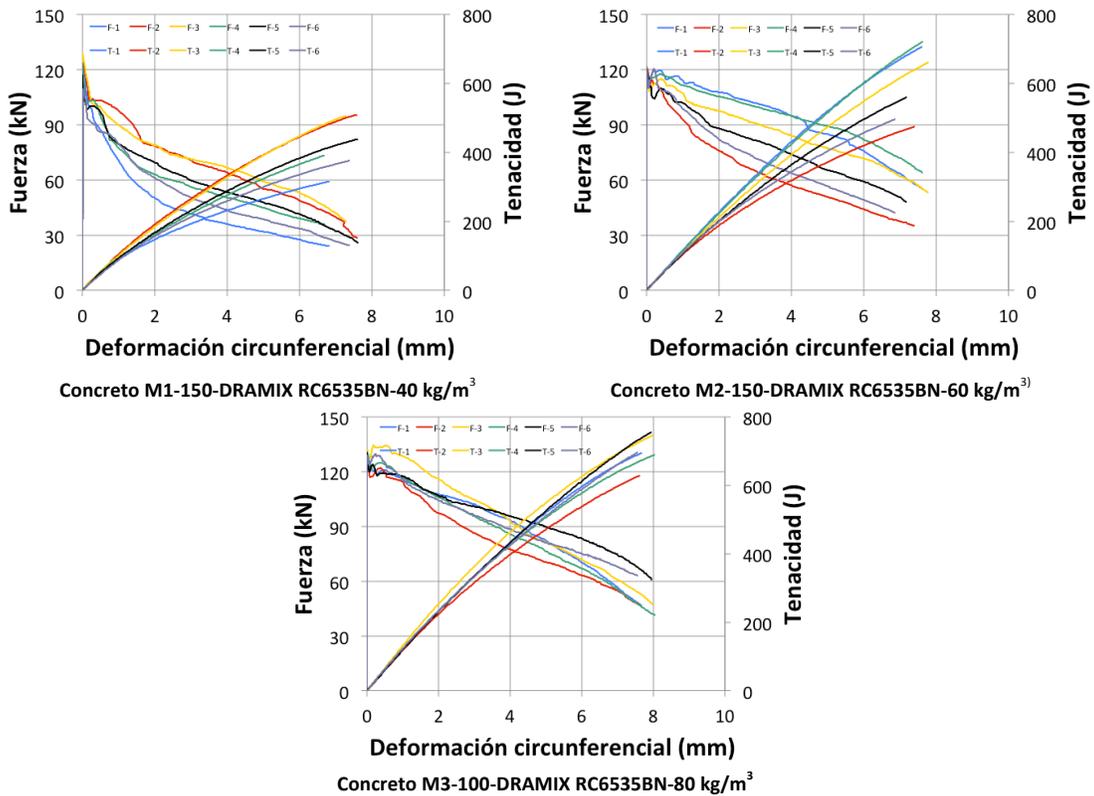


Figura 4.4 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (150 mm)

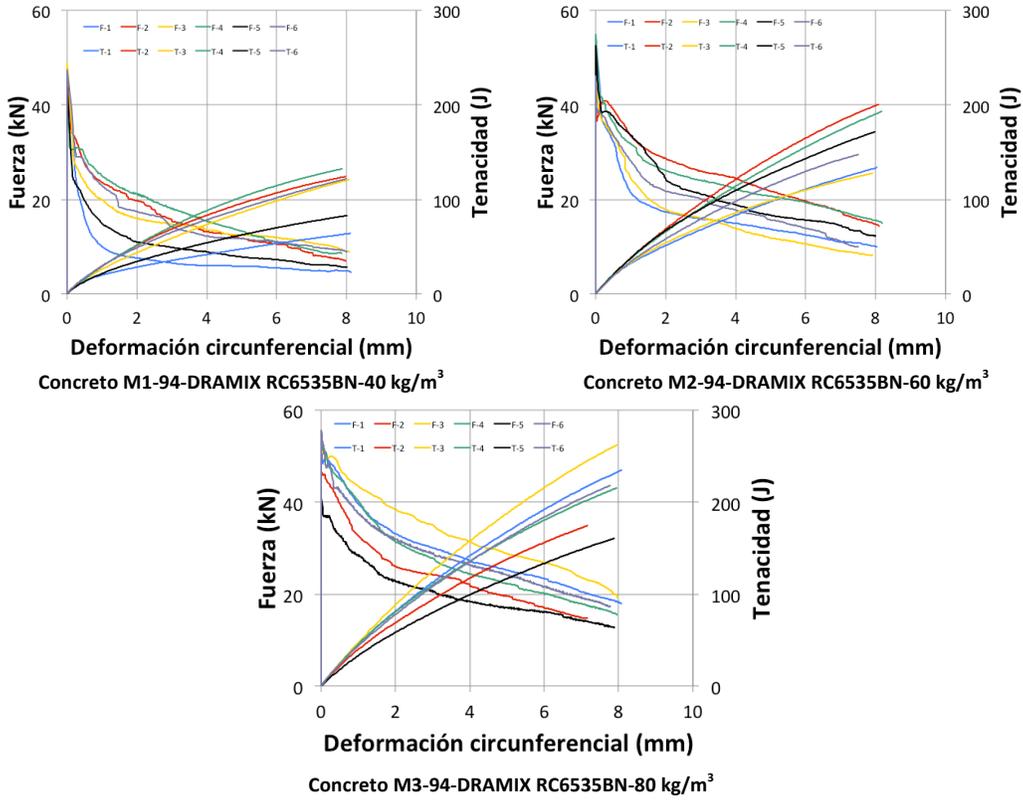


Figura 4.5 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (testigo 94 mm)

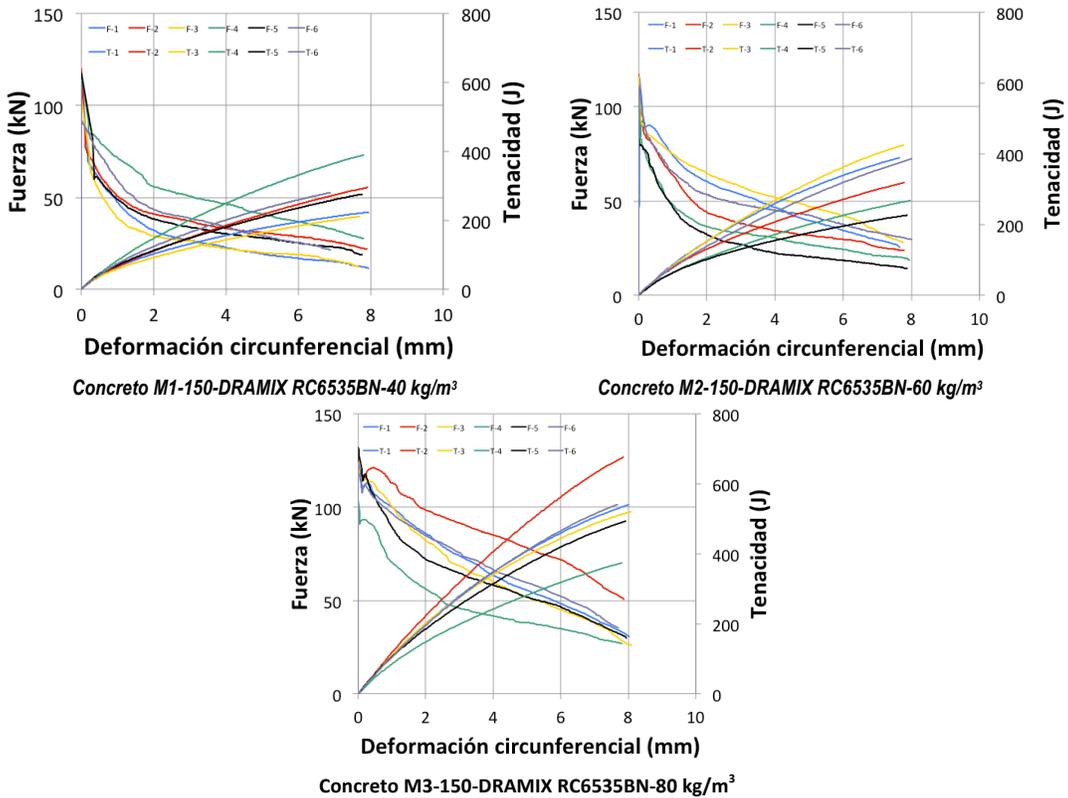


Figura 4.6 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (testigo 150 mm)

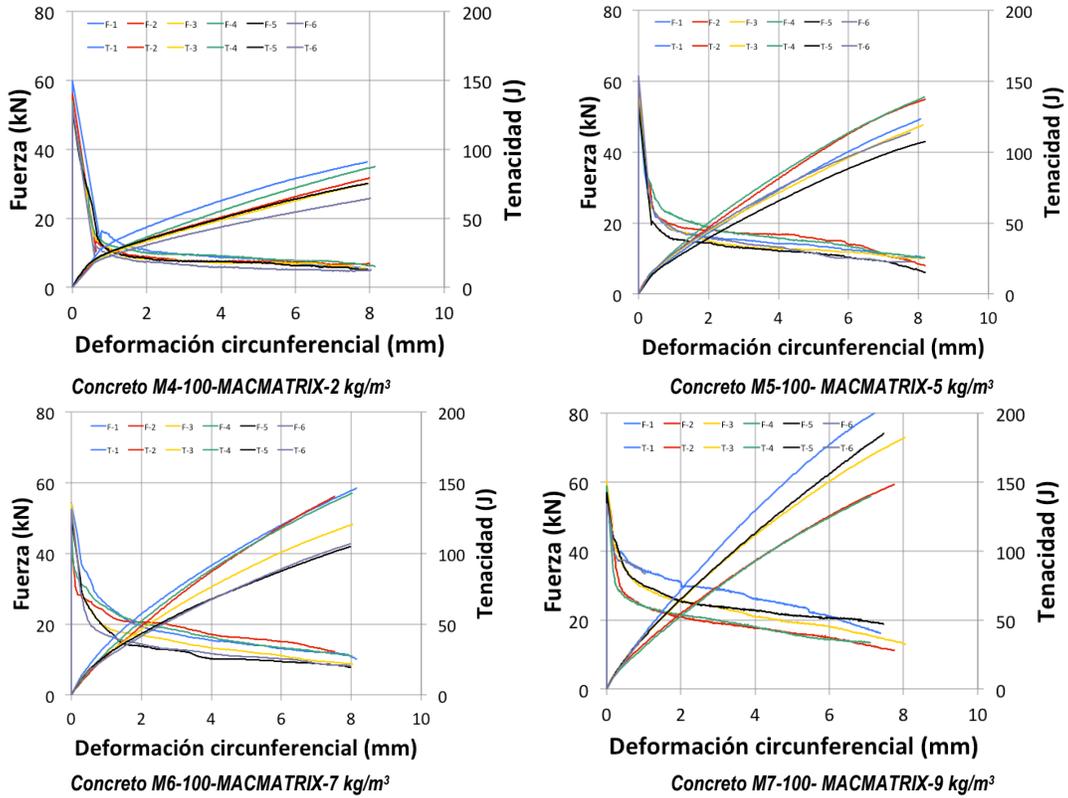


Figura 4.7 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (probeta 100 mm)

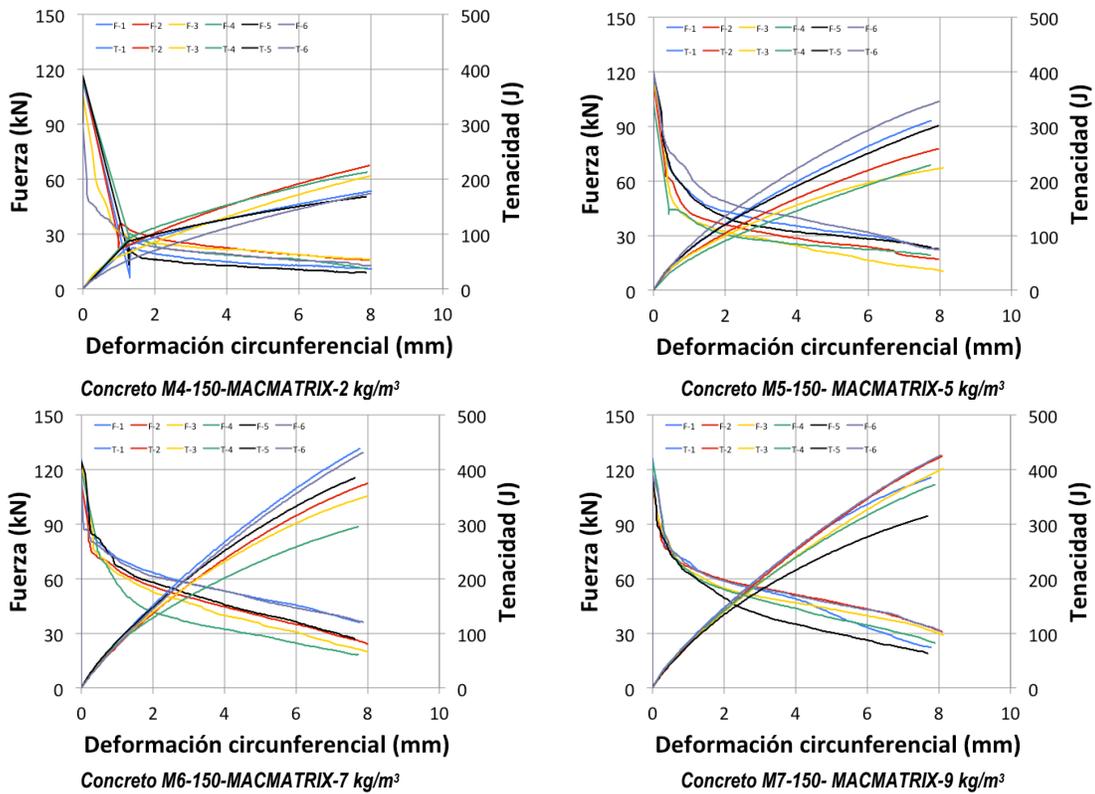


Figura 4.8 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (probeta 150 mm)

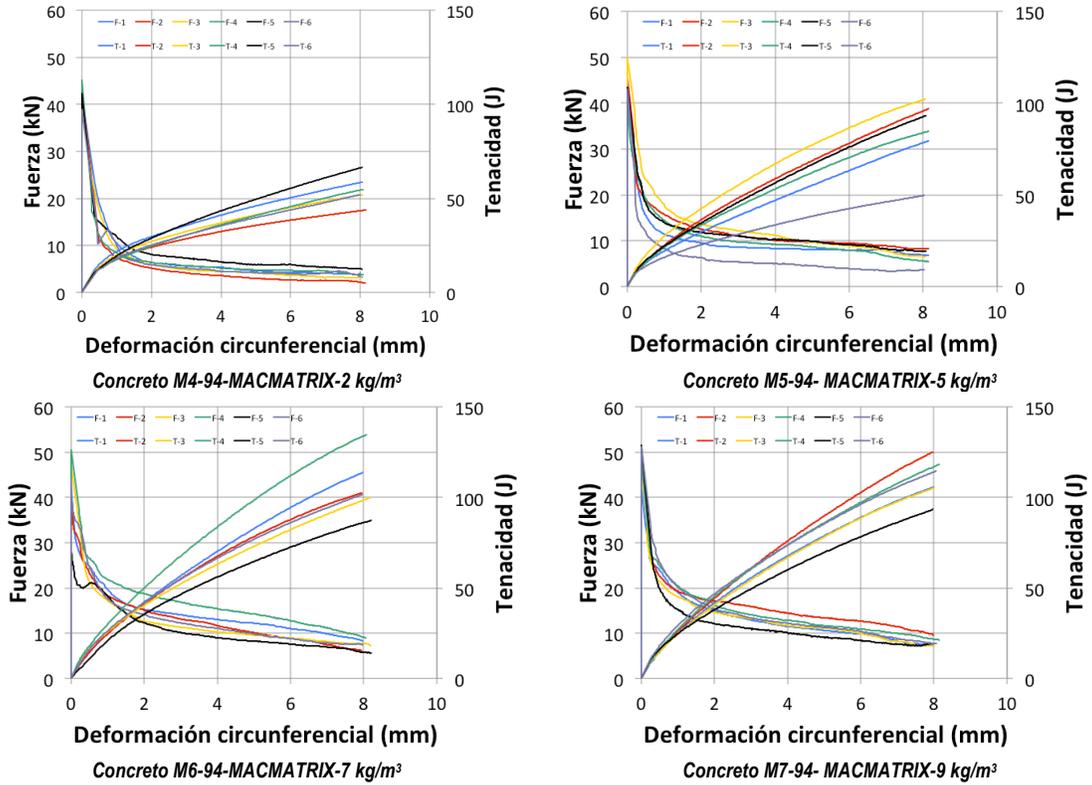


Figura 4.9 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (testigo 94 mm)

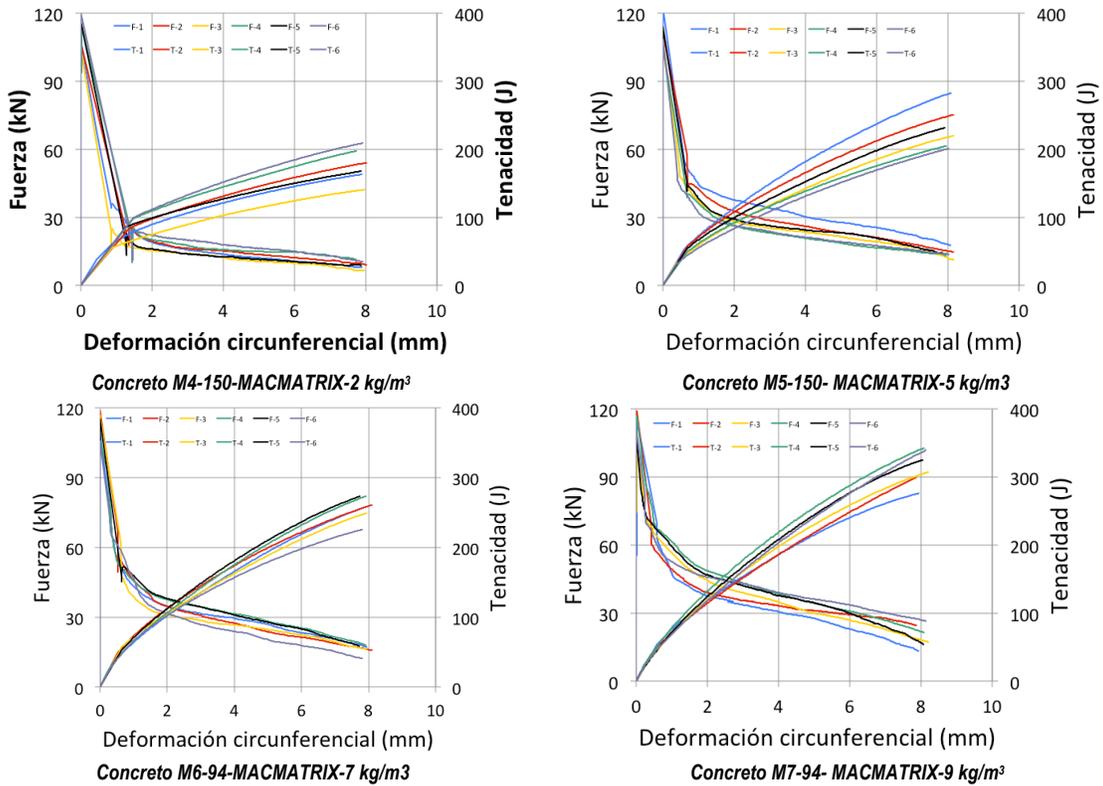


Figura 4.10 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento (testigo 150 mm)

4.4.4 Conteo de fibras

En las tablas de 4.4 a 4.9 se presentan los resultados obtenidos del conteo de fibras de acero para las probetas moldeadas y testigos de 150 mm de diámetro. Para determinar el número de fibras por kilogramo se pesaron 10 fibras y se obtuvo el resultado de 14,706 fibras/kg. Con este dato se determinó el número aproximado de fibras en cada probeta.

Tabla 4.4 Resultados de conteo de fibras para probeta moldeada de 40 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m³
M1-1	1661.78	42.07
M1-2	1636.78	41.53
M1-3	1557.37	39.17
M1-4	1683.84	43.20
M1-5	1760.31	44.76
M1-6	1520.60	38.83
Promedio	1636.78	41.59
Desv est	87.07	2.29
C.V. %	5.32	5.52

Tabla 4.5 Resultados de conteo de fibras para probeta moldeada de 60 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m³
M2-1	2625.02	66.60
M2-2	2578.70	65.28
M2-3	2691.79	66.95
M2-4	2510.46	63.84
M2-5	2509.87	64.10
M2-6	2772.67	69.13
Promedio	2614.75	65.98
Desv est	104.07	1.99
C.V. %	3.98	3.02

Tabla 4.6 Resultados de conteo de fibras para probeta moldeada de 80 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m³
M3-1	3135.76	79.38
M3-2	3239.58	82.38
M3-3	-	-
M3-4	3002.38	77.54
M3-5	3072.52	78.65
M3-6	3397.23	86.00
Promedio	3169.50	80.79
Desv est	154.31	3.42
C.V.%	4.87	4.23

Tabla 4.7 Resultados de conteo de fibras para probeta testigo de 40 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m³
M1-1	1582.51	39.07
M1-2	1498.54	38.32
M1-3	1635.31	41.85
M1-4	1633.84	41.90
M1-5	-	-
M1-6	1756.93	44.99
Promedio	1621.42	41.23
Desv est	93.97	2.65
C.V.%	5.80	6.43

Tabla 4.8 Resultados de conteo de fibras para probeta testigo de 60 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m³
M2-1	2258.69	58.19
M2-2	2270.90	57.98
M2-3	2408.99	61.05
M2-4	2314.87	58.86
M2-5	2242.67	57.39
M2-6	-	-
Promedio	2299.22	58.69
Desv est	66.96	1.42
C.V.%	2.91	2.42

Tabla 4.9 Resultados de conteo de fibras para probeta testigo de 80 kg/m³

Probeta	# Fibras	kg/m ³
M3-1	3124.29	79.09
M3-2	3167.97	80.94
M3-3	2982.38	76.14
M3-4	3006.64	77.80
M3-5	2977.67	76.22
M3-6	-	-
Promedio	3051.79	78.04
Desv est	88.18	2.03
C.V.%	2.89	2.61

A continuación, en las figuras 4.11 y 4.12, se presentan de forma gráfica los resultados del conteo de fibras para probetas moldeadas y testigos de 150 mm de diámetro.

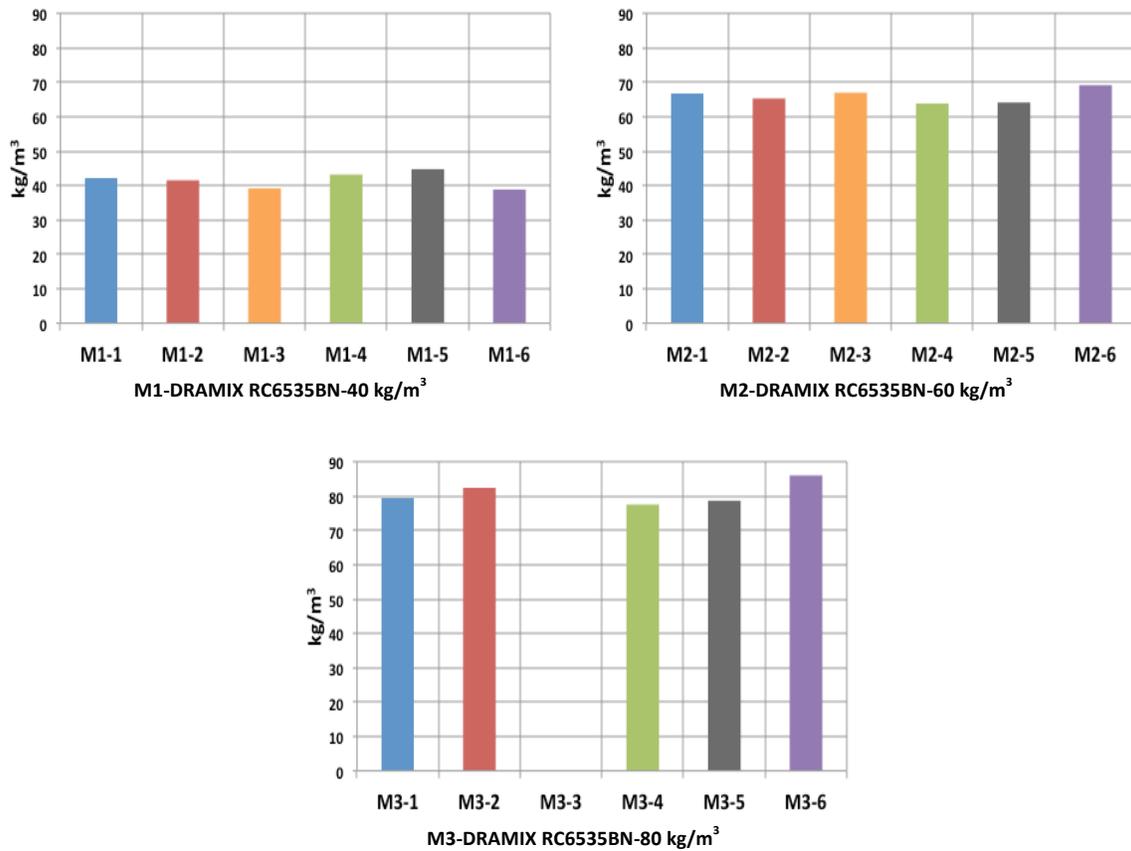


Figura 4.11 Conteo de fibras para probetas moldeadas de 150 mm

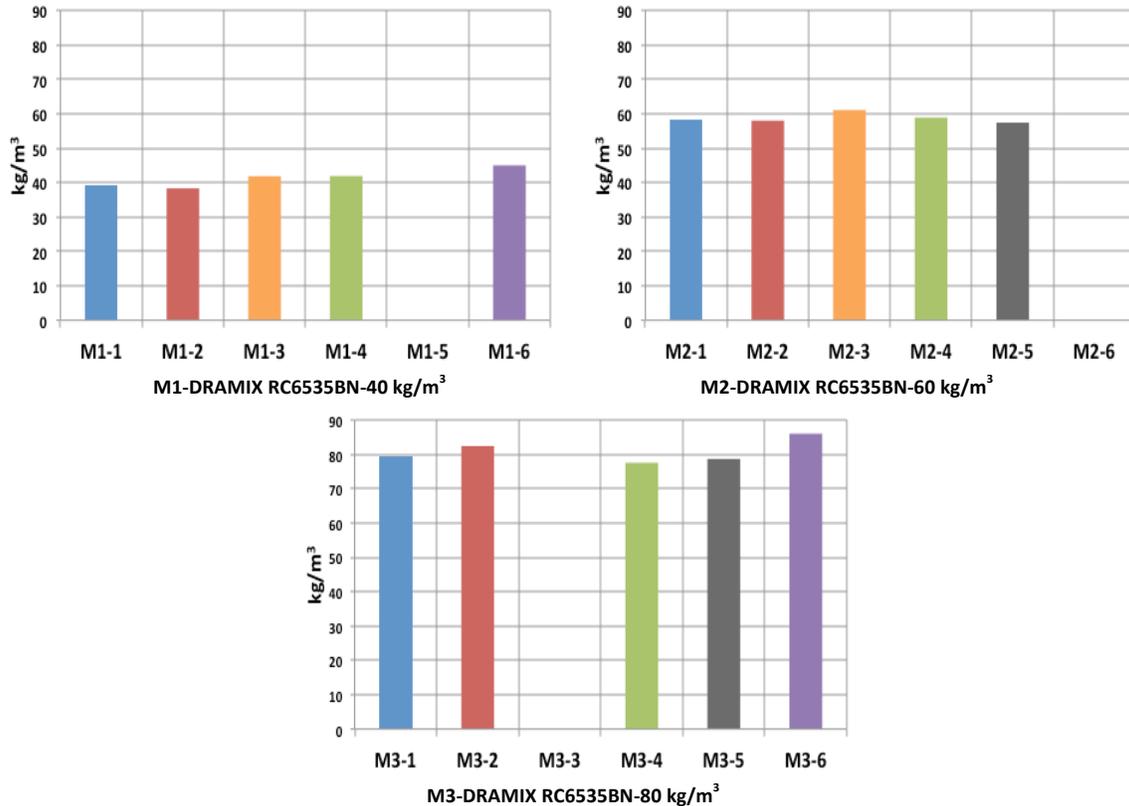


Figura 4.12 Conteo de fibras para probetas testigo de 150 mm

Para el caso de las probetas moldeadas, se observa que de forma general, la densidad de fibras es mayor a la dosificada, con un coeficiente de variación promedio de 4.16%. Por el contrario, en las probetas testigo de 60 y 80 kg/m³ se tiene que la densidad de fibras es menor con un coeficiente de variación promedio de 3.82%. Esto puede deberse a que al momento de extraer las probetas testigo las fibras se cortan, a diferencia de las probetas moldeadas donde las fibras se encuentran completas. Además de que la ubicación de la extracción de las probetas testigo puede influir. En la figura 4.13 se muestra la ubicación de las probetas testigo en las losas.



Figura 4.13 Localización de las probetas testigo

4.4.5 Análisis de resultados

4.4.5.1 Carga Máxima

En las tablas 4.10 y 4.11 se muestran los resultados de carga máxima obtenidos de las curvas fuerza vs deformación circunferencial para las probetas moldeadas de 100 y 150 mm y los testigos de 94 y 150 mm.

La variabilidad de los resultados es aceptable, menor a 11.1 % en todos los casos a excepción del valor de 16.6%. Las probetas de 150 y 100 mm tienen coeficientes de variación que van de 1.2 a 9.5%. En las probetas testigo la variabilidad estuvo entre 4.5 y 16.6%.

Como se puede ver en las figuras 4.14 y 4.15, la carga máxima no depende de la cantidad de fibras, sino de la matriz del concreto. El factor que tiene más importancia es la edad del concreto, en este caso no todas las probetas se ensayaron a 28 días, la edad varió de 28 a 35 días. Sin embargo se puede comprobar que la magnitud de los valores es parecida en todas ellas.

Tabla 4.10 Resultados de carga máxima (Fibra de acero)

Fibra Dramix RC6535BN								
BCN	Moldeada				Testigo			
	150 mm		100 mm		94 mm		150 mm	
ID-kg/m ³	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %
M1-40	122 (28)	6.2	57 (31)	9.5	45 (31)	7.3	115 (35)	5.0
M2-60	120 (28)	1.2	61 (29)	3.9	50 (33)	10.1	109 (33)	10.8
M3-80	131 (27)	1.5	60 (27)	3.6	53 (29)	11.1	123 (29)	8.4
Promedio	124.5		59.4		49.4		115.5	
Desv est	5.84		2.16		3.691		7.129	
C.V. %	4.69		3.64		7.47		6.17	

Tabla 4.11 Resultados de carga máxima (Fibra sintética)

Fibra MacMatrix								
BCN	Moldeada				Testigo			
	150 mm		100 mm		94 mm		150 mm	
ID-kg/m ³	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %	kN (días)	C.V. %
M4-2	109 (28)	9.3	54 (28)	6.6	42 (29)	5.3	112 (29)	5.7
M5-5	115 (28)	5.5	56 (28)	6.5	44 (29)	7.6	111 (28)	5.9
M6-7	121 (28)	4.0	50 (28)	9.4	42 (29)	16.6	112 (28)	5.0
M7-9	118 (28)	5.6	58 (27)	3.9	48 (27)	7.1	113 (28)	4.5
Promedio	115.8		54.5		44.2		112.1	
Desv est	5.013		3.307		2.887		0.906	
C.V. %	4.33		6.07		6.53		0.81	

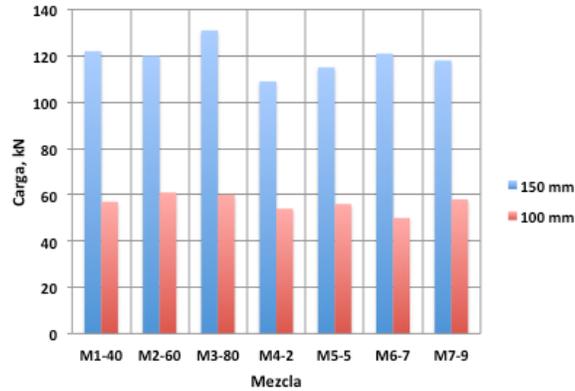


Figura 4.14 Comparación de cargas máximas para las probetas moldeadas

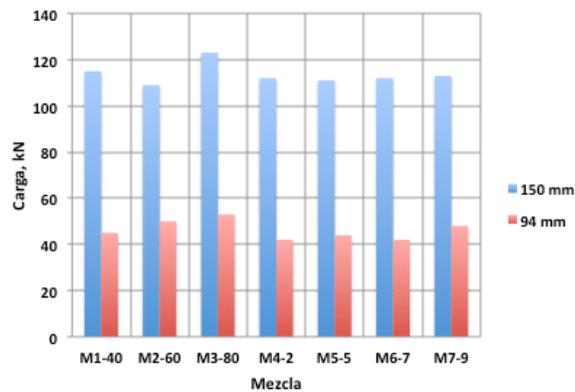


Figura 4.15 Comparación de cargas máximas para las probetas testigo

4.4.5.2 Resistencia Máxima

En las tablas 4.12 y 4.13 se muestran los resultados promedio de la resistencia máxima a esfuerzos de tensión de las probetas moldeadas de 150 y 100 mm y de los testigos de 150 y 94 mm. Se puede hacer una comparación para cada diámetro estudiado, independientemente de la cantidad de fibra utilizada, como se muestra en la figura 4.16. Al igual que en la carga máxima, el coeficiente de variación es menor a 10.9% a excepción del valor de 16.6 %.

Para las probetas moldeadas de 100 mm de diámetro, la resistencia promedio máxima fue de 2.1 MPa (2.2 y 2.0 MPa para probetas con fibras de acero y sintética, respectivamente) y para las probetas moldeadas de 150 mm fue de 3.0 MPa (3.1 MPa y 2.9 MPa en probetas con fibra de acero y sintética, respectivamente).

Para los testigos de 94 mm la resistencia promedio máxima fue de 1.9 MPa (2.0 y 1.8 MPa para las probetas con fibra de acero y sintética, respectivamente) y para los testigos de 150 mm fue de 2.85 MPa (2.9 y 2.8 MPa para las mismas fibras).

Tabla 4.12 Resultados de resistencia máxima (Fibra de acero)

Fibra Dramix RC6535BN								
BCN	Moldeada				Testigo			
	150 mm		100 mm		94 mm		150 mm	
ID-kg/m ³	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %
M1-40	3.0 (28)	5.9	2.1 (31)	9.2	1.8 (31)	7.1	2.9 (35)	5.0
M2-60	3.0 (28)	1.2	2.2 (29)	3.8	2.0 (33)	10.1	2.7 (33)	10.9
M3-80	3.3 (27)	1.6	2.3 (27)	3.4	2.1 (29)	10.9	3.1 (29)	8.1
Promedio	3.1		2.2		2.0		2.9	
Desv est	0.144		0.095		0.137		0.180	
C.V. %	5		4		7		6	

Tabla 4.13 Resultados de resistencia máxima (Fibra sintética)

Fibra MacMatrix								
BCN	Moldeada				Testigo			
	150 mm		100 mm		94 mm		150 mm	
ID-kg/m ³	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %	MPa (días)	C.V. %
M4-2	2.7 (28)	9.4	2.0 (28)	6.4	1.7 (29)	4.7	2.8 (29)	5.3
M5-5	2.9 (28)	5.6	2.1 (28)	6.0	1.8 (29)	7.7	2.8 (28)	5.7
M6-7	3.0 (28)	4.8	1.8 (28)	9.3	1.7 (29)	16.6	2.8 (28)	4.7
M7-9	2.9 (28)	5.1	2.1 (27)	4.2	1.9 (28)	6.9	2.8 (28)	3.9
Promedio	2.9		2.0		1.8		2.8	
Desv est	0.127		0.128		0.109		0.015	
C.V. %	4		6		6		1	

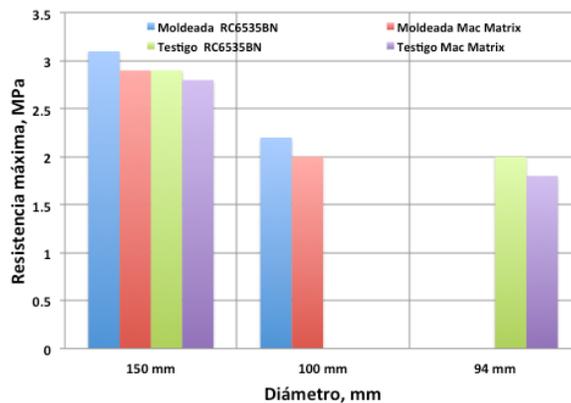


Figura 4.16 Comparación de resistencia máxima de probetas moldeadas y testigo.

Con los resultados se puede obtener una correlación experimental entre los valores de resistencia máxima obtenidos con el ensayo de probetas moldeadas y testigos,

considerando las variables del estudio, que fueron: contenido y tipo de fibra y diámetros diferentes. En las tablas 4.14 y 4.15 se muestran los resultados.

Tabla 4.14 Correlación de resultados de probetas moldeadas y testigos

Fibra Dramix RC6535BN								
BCN	Moldeada		Relación	Testigo		Relación		
	150 mm	100 mm	Fct100m/ Fct150m	150 mm	94 mm	Fct94t/ Fct150t	Fct150t/ Fct150m	Fct94t/ Fct100m
ID-kg/m ³	MPa	MPa		MPa	MPa			
M1-40	3.0	2.1	0.70	2.9	1.8	0.60	0.97	0.86
M2-60	3.0	2.2	0.73	2.7	2.0	0.67	0.90	0.91
M3-80	3.3	2.3	0.70	3.1	2.1	0.64	0.94	0.91
Promedio			0.71⁽¹⁾			0.63⁽²⁾	0.94	0.89⁽³⁾
Desv est			0.02018			0.0334	0.03352	0.03120
C. V. %			2.8			5.3	3.58	3.49

$$^{(1)}0.71 * ^{(3)}0.89 = ^{(2)}0.63$$

Tabla 4.15 Correlación de resultados de probetas moldeadas y testigos

Fibra MacMatrix								
BCN	Moldeada		Relación	Testigo		Relación		
	150 mm	100 mm	Fct100m/ Fct150m	150 mm	94 mm	Fct94t/ Fct150t	Fct150t/ Fct150m	Fct94t/ Fct100m
ID- kg/m ³	MPa	MPa		MPa	MPa			
M4-2	2.7	2.0	0.74	2.8	1.7	0.63	1.04	0.85
M5-5	2.9	2.1	0.72	2.8	1.8	0.62	0.97	0.86
M6-7	3.0	1.8	0.60	2.8	1.7	0.57	0.93	0.94
M7-9	2.9	2.1	0.72	2.8	1.9	0.66	0.97	0.90
Promedio			0.70⁽¹⁾			0.62⁽²⁾	0.98	0.89⁽³⁾
Desv est			0.06531			0.0341	0.04383	0.04419
C. V. %			9.37			5.5	4.49	4.97

$$^{(1)}0.70 * ^{(3)}0.89 = ^{(2)}0.62$$

La relación promedio ($f_{ct150testigo}/f_{ct150moldeada}$) y ($f_{ct94testigo}/f_{ct100moldeada}$) entre los valores de resistencia máxima obtenidos de testigos de 150 mm y probetas moldeadas de 150 mm, y de testigos de 94 mm y probetas moldeadas de 100 mm es de 0.96 y 0.89 respectivamente.

Las relaciones entre resistencias obtenidas de probetas moldeadas y testigos son similares para ambos tipos de fibra: ($f_{ct100moldeada}/f_{ct150moldeada}$) = 0.70, ($f_{ct94testigo}/f_{ct150testigo}$) = 0.62.

La relación promedio de ($f_{ct94testigo}/f_{ct150testigo}$) = 0.62, con un coeficiente de variación del 5.4% éste valor coincide con el producto de:

$$\frac{f_{ct100m}}{f_{ct150m}} \times \frac{f_{ct94t}}{f_{ct100m}} = 0.70 \times 0.89 = 0.62$$

Con esto se puede demostrar que es posible extraer testigos de diámetro menor a lo especificado en UNE 83515 (2010) y Pujadas *et al.*, (2013) para caracterizar la resistencia a tracción de la matriz del CRF. Esto es de gran utilidad ya que cuando por razones prácticas no se pueda extraer testigos de 100 mm de diámetro, existe la posibilidad de extraer probetas de menor diámetro al mínimo especificado en la UNE 83515 (2010).

4.4.5.3 Resistencia Residual

En las tablas 4.16 a 4.19 se presentan los resultados de resistencia residual para los valores de deformación circunferencial de 2.0, 2.5, 4.0 y 6.0 mm para los concretos con fibras de acero y sintéticas. Como puede observarse la variabilidad de los resultados es alta, en el caso de las probetas moldeadas los valores van de 5.4 a 33.2% y para las probetas testigos se presentan mayores dispersiones, entre 8.2 y 33.3%.

Tabla 4.16 Resultados de resistencia residual (Fibra de acero) Probetas moldeadas

BCN 150 mm	Moldeada 150 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	3.04	5.9	2.99	1.2	3.26	1.6
fct 2 mm	1.67	16.2	2.31	14.2	2.65	5.5
fct 2.5 mm	1.55	18.0	2.21	16.3	2.53	5.4
fct 4 mm	1.30	22.0	1.94	20.9	2.21	7.5
fct 6 mm	1.01	23.2	1.58	24.3	1.79	9.7
BCN 100 mm	Moldeada 100 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	2.09	9.2	2.25	3.8	2.26	3.4
fct 2 mm	1.43	11.7	1.91	11.9	2.51	14.1
fct 2.5 mm	1.38	12.2	1.79	12.7	2.38	15.8
fct 4 mm	1.23	13.6	1.56	13.0	2.06	19.0
fct 6 mm	1.10	16.4	1.27	13.8	1.63	25.7

Tabla 4.17 Resultados de resistencia residual (Fibra de Acero) Testigos

BCN 94 mm	Testigo 94 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	1.82	7.1	2.00	10.1	2.09	10.9
fct 2 mm	0.93	33.3	1.36	20.1	1.83	18.0
fct 2.5 mm	0.87	32.7	1.28	20.0	1.73	18.1
fct 4 mm	0.69	29.8	1.12	22.0	1.49	18.1
fct 6 mm	0.57	26.9	0.91	24.0	1.24	19.0
BCN 150 mm	Testigo 150 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	2.88	5.0	2.72	10.9	3.08	8.1
fct 2 mm	1.00	24.2	1.22	27.3	2.00	17.7
fct 2.5 mm	0.94	25.5	1.14	28.5	1.87	20.0
fct 4 mm	0.79	28.8	0.96	29.6	1.56	22.2
fct 6 mm	0.63	28.8	0.78	28.2	1.25	24.5

Tabla 4.18 Resultados de resistencia residual (Fibra sintética) Probetas moldeadas

BCN 150 mm	Moldeada 150 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	2.73	9.4	2.86	5.6	3.03	4.8	2.94	5.1
fct 2 mm	0.56	19.7	0.96	18.1	1.39	14.3	1.40	6.6
fct 2.5 mm	0.52	19.6	0.90	18.1	1.31	15.2	1.32	9.2
fct 4 mm	0.45	21.7	0.77	19.6	1.12	18.5	1.15	13.0
fct 6 mm	0.38	21.7	0.63	22.6	0.90	22.6	0.92	18.3
BCN 100 mm	Moldeada 100 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	2.00	6.4	2.06	6.0	1.84	9.3	2.15	4.2
fct 2 mm	0.50	14.4	0.90	9.9	0.97	17.2	1.46	18.5
fct 2.5 mm	0.47	13.2	0.85	10.4	0.92	18.3	1.42	19.7
fct 4 mm	0.42	15.8	0.78	12.3	0.77	19.5	1.29	24.6
fct 6 mm	0.37	13.5	0.66	13.3	0.66	17.9	1.13	33.2

Tabla 4.19 Resultados de resistencia residual (Fibra sintética) Testigos

BCN 94 mm	Testigo 94 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	1.68	4.7	1.78	7.7	1.68	16.6	1.91	6.9
fct 2 mm	0.37	16.1	0.65	24.5	0.88	16.0	0.89	12.0
fct 2.5 mm	0.35	18.4	0.61	26.1	0.82	17.2	0.84	12.2
fct 4 mm	0.29	20.1	0.54	24.6	0.70	19.0	0.72	12.8
fct 6 mm	0.25	25.8	0.47	26.0	0.58	19.3	0.61	14.2
BCN 150 mm	Testigo 150 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
fct	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
fct, max	2.81	5.3	2.80	5.7	2.83	4.7	2.83	3.9
fct 2 mm	0.47	13.0	0.76	14.3	0.87	8.2	1.09	11.0
fct 2.5 mm	0.44	13.0	0.71	15.3	0.82	8.7	1.04	10.9
fct 4 mm	0.37	14.4	0.61	14.0	0.71	10.1	0.89	9.9
fct 6 mm	0.30	17.5	0.51	15.6	0.57	12.5	0.72	13.1

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran la variabilidad y evolución de los resultados. Haciendo una comparación entre los concretos y sus diámetros.

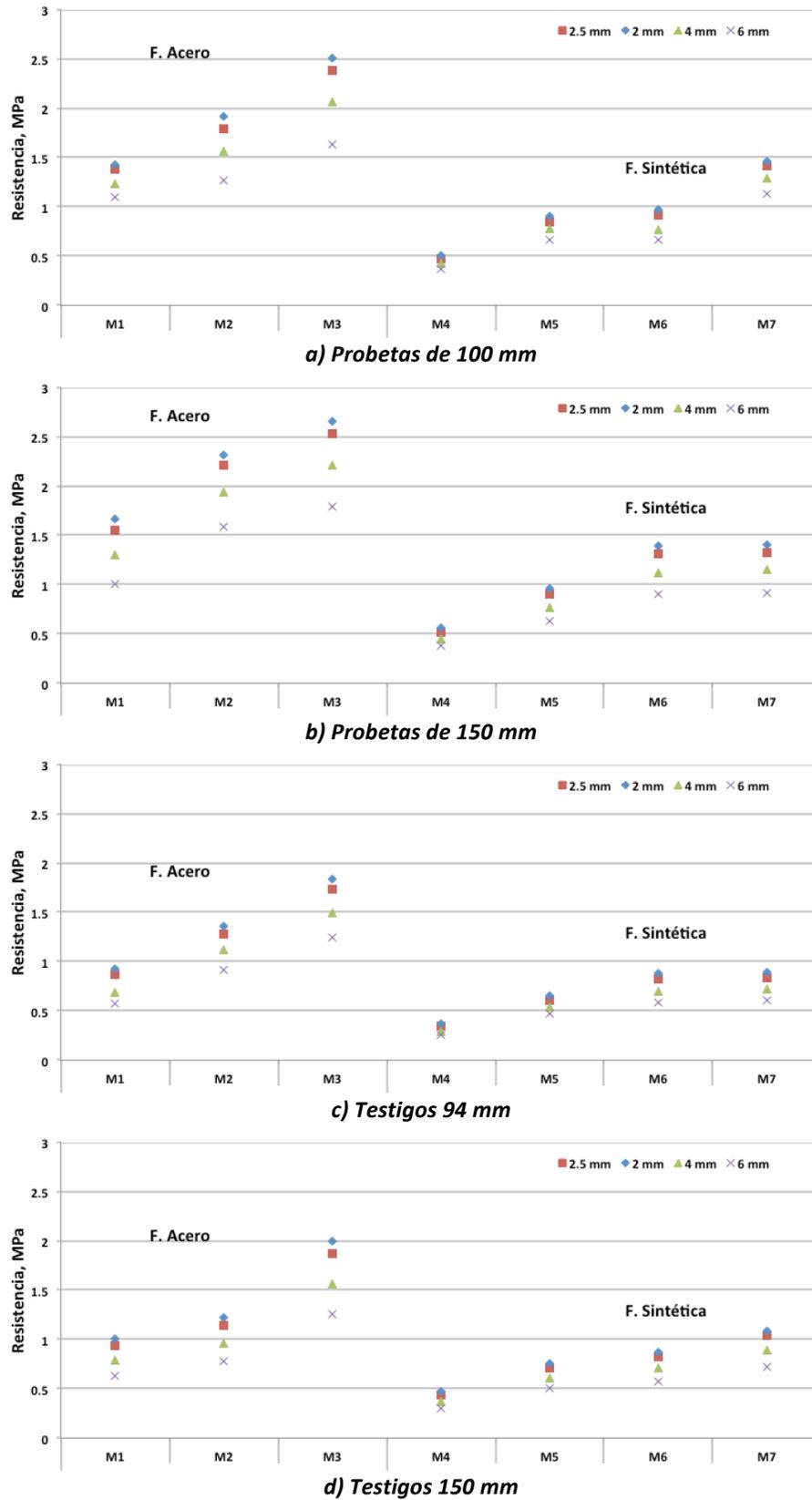
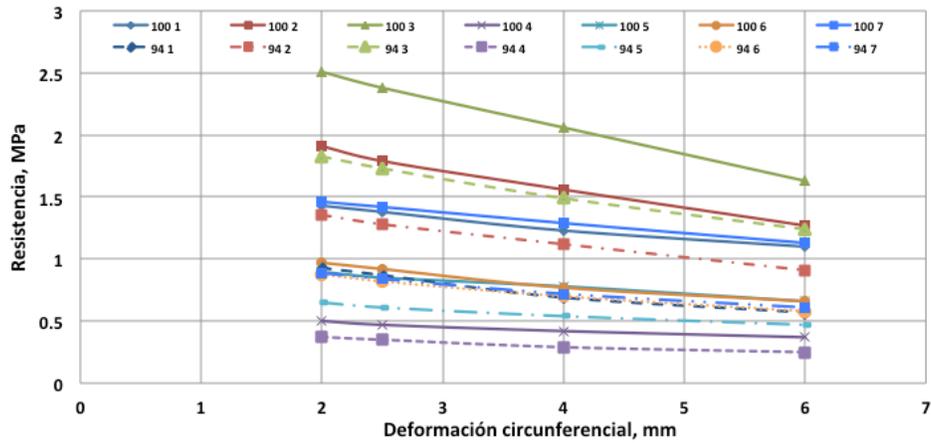
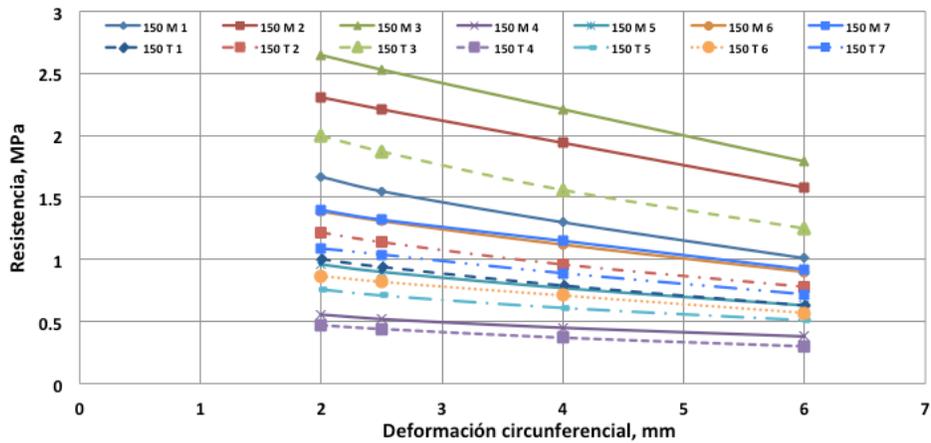


Figura 4.17 Variabilidad de la resistencia residual del ensayo Barcelona



a) *Probetas moldeadas de 100 y testigos de 94 mm*



b) *Probetas moldeadas de 150 y testigos de 150 mm*

Figura 4.18 Evolución de la resistencia residual de los resultados del ensayo Barcelona

La resistencia residual aumenta a medida que se incrementa la cantidad de fibra en el concreto. Para ambos tipos de fibra, los valores de resistencia residual son mayores en las probetas moldeadas para cada deformación circunferencial evaluada. Esto se explica con el fenómeno que ocurre durante la extracción de testigos. Por ejemplo, en el caso de las fibras de acero, una cantidad significativa de fibras resultan cortadas. Al perder uno de los extremos, la fibra pierde eficacia al no estar anclada. En las probetas moldeadas las fibras están completas con sus ganchos anclados, por lo que pueden desarrollar toda su capacidad resistente.

Además se puede observar que las resistencias residuales son mayores en las probetas de mayor diámetro. En el caso de las probetas moldeadas, se puede explicar con el efecto pared. Al tener un diámetro menor, este efecto aumenta, es decir mayor número de fibras se orientan según la dirección z del colado lo que se refleja en una menor capacidad. Para el caso de los testigos, al reducirse el diámetro, aumenta la cantidad de fibras cortadas por consecuencia disminuye la capacidad resistente.

4.4.5.4 Tenacidad

En las tablas 4.20 a 4.23 se muestran los resultados de tenacidad para los valores de deformación circunferencial de 2.0, 2.5, 4.0 y 6.0 mm.

De acuerdo con los resultados, los valores de tenacidad son diferentes para cada concreto. En la figura 4.19 se puede observar que los valores de tenacidad son mayores para los concretos con fibra de acero en todos los casos.

Tabla 4.20 Resultados de tenacidad (Fibra de acero) Probetas moldeadas

BCN 150 mm	Moldeada 150 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	168.32	9.8	208.25	7.3	234.39	4.3
T2.5 mm	200.43	11.0	253.56	8.6	286.44	4.5
T4 mm	285.94	13.8	378.94	11.8	429.82	4.9
T6 mm	378.82	15.9	520.67	14.5	590.54	5.2
BCN 100 mm	Moldeada 100 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	66.46	7.7	85.26	9.3	103.27	8.9
T2.5 mm	79.30	8.3	101.93	9.7	125.01	9.9
T4 mm	114.54	9.9	146.91	10.4	184.38	12.3
T6 mm	155.57	10.9	197.87	11.1	249.79	15.1

Tabla 4.21 Resultados de tenacidad (Fibra de acero) Testigos

BCN 150 mm	Testigo 150 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	115.06	16.7	130.18	17.2	192.21	12.9
T2.5 mm	134.32	17.8	153.52	18.7	230.88	13.9
T4 mm	185.94	20.0	216.14	21.4	333.20	16.1
T6 mm	242.14	21.8	285.48	23.1	445.24	17.8
BCN 94 mm	Testigo 94 mm					
	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	43.07	22.4	60.82	12.1	75.90	14.0
T2.5 mm	50.56	24.1	71.83	13.2	90.79	14.7
T4 mm	69.87	26.0	101.99	15.1	131.26	15.5
T6 mm	90.90	26.2	135.68	16.9	176.92	16.2

Tabla 4.22 Resultados de tenacidad (Fibra sintética) Probetas moldeadas

BCN 150 mm	Moldeada 150 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	93.30	15.4	111.68	14.9	141.25	6.0	141.61	3.3
T2.5 mm	104.18	14.0	130.27	15.3	168.24	7.2	168.72	3.9
T4 mm	133.25	11.9	180.20	16.1	241.25	9.9	242.77	6.2
T6 mm	166.57	11.8	236.34	16.9	321.96	12.2	325.36	8.2
BCN 100 mm	Moldeada 100 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	35.58	12.3	44.81	8.2	48.12	12.0	61.83	12.8
T2.5 mm	39.91	12.4	52.76	8.4	56.66	12.4	73.98	13.3
T4 mm	51.86	12.5	74.93	9.1	79.75	13.5	107.91	14.4
T6 mm	66.37	12.6	101.41	9.9	105.78	14.5	146.81	15.2

Tabla 4.23 Resultados de tenacidad (Fibra sintética) Testigos

BCN 150 mm	Testigo 150 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	97.10	14.0	98.02	11.5	106.82	4.2	121.03	5.1
T2.5 mm	106.09	13.8	112.55	11.8	123.64	4.4	142.27	5.6
T4 mm	129.88	13.4	151.98	12.5	169.19	5.3	200.09	6.4
T6 mm	156.36	13.8	196.45	12.9	219.91	6.3	264.66	6.9
BCN 94 mm	Testigo 94 mm							
	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	26.53	9.0	33.25	19.9	41.81	11.3	42.75	7.7
T2.5 mm	29.54	9.2	38.44	20.6	48.88	11.9	50.04	8.0
T4 mm	37.53	10.7	52.66	21.7	67.87	13.6	69.65	8.5
T6 mm	46.47	12.5	69.47	22.1	89.21	15.0	92.07	9.3

La variabilidad de los resultados es diversa. En general se observa que los coeficientes de variación de los resultados obtenidos de las pruebas en probetas moldeadas son menores que los obtenidos en los testigos. Los resultados de los testigos varían de 4.2 a 26.2 % y en las probetas moldeadas de 3.3 a 16.9%.

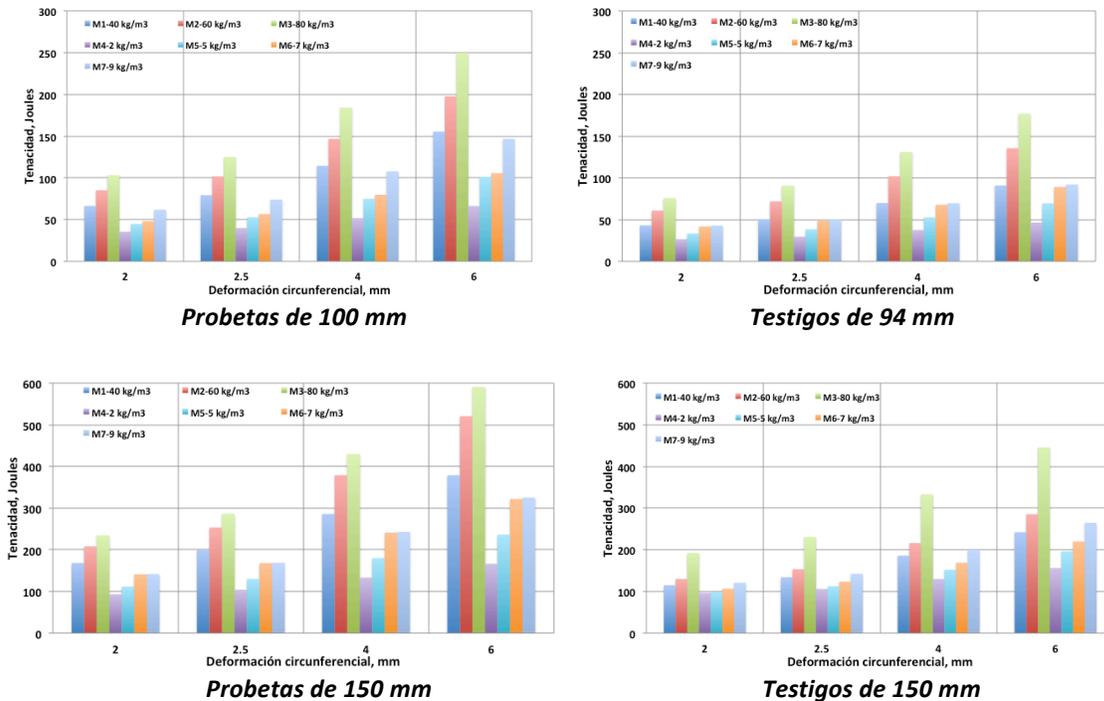


Figura 4.19 Resultados de tenacidad del ensayo Barcelona

Al igual que lo observado en los resultados de las resistencias residuales, la tenacidad aumenta a medida que incrementa el diámetro de la probeta por el efecto de la orientación de las fibras, esto para las probetas moldeadas. Para las probetas testigo, la tenacidad aumenta a medida que disminuyen las fibras cortadas en la probeta. Es por esto que la tenacidad que se obtiene en los testigos es menor que la tenacidad en las probetas moldeadas.

4.5 Ensayo de flexión

4.5.1 Generalidades

Se ensayaron a flexión 42 vigas de 150 x 150 x 600 mm, seis por cada serie. El procedimiento de ensayo de flexión se describe en la norma americana ASTM C1609 “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”.

Este ensayo evalúa el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras usando parámetros derivados de la curva de carga vs desplazamiento. Los resultados se obtienen ensayando una viga cargada a los tercios usando un sistema de ensayo servo hidráulico de lazo cerrado. El sistema de control por lazo cerrado se utiliza para estabilizar la propagación de las fisuras después de que se presenta la carga pico.

Este método de ensayo proporciona la determinación de la resistencia máxima calculada en el primer pico y las resistencias residuales para las flechas especificadas en la norma. También se puede obtener la tenacidad como el resultado del área bajo la curva.

Las 42 vigas se ensayaron a flexión utilizando un arreglo de carga a los tercios similar al especificado en la norma americana ASTM C78 “Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”, a diferencia que en éste se incorporó el sistema de prueba servo controlado de lazo cerrado. Para asegurar que la carga aplicada sea perpendicular a la cara de la viga, sin presentar excentricidad, se utilizan apoyos que consisten en barras de acero. En la figura 4.20 se muestra un esquema del dispositivo de carga para la norma ASTM C78.

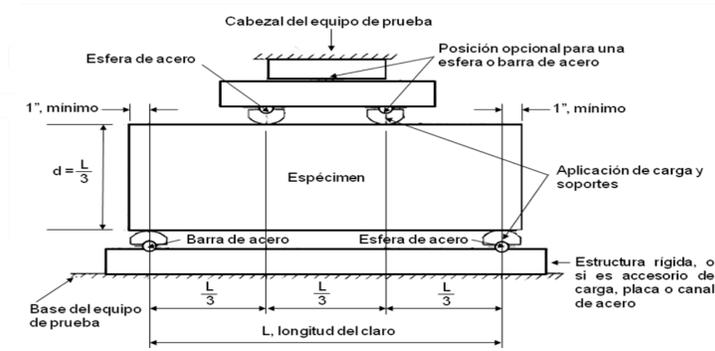
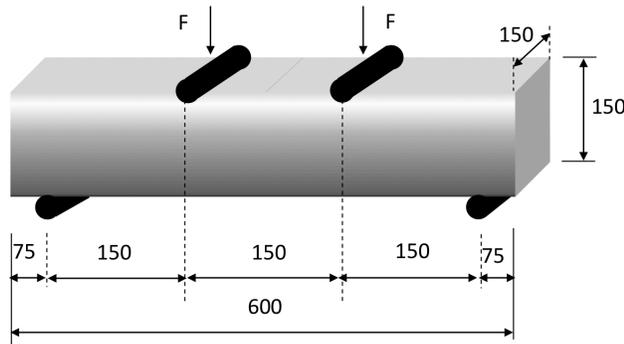


Figura 4.20 Dispositivo de carga a los tercios

Para esta campaña experimental se fabricaron vigas de 150 x 150 x 600 mm con una longitud del claro de 450 mm. En la figura 4.21 se muestra la configuración de carga y las dimensiones de la viga.



dimensiones en mm

Figura 4.21 Esquema de viga de ensayo

Durante la prueba se registró de forma continua la carga y la flecha para obtener la curva carga vs flecha a partir de la cual se determinaron las resistencias residuales para los valores de flechas especificados. La figura 4.22 muestra el comportamiento típico de la curva carga vs flecha de un ensayo de flexión además de los parámetros que se calculan.

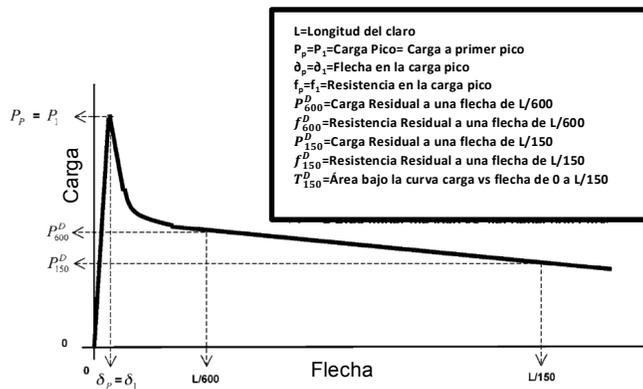


Figura 4.22 Curva carga vs flecha para determinar los parámetros de carga residual

Las pruebas se realizaron en un marco de carga rígido con actuador de 500 kN y un sistema de control con lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento fue de 0.9 mm/min, como lo establece la norma ASTM C1609, la prueba finaliza cuando se alcanza una flecha de L/150 (3 mm).

Las vigas se instrumentaron colocando dos transductores de desplazamiento tipo LVDT de 50 mm de rango al centro del claro, uno en cada cara como se muestra en la figura 4.23.



Figura 4.23 Configuración del ensayo de flexión

La resistencia residual se calculó al valor de las flechas de L/600, L/300 y L/150. Como se mencionó anteriormente, la prueba también permite determinar la tenacidad, para lo cual se emplea el área bajo la curva de carga vs flecha hasta la flecha especificada de L/150.

Para calcular la resistencia a flexión máxima se emplea la siguiente expresión:

$$f_{ct} = \frac{PL}{bd^2} \quad [5.1]$$

donde:

f_{ct} , resistencia máxima

P , carga máxima de rotura

L , longitud del claro entre apoyos

b , ancho de la viga

d , altura de la viga

4.5.2 Modo de falla

El modo de falla característico del ensayo de flexión se origina en el tercio central de la viga. Debido a la configuración, se espera que la falla ocurra al centro. En la figura 4.24 se muestra el modo de falla típico del ensayo de flexión.

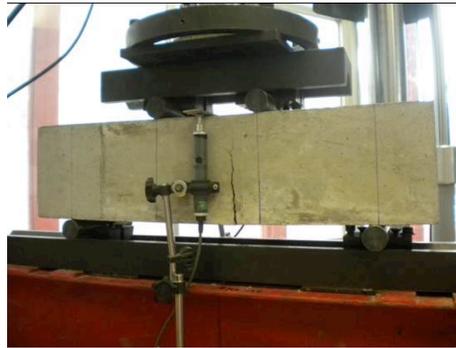
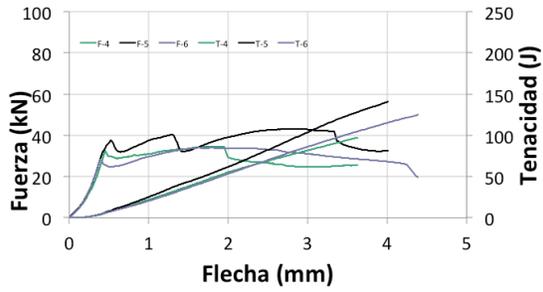


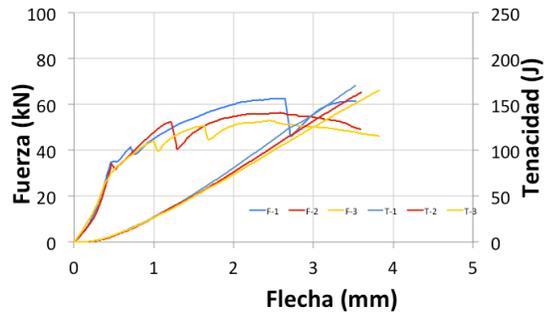
Figura 4.24 Modo de falla típico del ensayo de flexión

4.5.3 Curvas fuerza y tenacidad vs flecha

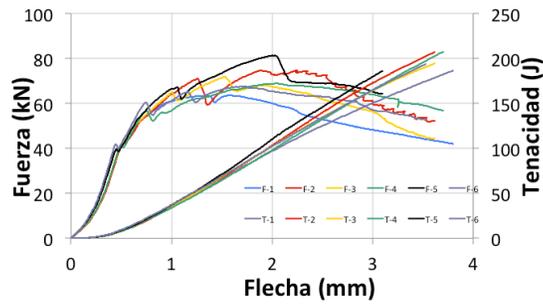
En las figuras 4.25 y 4.26 se muestran las curvas de fuerza y tenacidad vs flecha de los concretos reforzados con fibras de acero y sintéticas. Como se puede observar, las curvas fuerza vs flecha muestran un comportamiento diferente dependiendo del tipo de fibra empleado. En general, las curvas presentan un primer pico, donde se tiene la primera fisura, después registran un descenso y en el caso de la fibra de acero se presenta una recuperación de carga en varios valores de flecha y finalmente hay un descenso de carga y la falla. En el caso del concreto con fibras sintéticas, se presenta el mismo comportamiento para altos consumos de fibras excepto para las de contenido de fibra de 2 y 5 kg/m³ donde no hay recuperación de carga.



Concreto M1-100-DRAMIX RC6535BN-40 kg/m³

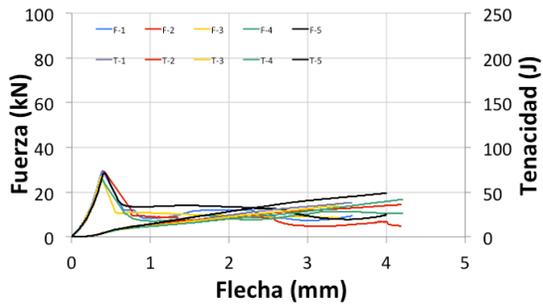


Concreto M2-100-DRAMIX RC6535BN-60 kg/m³

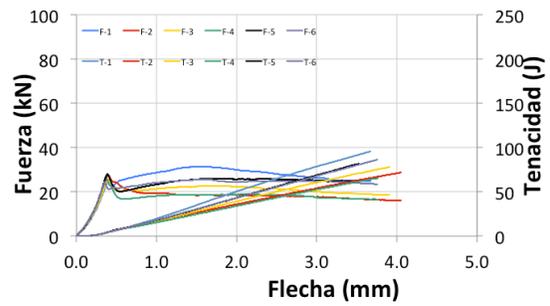


Concreto M3-100-DRAMIX RC6535BN-80 kg/m³

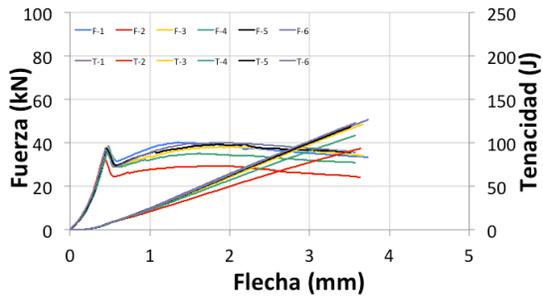
Figura 4.25 Curvas fuerza y tenacidad vs flecha (Fibras de acero)



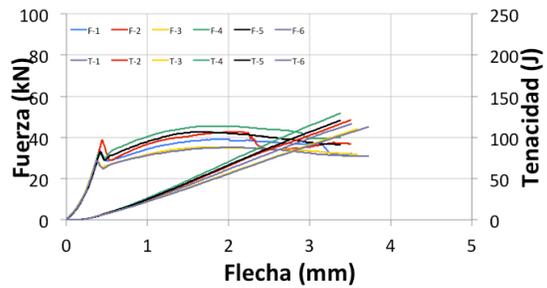
Concreto M4-150-MACMATRIX-2 kg/m³



Concreto M5-150-MACMATRIX-5 kg/m³



Concreto M6-94-MACMATRIX-7 kg/m³



Concreto M7-94-MACMATRIX-9 kg/m³

Figura 4.26 Curvas fuerza y tenacidad vs flecha (Fibras sintéticas)

4.5.4 Análisis de resultados

4.5.4.1 Carga máxima

En las tablas 4.24 y 4.25 se muestran los resultados de carga máxima (P_{max}) y las cargas correspondientes a 0.5, 0.75, 1.50 y 3.0 mm de flecha.

En la figura 4.27 se muestra una comparación de las cargas máximas obtenidas, se observa que la carga máxima de los concretos con fibras de acero es mayor que la de los concretos con fibras sintéticas y ésta aumenta conforme se aumenta el contenido de fibra. La variabilidad de los resultados es alta. Los coeficientes de variación están entre 1.25 y 27.89%. En comparación con lo obtenido en los ensayos Barcelona, los valores son muy superiores.

Tabla 4.24 Resultados de carga máxima (Fibra de acero)

FLEXIÓN	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Carga	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
Pmax	37.21	13.56	57.37	8.58	71.41	8.73
P, 0.5 mm	30.32	19.45	32.96	6.22	41.20	1.25
P, 0.75 mm	29.80	10.87	38.88	1.81	56.33	4.05
P, 1.5 mm	33.20	1.59	50.44	6.42	67.30	6.16
P, 3.0 mm	32.84	27.89	50.76	8.90	60.65	12.0

Tabla 4.25 Resultados de carga máxima (Fibra sintética)

FLEXIÓN	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Carga	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
Pmax	28.29	5.44	27.44	8.16	38.29	6.11	40.13	10.44
P, 0.5 mm	26.12	9.62	21.54	10.72	35.17	12.3	29.01	9.09
P, 0.75 mm	10.98	17.20	21.56	15.26	30.84	8.4	32.26	9.37
P, 1.5 mm	10.31	24.12	23.66	20.62	36.58	11.39	39.07	10.78
P, 3.0 mm	8.22	26.15	21.91	18.27	33.96	12.89	35.87	7.60

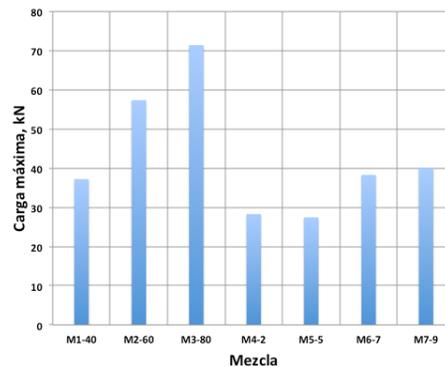


Figura 4.27 Comparación de cargas máximas

4.5.4.2 Resistencia máxima y residual

En las tablas 4.26 y 4.27 se muestran los resultados de resistencia máxima y resistencia residual para los valores de flecha de 0.5, 0.75, 1.5 y 3.0 mm.

Como se observa en la figura 4.28, los resultados de resistencia máxima siguen la misma tendencia que los resultados de carga máxima, a mayor contenido de fibra mayor es la resistencia, además de que los concretos con fibra de acero presentan valores más altos de resistencias.

Los resultados de resistencia residual muestran una variabilidad alta. El coeficiente de variación de los resultados está entre 1.58 y 25.84%. Como se observa en la tabla 4.26 y en la figura 4.29, en los casos de concreto con fibra de acero, se presenta una recuperación y la resistencia es mayor a medida que se incremente el contenido de fibra.

En el caso de los concretos con fibra sintética se presentan dos comportamientos, esto se puede observar en la figura 4.30. Para las mezclas M4 y M5 con contenidos de 2 y 5 kg/m³, respectivamente, la resistencia residual disminuye y no se recupera. Sin embargo, para las mezclas M6 y M7 con contenidos de 7 y 9 kg/m³, se presenta una recuperación después del primer descenso al presentarse la primera fisura.

Tabla 4.26 Resultados de resistencia máxima y residual (Fibra de acero)

FLEXIÓN	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
Fmax	7.58	13.78	11.45	11.57	13.89	8.38
Fr, 0.5 mm	5.88	14.99	7.28	15.73	8.01	1.58
Fr 0.75 mm	6.15	14.94	8.18	11.39	10.96	4.04
Fr, 1.5 mm	7.08	15.99	10.39	12.15	13.09	6.05
Fr, 3.0 mm	6.38	19.98	10.12	17.28	11.79	11.42

Tabla 4.27 Resultados de resistencia máxima y residual (Fibra de sintética)

FLEXIÓN	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %	MPa	C.V. %
Fmax	5.40	5.83	5.37	7.86	7.51	6.02	7.80	10.59
Fr, 0.5 mm	4.99	10.13	4.21	10.00	6.90	12.35	5.64	9.25
Fr, 0.75 mm	2.10	17.32	4.21	14.66	6.05	8.51	6.27	9.55
Fr, 1.5 mm	1.97	24.03	4.62	20.15	7.17	11.27	7.59	10.96
Fr, 3.0 mm	1.57	25.84	4.28	17.78	6.66	12.71	6.97	7.58

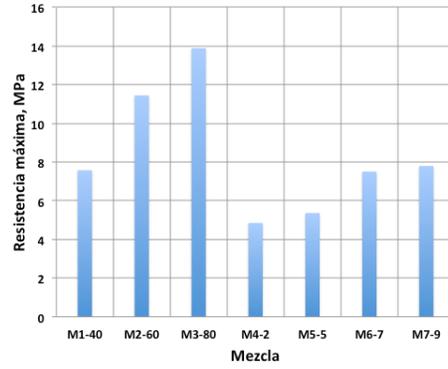


Figura 4.28 Comparación de resistencias máximas

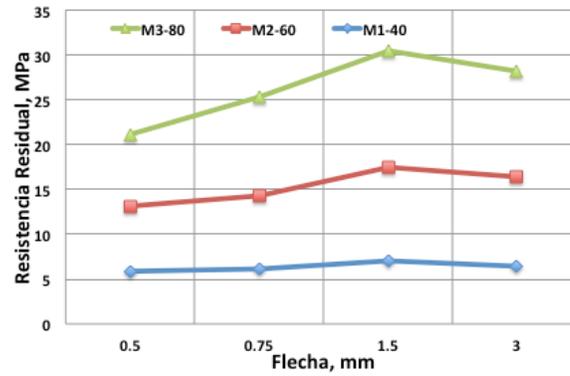


Figura 4.29 Comportamiento de resistencia residual (Fibra de acero)

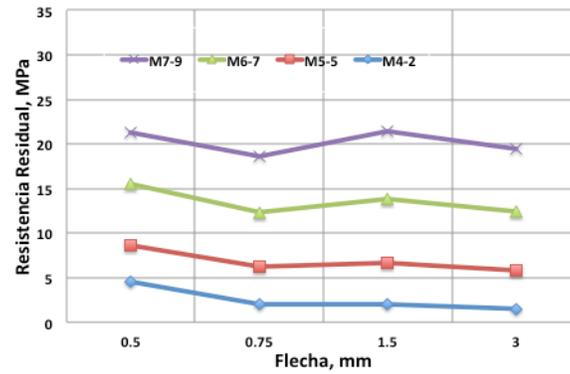


Figura 4.30 Comportamiento de resistencia residual (Fibra sintética)

4.5.4.3 Tenacidad

En las tablas 4.28 y 4.29 se presentan los resultados de tenacidad, calculada como el área bajo la curva carga vs flecha expresada en Joules.

Los resultados presentan alta variabilidad. Los coeficientes de variación están entre 3.40 y 36.10%. Estos valores son significativamente más altos que los que se obtuvieron con los resultados del ensayo Barcelona.

Tabla 4.28 Resultados de tenacidad – Fibra de acero

FLEXIÓN	M1-40 kg/m ³		M2- 60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T, 0.5 mm	9.35	26.76	10.09	36.10	8.28	8.89
T, 0.75 mm	16.85	17.54	20.26	22.54	20.57	5.37
T, 1.5 mm	42.97	14.17	57.71	14.27	67.59	3.40
T, 3.0 mm	95.47	14.04	127.44	5.86	155.91	6.12

Tabla 4.29 Resultados de tenacidad – Fibra sintética

FLEXIÓN	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
Tenacidad	Joules	C.V.%	Joules	C.V.%	Joules	C.V.%	Joules	C.V.%
T, 0.5 mm	5.19	17.25	6.78	3.60	7.25	5.82	7.99	4.25
T, 0.75 mm	9.30	28.35	12.12	5.44	15.47	4.38	15.63	5.71
T, 1.5 mm	18.19	11.58	29.22	12.30	41.26	8.09	42.86	8.59
T, 3.0 mm	32.85	14.44	63.75	15.53	94.90	9.97	100.10	9.14

Los resultados de energía absorbida son mayores en los concretos reforzados con fibras de acero, lo que confirma que las fibras de acero tienen un mejor desempeño para la absorción de energía. Esto se observa en la figura 4.31.

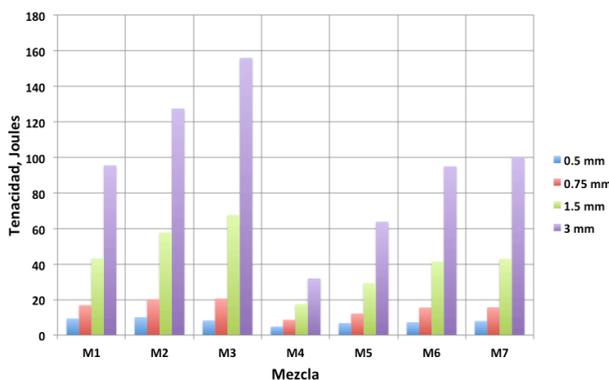


Figura 4.31 Comparación de tenacidad

Capítulo 5. Análisis comparativo: ensayo Barcelona y ensayo de flexión

5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es el de realizar una correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo Barcelona y los del ensayo de flexión de vigas. Para hacer una comparación entre ambos resultados, es necesario plantear equivalencias entre las variables medidas en los ensayos. Las variables que son equivalentes entre sí, son la tenacidad medida desde la carga máxima en el ensayo Barcelona y la energía, el área bajo la curva carga vs flecha, en el ensayo de flexión ASTM C1609.

El ensayo que describe la norma americana ASTM C1609 consiste en el ensayo de una probeta prismática simplemente apoyada de 150 x 150 x 600 mm, como la que se observa en la figura 5.1, aplicando dos cargas puntuales a tercios del claro.

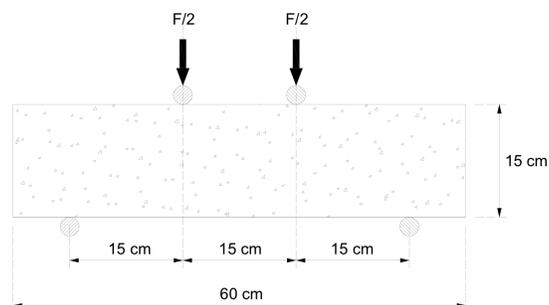


Figura 5.1 Ensayo ASTM C1609

Con el objetivo de realizar la correlación de resultados, se partió de la hipótesis que sugiere que en el ensayo ASTM C1609, la probeta prismática fisura en toda la sección excepto en un punto, como se aprecia en la figura 5.2. Si esta hipótesis fuera cierta, dicho punto tendría una resistencia a la compresión infinita, por lo que se presentaría un giro. Esta hipótesis no es del todo cierta, sin embargo se asume como válida para los alcances de este trabajo.

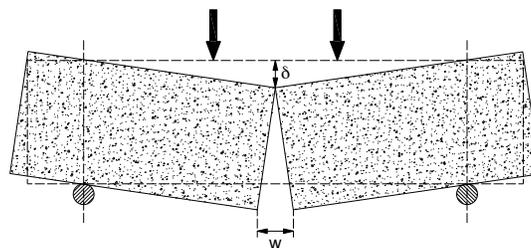
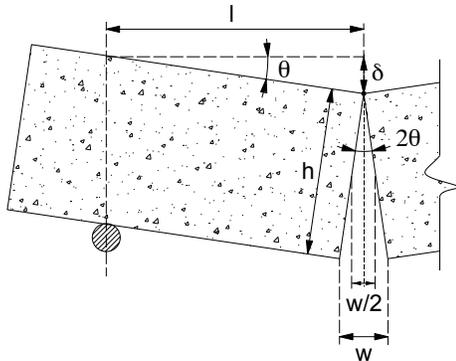


Figura 5.2 Hipótesis de fisuración para el ensayo ASTM C1609

En la figura 5.2 se muestra el modelo de fisura idealizado para el ensayo ASTM C1609, donde δ representa la flecha de la probeta prismática y w , la apertura de fisura de la probeta medida en el ensayo. Se supone que la rotura se presenta en el centro del claro de la viga.

Para realizar la correlación se plantean una serie de relaciones geométricas para lo cual se utilizarán los parámetros que se observan en el detalle de la figura 5.3.



Donde:

h =peralte de la probeta prismática
 l =longitud media entre apoyos
 θ =ángulo de giro de la probeta respecto a la horizontal
 w =apertura de fisura de la probeta
 δ =flecha de la probeta prismática

Para esta campaña experimental:

$h = 15$ cm
 $l = 22.5$ cm

Figura 5.3 Detalle del modo de rotura asumido para el ensayo ASTM C1609

Partiendo del modo de rotura planteado anteriormente, se obtiene que la fisura media (W_{NBN}) que resulta del ensayo ASTM C1609 es de $w/2$. Suponiendo ángulos pequeños se pueden obtener las siguientes relaciones geométricas:

$$\theta = \frac{\delta}{l} \quad [5.1]$$

$$\theta = \frac{w/2}{h} = \frac{W_{NBN}}{h} \quad [5.2]$$

Igualando las expresiones [5.1] y [5.2] y sustituyendo los valores de $h=15$ cm y $l=22.5$ cm, se obtiene la siguiente relación entre la flecha y la fisura media.

$$W_{NBN} = \frac{w}{2} = \frac{h}{l} \delta = \frac{15}{22.5} \delta$$

$$W_{NBN} = \frac{w}{2} = \frac{2}{3} \delta \quad [5.3]$$

A continuación se harán las hipótesis de rotura equivalentes para el ensayo Barcelona. En este ensayo se asume, de manera simplificada, un modo de rotura en 3 planos de fisura radial que van desde el final del disco de carga hasta la parte extrema de

la probeta como se muestra en la figura 5.4. Se asume esta hipótesis debido a que las probetas ensayadas en el laboratorio en general muestran 3 planos de fisura. También se asume que las dos caras de un plano de fisura son paralelas entre sí, siendo este modo de rotura cinemáticamente admisible.

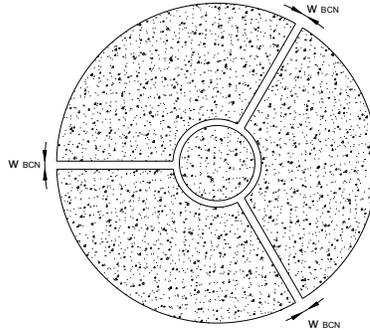


Figura 5.4 Modo de rotura asumido para el ensayo Barcelona

La apertura de fisura total $[\Delta\phi]$ es igual al ancho de fisura medido en cada plano de fisura (W_{BCN}). Asumiendo que los tres planos de fisura radial tienen el mismo ancho de fisura se obtiene la siguiente relación:

$$\Delta\phi = 3 W_{BCN} \quad [5.4]$$

Se sabe que esta condición no se cumplirá siempre, ya que la probeta cilíndrica no se romperá siempre en tres partes. Además de que normalmente el ancho de fisura de los planos es diferente, la primera fisura que se forma en la probeta es la que tiene un mayor ancho de fisura. Sin embargo, con el fin de relacionar los resultados, esta hipótesis se tomará como cierta y no condiciona el desarrollo de la correlación.

Si se plantea la igualdad de las expresiones [5.3] y [5.4] se obtiene una equivalencia entre ambos ensayos, es decir, se iguala el ancho de fisura radial (W_{BCN}) en el ensayo Barcelona con el ancho de fisura medio en el ensayo ASTM C1609 (W_{NBN}):

$$W_{BCN} = \frac{\Delta\phi}{3} = W_{NBN} = \frac{2}{3} \delta \quad [5.5]$$

A partir de esta relación geométrica, la cual se basa en las hipótesis asumidas para los dos ensayos, se obtuvieron las relaciones de equivalencia que se derivan de la apertura de fisura circunferencial $[\Delta\phi]$ obtenida en el ensayo Barcelona y la flecha (δ) del ensayo de flexión ASTM C1609, en la tabla 5.1 se muestran estas equivalencias.

Tabla 5.1 Equivalencias entre el ensayo Barcelona y el ensayo ASTM C1609

Tipo de ensayo	Equivalencia (mm)			
	$\Delta\phi$ (Ensayo Barcelona)	1	2	3	4
δ (Ensayo ASTM C1609)	0.5	1	1.5	2

5.2 Análisis Comparativo entre la tenacidad de los ensayos de Flexión y Barcelona.

La tabla 5.2 muestra los valores de $\Delta\phi$ y δ característicos de comparación para cada ensayo. Para realizar el análisis se determinaron las tenacidades de ambos ensayos para estos valores de $\Delta\phi$ y δ .

Tabla 5.2 Equivalencias entre δ -Flexión y $\Delta\phi$ -ensayo Barcelona

ASTM C 1609	δ, mm	0.5	0.75	1.5	3.0
UNE 83515	$\Delta\phi$, mm	1.0	1.5	3.0	6.0

En este apartado se muestran los valores de tenacidad equivalentes y el ajuste matemático de los datos para así elegir una tendencia entre ambos.

Para obtener las tendencias se asumió que la curva inicia en el origen y siempre es ascendente, es decir, que cuando la fisura es cero, la disipación de energía es nula; y que es creciente porque cuando aumenta la fisuración, la tenacidad no puede disminuir; sólo puede aumentar lentamente.

5.2.1 Probetas moldeadas de 150 mm vs Flexión

En la tabla 5.3 se presentan los valores individuales de tenacidad del ensayo Barcelona y flexión. La figura 5.5 muestra el ajuste de datos para elegir una tendencia.

**Tabla 5.3 Tenacidad de los ensayos Barcelona-150 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609)-
Probetas moldeadas – Fibra acero**

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	-	88.97	7.47	116.04	7.81	119.2
	0.75	1.5	-	120.6	16.97	172.52	19.96	176.17
	1.5	3	-	192.79	52.33	331.81	65.67	335.88
	3	6	-	295	125.74	600.84	150.21	597.37
2	0.5	1	-	103.94	6.82	104.8	7.62	118.07
	0.75	1.5	-	146.72	15.67	148.28	19.54	172.89
	1.5	3	-	265.61	50.25	257.71	67.24	315.9
	3	6	-	445.2	117.66	420.09	151.00	538.91
3	0.5	1	-	100.93	7.47	110.63	7.93	131.44
	0.75	1.5	-	144.11	16.29	162.18	20.09	194.32
	1.5	3	-	258.87	49.45	305.96	68.22	363.64
	3	6	-	447.52	123.66	548.53	144.79	626.47
4	0.5	1	7.07	93.93	-	114.98	7.95	122.46
	0.75	1.5	14.41	130.31	-	169.8	20.06	179.09
	1.5	3	38.23	222.6	-	326	64.59	334.1
	3	6	81.66	365.68	-	601.8	154.92	578.11
5	0.5	1	7.94	92.84	-	106.54	8.87	119.36
	0.75	1.5	16.34	131.08	-	155.92	21.27	176.7
	1.5	3	43.76	231.52	-	285.85	71.01	334.85
	3	6	103.73	383.52	-	496.03	170.00	613.12
6	0.5	1	7.09	87.89	-	108.57	9.49	123.81
	0.75	1.5	13.43	124.84	-	155.91	22.48	179.7
	1.5	3	36.37	212.39	-	275.8	68.81	333.44
	3	6	86.08	335.99	-	456.71	164.56	589.26

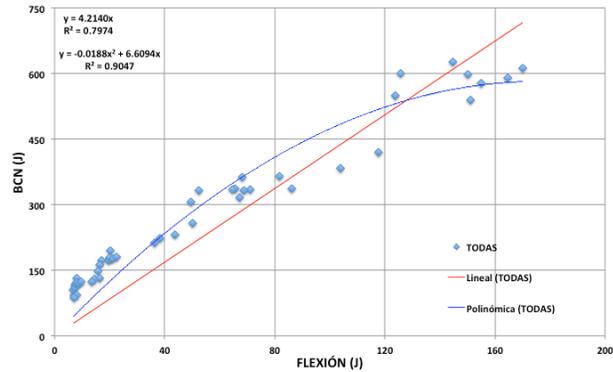


Figura 5.5 Relación entre tenacidades: BCN- 150 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación entre los resultados del ensayo Barcelona y el de flexión es del orden de 4.2 con un coeficiente de correlación de 0.8930. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.9512.

Además, se hizo una correlación entre los resultados promedio para cada mezcla y cada tipo de ensayo. Estos valores se muestran en la tabla 5.4. En la figura 5.6 y la tabla 5.5 se muestran los resultados del análisis de regresión lineal y en la tabla 5.6 y la figura 5.7 se presentan los resultados de la regresión polinómica.

Tabla 5.4 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 150 mm y flexión

M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
7.37	94.75	7.25	110.3	8.28	122.39
14.73	132.94	16.31	160.8	20.57	179.81
39.45	230.63	50.68	297.2	67.59	336.30
90.49	378.82	122.35	520.7	155.91	590.54

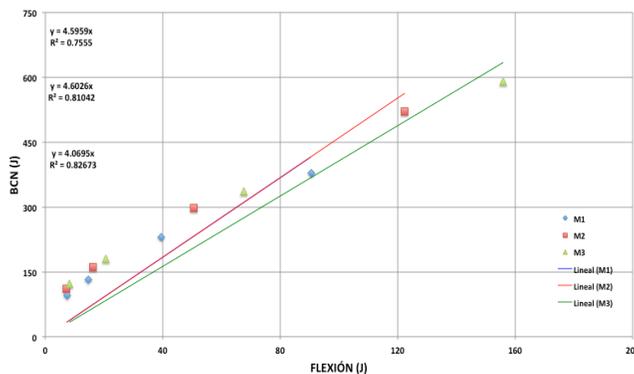


Figura 5.6 Relación entre tenacidades promedio BCN-150 mm vs flexión: Regresión lineal

Tabla 5.5 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
150 mm	M1-40 kg/m ³	4.5959	0.7555	0.8692
	M2-60 kg/m ³	4.6026	0.8104	0.9002
	M3-80 kg/m ³	4.0695	0.8267	0.9092

En los resultados del análisis de regresión lineal, se observa que los valores de energía disipada del ensayo Barcelona son del orden de 4.0695 a 4.6026 del ensayo de flexión. Los coeficientes de correlación de las regresiones lineales varían entre 0.8692 y 0.9092.

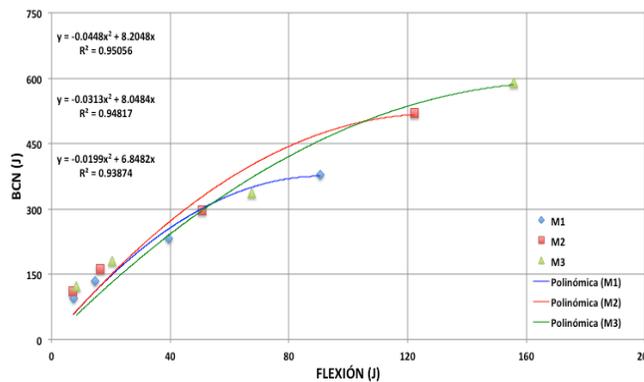


Figura 5.7 Relación entre tenacidades promedio BCN-150 mm vs flexión: Regresión polinómica.

Tabla 5.6 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
150 mm	M1-40 kg/m ³	-0.0448	8.2048	0.9506	0.9750
	M2-60 kg/m ³	-0.0313	8.0484	0.9482	0.9738
	M3-80 kg/m ³	-0.0199	6.8482	0.9387	0.9689

En el caso del análisis de regresión polinómica, los coeficientes de correlación mejoran y son del orden de 0.97 en todos los casos. Es decir, existe una relación de grado 2 entre ambas tenacidades y los resultados experimentales se aproximan mejor a esta formulación.

Finalmente, se hizo la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades, a continuación se muestran los resultados en la tabla 5.7 y la figura 5.8.

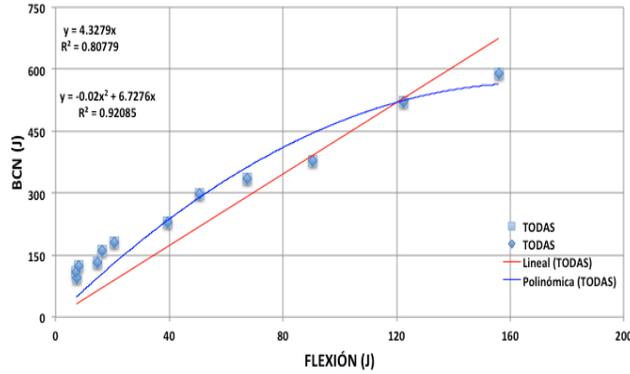


Figura 5.8 Relación entre tenacidades: BCN- 150 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.7 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal.

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
150 mm	M1-M3	-0.02	6.7176	0.9209	0.9596	4.3279	0.8078	0.8988

Como ya se había observado en los resultados anteriores, el coeficiente de correlación que mejor se ajusta es el de la regresión polinómica, con un coeficiente de 0.9596.

La tabla 5.8 se muestran los valores individuales del ensayo Barcelona y el de flexión para fibra sintética y la figura 5.9 contiene las curvas de regresión.

**Tabla 5.8 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 150 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609)-
Probetas moldeadas- Fibra sintética**

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	5.21	0.33	6.46	73.75	7.52	84.67	8.04	84.02
	0.75	1.5	11.31	83.54	12.92	98.7	16.17	119.28	15.50	116.8
	1.5	3	18.36	111.56	35.01	162.1	44.85	212.07	41.93	203.21
	3	6	34.00	154.11	78.57	263.98	101.42	365.81	99.07	336.88
2	0.5	1	4.79	70.29	6.97	65.42	7.96	76.75	8.53	78.15
	0.75	1.5	4.79	86.81	12.41	85.63	14.31	107.87	16.29	110.59
	1.5	3	18.27	127.47	26.72	138.18	35.35	189.19	44.49	198.15
	3	6	29.54	191.41	54.12	220.01	77.53	315.83	100.65	346.3
3	0.5	1	4.32	58.04	6.62	63.91	6.96	80.95	7.77	80.19
	0.75	1.5	9.5	72.25	11.79	82.53	15.73	111.15	14.73	111.21
	1.5	3	17.4	108.93	28.04	129.45	41.65	188.4	39.14	191.93
	3	6	31.52	171.76	60.47	196.54	98.00	302.05	91.00	327.07
4	0.5	1	4.94	0.47	6.75	55.82	7.25	80.54	8.14	83.26
	0.75	1.5	9.82	98.47	10.99	74.11	15.05	106.4	16.77	113.66
	1.5	3	15.56	132.97	24.69	118.95	39.84	167.26	47.88	192.87
	3	6	28.68	186.76	52.61	192.94	90.62	258.59	114.27	316.31
5	0.5	1	6.68	0.05	7.14	74.57	6.94	85.63	7.88	77.96
	0.75	1.5	11.06	90.74	12.32	98.89	15.79	117.86	15.97	107.75
	1.5	3	21.38	113.99	30.29	157.2	42.64	202.44	45.29	178.48
	3	6	40.51	150.22	68.82	250.97	99.86	333.24	105.67	276.98
6	0.5	1	-	43.93	6.73	80.79	6.88	79.14	7.55	83.47
	0.75	1.5	-	57.66	12.27	109.74	15.78	112.92	14.50	115.8
	1.5	3	-	91.14	30.57	180.72	43.21	203.88	38.45	202.43
	3	6	-	145.16	67.89	293.57	102.00	356.25	89.96	348.62

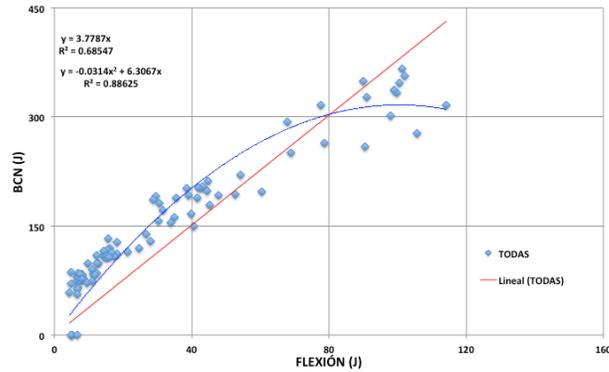


Figura 5.9 Relación entre tenacidades: BCN- 150 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación es del orden de 3.7787 con un coeficiente de correlación de 0.8279. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.9414. Estos coeficientes son más bajos que los que se obtuvieron con los resultados de las fibras de acero.

En la tabla 5.9 se registran los resultados de tenacidad promedio para ambos ensayos. En la tabla 5.10 y la figura 5.10 se muestra la regresión lineal y en forma similar en la tabla 5.11 y la figura 5.11 la regresión polinómica.

Tabla 5.9 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 150 mm y flexión

M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
5.19	28.85	6.78	69.0	7.25	81.28	7.99	81.18
9.30	81.58	12.12	91.6	15.47	112.58	15.63	112.64
18.19	114.34	29.22	147.8	41.26	193.87	42.86	194.51
32.85	166.57	63.75	236.3	94.90	321.96	100.10	325.36

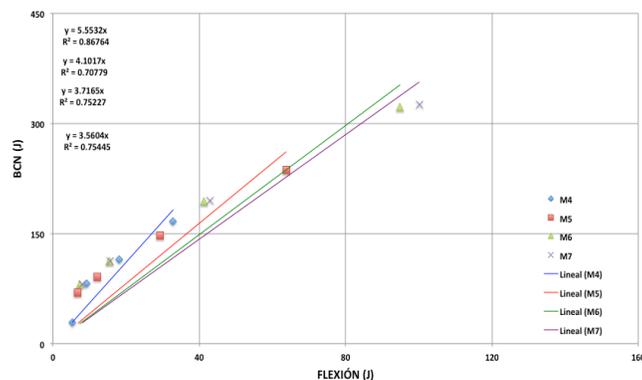


Figura 5.10 Relación entre tenacidades promedio BCN – 150 mm vs flexión : Regresión lineal

Tabla 5.10 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
150 mm	M4-2 kg/m ³	5.5532	0.8676	0.9315
	M5-5 kg/m ³	4.1017	0.7078	0.8413
	M6-7 kg/m ³	3.7165	0.7523	0.8674
	M7-9 kg/m ³	3.5604	0.7544	0.8686

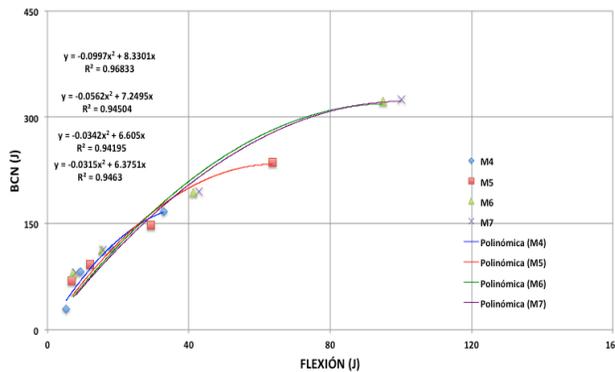


Figura 5.11 Relación entre tenacidades promedio BCN – 150 mm vs flexión: Regresión polinómica.

Tabla 5.11 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
150 mm	M4-2 kg/m ³	-0.0997	8.3301	0.9683	0.9840
	M5-5 kg/m ³	-0.0562	7.2495	0.94504	0.9721
	M6-7 kg/m ³	-0.0342	6.605	0.94195	0.9705
	M7-9 kg/m ³	-0.0315	6.3751	0.9463	0.9728

Se encontró una relación de 3.5 a 5.5 entre los resultados del ensayo Barcelona y flexión con una correlación promedio de 0.88 para la regresión lineal. Para el análisis de regresión polinómico, el coeficiente es de 0.97 en promedio.

Finalmente, se hizo la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades; los resultados se muestran en la figura 5.12 y la tabla 5.12.

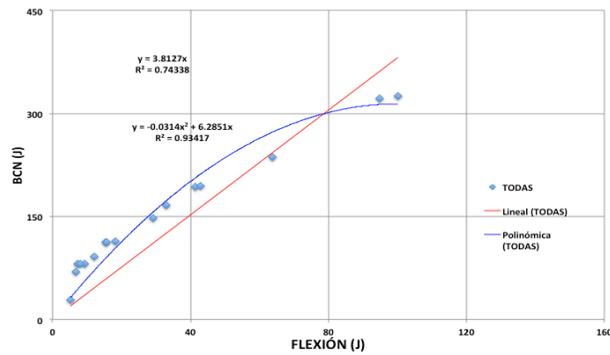


Figura 5.12 Relación entre tenacidades: BCN – 150 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.12 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
150 mm	M4-M7	-0.0314	6.2851	0.9342	0.9665	3.8127	0.7434	0.8622

Se concluye que al igual que en las probetas con fibras de acero, en este caso la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los resultados con un coeficiente de 0.97.

5.2.2 Probetas moldeadas de 100 mm vs Flexión

En la tabla 5.13 y figura 5.13 se muestran todos los resultados de tenacidad y las regresiones, mientras que los valores promedio aparecen en la tabla 5.14.

Tabla 5.13 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 100 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609) – Probetas moldeadas – Fibra de acero

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	-	42.14	7.47	54.98	7.81	54.6
	0.75	1.5	-	57.61	16.97	78.54	19.96	79.27
	1.5	3	-	97.14	52.33	136.19	65.67	142.44
	3	6	-	159.49	125.74	226.44	150.21	243.68
2	0.5	1	-	0.00	6.82	46.67	7.62	51.55
	0.75	1.5	-	0.00	15.67	65.55	19.54	73.42
	1.5	3	-	0.00	50.25	114.08	67.24	126.77
	3	6	-	0.00	117.66	190.73	151.00	205.4
3	0.5	1	-	37.64	7.47	46.67	7.93	50.83
	0.75	1.5	-	51.82	16.29	65.55	20.09	72.93
	1.5	3	-	86.22	49.45	114.08	68.22	129.09
	3	6	-	144.68	123.66	190.73	144.79	208.82
4	0.5	1	7.07	38.85	-	45.63	7.95	59.88
	0.75	1.5	14.41	55.74	-	63.59	20.06	88.12
	1.5	3	38.23	102.11	-	108.79	64.59	166.65
	3	6	81.66	179.61	-	179.52	154.92	301.43
5	0.5	1	7.94	35.08	-	48.13	8.87	56.46
	0.75	1.5	16.34	48.36	-	69.45	21.27	82.38
	1.5	3	43.76	81.75	-	127.3	71.01	152.79
	3	6	103.73	135.04	-	224.01	170.00	271.12
6	0.5	1	7.09	35.67	-	44.96	9.49	57.67
	0.75	1.5	13.43	50.49	-	61.92	22.48	84.52
	1.5	3	36.37	90.43	-	105.53	68.81	156.58
	3	6	86.08	159.05	-	175.79	164.56	268.3

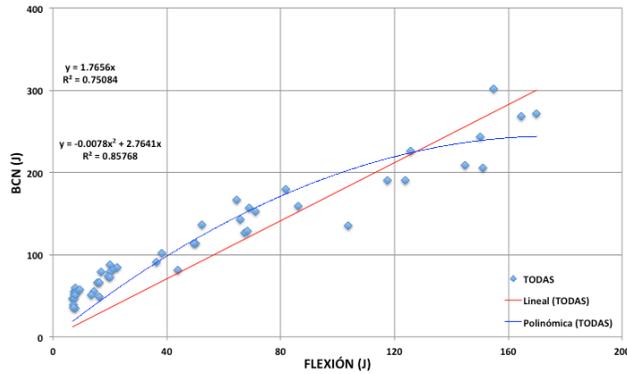


Figura 5.13 Relación entre tenacidades: BCN – 100 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación es del orden de 1.76 con un coeficiente de correlación de 0.87. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.93.

Tabla 5.14 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 100 mm y flexión

M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
7.37	37.88	7.25	47.8	8.28	55.17
14.73	52.80	16.31	67.4	20.57	80.11
39.45	91.53	50.68	117.7	67.59	145.72
90.49	155.57	122.35	197.9	155.91	249.79

En la figura 5.14 y la tabla 5.15 se muestran los resultados de la regresión lineal de las tenacidades promedio de ambos ensayos, en forma similar se muestran los resultados de la regresión polinómica en la figura 5.15 y la tabla 5.16.

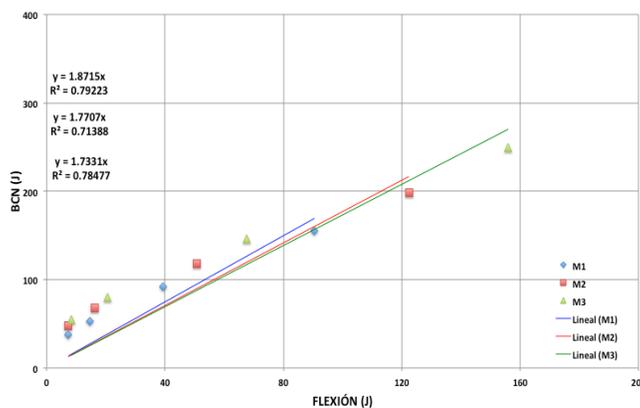


Figura 5.14 Relación entre tenacidades promedio BCN – 100 mm vs flexión: Regresión lineal.

Tabla 5.15 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
100 mm	M1-40 kg/m ³	1.8715	0.7922	0.8901
	M2-60 kg/m ³	1.7707	0.7139	0.8449
	M3-80 kg/m ³	1.7331	0.7848	0.8859

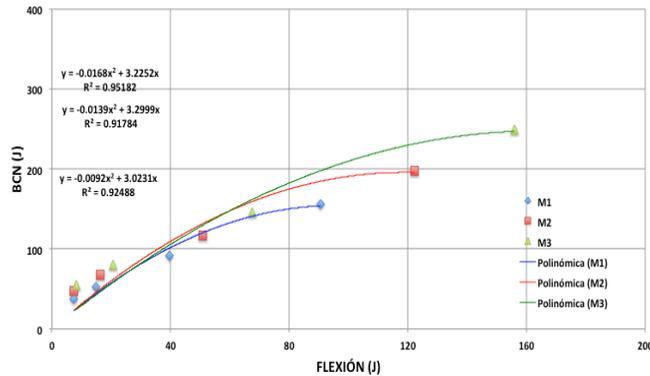


Figura 5.15 Relación entre tenacidades promedio BCN – 100 mm vs flexión: Regresión polinómica.

Tabla 5.16 Resultados del análisis de regresión polinómica.

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
100 mm	M1-40 kg/m ³	-0.0168	3.2252	0.9518	0.9756
	M2-60 kg/m ³	-0.0139	3.2999	0.9178	0.9580
	M3-80 kg/m ³	-0.0092	3.0231	0.9249	0.9617

Considerando el análisis de regresión lineal, se puede establecer una relación de 1.73 a 1.87 entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona y el de flexión. El coeficiente de correlación fue de 0.87 en promedio. Con el análisis de regresión polinómica el coeficiente de correlación es de 0.97.

A continuación, en la figura 5.16 y la tabla 5.17, se muestran los resultados que se obtuvieron utilizando todos los valores promedio de las tenacidades

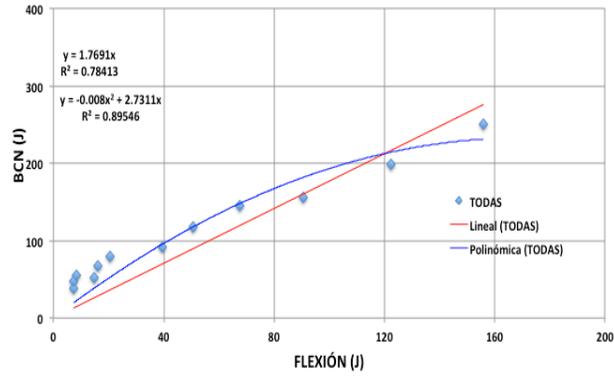


Figura 5.16 Relación entre tenacidades: BCN – 100 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.17 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal.

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
100 mm	M1-M3	-0.008	2.7311	0.8955	0.9463	1.7691	0.7841	0.8855

De estos resultados, se puede concluir que la regresión polinómica es la que mejor se ajusta en todos los casos.

Los resultados individuales de cada ensayo se presentan en la tabla 5.18 y figura 5.17 para el caso de fibra sintética, con las respectivas regresiones lineal y polinómica, mientras que los valores promedio aparecen después en la tabla 5.19.

Tabla 5.18 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 100 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609) – Probetas moldeadas- Fibra sintética

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	5.21	31.4	6.46	25.97	7.52	35.04	8.04	39.4
	0.75	1.5	11.31	38	12.92	34.7	16.17	46.89	15.50	56.23
	1.5	3	18.36	53.67	35.01	58.55	44.85	75.18	41.93	101.54
	3	6	34.00	78.9	78.57	100.42	101.42	120.15	99.07	177.3
2	0.5	1	4.79	25.27	6.97	28.28	7.96	27.35	8.53	32.39
	0.75	1.5	4.79	30.37	12.41	37.69	14.31	38.19	16.29	43.92
	1.5	3	18.27	43.16	26.72	64.36	35.35	68.79	44.49	74.52
	3	6	29.54	65.69	54.12	112.88	77.53	119.16	100.65	125.54
3	0.5	1	4.32	24.32	6.62	27.65	6.96	28.57	7.77	37.48
	0.75	1.5	9.5	29.16	11.79	36.38	15.73	37.68	14.73	51.58
	1.5	3	17.4	41.33	28.04	58.36	41.65	62.24	39.14	89.14
	3	6	31.52	62.86	60.47	96.11	98.00	100.82	91.00	150.58
4	0.5	1	4.94	25.41	6.75	29.86	7.25	29.92	8.14	30.28
	0.75	1.5	9.82	31.15	10.99	40.42	15.05	41.54	16.77	41.89
	1.5	3	15.56	46.05	24.69	67.81	39.84	71.32	47.88	73.45
	3	6	28.68	72.15	52.61	113.7	90.62	117.92	114.27	124.52
5	0.5	1	6.68	25.46	7.14	24.47	6.94	28.01	7.88	37.49
	0.75	1.5	11.06	30.29	12.32	32.04	15.79	36.21	15.97	51.95
	1.5	3	21.38	42.45	30.29	52.91	42.64	56.32	45.29	89.76
	3	6	40.51	64.04	68.82	88.42	99.86	87.57	105.67	156.12
6	0.5	1	-	22.44	6.73	28.46	6.88	26.06	7.55	38.53
	0.75	1.5	-	26.77	12.27	37.14	15.78	34.09	14.50	-
	1.5	3	-	37.58	30.57	60.35	43.21	54.98	38.45	-
	3	6	-	54.56	67.89	96.96	102.00	89.02	89.96	-

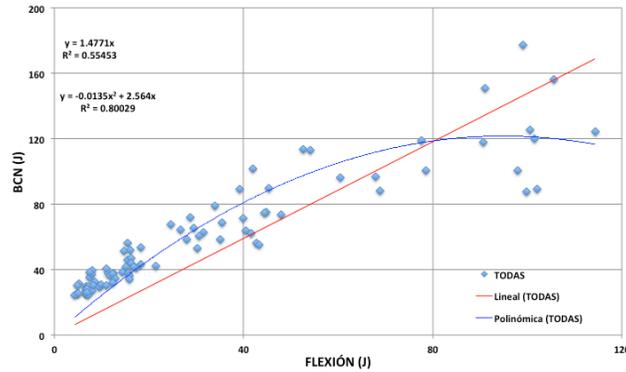


Figura 5.17 Relación entre tenacidades: BCN – 100 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación es del orden de 1.48 con un coeficiente de correlación de 0.7447. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.8946.

Tabla 5.19 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 100 mm y flexión

M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
5.19	25.72	6.78	27.4	7.25	29.16	7.99	35.93
9.30	30.96	12.12	36.4	15.47	39.10	15.63	49.11
18.19	44.04	29.22	60.4	41.26	64.81	42.86	85.68
32.85	66.37	63.75	101.4	94.90	105.77	100.10	146.81

En la figura 5.18 y la tabla 5.20 se muestran los resultados de la regresión lineal de las tenacidades promedio y en la figura 5.19 y tabla 5.21 los resultados de la regresión polinómica.

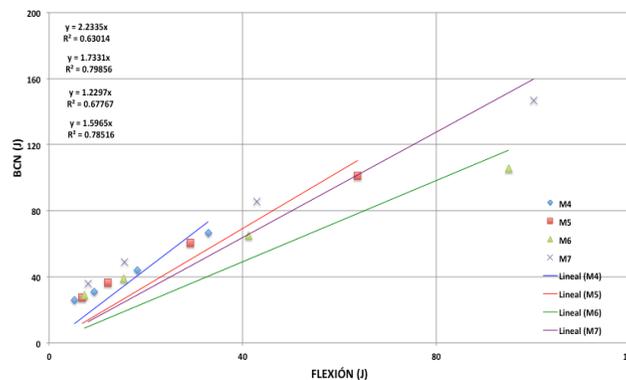


Figura 5.18 Relación entre tenacidades promedio BCN – 100 mm vs flexión : Regresión lineal.

Tabla 5.20 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
100 mm	M4-2 kg/m ³	2.2335	0.6301	0.7938
	M5-5 kg/m ³	1.7331	0.7986	0.8936
	M6-7 kg/m ³	1.2297	0.6777	0.8232
	M7-9 kg/m ³	1.5965	0.7852	0.8861

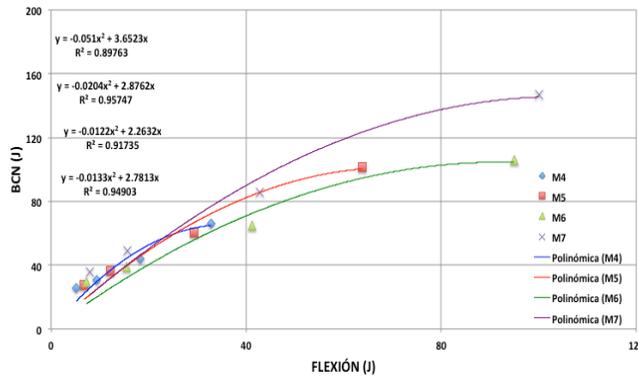


Figura 5.19 Relación entre tenacidades promedio BCN – 100 mm vs flexión: Regresión polinómica.

Tabla 5.21 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
100 mm	M4-2 kg/m ³	-0.051	3.6523	0.8976	0.9474
	M5-5 kg/m ³	-0.0204	2.8762	0.9575	0.9785
	M6-7 kg/m ³	-0.0122	2.2632	0.9174	0.9578
	M7-9 kg/m ³	-0.0133	2.7813	0.949	0.9742

Considerando el análisis de regresión lineal, se puede establecer una relación de 1.23 a 2.23 entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona y el de flexión. El coeficiente de correlación fue de 0.85, en promedio. Con el análisis de regresión polinómica el coeficiente de correlación es de 0.96.

Para finalizar el análisis, se muestran los resultados, en la figura 5.20 y la tabla 5.22, de la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades.

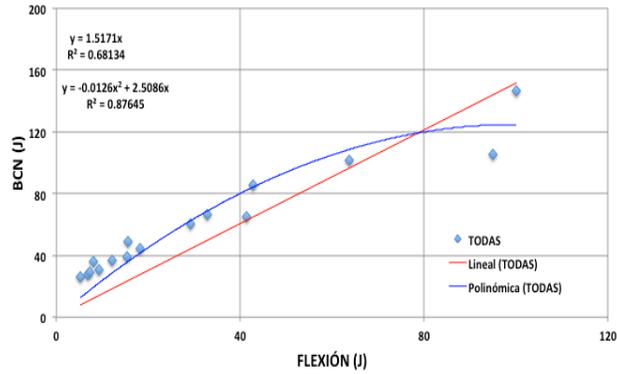


Figura 5.20 Relación entre tenacidades: BCN – 100 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.22 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
100 mm	M4-M7	-0.0126	2.5086	0.8764	0.9362	1.5171	0.6813	0.8254

Se encontró que al igual que en las probetas con fibras de acero, la tendencia que mejor se ajusta a los resultados es la regresión polinómica, con un coeficiente de 0.94.

5.2.3 Probetas testigo de 150 mm vs Flexión

Se presentan los valores individuales de tenacidad del ensayo Barcelona y flexión en la tabla 5.23 y la figura 5.21.

Tabla 5.23 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 150 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609) – Probetas testigo – Fibra de acero

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	-	64.32	7.47	86.57	7.81	107.31
	0.75	1.5	-	85.39	16.97	121.28	19.96	155.54
	1.5	3	-	131.58	52.33	209.11	65.67	279.4
	3	6	-	195.15	125.74	339.11	150.21	459.77
2	0.5	1	-	66.25	6.82	78.06	7.62	117.98
	0.75	1.5	-	89.93	15.67	106.79	19.54	172.24
	1.5	3	-	150.13	50.25	171.35	67.24	318.01
	3	6	-	246.63	117.66	271.05	151.00	563.03
3	0.5	1	-	59.07	7.47	83.24	7.93	110.23
	0.75	1.5	-	76.73	16.29	119.17	20.09	157.81
	1.5	3	-	119.48	49.45	213.58	68.22	275.96
	3	6	-	183.81	123.66	362.35	144.79	444.49
4	0.5	1	7.07	83.56	-	64.44	7.95	85.36
	0.75	1.5	14.41	117.66	-	86.5	20.06	118.63
	1.5	3	38.23	200.81	-	140.06	64.59	198.55
	3	6	81.66	331.5	-	225.77	154.92	318.51
5	0.5	1	7.94	69.9	-	63.56	8.87	105.85
	0.75	1.5	16.34	92.57	-	84.14	21.27	147.55
	1.5	3	43.76	148.38	-	130.44	71.01	253.5
	3	6	103.73	236.01	-	195.58	170.00	419.38
6	0.5	1	7.09	74.34	-	79.9	9.49	105.32
	0.75	1.5	13.43	101.24	-	110.78	22.48	151.92
	1.5	3	36.37	164.83	-	188.83	68.81	276.11
	3	6	86.08	259.75	-	319.01	164.56	466.25

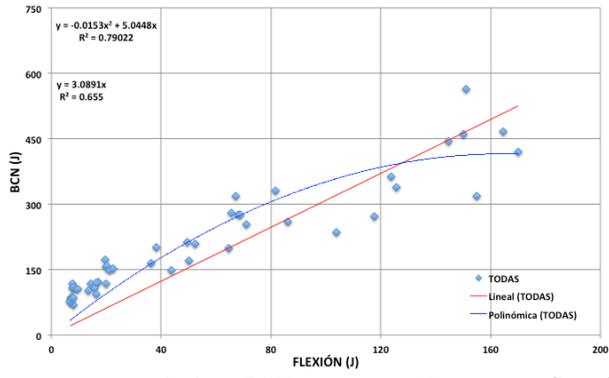


Figura 5.21 Relación entre tenacidades: BCN testigo – 150 mm vs flexión (valores individuales)

Considerando el análisis de regresión lineal, la relación entre los resultados del ensayo Barcelona y el de flexión es del orden de 3.0891 con un coeficiente de correlación de 0.8093. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.8889.

En la tabla 5.24 se presentan los valores de las tenacidades promedio para ambos ensayos. En la figura 5.22 y la tabla 5.25 se muestran los resultados de la regresión lineal de dichos valores y en forma similar, en la figura 5.23 y la tabla 5.26, los resultados de la regresión polinómica.

Tabla 5.24 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona testigo– 150 mm y flexión

M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
7.37	69.57	7.25	76.0	8.28	105.34
14.73	93.92	16.31	104.8	20.57	150.62
39.45	152.54	50.68	175.6	67.59	266.92
90.49	242.14	122.35	285.5	155.91	445.24

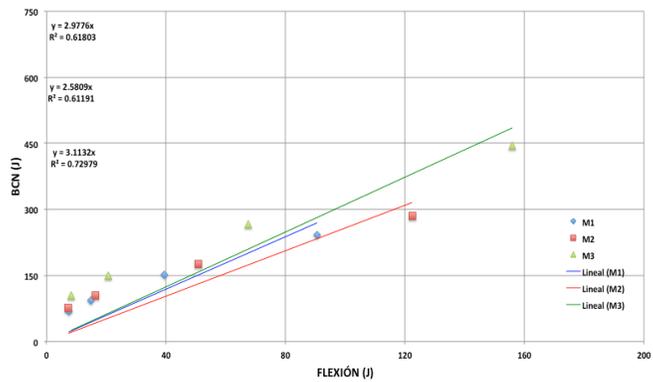


Figura 5.22 Relación entre tenacidades promedio BCN testigo – 150 mm vs flexión: Regresión lineal

Tabla 5.25 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
150 mm	M1-40 kg/m ³	2.9776	0.6180	0.7861
	M2-60 kg/m ³	2.5809	0.6119	0.7822
	M3-80 kg/m ³	3.1132	0.7298	0.8543

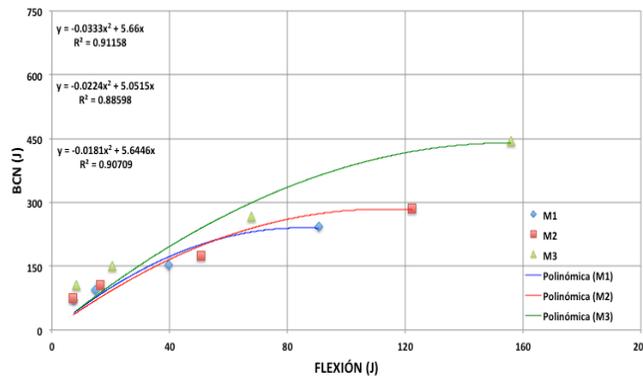


Figura 5.23 Relación entre tenacidades promedio BCN testigo – 150 mm vs flexión: Regresión polinómica.

Tabla 5.26 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
150 mm	M1-40 kg/m ³	-0.0333	5.6600	0.9116	0.9548
	M2-60 kg/m ³	-0.0224	5.0150	0.8860	0.9413
	M3-80 kg/m ³	-0.0181	5.6450	0.9071	0.9524

Considerando el análisis de regresión lineal, se puede establecer una relación de 2.58 a 3.11 entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona y el de flexión. El coeficiente de correlación fue de 0.81 en promedio. Con el análisis de regresión polinómica el coeficiente de correlación es de 0.95.

Finalmente, en la tabla 5.27 y la figura 5.24, se presentan los resultados que se obtuvieron utilizando todos los valores promedio de las tenacidades.

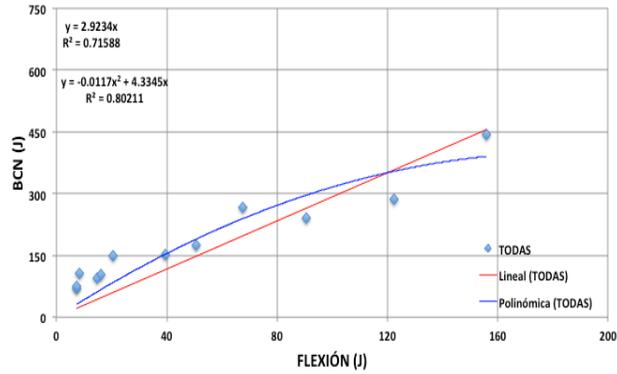


Figura 5.24 Relación entre tenacidades: BCN testigo – 150 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.27 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
150 mm	M1-M3	-0.0117	4.3345	0.8021	0.8956	2.9234	0.7159	0.8461

Con estos resultados, se puede establecer que la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los datos, con un coeficiente de 0.90.

La tabla 5.28 se muestran los valores individuales del ensayo Barcelona y el de flexión para fibra sintética. La figura 5.25 contiene el ajuste de datos para elegir la tendencia que mejor se acomode.

Tabla 5.28 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 150 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609) – Probetas testigo- Fibra sintética

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	5.21	64.69	6.46	73.01	7.52	64.06	8.04	76.44
	0.75	1.5	11.31	79.05	12.92	94.12	16.17	84.18	15.50	98.43
	1.5	3	18.36	106.56	35.01	149.54	44.85	135.26	41.93	153.81
	3	6	34.00	145.57	78.57	237.4	101.42	218.96	99.07	240.39
2	0.5	1	4.79	0.42	6.97	71.32	7.96	73.11	8.53	71.14
	0.75	1.5	4.79	87.27	12.41	90.77	14.31	94.22	16.29	94.16
	1.5	3	18.27	115.47	26.72	138.41	35.35	144.9	44.49	151.75
	3	6	29.54	158.56	54.12	212.59	77.53	221.95	100.65	248.47
3	0.5	1	4.32	57.81	6.62	59.51	6.96	71.83	7.77	69.83
	0.75	1.5	9.5	66.95	11.79	76.5	15.73	89.57	14.73	96.25
	1.5	3	17.4	89.56	28.04	117.95	41.65	135.29	39.14	160.84
	3	6	31.52	124.42	60.47	185.13	98.00	211.92	91.00	258.73
4	0.5	1	4.94	1.12	6.75	61.57	7.25	65.74	8.14	78.01
	0.75	1.5	9.82	98.78	10.99	77.94	15.05	87.01	16.77	106.7
	1.5	3	15.56	128.43	24.69	116.47	39.84	142.08	47.88	177.95
	3	6	28.68	174.78	52.61	175.67	90.62	231.92	114.27	287.63
5	0.5	1	6.68	0.05	7.14	67.23	6.94	70.36	7.88	71.76
	0.75	1.5	11.06	90.74	12.32	84.48	15.79	92.58	15.97	99.47
	1.5	3	21.38	113.99	30.29	127.12	42.64	148.29	45.29	168.43
	3	6	40.51	150.22	68.82	198.37	99.86	236.64	105.67	276.87
6	0.5	1	-	0.58	6.73	55.38	6.88	66.1	7.55	69.06
	0.75	1.5	-	100.3	12.27	70.09	15.78	85.77	14.50	94.29
	1.5	3	-	132.76	30.57	108.54	43.21	131.48	38.45	162.29
	3	6	-	184.62	67.89	169.57	102.00	198.06	89.96	275.88

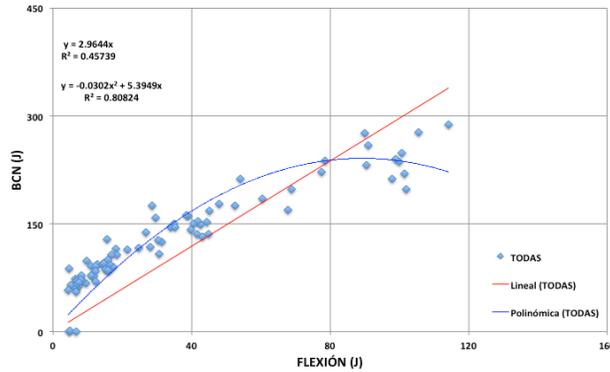


Figura 5.25 Relación entre tenacidades: BCN testigo– 150 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación que existe entre los resultados del ensayo Barcelona y el de flexión es del orden de 2.9644 con un coeficiente de correlación de 0.6763. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.8990.

En la tabla 5.29 se presentan los resultados de las tenacidades promedio de los ensayos. Con estos valores se realizó la regresión lineal y polinómica, lo cual se muestra en la tabla 5.30 y 5.31 y en las figuras 5.26 y 5.27 respectivamente.

Tabla 5.29 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 150 mm y flexión (testigo)

M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
5.19	20.78	6.78	64.7	7.25	68.53	7.99	72.71
9.30	87.18	12.12	82.3	15.47	88.89	15.63	98.22
18.19	114.46	29.22	126.3	41.26	139.55	42.86	162.51
32.85	156.36	63.75	196.5	94.90	219.91	100.10	264.66

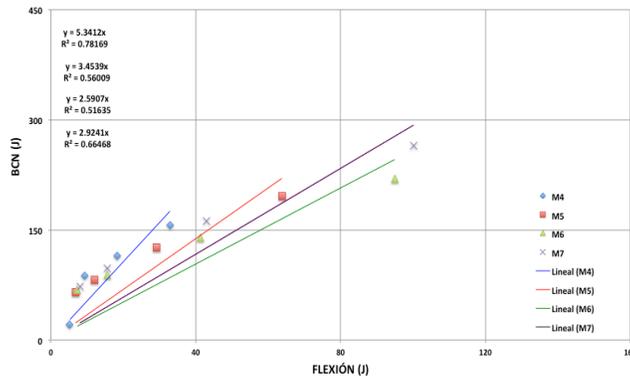


Figura 5.26 Relación entre tenacidades promedio BCN testigo– 150 mm vs flexión: Regresión Lineal

Tabla 5.30 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
150 mm	M4-2 kg/m ³	5.3412	0.7817	0.8841
	M5-5 kg/m ³	3.4539	0.5601	0.7484
	M6-7 kg/m ³	2.5907	0.5164	0.7186
	M7-9 kg/m ³	2.9241	0.6647	0.8153

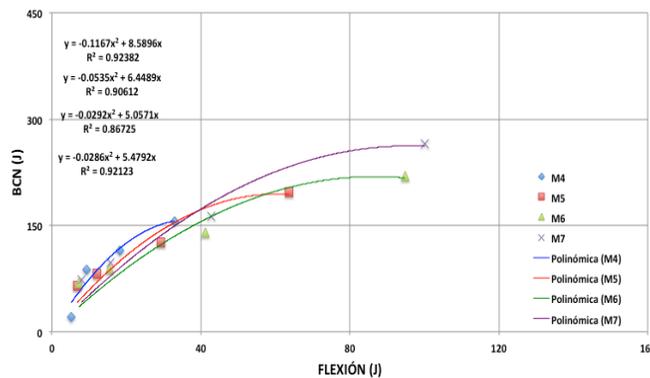


Figura 5.27 Relación entre tenacidades promedio BCN – 150 mm vs flexión: Regresión polinómica

Tabla 5.31 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
150 mm	M4-2 kg/m ³	-0.1167	8.5896	0.9238	0.9611
	M5-5 kg/m ³	-0.0535	6.4489	0.9061	0.9519
	M6-7 kg/m ³	-0.0292	5.0571	0.8673	0.9313
	M7-9 kg/m ³	-0.0286	5.4792	0.9212	0.9598

Con los resultados del análisis de regresión lineal, se puede establecer una relación de 2.59 a 5.34 entre los resultados obtenidos. El coeficiente de correlación fue de 0.79 en promedio. Con el análisis de regresión polinómica el coeficiente de correlación es de 0.95.

También, se hizo la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades, a continuación se muestran los resultados en la figura 5.28 y la tabla 5.32. Se observa que al igual que en las probetas con fibra de acero, la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los resultados.

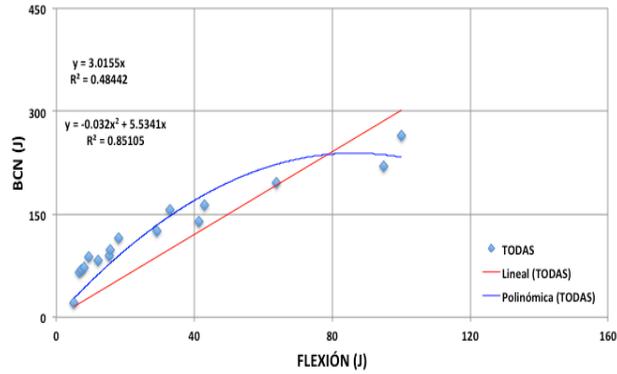


Figura 5.28 Relación entre tenacidades: BCN testigo– 150 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.32 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
150 mm	M4-M7	-0.0320	5.5341	0.8511	0.9226	3.0155	0.4844	0.6960

Se concluye que la regresión polinómica es la que mejor se ajusta con un coeficiente de 0.92.

5.2.4 Probetas testigo de 94 mm vs Flexión

En la tabla 5.33 y la figura 5.29 se presentan los valores individuales de tenacidad y el ajuste de datos.

Tabla 5.33 Tenacidad de los ensayos Barcelona-94 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1509) – Probetas testigo- Fibra acero

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	-	19.96	7.47	32.27	7.81	45.43
	0.75	1.5	-	24.45	16.97	42.21	19.96	64.19
	1.5	3	-	35.49	52.33	67.82	65.67	112.8
	3	6	-	53.37	125.74	110.78	150.21	192.11
2	0.5	1	-	29.52	6.82	37.99	7.62	39.76
	0.75	1.5	-	40.82	15.67	53.92	19.54	55.24
	1.5	3	-	68.83	50.25	95.89	67.24	93.97
	3	6	-	106.92	117.66	164.92	151.00	156.12
3	0.5	1	-	26.16	7.47	33.32	7.93	47.34
	0.75	1.5	-	35.39	16.29	44.47	20.09	68.44
	1.5	3	-	59.03	49.45	70.79	68.22	125.02
	3	6	-	98.62	123.66	110.01	144.79	215.75
4	0.5	1	7.07	29.01	-	37.49	7.95	45.48
	0.75	1.5	14.41	40.92	-	52.31	20.06	64.18
	1.5	3	38.23	71.34	-	90.76	64.59	110.1
	3	6	81.66	114.64	-	155.46	154.92	180.42
5	0.5	1	7.94	21.58	-	37.8	8.87	33.01
	0.75	1.5	16.34	28.48	-	53.63	21.27	46.39
	1.5	3	43.76	44.78	-	89.59	71.01	79.79
	3	6	103.73	70.05	-	143.31	170.00	133.39
6	0.5	1	7.09	29.41	-	33.99	9.49	43.45
	0.75	1.5	13.43	40.1	-	46.9	22.48	61.32
	1.5	3	36.37	65.37	-	79.16	68.81	108.06
	3	6	86.08	101.78	-	129.62	164.56	183.74

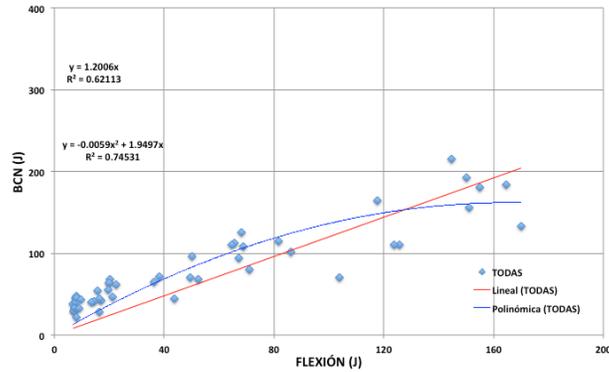


Figura 5.29 Relación entre tenacidades: BCN – 94 mm vs flexión (valores individuales)

Los resultados del análisis de regresión lineal muestran que la relación entre los resultados del ensayo Barcelona y el de flexión es del orden de 1.2006 con un coeficiente de correlación de 0.7881 y el de la regresión polinómica es del orden de 0.8633.

En la tabla 5.34 se muestran los valores de las tenacidades promedio para los ensayos. Utilizando estos resultados se realizó la regresión lineal y polinómica, lo cual se presenta en las tablas 5.35 y 5.36 y en las figuras 5.30 y 5.31, respectivamente.

Tabla 5.34 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 94 mm y flexión

M1-40 kg/m ³		M2-60 kg/m ³		M3-80 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
7.37	25.94	7.25	35.5	8.28	42.41
14.73	35.03	16.31	48.9	20.57	59.96
39.45	57.47	50.68	82.3	67.59	104.96
90.49	90.90	122.35	135.7	155.91	176.92

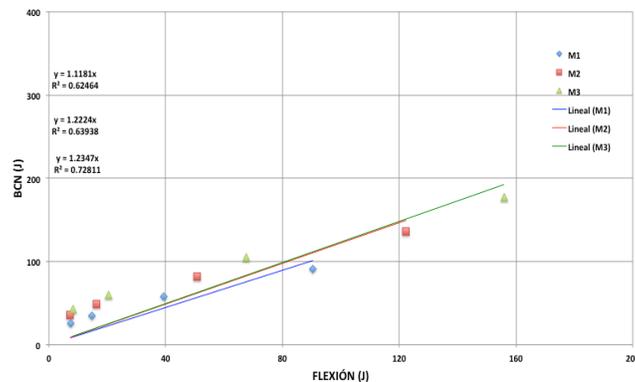


Figura 5.30 Relación entre tenacidades promedio BCN – 94 mm vs flexión: Regresión lineal

Tabla 5.35 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
94 mm	M1-40 kg/m ³	1.1181	0.6246	0.7903
	M2-60 kg/m ³	1.2224	0.6394	0.7996
	M3-80 kg/m ³	1.2347	0.7281	0.8533

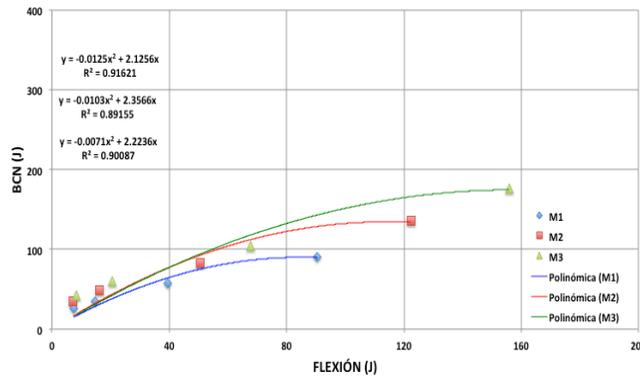


Figura 5.31 Relación entre tenacidades promedio BCN – 94 mm vs flexión: Regresión polinómica

Tabla 5.36 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² +bx
		a	b	r ²	r
94 mm	M1-40 kg/m ³	-0.0125	2.1256	0.9162	0.9572
	M2-60 kg/m ³	-0.0103	2.3566	0.8915	0.9442
	M3-80 kg/m ³	-0.0071	2.2236	0.9009	0.9492

Se encontró que hay una relación de 1.11 a 1.23 entre los resultados del ensayo Barcelona y flexión con una correlación promedio de 0.81 para la regresión lineal. Para el análisis de regresión polinómico, el coeficiente es de 0.95 en promedio.

También, se hizo la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades, a continuación se muestran los resultados en la figura 5.32 y la tabla 5.37. Se observa que la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los resultados.

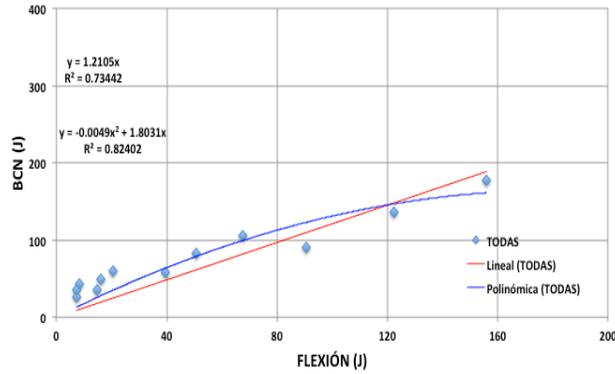


Figura 5.32 Relación entre tenacidades: BCN – 94 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.37 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y = mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
94 mm	M1-M3	-0.0049	1.8031	0.8240	0.9078	1.2105	0.7344	0.8570

Con estos resultados, se puede establecer que la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los datos, con un coeficiente del 0.91.

Para finalizar este análisis, en la tabla 5.38 muestra los valores individuales del ensayo Barcelona y el de flexión para fibra sintética. La figura 5.33 contiene el ajuste de datos para elegir la tendencia que mejor se acomode. Los valores promedio se muestran en la tabla 5.39.

Tabla 5.38 Tenacidad de los ensayos Barcelona – 94 mm (UNE 83515) y Flexión (ASTM C1609) – Probetas testigo – Fibra sintética

ID # Probeta	C1609 δ mm	UNE83515 $\Delta\phi$ mm	M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
			FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
			Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
1	0.5	1	5.21	21.82	6.46	19.41	7.52	25.38	8.04	25.13
	0.75	1.5	11.31	26.26	12.92	24.79	16.17	34.29	15.50	33.87
	1.5	3	18.36	35.61	35.01	38.58	44.85	56.74	41.93	55.52
	3	6	34.00	50.35	78.57	63.22	101.42	94.48	99.07	88.96
2	0.5	1	4.79	17.89	6.97	22.51	7.96	24.60	8.53	26.29
	0.75	1.5	4.79	21.22	12.41	29.85	14.31	33.22	16.29	35.56
	1.5	3	18.27	28.54	26.72	48.18	35.35	55.08	44.49	60.78
	3	6	29.54	38.43	54.12	78.19	77.53	87.83	100.65	102.78
3	0.5	1	4.32	19.81	6.62	27.42	6.96	25.73	7.77	24.42
	0.75	1.5	9.5	23.83	11.79	35.43	15.73	33.62	14.73	32.95
	1.5	3	17.4	32.34	28.04	55.31	41.65	52.31	39.14	54.37
	3	6	31.52	45.13	60.47	86.49	98.00	82.25	91.00	88.71
4	0.5	1	4.94	17.33	6.75	21.22	7.25	29.95	8.14	27.15
	0.75	1.5	9.82	21.17	10.99	27.79	15.05	40.39	16.77	36.71
	1.5	3	15.56	30.54	24.69	43.75	39.84	67.72	47.88	60.35
	3	6	28.68	45.66	52.61	70.38	90.62	112.10	114.27	97.29
5	0.5	1	6.68	19.37	7.14	21.94	6.94	20.74	7.88	24.66
	0.75	1.5	11.06	24.57	12.32	28.54	15.79	28.82	15.97	31.67
	1.5	3	21.38	36.45	30.29	45.98	42.64	46.48	45.29	49.43
	3	6	40.51	55.41	68.82	76.02	99.86	72.52	105.67	78.34
6	0.5	1	-	18.14	6.73	15.92	6.88	26.39	7.55	29.20
	0.75	1.5	-	21.97	12.27	19.59	15.78	34.50	14.50	38.58
	1.5	3	-	30.55	30.57	28.41	43.21	54.90	38.45	61.03
	3	6	-	43.84	67.89	42.51	102.00	86.10	89.96	96.30

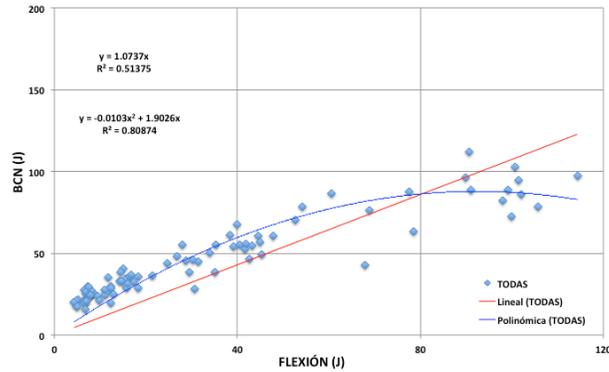


Figura 5.33 Relación entre tenacidades: BCN – 94 mm vs flexión (valores individuales)

Con los resultados del análisis de regresión lineal se observa que la relación entre los resultados del ensayo Barcelona y el de flexión es del orden de 1.0737 con un coeficiente de correlación de 0.7168. En el caso del análisis de regresión polinómico, el coeficiente de correlación es del orden de 0.8993.

Tabla 5.39 Tenacidades promedio de los ensayos Barcelona – 94 mm y flexión (testigo)

M4-2 kg/m ³		M5-5 kg/m ³		M6-7 kg/m ³		M7-9 kg/m ³	
FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN	FLEX	BCN
Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule	Joule
5.19	19.06	6.78	21.4	7.25	25.47	7.99	26.14
9.30	23.17	12.12	27.7	15.47	34.14	15.63	34.89
18.19	32.34	29.22	43.4	41.26	55.54	42.86	56.92
32.85	46.47	63.75	69.5	94.90	89.21	100.10	92.07

En la figura 5.34 y la tabla 5.40 se muestran los resultados de la regresión lineal de las tenacidades promedio y en la figura 5.35 y la tabla 5.41 se presentan los resultados de la regresión polinómica.

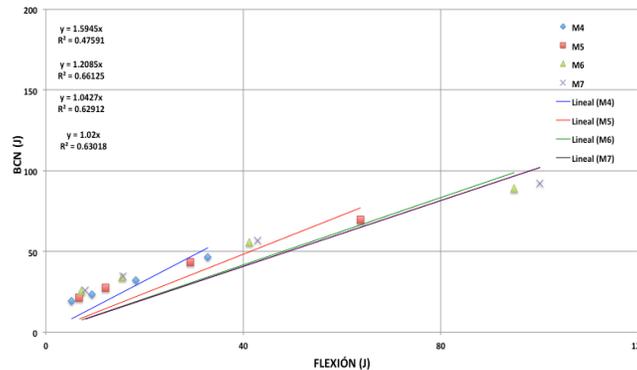


Figura 5.34 Relación entre tenacidades promedio BCN – 94 mm vs flexión: Regresión Lineal

Tabla 5.40 Resultados del análisis de regresión lineal

Probeta	ID	Regresión lineal		y=mx
		m	r ²	r
94 mm	M4-2 kg/m ³	1.5945	0.4759	0.6899
	M5-5 kg/m ³	1.2085	0.6612	0.8131
	M6-7 kg/m ³	1.0427	0.6291	0.7932
	M7-9 kg/m ³	1.0200	0.6302	0.7939

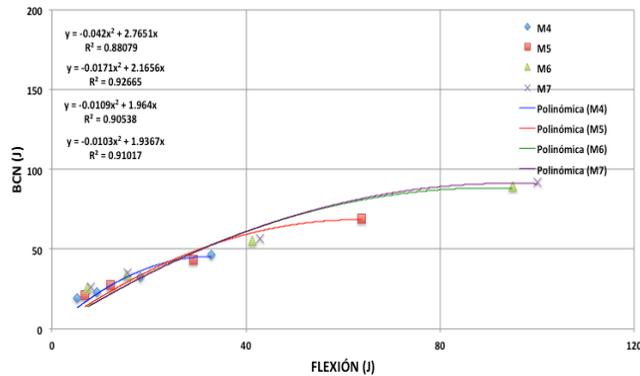


Figura 5.35 Relación entre tenacidades promedio BCN – 94 mm vs flexión: Regresión polinómica

Tabla 5.41 Resultados del análisis de regresión polinómica

Probeta	ID	Regresión Polinómica			y = ax ² + bx
		a	b	r ²	r
94 mm	M4-2 kg/m ³	-0.042	2.7851	0.8808	0.9385
	M5-5 kg/m ³	-0.0171	2.1656	0.9267	0.9627
	M6-7 kg/m ³	-0.0109	1.9640	0.9054	0.9515
	M7-9 kg/m ³	-0.0103	1.9367	0.9102	0.9540

Considerando el análisis de regresión lineal, se puede establecer una relación de 1.02 a 1.59 entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona y el de flexión. El coeficiente de correlación fue de 0.77 en promedio. Con el análisis de regresión polinómica el coeficiente de correlación es de 0.95.

Finalmente, se hizo la relación entre todos los valores promedio de las tenacidades, a continuación se muestran los resultados en la tabla 5.42 y la figura 5.36. Se observa que al igual que en las probetas con fibra de acero, la regresión polinómica es la que mejor se ajusta a los resultados.

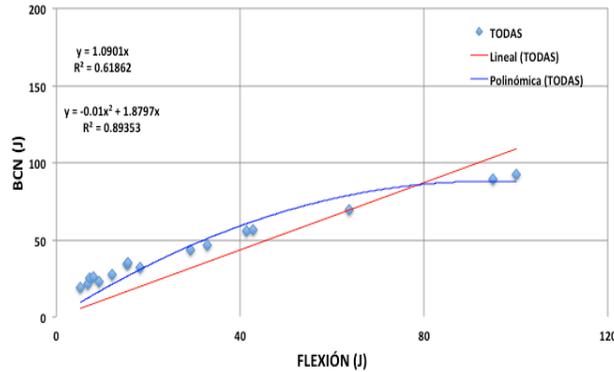


Figura 5.36 Relación entre tenacidades: BCN – 94 mm vs flexión (valores promedio)

Tabla 5.42 Resultados del análisis de regresión polinómica y lineal

Probeta	ID	Regresión Polinómica $y = ax^2 + bx$				Regresión lineal $y=mx$		
		a	b	r^2	r	m	r^2	r
94 mm	M4-M7	-0.0100	1.8797	0.8935	0.9453	1.0901	0.6186	0.7865

Se establece que la regresión polinómica es la que se ajusta a los datos, con un coeficiente de correlación de 0.95.

En las siguientes tablas, de la 5.43 a la 5.46, se resumen los valores promedio de los coeficientes de correlación de los diferentes diámetros y fibras estudiados.

Tabla 5.43 Coeficientes de correlación del análisis de regresión lineal para probetas moldeadas

ID	Regresión lineal $y=mx$			
	Acero		Sintéticas	
	150 mm	100 mm	150 mm	100 mm
Promedio	0.89	0.87	0.88	0.85
CV (%)	2.35	2.85	4.37	5.72

Tabla 5.44 Coeficientes de correlación del análisis de regresión polinómica para probetas moldeadas

ID	Regresión polinómica $y = ax^2 + bx$			
	Acero		Sintéticas	
	150 mm	100 mm	150 mm	100 mm
Promedio	0.97	0.97	0.97	0.96
CV (%)	0.33	0.96	0.63	1.50

Tabla 5.45 Coeficientes de correlación del análisis de regresión lineal para probetas testigo

ID	Regresión lineal $y=mx$			
	Acero		Sintéticas	
	150 mm	94 mm	150 mm	94 mmm
Promedio	0.81	0.81	0.79	0.77
CV (%)	5.02	4.17	9.32	7.23

Tabla 5.46 Coeficientes de correlación del análisis de regresión polinómica para probetas testigo

ID	Regresión polinómica $y = ax^2 + bx$			
	Acero		Sintéticas	
	150 mm	94 mm	150 mm	94 mmm
Promedio	0.95	0.95	0.95	0.95
CV (%)	0.76	0.69	1.45	1.05

De manera general, se puede observar que no existe una clara relación lineal entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona y el de flexión debido a la variabilidad de los resultados, sobretodo en el caso de los ensayos sobre testigos. Los coeficientes de correlación en este caso varían entre 0.77 y 0.81 siendo el más bajo para las fibras sintéticas. Para el caso de probetas moldeadas, los coeficientes de correlación lineal fueron de 0.89 y 0.87 para probetas de 150 mm y 100 mm con fibras de acero respectivamente, y de 0.88 y 0.85 en el caso en que se usaron fibras sintéticas.

Sin embargo, con el análisis de regresión polinómica se puede establecer una clara relación entre ambos ensayos. En este caso los coeficientes de correlación fueron del orden de 0.97 para probetas moldeadas de 150 y 100 mm, y de 0.95 para los testigos de 94 y 150 mm.

Capítulo 6. Conclusiones

En esta investigación se han expuesto los resultados de la campaña experimental que se emprendió con el objetivo de implementar el ensayo Barcelona para caracterizar el comportamiento a tracción del concreto reforzado con fibras. Además de que se evaluó la influencia de otras variables en los resultados y se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el ensayo Barcelona en cilindros y el ensayo de flexión en vigas. En este capítulo se presentan las conclusiones de la investigación.

6.1 Ensayo Barcelona

El ensayo Barcelona demostró ser una alternativa viable para determinar la resistencia a tracción indirecta del concreto reforzado con fibra.

Presenta varias ventajas entre ellas se puede afirmar que es un método de prueba de fácil ejecución al poder realizarlo en una prensa convencional con un procedimiento estándar y utilizando un cilindro de menor peso en comparación con otras geometrías que se emplean para caracterizar el concreto reforzado con fibras, como las vigas o los paneles.

Las probetas ensayadas fallaron de forma típica al presentarse dos y tres fisuras radiales principalmente sobre la cara de carga y otras secundarias. El mecanismo de falla típico se presentó en todas las probetas sin importar su procedencia (moldeada o testigo), tamaño (94, 100 o 150 mm) o tipo de fibra (acero o sintética).

Los resultados del conteo de fibras de acero en probetas moldeadas de 150 mm de diámetro arrojaron que la densidad fue mayor a la dosificada con coeficientes de variación de 3.02 a 5.52%. Caso contrario a las probetas testigo donde la densidad fue menor para las cuantías de 60 y 80 kg/m³ con un coeficiente de variación del orden de 2.51%.

Las curvas carga vs deformación circunferencial muestran un comportamiento típico muy similar para todas las mezclas.

La carga máxima de las probetas no depende de la cantidad o el tipo de fibra. La variabilidad de los resultados es aceptable, está entre 1.2 y 11.1% a excepción de un valor de 16.6%. Las cargas máximas promedio en los cilindros moldeados de 150 y 100 mm de diámetro fueron de 120.15 y 56.95 kN, respectivamente. Para el caso de los testigos de 150 mm la carga máxima promedio fue de 113.8 kN y para los de 94 mm fue de 46.85 kN.

Muy similar a los resultados de carga máxima, los resultados de la resistencia máxima presentan coeficientes de variación comprendidos entre 1.2 y 10.9% , a excepción de un valor superior. Los resultados promedio de resistencia máxima son comparables

para cada diámetro de probeta sin importar tipo y cantidad de fibra. Para las probetas moldeadas de 100 mm de diámetro, la resistencia promedio máxima fue de 2.1 MPa y para las probetas moldeadas de 150 mm fue de 3.0 MPa. Para el caso de las probetas testigo de 94 mm la resistencia promedio máxima fue de 1.9 MPa y para los testigos de 150 mm fue de 2.85 MPa.

Se demostró que es posible utilizar una dimensión de diámetro menor a la que está especificada en la UNE 83515, al comprobar que la relación promedio de probetas testigo (f_{ct94t}/f_{ct150t}) = 0.62 coincide con el producto de las relaciones (f_{ct100m}/f_{ct150m}) y (f_{ct94t}/f_{ct100m}). Esta nueva opción de diámetro resulta en una gran ventaja adicional del ensayo Barcelona frente a otros métodos, ya que permite extraer probetas testigos de un tamaño más práctico, lo cual puede ser útil para el control de calidad de elementos ya existentes o en casos de concreto lanzado.

Los resultados de resistencia residual presentan una variabilidad alta, para probetas moldeadas los coeficientes de variación se encuentran entre 5.4 y 33.2% y en el caso de probetas testigo entre 8.2 y 33.3%. Se comprueba que la resistencia residual aumenta con el incremento de fibras. Para ambos tipos de fibra, la resistencia residual fue mayor en las probetas moldeadas. También se concluyó que las resistencias residuales son mayores en las probetas de mayor diámetro.

Los valores de tenacidad son mayores para las probetas con fibras de acero en todos los casos y aumentan a medida que se incrementa el diámetro de la probeta. Los resultados presentan una variabilidad diversa. El coeficiente de variación de los resultados obtenidos en probetas moldeadas es menor que en los testigos, varía de 3.3 a 16.9%, y en los testigos de 4.2 a 26.2%.

6.2 Ensayo de flexión

Las 42 vigas de 150 x 150 x 600 mm ensayadas en esta investigación fallaron de forma típica al presentar la fisura en el tercio central del claro.

El comportamiento registrado en las curvas carga vs flecha fue el esperado y varió dependiendo el tipo de fibra.

Los resultados de la carga presentan una alta variabilidad que va del 1.25 a 27.89%. Los valores son mayores para los concretos reforzados con fibras de acero y aumenta con el contenido de fibra.

Los valores de resistencia residual siguen la misma tendencia que los de carga y los coeficientes de variación son muy similares, están entre 1.58 y 25.84%. Con estos valores se comprueba lo investigado en la bibliografía sobre los ensayos de flexión en vigas donde se menciona que los coeficientes de variación son del orden del 25%.

Los resultados de tenacidad demuestran que los concretos reforzados con fibras de acero absorben más energía. Los coeficientes de variación se encuentran entre 3.40 y 36.10%, más altos que los registrados con el ensayo Barcelona.

6.3 Análisis comparativo

El parámetro que se utilizó para realizar el análisis comparativo entre el ensayo Barcelona y el de flexión fue la tenacidad. Se hizo una equivalencia entre la apertura circunferencial del ensayo Barcelona y la flecha del ensayo de vigas y se compararon los valores.

Se puede concluir que no existe una clara relación lineal entre los resultados de tenacidad de ambos métodos. Los coeficientes de correlación lineal del análisis son del orden de 0.87 para las probetas moldeadas de 100 y 150 mm de diámetro y del orden de 0.80 para las probetas testigo de 94 y 150 mm de diámetro.

El análisis de regresión cuadrática presenta coeficientes de correlación más adecuados y menos dispersión. El coeficiente de correlación fue de 0.97 para las probetas moldeadas de 100 y 150 mm de diámetro con coeficientes de variación que van de 0.33 a 1.50%. Para las probetas testigo de 94 y 150 mm de diámetro el coeficiente de correlación fue de 0.95 y los coeficientes de variación de 0.69 a 1.45%. Esto comprueba la buena correspondencia que existe entre ambos métodos en lo que se refiere al cálculo de la tenacidad, la cual es muy importante pues evalúa la cantidad de energía absorbida.

6.4 Conclusiones generales

A continuación se presentan de forma resumida las conclusiones generales de esta investigación:

- El ensayo Barcelona es una alternativa viable al ensayo de flexión en vigas con carga a los tercios para determinar la resistencia a tracción indirecta y la tenacidad del CRF.
- Los coeficientes de variación que se obtienen de los resultados del ensayo Barcelona son considerablemente más bajos que los obtenidos del ensayo de flexión en vigas.
- El ensayo Barcelona de doble punzonamiento presenta varias ventajas entre ellas se encuentran:

- Procedimiento sencillo y utiliza equipos convencionales
- Probetas de menor volumen lo que tiene como resultado un ahorro de tiempo y costo, además que resulta más ecológico
- Permite el uso de probetas moldeadas y testigos obtenidos de elemento existentes de gran utilidad para el control de calidad.

Los resultados obtenidos permiten asegurar que el método de prueba ensayo Barcelona es confiable para determinar el comportamiento a tracción indirecta del concreto reforzado con fibra. Se pueden utilizar probetas moldeadas y testigos de 94, 100 y 150 mm de diámetro, siguiendo el protocolo de ensayo establecido en la norma UNE 83515.

REFERENCIAS

- ACI Committee 116 (2000), *Cement and Concrete Terminology*. ACI 116R-00. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 73 p
- ACI Committee 211 (1997), *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI 211.1. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 38 p
- ACI Committee 446 (1991), *Fracture mechanics of concrete: Concepts, models and determination of material properties*. ACI 446.1R.91. American Concrete Institute. 146 p
- Aenor (2008), *UNE 83.515. Concretos con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona*. Madrid, España, 7pp
- Aire C., Molins C. y Aguado A. (2013), *Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta*. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo. Vol 5 No.1, p 19-33
- Aire C., Molins C. y Aguado A. (2013), *Método de doble punzonamiento de tracción indirecta para concreto reforzado con fibra: Ensayo Barcelona*. Investigación y desarrollo (azul), Instituto de Ingeniería. UNAM. SID 684, 126 pp
- ASTM C31/C31M (1995), *Standard Practice for making and curing concrete test specimens in the field*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C39 (1994), *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C78 (1994), *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C138/C138M (1992), *Standard test method for unit weight, yield, and air content (gravimetric) of concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C143/C143M (1990), *Standard test method for slump of hydraulic cement concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C496 (1996), *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C1116/C1116M (2005), *Standard specification for Fiber-Reinforced Concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C1550 (2008), *Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)*. Book of Standards Volume 04.02.
- ASTM C1609 (2010), *Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- Barzin M. (2012), *Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites*. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton. 451 pp
- Bazant Z. (1985), *Mechanics of fracture and progressive cracking in concrete structures. Fracture Mechanics Applied to Concrete Structures*. Martinus Nijhoff, La Haya, Cap 1

- Bernard E. (1999), *Correlations in the performance of fiber reinforced shotcrete beams and panels*. Engineering Report CE9. School of Civil Engineering and Environment. University of Western Sydney. Nepean. Australia
- Bernard E. y Pircher M (2001), *The influence of thickness on performance of fibre reinforced concrete in a round determinate panel test*. Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol 23, No. 1, p 27-33.
- Carmona S., Aguado A., Molins C. y Cabrera M. (2009), *Control de la tenacidad de los concretos reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona)*. Revista Ingeniería de Construcción Vol 24, No. 2 Agosto 2009
- Chen W. (1970), *Double punch test for tensile strength of concrete*. ACI Materials Journal Vol 67 (2), pp 993-995
- Chen W. y Yuan R. (1980), *Tensile strength of concrete: Double punch test*. Journal of Structural Division. ASCE. Vol 106, pp 1673-1693
- Dávila, M. P. (2010), *Efecto de la adición de fibras sintéticas sobre las propiedades plásticas y mecánicas del concreto*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 127 pp
- EFNARC (1996), *European Specification for Sprayed Concrete*. European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry.
- EN 14651 (2005): *Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionally (LOP), residual)*. European committee for standardization. Bruselas, Belgica
- Gopalaratnam V. y Gettu R. (1995), *On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concrete*. International Journal Cement and Concrete Composites. Vol 17, pp 239-254
- Marti P. (1989), *Size effect in double-punch tests on concrete cylinders*. ACI Materials Journal. Vol 86, pp 597-601
- Molins C., Aguado A., Saludes S. y Garcia T. (2007), *New test to control tension properties of FRC*. ECOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunneling (EURO:TUN 2007). Vienna, Austria. August 27-29
- Monsó A., (2011), *Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras para el ensayo Barcelona y de flexotracción*. Tesina de especialidad. Universitat Politecnica de Catalunya, España, 208 pp
- Perepérez B. (1985), *La resistencia a tracción indirecta del hormigón por doble punzonamiento. Influencia del tamaño máximo del árido y la excentricidad*. Informes de la Construcción, Vol. 37, No. 374
- Pujadas, P; Blanco, A; Cavalaro, S; de la Fuente, A, y Aguado, A (2013), *New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement*, *Journal of Civil Engineering and Management (JCEM)*, DOI:10.3846/13923730.2012.756425, 19(2), 259-271
- RILEM TC 50-FMC (1985), *Fracture mechanics of concrete. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. Materials and Structures. V 18. No 106, pp 285-290

- RILEM TC 89-FMT (1990), *Fracture mechanics of concrete. Test methods. Determination of fracture parameters (K_{Ic} and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend test.* Materials and Structures. V 23, pp 457-460
- RILEM TC 89-FMT (1990), *Fracture mechanics of concrete. Test methods. Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete.* Materials and Structures. V 23, pp 461-465
- Saludes S. (2006), *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al concreto reforzado con fibras (ensayo Barcelona).* Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: Ingeniería de la Construcción.
- Saludes S., Aguado A. y Molins C. (2007), *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al concreto reforzado con fibras (ensayo Barcelona).* Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Concreto. 1 ed Barcelona. Publicacions del Departament d'Enginyeria de la Construcció. 338p

ANEXOS

A-1



POZZOLITH® 322N

Aditivo reductor de agua para concreto

USOS RECOMENDADOS

- Concreto pretensado y prefabricado
- Concreto reforzado
- Shotcrete vía húmeda
- Concreto ligero y de peso normal
- Concreto bombeado

DESCRIPCION

POZZOLITH 322N es un aditivo líquido listo para usarse y obtener un concreto más uniforme y de calidad predecible. Cumple con la especificación ASTM C 494 y C494 M para aditivos reductores de agua tipo A, tipo B retardantes, y tipo D aditivos retardantes y reductores de agua.

CARACTERÍSTICAS

- Reduce el contenido de agua requerido para una manejabilidad determinada

CARACTERISTICAS DE DESEMPEÑO

Datos de la Mezcla - POZZOLITH 322 N

Cemento Tipo I, kg/m ³ (lb/yc ³)	237 (400)
Asentamiento, mm(in)	125 (5)
Contenido de aire, %	Concreto sin aire incluido
Temperatura concreto	24°C (76°F)
Temperatura ambiente	23°C (74°F)

Tiempo de fraguado⁽¹⁾

Mezcla	Fraguado	
	Hr:	Min
Concreto normal	5:20	-
POZZOLITH 322N		
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	5:15	-0:05
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	5:40	+0:20
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	6:20	+1:00

Resistencia a Compresión⁽¹⁾

Mezcla	7 días	28 días
Concreto Normal	14.8 MPa (2150 psi), 100 %	21.2 MPa (3070 psi), 100%
POZZOLITH 322N		
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	19.4 MPa (2820 psi) 131%	27.4 MPa (3970 psi) 129 %
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	21.8 MPa (3160 psi) 147 %	28.3 MPa (4100 psi) 134 %
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	22.0 MPa (3190 psi) 148%	30.3 MPa (4390 psi) 143%

(1) Los datos mostrados están basados en pruebas de laboratorio controladas. Se pueden experimentar variaciones razonables de los resultados aquí mostrados como resultado de las diferencias en los materiales de manufactura del concreto y en las condiciones de la obra.

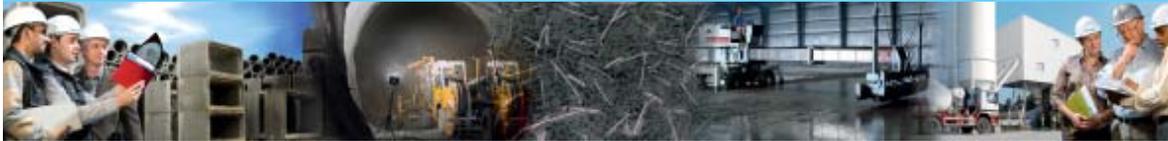
El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto y las condiciones climáticas. Las mezclas de prueba deben hacerse con los materiales de la obra para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y un requerimiento de resistencia determinado.

- Características de fraguado normales

BENEFICIOS

- Mejora la trabajabilidad o manejabilidad del concreto
- Reduce la segregación
- Características de acabado superiores para superficies planas y encofradas
- Aumento de resistencia a la flexión y compresión





DATA SHEET



What is Dramix®?

Dramix® steel fibres, from industry specialist Bekaert, have set a new standard for concrete reinforcement with their unique combination of flexibility and cost-efficiency.

Dramix® is a cold drawn steel wire fibre with hooked ends for optimum anchorage. What you get from Dramix® reinforced concrete is ductility and high load bearing capacity. On top of that, you'll find a quick and easy way to an efficient and cost effective solution.

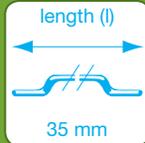
RC-65/35-BN offers you:

✓ Dramix® Easy Mix
Dramix® Easy Mix fibres are engineered in such a way to offer fast and perfect mixing, improved pumpability and optimized fibre distribution. Even complex forms and structures are possible.

✓ Dramix® Hi Perform
Dramix® Hi Perform fibres provide high performance and crack resistance. These are products of choice to create optimal ductility. Dramix® Hi Perform is used for structural, designed applications, in situ, precast or sprayed.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.

GEOMETRY AND PERFORMANCE



14.500 Fibres/kg **Minimum dosage:** 15 kg per m³ (according to CE)
Minimum fibre network: 7,6 km per m³ (for 15 kg/m³)

MATERIAL PROPERTIES

Tensile strength: Rm nom: 1.345 N/mm²
Tolerances: ± 7,5% Avg
Young's Modulus (Emod): ± 210.000 N/mm²

PACKAGING



STORAGE



PRODUCT APPROVALS



SYSTEM APPROVALS



- **CE LABEL:** Dramix® is certified for CE mark system 1: steel fibres for structural use. For detailed info: CE info sheet available on request.
- **ISO 9001:** All Dramix® plants are ISO 9001 certified. The same quality standards are applied.
- **ISO 14001:** Some plants are already ISO 14001 certified. All plants will be ISO 14001 certified before end 2011.

Bekaert will advise on the most suitable fibre for your application.
- For our recommendations on handling, dosing and mixing.
- For composition and safe application and in the frame of Reach art.33.
Please go to: www.bekaert.com/dosingdramix
infobuilding@bekaert.com



3	03 30 00	Product Data
	03 37 13	Cast-in-Place Concrete
	03 40 00	Shotcrete
	03 70 00	Precast Concrete
	03 70 00	Mass Concrete

Description

BASF introduces MasterFiber MAC Matrix, a "best-in-class" synthetic polymeric fiber for use in the most stringent secondary reinforcement applications. MasterFiber MAC Matrix fiber was designed with the contractor in mind - whether they are slab-on-ground contractors or shotcrete contractors.

MasterFiber MAC Matrix is a macrosynthetic fiber and is specifically engineered for use as secondary reinforcement to provide excellent control of plastic shrinkage and settlement cracking. It is specifically designed to provide excellent finishability in shotcrete and slab-on-ground applications, and it gives optimum performance in highly corrosive environments. MasterFiber MAC Matrix provides excellent flexural performance in concrete and is a true replacement for welded-wire reinforcement (WWR), conventional light gauge steel reinforcement and steel fiber. MasterFiber MAC Matrix provides increased flexural toughness and increased impact, shatter and abrasion resistance to help improve the long-term durability and integrity of concrete.

Applications

Recommended for use in:

- Shotcrete
- Composite metal decks
- Industrial and warehouse floors
- Pavement
- Precast
- Residential & commercial slabs-on-ground
- Thin-wall precast
- Tunnel linings
- Wall systems
- Whitetopping/overlays (dosage will vary based on application)

MasterFiber™ MAC Matrix

Macrosynthetic Fiber

Features

- Excellent bond with mortar
- Excellent distribution
- Excellent finishability

Benefits

- Eliminates the need for welded-wire reinforcement (WWR) and conventional steel bars as secondary reinforcement, depending on the application
- Effective tight crack control
- Provides excellent control of plastic shrinkage and settlement cracking
- Reduces production time and overall labor and material costs
- Improves green strengths and permits earlier stripping of forms with less rejection
- Reduces the effects of handling and transportation stresses



Performance Characteristics

Physical Properties

Configuration:	Stick-like fiber
Fiber Type:	Embossed
Material:	100% virgin polypropylene
Specific Gravity:	0.91
Melt Point:	320 °F (160 °C)
Ignition Point:	1094 °F (590 °C)
Available Lengths:	1.9 – 2.1 in. (48 - 54 mm)
Water Absorption:	Nil
Tensile Strength:	85 ksi (586 MPa) min
Alkali Resistance:	Excellent
Chemical Resistance:	Excellent
Color:	White, translucent
Electrical Conductivity:	Low
Average of 20,430 fibers per lb (44,950 fibers per kg) {assuming a 50-mm fiber length, 4000 denier}	

