

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



EFFECTO DEL TAMAÑO DE LA PROBETA EN LA ENERGIA DISIPADA DE LOS HRF
DETERMINADA MEDIANTE EL ENSAYO BARCELONA

Memoria de titulación presentada por
MATIAS IGNACIO FRANCISCO AHUMADA ALVAREZ

Como requisito parcial para optar al título de
Constructor Civil.

Profesor Guía
Sergio Carmona Malatesta.

Junio 2018.

Resumen

En los últimos años, los hormigones proyectados o shotcrete reforzados con fibras (SFR) están siendo ampliamente utilizados para el revestimiento de túneles, especialmente en proyectos hidroeléctricos y faenas mineras. En esos proyectos, los diseños de los sostenimientos se basan principalmente en el método Q-Barton modificado, el que relaciona la calidad del macizo rocoso con la capacidad de absorción de energía requerida del SRF, la que se determina mediante el ensayo de paneles cuadrados, siguiendo las recomendaciones dadas por EFNARC en 1996.

Sin embargo, esta prueba requiere probetas de gran tamaño y peso, que deben ser llenadas durante la proyección del SRF en el túnel. Esto a menudo hace que el panel presente defectos o daños que alteran los resultados, aumentando la dispersión, con coeficientes de variación entre probetas de la misma muestra superior al 20%. Adicionalmente, el uso de paneles para el control de calidad de los SFR no permite verificar la calidad del sostenimiento resultante, así como tampoco volver a ensayar el SRF de un punto dudoso. Debido a esto, diferentes autores han considerado que este ensayo no es adecuado para el control de calidad del SRF en obra, lo que ha motivado al uso del ensayo de tracción indirecta por doble punzonamiento o “ensayo Barcelona (BCN).

El ensayo Barcelona normalizado considera el uso de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura. Sin embargo, algunos espesores del shotcrete son menores a 150 mm.

El tema principal de la presente memoria, es establecer una equivalencia entre la energía disipada por el SFR cuantificada mediante el ensayo Barcelona normalizado y en testigos de 100 mm de diámetro y altura, luego relacionar estos valores con la capacidad de absorción de energía determinada mediante el ensayo de panel cuadrado EFNARC.

Para tal objetivo, se realiza una campaña experimental en la que se ensayaran paneles y testigos de 150 mm de diámetro, con dosificación diseñada para uso en shotcrete reforzada con 4 y 5 kg de fibra por metro cúbico de hormigón. Después de ensayados los paneles, se extraerán probetas de 100 mm de diámetro de las zonas fracturadas de cada uno de ellos, las cuales se someterán al ensayo Barcelona

De esta forma, usando los resultados experimentales, se propondrán equivalencias que permitan relacionar la energía disipada obtenida con el ensayo Barcelona con cilindros de 150 mm y 100 mm y a su vez con los paneles EFNARC.

Abstract

In recent years, projected concretes or fiber reinforced shotcrete (FRS) are being used for floor covering, especially in hydroelectric projects and mining operations. In these projects, the designs of the tunnel support are based mainly on the modified Q-Barton method, which relates the quality of the rock mass with the required energy absorption capacity of the FRS, which is determined by the square panels test, following the recommendations given by EFNARC in 1996.

However, this test requires large size and weight probes, which must be filled during the FRS projection in the tunnel. This often causes the panel to present defects or damages that alter the results, increasing the dispersion, with coefficients of variation between the probes of the same sample higher than 20%. Additionally, the use of panels for the quality control of the FRSs does not allow to verify the quality of the resulting support, or to re-test the SRF of a doubtful point. Due to this, different authors have considered that this test is not suitable for the quality control of SRF in the work, which has motivated the use of the indirect technique test for the double punching of the Barcelona test (BCN).

The Barcelona standardized test considers the use of cylindrical test tubes of 150 mm in diameter and 150 mm in height. However, some thicknesses of the shotcrete are less than 150 mm.

The main theme of this report is to establish an equivalence between the energy dissipated by the SFR quantified by the standardized Barcelona test and in the 100 mm diameter and height controls, then relate these values to the specific energy absorption capacity by means of the square panel test EFNARC.

For this purpose, an experimental campaign was carried out in which panels and test pieces of 150 mm diameter were tested, with dosing designed for use in reinforced shotcrete with 4 and 5 kg of fiber per cubic meter of concrete. After testing the panels, samples of 100 mm diameter were extracted from the fractured areas of each of them, which will be submitted to the Barcelona test

In this way, using the experimental results, equivalences will be proposed that allow to relate the dissipated energy obtained with the Barcelona test with cylinders of 150 mm and 10 mm and in turn with the EFNARC panels.

Glosario

- HRF: Hormigón reforzado con fibras, es un conglomerado de áridos, cemento y agua, al que además se le incluyen fibras, las cuales pueden ser plásticas o metálicas.
- Tenacidad: Energía total que es capaz de soportar un material antes de su fisuración.
- TCOD: Total circumferential opening displacement.
- Ensayo BCN: Ensayo Barcelona o doble punzonamiento, normado por la UNE 83515 of 2010.
- Energía Absorbida: Capacidad de resistir un esfuerzo que posee un material antes de colapsar, corresponde al área bajo la curva esfuerzo–deformación
- EFNARC: Experts for Specialized Construction and Concrete Systems
- Testigo: Probeta extraída de un elemento de hormigón endurecido.
- BCN100: Ensayo Barcelona o doble punzonamiento para testigos o probetas cilíndricos de diámetro 100 mm y altura 100 mm
- BCN150: Ensayo Barcelona o doble punzonamiento para testigos o probetas cilíndricos de diámetro 150 mm y altura 150 mm
- MCC8 (**Multifunctional Control Console 8**): Consola de control multifuncional, equipo utilizado para el desarrollo de los ensayos durante la presente memoria.
- Probeta: Pieza de hormigón elaborada con fibras, la cual es sometida a una serie de ensayos para estudiar su comportamiento frente a estos, determinando por ejemplo propiedades mecánicas.

Tabla de contenido

1	Introducción	7
1.1	Antecedentes	7
1.2	Objetivos	8
1.3	Metodología	8
2	Marco Teórico	9
2.1	Hormigón Reforzado con Fibras	9
2.2	Fibras Sintéticas Barchip 54	10
2.3	Ensayo Barcelona o de doble punzonamiento	11
2.4	Generalización Ensayo Barcelona	13
2.5	Modelo analítico de la generalización del ensayo Barcelona usando el desplazamiento axial para la determinación de la tenacidad de los HRF.	17
2.6	Ensayo de Panel EFNARC	19
2.7	Correlación entre ensayo de panel EFNARC y ensayo Barcelona (BCN)	21
3	Programa experimental	23
3.1	Ensayo Barcelona 100 mm (BCN100)	23
3.1.1	Preparación del testigo	23
3.1.2	Equipos Utilizados	23
3.1.3	Procedimiento de ensayo	25
3.2	Ensayo Barcelona 150 mm (BCN150)	27
3.2.1	Preparación de la probeta	27
3.2.2	Equipos Utilizados	27
3.2.3	Procedimiento Ensayo Barcelona 150 mm	29
3.3	Ensayo Panel EFNARC	29
3.3.1	Equipos Utilizados	29
3.3.2	Procedimiento de ensayo	30

4	Análisis y resultados.....	31
4.1	Ensayo Barcelona 100 mm.....	31
4.1.1	Resultados tenacidad medida con la deformación circunferencial.	31
4.1.2	Resultados tenacidad medida con la deformación axial aplicando eq. 8.	32
4.1.3	Resultado Tenacidad aplicando eq. 9	34
4.2	Ensayo Barcelona 150 [mm].	35
4.2.1	Resultados tenacidad medida con la deformación circunferencial.	35
4.2.2	Resultados tenacidad medida con la deformación axial.	36
4.3	Ensayo Panel EFNARC.....	37
4.3.1	Resultado tenacidad Panel EFNARC.	37
4.4	Equivalencia entre ensayo BCN 100 y BCN 150.....	39
4.5	Equivalencia entre ensayo BCN 150 y Panel EFNARC.	41
4.6	Equivalencia entre ensayo BCN 100 y Panel EFNARC.	42
5	Conclusiones.....	44
6	Referencias.....	45
7	Anexos	46

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción el cual presenta múltiples variables con respecto a su composición. Durante el último tiempo uno de los temas que ha tenido mayor desarrollo en esta área es el hormigón proyectado o shotcrete reforzado con fibras.

La adición de fibras a la composición del hormigón, aporta significativamente mayor ductilidad al material, mejora propiedades como resistencia a tracción, capacidad de resistir gran deformación, resistencia residual post-fisuración, incrementa la capacidad de absorber energía del material, lo cual transforma el hormigón en un material más tenaz. Además las fibras han demostrado tener buenas características como alto módulo de elasticidad, adherencia a la matriz de hormigón, resistencia a tracción, y sin duda deben ser así ya que estas comienzan a hacer su aporte al aparecer las fisuras.

En Chile, los hormigones proyectados o shotcrete reforzados con fibras (SFR) están siendo ampliamente utilizados para el revestimiento de túneles, especialmente en proyectos hidroeléctricos y faenas mineras. En esos proyectos, los diseños de los sostenimientos se basan principalmente en el método Q-Barton modificado, el que relaciona la calidad del macizo rocoso con la capacidad de absorción de energía requerida del SRF, la que se determina mediante el ensayo de paneles cuadrados, siguiendo las recomendaciones dadas por EFNARC en 1996.

Sin embargo, esta prueba requiere probetas de gran tamaño y peso, que deben ser llenadas durante la proyección del SRF en el túnel. Esto a menudo hace que el panel presente defectos o daños que alteran los resultados, aumentando la dispersión, con coeficientes de variación entre probetas de la misma muestra superior al 20%. Adicionalmente, el uso de paneles para el control de calidad de los SFR no permite verificar la calidad del sostenimiento resultante, así como tampoco volver a ensayar el SRF de un punto dudoso.

Debido a esto, diferentes autores han considerado que este ensayo no es adecuado para el control de calidad del SRF en obra, lo que ha motivado al uso del ensayo de tracción indirecta por doble punzonamiento o “ensayo Barcelona (BCN).

Si bien el ensayo por doble punzonamiento en sus inicios era utilizado para determinar la resistencia a tracción indirecta, tras una serie de estudios y modificaciones, se adaptó el ensayo de tracción indirecta pasándose a llamar ensayo Barcelona. Es un ensayo adoptado por la norma europea AENOR 83515 (2010), este método consiste en ensayar a doble punzonamiento probetas o testigos de pequeñas dimensiones, en equipos comunes que se pueden encontrar en cualquier tipo de laboratorio

de ensayo de materiales. Permite determinar la resistencia a primera fisura, la resistencia residual y tenacidad, además tiene como ventajas que los resultados obtenidos presentan una baja dispersión.

Aunque se hayan hecho campañas experimentales extensas que han permitido normalizar el ensayo Barcelona a probetas de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura, aún falta por ampliar ya que algunos espesores del shotcrete son menores a 150 mm, lo que obliga a muestrear usando coronas diamantadas de 100 mm de diámetro nominal, por lo tanto uno de los temas y que además trata este trabajo, es la correlación entre probetas o testigos de diferentes dimensiones.

1.2 Objetivos

Como objetivo general, se pretende encontrar relaciones entre el ensayo Barcelona, en testigos de 100 y 150 mm, además de relacionarlos con el ensayo de Panel EFNARC, de modo que conociendo los resultados de uno de estos, se pueda obtener el equivalente en el otro ensayo, sin la necesidad de aplicar el ensayo.

Como objetivos específicos, se determinara si existe una equivalencia de la tenacidad, en el estado post fisuración entre el ensayo de Panel EFNARC y el ensayo Barcelona para testigos de 100 y 150 mm, además de analizar el coeficiente de variabilidad con el fin de determinar la estabilidad de los ensayos mencionados.

1.3 Metodología

Para el desarrollo de esta investigación y lograr los objetivos planteados, se realiza una búsqueda y recopilación de información relacionada con el hormigón reforzado con fibras, información con respecto al ensayo Barcelona y ensayo de panel EFNARC, estudio de la procedencia y dosificación de los testigos de hormigón. La información recopilada de otras investigaciones, permite simplificar el análisis y aporta significativamente en el alcance de los objetivos de esta memoria.

Posteriormente en el laboratorio de ensayo de materiales de construcción (LEMCO), se procederá realizar la campaña experimental, con el fin de obtener los datos necesarios para poder realizar la investigación. Ya ensayados los testigos, se realiza la parte final de la investigación, que consiste en el análisis de resultados con el fin de obtener una correlación entre los dos tipos de ensayos.

Mediante análisis, métodos matemáticos, análisis de tablas y gráficos, se podrá encontrar si existe alguna equivalencia entre los ensayos en investigación.

2 Marco Teórico

2.1 Hormigón Reforzado con Fibras

El hormigón reforzado con fibras es hormigón compuesto por cemento hidráulico como aglomerante, agregados finos o, agregados finos y gruesos, agua y fibras discontinuas las cuales pueden ser de diferentes materiales, que para el caso del presente estudio serán de polipropileno, esto según la definición del ACI-American Concrete Institute.

La unión de las fibras sintéticas, disponibles comercialmente, dentro de la matriz es exclusivamente mecánica, por consecuencia no hay reacción química entre las fibras y los demás componentes del hormigón. Esta unión depende de factores tal como el módulo de elasticidad, relación de Poisson del material utilizado, al igual que la geometría de la fibra y si se trata de microfibra o macro fibra.

Las fibras sintéticas han demostrado ser efectivas a temprana edad del hormigón, cuando la matriz aun es débil, frágil y de bajo módulo de elasticidad. Para el hormigón maduro, la tenacidad depende del volumen de fibra utilizado y la durabilidad de la fibra en la matriz.

Dependiendo del uso, diferentes fabricantes sugieren diferentes cantidades de volumen y geometría de la fibra. El criterio de aceptación está prescrito en la norma ASTM Standard Specification. C1116.

Las propiedades más significativas del HRF es la mejora de la tenacidad (capacidad de absorber energía post-agrietamiento), resistencia al impacto y resistencia a la fatiga por flexión. Por esta razón los HRF tienen múltiples aplicaciones como por ejemplo losas que deben soportar altas cargas e impactos, en túneles, reparaciones pero principalmente en estabilización de taludes o soporte del suelo, en las cuales se utiliza con el método de proyectar hormigón, que por lo demás es el tema que se trata en el presente estudio.

2.2 Fibras Sintéticas Barchip 54

La fibra Barchip 54 que ofrece la compañía Elasto Plastic, es una fibra de origen sintético compuesta básicamente por polipropileno virgen. La fibra Barchip 54 es catalogada como fibra estructural, siendo apto su uso para mortero, hormigón y grout. Es una fibra elaborada y optimizada para su uso en hormigón proyectado (Shotcrete).

Tabla 1- Propiedades Fibra BarChip 54

Propiedades	
Resina	Olefina modificada
Largo	54 [mm]
Resistencia a la tracción	6400[kg/cm ²]
Superficie	Relieve continuo
Cantidad de fibra	37000 [fibras/kg]
Densidad relativa	0,90 - 0,92
Módulo de elasticidad	10[GPa]
Punto de fusión	159°C – 179°C
Punto de ignición	Sobre 450°C

Con respecto a la dosificación EPC, señala que la dosis de fibra Barchip 54 puede variar entre 3 a 6 Kg por metro cubico de hormigón. En el presente estudio, las dosis utilizadas son entre 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón.

Vista en detalle de la fibra BarChip 54



Figura 1- Fibra BarChip 54

2.3 Ensayo Barcelona o de doble punzonamiento

El ensayo Barcelona es un ensayo de tracción indirecta desarrollado por Aguado et.al (2005), basado en el ensayo de doble punzonamiento propuesto por Chen (1970), adoptado por la norma europea UNE 83515 (2010), en el cual un cilindro es sometido a compresión mediante dos punzones cilíndricos de acero colocadas concéntricamente en las caras superior e inferior de la probeta de hormigón, como se muestra en la figura, con una relación entre diámetros de punzones ($2a$) y probeta ($2b$) de 1:4 ($2a/2b=0.25$). Por otro lado, la probeta debe tener un diámetro ($2b$) igual a su altura ($2h$).

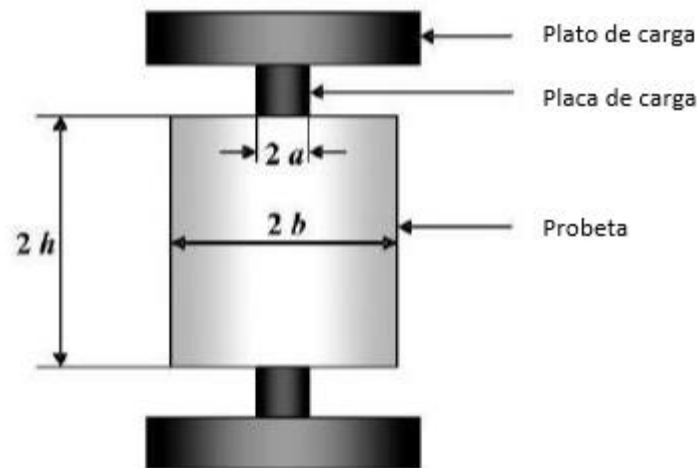


Figura 2- Forma Ensayo Barcelona

La probeta de hormigón es de 150 mm de diámetro y de altura, la relación entre los diámetros de los punzones y la probeta es de un cuarto ($d=37,5$ mm).

Durante el ensayo, la carga aplicada sobre el cilindro de hormigón a través de los punzones de acero, produce una zona cónica de compresiones bajo estas, lo que provoca un incremento del diámetro del cilindro produciendo esfuerzos de tracción perpendiculares a las líneas radiales de la probeta. Cuando el estado tensional sobrepasa la resistencia del hormigón se produce la fractura del hormigón.

Debido a la concentración de tensiones en planos concéntricos, en el momento de la rotura se producen grietas radiales perpendiculares a este campo de tensiones. Las grietas se propagan desde el centro de la probeta, específicamente desde el borde formado por el punzón de acero hacia el manto del cilindro. El modo de falla típico presenta tres planos de fractura radial, sin embargo en otras ocasiones se puede encontrar planos de falla entre dos y cuatro.

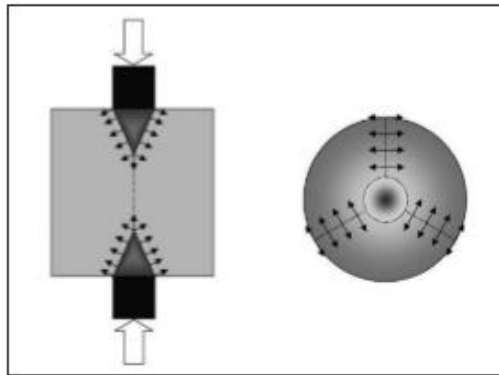


Figura 3- Distribución de Tensiones Ensayo Barcelona.

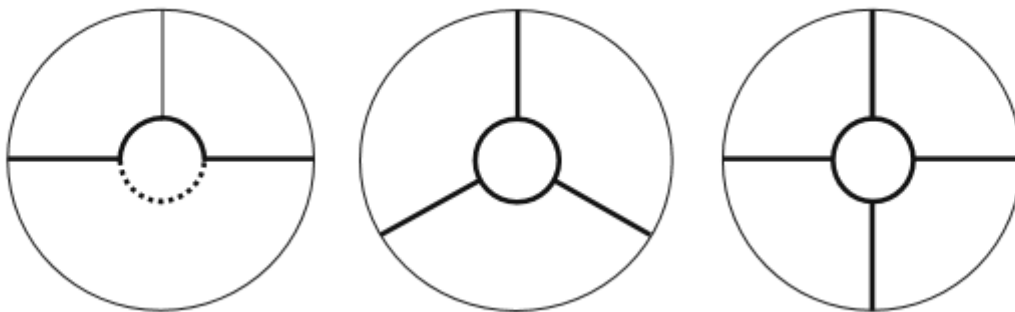


Figura 4- Modo de fractura ensayo Barcelona.

Una vez que la probeta de hormigón se fractura y aparecen las grietas, la expansión circunferencial medida es el desplazamiento total de abertura de las grietas (TCOD), y la tenacidad de los HRF se puede calcular como:

$$E(TCOD) = \int_0^{TCOD} P(TCOD)d(TCOD) \quad (1)$$

Donde E (TCOD) es la energía medida a un valor dado de TCOD, que está directamente relacionada con la tenacidad determinada mediante la prueba de resistencia a la flexión de la norma belga NBN B 15-238.

El procedimiento del ensayo Barcelona permite realizar el ensayo en una prensa convencional para rotura de probetas a compresión, además el volumen de cada probeta o testigo es considerablemente menor en comparación con otros métodos en los cuales se ocupan paneles o vigas, lo que conlleva a

un menor consumo de material y facilidad de manejo de la probeta, lo que permite un montaje más ágil y con menor número de personal. Las probetas utilizadas no necesitan de ningún tratamiento anterior (refrentado), el único requisito es que las caras en las cuales se aplica la carga sean paralelas entre sí, y ortogonales al eje de la probeta. Además de poder realizar el ensayo en testigos extraídos de estructuras existentes. Todo lo anterior hace del ensayo Barcelona un método con ventajas comparativas relevantes.

Durante la prueba, la carga aplicada y el TCOB a la mitad de la altura de la probeta, deben registrarse continuamente, esto permite determinar la carga máxima, que corresponde a la resistencia de la probeta y evaluar la tenacidad como la integral de la carga en función de la apertura circunferencial.

2.4 Generalización Ensayo Barcelona

El ensayo Barcelona, como se mencionó anteriormente, fue adoptado por la norma europea UNE-83515, Hormigones con fibra-Determinación de la resistencia a figuración, tenacidad y resistencia residual a tracción, aprobada por AENOR (2010).

Según esta norma las condiciones generales para la ejecución del ensayo son las siguientes:

- Diámetro de la probeta (d): 150 mm.
- Altura de la probeta (h): 150 mm.
- Diámetro del disco de carga (a): 38 mm (equivalente a d/4).
- Velocidad de desplazamiento del actuador: 0,5 mm/min.
- Control del ensayo a través de la deformación circunferencial del cilindro.

Para el control de la deformación circunferencial del cilindro, es necesaria una cadena extensométrica circunferencial, la que por motivos económicos no se encuentra en todos los laboratorios de ensayo de materiales, por lo tanto la ejecución del ensayo Barcelona sería limitado.

Debido a lo anterior, y con el objetivo de simplificar, sistematizar y expandir el ensayo Barcelona, es que Carmona et al. (2011) Reemplaza la medición del TCOB por el desplazamiento axial (dA) medido entre las cuñas de carga, con el que se calcula la tenacidad (T) de los hormigones reforzados con fibra, como se mencionó anteriormente la tenacidad es la capacidad que tiene un material de absorber energía y se puede cuantificar como el trabajo realizado por la carga durante el proceso de rotura mediante la expresión:

$$T(\delta_A) = \int_0^{\delta_A} P \delta x \quad (2)$$

Dónde:

P: Carga aplicada

δ_A : Desplazamiento axial en el estado post-fisuración experimentado por la carga.

Al proponer esta generalización del ensayo Barcelona, los autores establecieron la relación que existe entre el desplazamiento axial y el TCDO en el régimen agrietado de un cilindro sometido a doble punzonamiento.

Al estar una muestra cilíndrica de hormigón sometida a doble punzonamiento, se forman 2 conos de compresión bajo las cuñas de carga, los que una vez agrietada la muestra se mueven verticalmente, provocando un aumento de diámetro, y en consecuencia, el perímetro de la muestra. De acuerdo a los parámetros de la figura 5, el aumento de perímetro (Δp) queda definido por la siguiente ecuación:

$$\Delta p = 2\pi\delta b \quad (3)$$

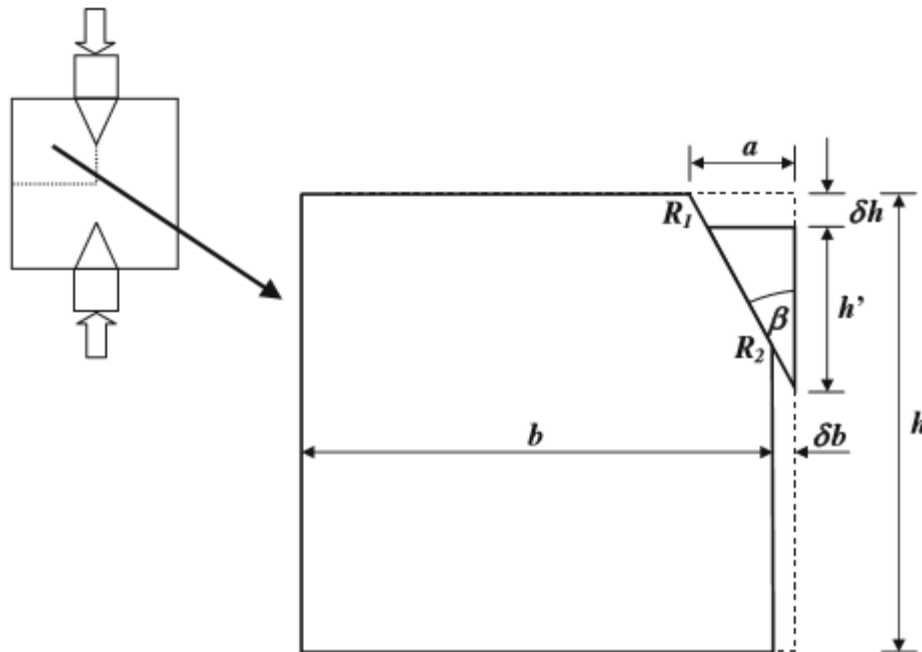


Figura 5 -Esquema del desplazamiento lateral (δb) que se produce en el cilindro en el régimen post fisuración, debido a la penetración de las cuñas de carga (δh).

Como el aumento del radio es proporcional a la penetración de la cuña cónica en el cilindro se puede expresar de la siguiente forma:

$$\delta b = \delta \frac{a}{h} = \delta h \tan \beta \quad (4)$$

Donde β es la pendiente de la generatriz del cono (R1,R2), con respecto a la dirección de la carga aplicada. Reemplazando en la ecuación anterior, el aumento de perímetro es:

$$\Delta p = 2\pi \delta h \tan \beta \quad (5)$$

Además se postuló que el aumento del perímetro, en el estado después de la fisura, es igual a la apertura total de las grietas, medido a la mitad de la probeta, que corresponde a la apertura promedio de grietas verticales, independiente de que si un punzón penetra más o menos profundamente que otro.

Por lo anterior mencionado se establece la relación existente entre δ_A y el TCOD en el régimen agrietado de un cilindro sometido a doble punzonamiento, demostrando que:

$$TCOD = \alpha \delta_A \quad (6)$$

Dónde:

$$\alpha = \pi \tan \beta \quad (7)$$

Esta relación está avalada por una gran campaña experimental realizada por Carmona et al. (2011), en la que se determinó el factor de proporcionalidad α para distintas dosificaciones de hormigón con fibra de acero (HRFA) y hormigón con fibras plásticas (HRFP), los valores se presentan en la tabla 2. En ella se observa que para estados avanzados del régimen post-agrietamiento, la relación entre δ_A – TCOD es aproximadamente 1:1.

Tabla 2- Factor α Generalización Ensayo Barcelona.

δA (mm)	HRFA			HRFP		
	25	50	75	13	26	39
0 0,15						
	2,13	1,932	1,707	2,065	1,598	1,822
1,0 4,0						
	1,172	0,996	0,937	1,199	0,947	0,959

Por lo tanto, Carmona et al. (2011) concluyeron que entre la tenacidad (T) y energía (E) existe relación lineal de aproximadamente 1:1, permitiendo utilizar el desplazamiento axial (δA) para determinar la tenacidad en el estado post agrietado.

De acuerdo a lo anterior mencionado es que Carmona et al. (2011) determinaron que los valores de tenacidad calculados mediante el desplazamiento axial, están fuertemente correlacionados con las energías determinadas mediante el procedimiento del ensayo Barcelona estándar, lo que permite la utilización del desplazamiento axial para cuantificar la tenacidad de los HRF.

En consecuencia, en su estudio definieron una curva que permite encontrar la tenacidad del hormigón (independientemente de su contenido de fibra), que para los HRFP resulta en la siguiente ecuación:

$$E(TCOD) = 1,0427 * T(\delta_A) + 73,271 \quad (8)$$

2.5 Modelo analítico de la generalización del ensayo Barcelona usando el desplazamiento axial para la determinación de la tenacidad de los HRF.

Si bien la generalización de ensayo Barcelona es un modelo que logro encontrar una relación directa, solo es válido para un rango restringido de δ entre 1 [mm] y 4 [mm], además no representa los mecanismos físicos de resistencia implicados en la falla por tracción del hormigón reforzado con fibras. Es por esto que pujadas et al. 2013 desarrollaron un modelo analítico más general, el cual convierte el δ en el TCOD para toda la extensión de la curva y para cualquier tipo de HRF.

El modelo permite observar tres etapas durante la ejecución del ensayo Barcelona:

La Etapa 1 coincide con la aplicación inicial de carga. El estrés interno generado es resistido por la matriz de concreto que no presenta grietas importantes

Una vez que la tensión alcanza la resistencia a la tracción del material, la muestra entra en la Etapa 2. Aparecen las principales grietas radiales y las cuñas cónicas se forman bruscamente.

A medida que las grietas se estabilizan, comienza la Etapa 3, siguiendo un mecanismo cinemático que implica deslizarse entre la cuña cónica y los fragmentos de la muestra agrietada.

Para tener una visión más grafica de las distintas etapas que se pueden apreciar durante el ensayo Barcelona la imagen XX nos presenta los gráficos carga-desplazamiento circunferencial y carga-desplazamiento axial.

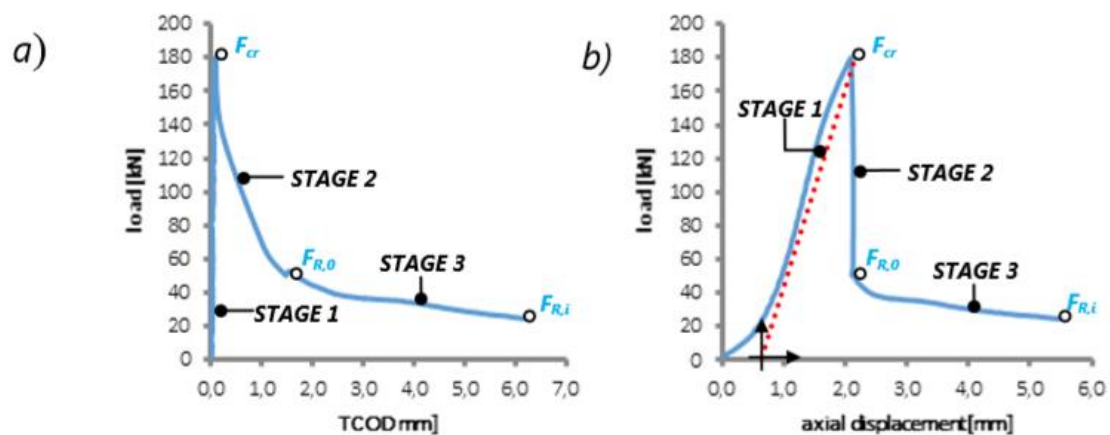


Figura 6- a) Grafico Carga-Desplazamiento circunferencial, b) Carga-Desplazamiento axial.

En consecuencia de lo descrito anteriormente, la correlación entre TCOD y δ puede describirse mediante el modelo tri-lineal que se presenta a continuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} TCOD = 0 \\ TCOD = n \frac{a \delta_{R,0}}{2l} \sin \frac{\pi}{n} \left(1 - \frac{F}{F_{cr}}\right) \\ TCOD = n \frac{a}{2l} \sin \frac{\pi}{n} \left[\delta - \delta_{cr} + \delta_{R,0} \left(1 - \frac{F}{F_{cr}}\right)\right] \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \delta \leq \delta_{cr} \\ \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \\ \delta > \delta_{R,0} \end{array} \quad (9)$$

La aplicación del modelo propuesto por pujadas et al.2013 es directa y válida para toda la extensión de la curva de desplazamiento de carga axial. Como fue descrito anteriormente, solo depende de los parámetros especificados en las formulas los cuales se obtienen del ensayo Barcelona. El modelo permite, por lo tanto, realizar el ensayo Barcelona midiendo desplazamiento axial, luego con las ecuaciones descritas previamente es posible convertir cada valor de desplazamiento axial en un TCOD correspondiente. Finalmente es posible obtener la curva Carga-TCOD, con la que podemos calcular la tenacidad de ese hormigón.

2.6 Ensayo de Panel EFNARC

Este ensayo permite determinar un conjunto de valores, de capacidad de absorción de energía, entre otros resultados. Dicho valor de absorción, es definido a partir de la curva carga-desplazamiento, desplazamiento medido al centro de la probeta, la curva mencionada es obtenida luego de registrar tanto la carga como la deformación, durante el transcurso del ensayo, el cual consiste en aplicar una carga aplicada al centro de un panel apoyado en sus cuatro bordes.

Para la elaboración del panel, los moldes se deben posicionar verticalmente y proyectar con hormigón con el mismo equipo, técnica, espesor de capa por pasada, distancia de proyección, que como se haría en terreno. El operador también debe ser el mismo. El panel se debe proteger contra la pérdida de humedad con el mismo método de cómo se haría en terreno.

El ensayo requiere un panel de 600x600x100 [mm] apoyado en sus cuatro bordes, al cual se le aplica una carga central a través de una superficie de contacto de 100x100 [mm] como se puede apreciar en la figura 7. La carga se debe aplicar en la cara lisa del panel, es decir, la cara opuesta a la de llenado.

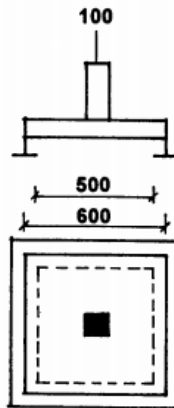


Figura 7- Forma Ensayo Panel EFNARC

La velocidad de desplazamiento en el punto central del panel será de 1,5 [mm/min]. Durante el ensayo se registrara una curva de carga-deformación como se muestra en la figura 8 hasta conseguir una deflexión de 25 [mm] en la parte central del panel.

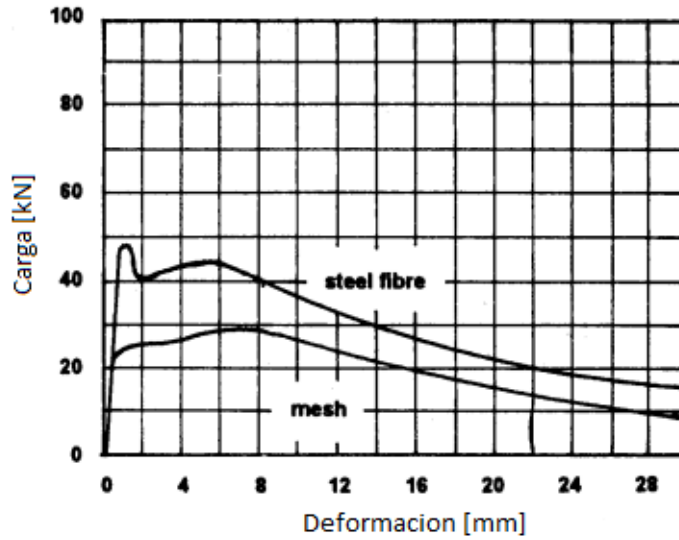


Figura 8- Ejemplo Gráfico Carga-deformación

Para calcular la capacidad de absorción de energía de la probeta se debe calcular el área bajo la curva del grafico carga-deformación, para lograr eso se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$E(\delta) = \int_0^{\delta} P(\delta) d(\delta) \quad (10)$$

Donde $P(\delta)$ corresponde a la carga en la deflexión δ . En la figura 9 se puede apreciar la curva energía-deformación hasta los 25 mm como lo indica la norma EFNARC.

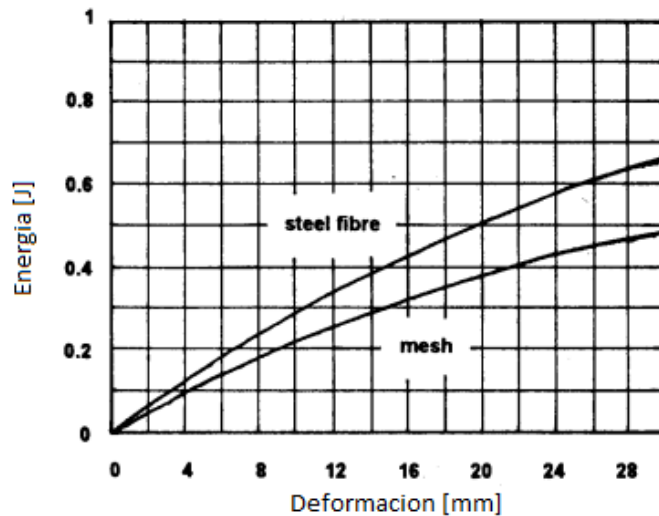


Figura 9- Ejemplo Gráfico Energía-Deformación

2.7 Correlación entre ensayo de panel EFNARC y ensayo Barcelona (BCN)

Para encontrar una relación entre la tenacidad obtenida al aplicar el ensayo de panel EFNARC y ensayo BCN 150, se realizó una campaña experimental en el cual se ensayó y analizó probetas de hormigón reforzado con fibras sintéticas, en la cual se determinó una correlación entre el ensayo de panel EFNARC y ensayo BCN 150, obteniendo la ecuación número 11 que se presenta a continuación:

$$E_{25}(TCOD) = 5,267 * E_{BCN 150}^{0,938} \quad (11)$$

Dónde:

$E_{25}(TCOD)$: Es la energía disipada equivalente.

$E_{BCN 150}$: Energía disipada en el ensayo Barcelona aplicado a probetas de 150 [mm].

La cual permite utilizar la tenacidad del hormigón obtenida mediante el ensayo Barcelona para estimar la energía absorbida en probetas que se rigen bajo la norma EFNARC en forma de paneles.

Para extender el método al ensayo BCN 100, primero se debe encontrar la relación entre el ensayo BCN 150 y ensayo BCN 100. Para esto, se calcula el área de los planos radiales generados posterior a la rotura de la probeta, ya que el área de fisura generada tiene relación directa con la cantidad de energía que puede disipar una probeta.

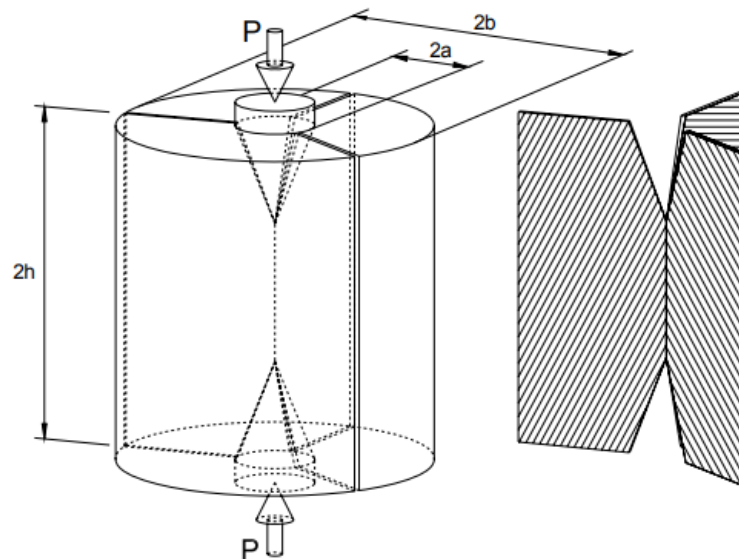


Figura 10- Esquema idealizado del modo de rotura donde se puede observar la formación de los planos radiales o área de fisura.

Se calcula el área de fisura mostrada en la figura 10 para el ensayo BCN150 y ensayo BCN100. Cada caso se tienen 3 planos radiales de altura (2h) y ancho (b), en consecuencia el área de fisura será la suma del área de la totalidad de planos radiales y la relación entre el áreas para los ensayos antes mencionados $\left(\frac{Area_{BCN\ 150}}{Area_{BCN\ 100}}\right)$ está dado por la siguiente ecuación

$$\frac{Area_{BCN\ 150}}{Area_{BCN\ 100}} = \frac{3 * 150 * 75}{3 * 100 * 50} = 2,25 \quad (13)$$

Con respecto a lo anterior, es posible plantear que:

$$E_{BCN\ 150} = 2,25 * E_{BCN\ 100} \quad (14)$$

Por lo tanto, utilizando la relación encontrada en (14) y reemplazándola en (11) se establece la relación existente entre el ensayo Barcelona BCN 100 y el ensayo de panel EFNARC mediante la siguiente ecuación.

$$E_{25}(TCOD) = 5,267 * (2,25 * E_{BCN\ 100})^{0,938} \quad (15)$$

Dónde:

$E_{25}(TCOD)$: Es la energía disipada equivalente.

$E_{BCN\ 100}$: Energía disipada en el ensayo Barcelona aplicado a probetas de 100 [mm].

3 Programa experimental

En el presente estudio se podrá conocer el comportamiento del hormigón reforzado con fibra sintética BarChip 54 ante una carga constante, y su capacidad de absorción de energía.

Para el estudio se utilizaron probetas provenientes del proyecto Chuquicamata Subterráneo, las cuales vienen en formato de paneles de 600x600x100, cilindros de 150 mm de diámetro y altura, y cilindros de 100 mm de diámetro y altura.

El hormigón utilizado fue diseñado para su aplicación como hormigón proyectado, de acuerdo a estos se usaron dosis de fibra sintética de 4 y 5 kilogramos por metro cubico de hormigón.

3.1 Ensayo Barcelona 100 mm (BCN100).

Este ensaye fue aplicado a 24 testigos, los cuales consisten en cilindros de 100 mm de diámetro y aproximadamente 100 mm de altura, provenientes de paneles de 100x600x600 [mm]. Para la obtención de los testigos, se utilizó una máquina de corte que permite dimensionar el diámetro del testigo.

3.1.1 Preparación del testigo

Una vez que el testigo es dimensionado, se verifico el paralelismo entre sus caras perpendiculares al eje longitudinal del cilindro, es decir, a las caras en las cuales se aplica la carga. En el caso de no ser paralelas, como cilindros con caras inclinadas, se les realizo un refrentado, con el fin de asegurar un paralelismo entre las dos áreas de carga.

3.1.2 Equipos Utilizados

Para el ensayo de doble punzonamiento, destaca la utilización de los siguientes elementos:

3.1.2.1 Maquina MCC8

El equipo utilizado para llevar a cabo el ensayo Barcelona en cilindros de 100 mm, es el sistema hidráulico automático MCC8 o Consola de control multifuncional 8 (Multifunctional Control Console 8), el cual es utilizado para pruebas dinámicas estáticas y de baja frecuencia en materiales de construcción bajo control de carga/esfuerzo, desplazamiento, deformación. El ensayo Barcelona requiere un equipo que autorregule la velocidad de desplazamiento axial, que para este ensayo en particular es de 0,5 [mm/min].



Figura 11- MCC8

3.1.2.2 Transductores

Se utilizó un transductor de desplazamiento variable lineal (o Linear Variable Differential Transformer), capaz de leer desplazamiento lineal con precisión de 0,01 [mm], el cual se sitúa en la parte superior del equipo con el fin de registrar el desplazamiento axial del punzón metálico en el testigo de hormigón reforzado con fibras.



Figura 12- Transductor lineal con soporte

3.1.2.3 Cadena Extensometrica

Una cadena extensometrica de diámetro ajustable marca EPSILON TECHNOLOGY CORP, para testigos de 50 [mm] a 150 [mm], con recorrido de 12 [mm]. Se ubica en la parte central del testigo y su función es leer el desplazamiento circunferencial que experimenta este cuando está sometido a cargas.



Figura 13- Cadena Extensometrica montada en cilindro de 100 mm

3.1.2.4 Punzón de apoyo

Dos punzones cilíndricos de acero, uno de carga y el otro de apoyo, se colocan concéntricamente en las caras superior e inferior del testigo de hormigón; su dimensión queda determinado en función del diámetro del testigo de hormigón en relación entre diámetro de punzones (2^a) y probeta ($2b$) de 1:4 ($2a/2b=0,25$), por lo que el diámetro de cada punzón será de 25 [mm].

3.1.3 Procedimiento de ensayo

En primer lugar, se instala la cadena extensometrica en la mitad del testigo de hormigón, hecho esto se procede a montar el testigo, de tal modo que el eje longitudinal del testigo de hormigón quede alineado con los ejes longitudinales de los punzones de acero.

Realizado lo anterior se instala el transductor de desplazamiento lineal en un soporte auxiliar, instalado previamente en la estructura de la máquina de ensayo, en la cual el transductor queda apoyado en una placa metálica instalada a un costado del brazo hidráulico de la prensa como se puede apreciar en la figura 14.



Figura 14- Visualización ensayo BCN 100

Para finalizar el montaje del testigo, se instala el transductor correspondiente a medir el desplazamiento circunferencial (TCDO).

Una vez realizado todo lo anterior se inicia la precarga del software de control, instante en el cual se ajustan a un cero relativo las lecturas de los transductores.

De acuerdo a la norma UNE 83515, el ensayo se debe ejecutar bajo control de desplazamiento axial, a una velocidad de $0,83[\mu\text{m}/\text{s}]$ (o $0,05[\text{mm}/\text{min}]$) para dicho desplazamiento, además de controlar el ensayo a través de la deformación circunferencial del cilindro, la cual una vez que alcanza los $6000 [\mu\text{m}]$ o $(6 [\text{mm}])$, se da por finalizado el ensayo.

3.2 Ensayo Barcelona 150 mm (BCN150)

El ensayo Barcelona para probetas de 150 [mm] fue aplicado a 87 muestras, las cuales consisten en cilindros de hormigón con fibras de polipropileno, con medidas de 150 [mm] de altura y 150 [mm] de diámetro aproximadamente.

3.2.1 Preparación de la probeta

Al igual que el ensayo anterior se debe corroborar el paralelismo entre las áreas de carga, es decir, entre la cara superior e inferior del cilindro. En el caso de que estas caras no sean paralelas, a la probeta se re aplica un refrentado de sus caras con el fin de corregir pequeñas imperfecciones o inclinación que pueda presentar las superficies de la probeta.

3.2.2 Equipos Utilizados

Para el caso de este ensayo, se utilizan los siguientes equipos, los cuales se encuentran en el laboratorio de ensayo de materiales de construcción (LEMCO).

3.2.2.1 Prensa Toni Technik

El equipo utilizado para realizar el ensayo Barcelona para testigos de 150 mm, es la prensa hidráulica Toni technik de 3000 KN de capacidad, controlada por una consola de control multifuncional MCC8 marca CONTROLS, de las mismas características al utilizado en el ensayo para testigos de 100 mm.



Figura 15-Prensa Toni Technik

3.2.2.2 Anillos de Carga

Para la realización de ensayo es necesario colocar ciertos adaptadores de modo que, sea posible y de forma fácil poder aplicar la carga y realizar la medición de los distintos desplazamientos experimentados por el testigo de hormigón. Por este motivo se utilizan dos anillos de carga, que como su nombre lo indica, cumplen la función de transmitir la carga al testigo mediante dos punzones de 38 mm ($\frac{1}{4}$ del diámetro de la probeta).

Como se puede apreciar en la figura 16, el anillo de carga inferior cuenta con tres pernos distanciados a 120° y en su extremo llevan adheridos tres placas de vidrio, las cuales se fijan en una posición y sirven como plano referencial para poder realizar las mediciones de desplazamiento lineal. En el anillo de carga superior, en lugar de los tres pernos se encuentran tres transductores de desplazamiento lineal, con las mismas características que el descrito en el ensayo Barcelona para testigos de 100 mm.

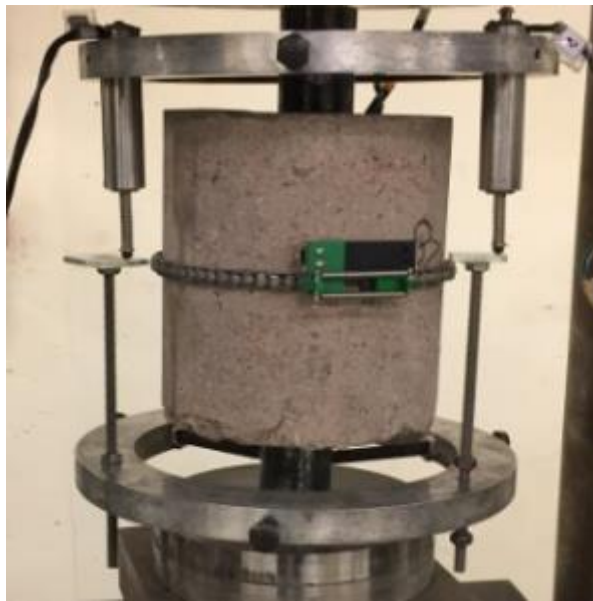


Figura 16- Anillos de carga montados en ensayo BCN 150 mm

3.2.2.3 Cadena Extensométrica

Al igual que en el ensayo descrito anteriormente, se utiliza una cadena extensométrica ubicada en la parte central del testigo, con la función de medir el desplazamiento circunferencial del testigo en la etapa post-fisuración.

3.2.3 Procedimiento Ensayo Barcelona 150 mm

Al igual que en el ensayo anterior, primero se instala la cadena extensométrica en la mitad del testigo de hormigón, hecho esto se procede a montar el testigo, de tal modo que los punzones y el testigo queden alineados concéntricamente.

Una vez que el testigo está montado, se procede a ajustar los transductores, los que deben quedar en contacto con la placa de vidrio, teniendo la consideración de dejar bastante recorrido del transductor para poder realizar la medición exitosamente.

Como último paso del montaje de la probeta, es la instalación del transductor correspondiente a medir el desplazamiento circunferencial que experimenta la probeta.

Ya con todo montado y ajustado, se inicia el ensayo con una velocidad de 0,14 Mpa/segundo, cabe mencionar que el ensayo se controlara por desplazamiento circunferencial hasta que este alcance los 6 [mm] según lo especificado en la norma.

Finalmente el ensayo es detenido desde el computador, se guardan los datos obtenidos, y se procede a desmontar la probeta ya ensayada para la realización del mismo procedimiento para una probeta integra.

3.3 Ensayo Panel EFNARC

Se realizó el ensayo para 81 paneles de HRF, de los cuales 50 corresponden a paneles con dosificación de 4 kg de fibra por metro cubico de hormigón y 31 paneles con dosificación de 5 Kg de fibra por metro cubico de hormigón. El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de ensaye de materiales de construcción (LEMCO) de la universidad técnica Federico santa maría, en el cual se utilizaron los siguientes aparatos para llevar a cabo el ensayo:

3.3.1 Equipos Utilizados

Los equipos utilizados en el ensayo de panel EFNARC son los siguientes:

3.3.1.1 Maquina MCC8

El equipo utilizado para llevar a cabo el ensayo de panel EFNARC, es el sistema hidráulico automático MCC8 o Consola de control multifuncional 8 (Multifunctional Control Console 8), al cual se le agrega una modificación, que consiste en un cuadro de acero como se puede apreciar en la figura 17. El ensayo requiere un equipo que autorregule la velocidad de desplazamiento axial, que para este ensayo en particular es de 0,5 [mm/min].



Figura 17- Ensayo de panel EFNARC.

3.3.1.2 Transductor lineal

Para la medición de la deflexión en la parte central del panel, se instala un transductor en la estructura de la maquina MCC8, de modo que quede apuntando hacia arriba y pueda hacer contacto con la parte inferior del panel ensayado. El transductor en su extremo una placa de vidrio de 10x10 [mm].

3.3.1.3 Punzón de carga

Para aplicar la carga se utiliza un punzón de acero, con dimensiones de 100x100x100 [mm], el cual hará contacto con la cara superior del panel, en el centro de este.

3.3.2 Procedimiento de ensayo

En primer lugar se procede a marcar el panel de 600x600x100 con la ayuda de un lápiz para hormigón y una regla, generando dos trazos diagonales que van desde una esquina hasta su opuesta más lejana. El punto donde se cruzan los trazos indica el centro del panel.

Realizado lo anterior, se instala el transductor que mide e indica cuando el panel alcanza una deflexión de 25 [mm] en su parte central. Por lo tanto para lograr esto el extremo del transductor debe estar a 25 [mm] por debajo de la parte inferior del panel, una vez que está a esa distancia se ajusta desde el software para realizar la medición.

Después de lo descrito anteriormente se procede a montar la probeta en la máquina de ensayo, una vez que está centrada, desde el software se da inicio al ensayo comenzando con una pre-carga para luego iniciar la carga propiamente tal a una velocidad de deformación de 1,5 mm/min . Una vez que la deflexión alcanza los 25 [mm], finaliza el ensayo.

4 Análisis y resultados

Se realizó un análisis de probetas y testigos ensayados en laboratorio, los cuales cuentan con dosificación de 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón.

Para el análisis general se estudió la tenacidad de las probetas, para paneles basados en las normas EFNARC y cilindros de diferentes dimensiones basado en la norma UNE 83515-10, con el objetivos de encontrar algún grado de relación entre los diferentes ensayos. Para esto se calcularon y graficaron en su totalidad los resultados de tenacidad de los ensayos, los cuales se encuentran en el anexo.

4.1 Ensayo Barcelona 100 mm.

Para el ensayo Barcelona 100 mm (BCN 100) se estudiaron 24 probetas dosificadas como muestra la tabla 3, a los cuales se realizó medición del desplazamiento circunferencial y axial con el fin de determinar la tenacidad o la energía absorbida después del punto de fisura, es decir, en el rango post fisuración

Tabla 3- Distribución de probetas BCN 100 Barchip 54.

Cantidad de fibras [kg/m ³] por testigo	Cantidad de Testigos
4	12
5	12

4.1.1 Resultados tenacidad medida con la deformación circunferencial.

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos aplicando la ecuación 1 antes mencionada, dando como resultado la capacidad de absorción de energía de los testigos con dosificación de 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón, medida con la deformación circunferencial que entrega la cadena extensometrica en el ensayo.

Tabla 4- Resultados tenacidad medida con la deformación circunferencial y CV

Cantidad de fibra [kg/m ³]	Energía [J] de cada testigo de acuerdo a su cantidad de fibra	
	4	5
Energía calculada hasta las 6 mm de deformación circunferencial	157,6	91,7
	107,2	91,7
	116,1	139,5
	117,2	108,5
	142,1	131,3
	118,4	104,7
	127,8	121,3
	109,5	127,8
	140,8	117,6
	111,0	120,5
	144,3	124,8
111,9	114,1	
Promedio	125,3(13,4)	116,1(12,8)

Como se puede observar en la tabla 4 hay una diferencia entre las tenacidades calculadas para probetas con 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón, de aproximadamente 7% mayor para las probetas con menos dosificación de fibras. Sin embargo este resultado se puede deber a la alta variabilidad que presento este ensayo, tanto para testigos con 4 y 5 kg de fibra en su dosificación. Por otro lado este resultado también se pudo ver afectado debido a que la carga de rotura para el HRF-5 fue menor.

4.1.2 Resultados tenacidad medida con la deformación axial aplicando eq. 8.

Otro método para cuantificar la tenacidad de un HRF es utilizando la relación existente entre la deformación circunferencial (TCOD) y el desplazamiento axial mencionada anteriormente en el punto 2.4, que proviene de un estudio nombrado Generalización del Ensayo Barcelona. En dicho estudio se define una curva que permite encontrar la tenacidad de un HRF, independiente de su contenido de fibra, a través de su tenacidad axial T (da) aplicando la ecuación (8).

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar la ecuación 8 antes mencionada.

Tabla 5- Resultados tenacidad medida con la deformación axial aplicando ecuación número 8 y CV.

Cantidad de fibra [kg/m ³]	Energía [J] de cada probeta de acuerdo a su cantidad de fibra	
	4	5
Energía calculada hasta las 6 [mm] de deformación circunferencial	143,3	95,1
	111,1	123,2
	96,8	122,2
	125,2	119,7
	196,3	124,3
	143,6	147,6
	79,9	135,0
	120,4	139,2
	183,3	121,7
	152,0	130,3
	128,2	149,9
	104,7	116,2
Promedio	132,1 (25,8)	127,0 (11,7)

Al observar los resultados obtenidos en la tabla 5, es posible apreciar la misma tendencia entre la tenacidad para los hormigones con distinto contenido de fibra, de modo que el HRF-4 presenta mayor tenacidad promedio, con un valor de aproximadamente 3,86% más alto en comparación a la tenacidad del HRF-5.

Al comparar los resultados obtenidos por el método tradicional del ensayo Barcelona con este método, se aprecia un alto grado de correlación entre los resultados obtenidos.

Adicionalmente se calculó el desplazamiento axial promedio el cual inicia en la etapa de post fisuración y finaliza al momento en que la deformación circunferencial alcanza los 6 mm de apertura, de modo que para probetas de 4 kg de fibra se encontró un desplazamiento medio de 3,16 [mm] mientras que para las probetas de 5 kg de fibra se obtuvo un desplazamiento axial promedio de 3,74 mm.

4.1.3 Resultado Tenacidad aplicando eq. 9

Se aplicó un tercer método para calcular la tenacidad de los HRF, en el cual se utiliza el desplazamiento axial para transformarlo en deformación circunferencial, como se vio anteriormente en el punto 2.5 utilizando la tri-ecuación que en este estudio es la ecuación 9, luego es posible calcular la tenacidad del hormigón por medio de la ecuación 1.

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos utilizando el modelo analítico de la generalización del ensayo Barcelona determinado por los autores Pujadas, 2013. Se determina la tenacidad circunferencial equivalente, para testigos con dosificación de 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón.

Tabla 6- Resultados tenacidad medida con la deformación axial, aplicando eq 9 y CV.

Cantidad de fibra [kg/m ³]	Energía [J] de cada probeta de acuerdo a su cantidad de fibra	
	4	5
Energía calculada hasta las 6 mm de deformación circunferencial	135,1	43,2
	47,6	74,2
	33,0	83,6
	100,5	54,3
	141,5	94,9
	86,3	91,5
	38,2	91,3
	72,1	106,2
	154,7	91,8
	89,3	101,5
	80,2	95,4
	71,8	76,9
Promedio	87,5 (45,4)	83,7 (22,5)

Los resultados de la tabla 6 presentan la misma tendencia que los dos métodos anteriores, y es que la tenacidad de los HRF-4 es mayor en aproximadamente 4,35% a la tenacidad de los HRF-5. En cuanto a la diferencia con los otros dos métodos, los resultados obtenidos son notablemente inferiores a los del método tradicional y al método desarrollado por Carmona (2011).

4.2 Ensayo Barcelona 150 [mm].

Para el ensayo Barcelona 150 mm (BCN 150) se estudiaron 87 probetas dosificadas, a los cuales se realizó medición de desplazamiento circunferencial a su totalidad y desplazamiento axial según lo que indica la tabla 4.

Tabla 5- Distribución de probetas BCN 150 Barchip 54.

Cantidad de fibras [kg/m ³] por testigo	Cantidad de Testigos	Cantidad de probetas con desplazamiento axial
4	62	30
5	25	13

4.2.1 Resultados tenacidad medida con la deformación circunferencial.

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos aplicando la ecuación 1 antes mencionada, dando como resultado la capacidad de absorción de energía de los testigos con dosificación de 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón. Estos resultados corresponden específicamente a la tenacidad del hormigón en el rango post-fisuración, tomando como inicio el momento inmediatamente después de la generación de la grieta y como fin los 6 mm de deformación circunferencial que indica la norma UNE 83515-10.

Tabla 6- Resultados tenacidad BCN 150 medida con la deformación circunferencial y CV.

Cantidad de fibra [kg/m ³]	Energía [J] de cada probeta de acuerdo a su cantidad de fibra	
	4	5
Energía calculada hasta las 6 mm de deformación circunferencial	299	258
	276	275
	267	333
	255	271
	313	250
	293	283
	322	297
	287	217,0
	257	294,0
	295	179
	245	214
	281	198
	Promedio	269,1 (14,2)

Al igual que en ensayo Barcelona de 100 mm, los resultados correspondientes al ensayo Barcelona de 150 mm presentan la misma tendencia, en que la tenacidad de las probetas con 4 kg de fibra es mayor al de las probetas con 5 kg de fibra en aproximadamente un 3 %.

4.2.2 Resultados tenacidad medida con la deformación axial.

Al igual que en el ensayo BCN100, otro método para cuantificar la tenacidad de un HRF es utilizando la relación existente entre la deformación circunferencial (TCOD) y el desplazamiento axial mencionada anteriormente en el punto 2.4.

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar la ecuación 8 antes mencionada, utilizando la generalización del ensayo Barcelona aplicando el método de Carmona et al. 2011.

Tabla 7- Resultados tenacidad BCN 150 aplicando eq. 8

Cantidad de fibra [kg/m ³]	Energía [J] de cada probeta de acuerdo a su cantidad de fibra	
	4	5
Energía calculada hasta las 6 mm de deformación circunferencial	199,4	238,0
	234,9	231,8
	219,2	256,8
	229,7	216,8
	210,9	224,9
	171,3	257,8
	167,1	225,5
	179,6	
Promedio	201,5 (13,1)	235,9 (6,8)

Con respecto a los resultados obtenidos en la tabla 7, se puede apreciar un discrepancia entre los resultados de tenacidad de los ensayos anteriores, tratándose del mismo tipo de hormigón, para este caso la tenacidad obtenida es mayor para el hormigón con dosificación de 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón.

Al igual que en el ensayo Barcelona para testigo de 100 mm se calculó el desplazamiento axial promedio, en el que se obtuvo un resultado de 3,56 mm para probetas de 4 kg de fibra y 4,01 mm para 5 kg de fibra.

4.3 Ensayo Panel EFNARC

Para el ensayo Panel EFNARC se estudiaron 81 probetas dosificadas, a los cuales se realizó medición desplazamiento axial según lo que indica la tabla 7.

Tabla 7- Distribución de probetas Panel EFNARC Barchip 54.

Cantidad de fibras [kg/m ³] por testigo	Cantidad de Testigos
4	50
5	31

4.3.1 Resultado tenacidad Panel EFNARC.

Mediante la ecuación 10 antes mencionada se puede conocer la energía absorbida por el panel al momento en el cual el panel alcanza los 25 mm de deformación axial, los valores se para probetas con dosificación de 4 y 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón se presentan en la tabla 8.

Tabla 8- Resultados Tenacidad Panel EFNARC y CV.

Cantidad de fibra [Kg/m3]	Energía [J] de cada probeta de acuerdo a su cantidad de fibra			
	4	4	5	5
Energía calculada hasta las 25 mm de deformación circunferencial	820	869,4	760,0	635
	985	834,3	885,5	850
	815	980,0	917,0	830
	700	924,6	868,4	800
	800	1255,8	955,2	735
	705	832,1	818,3	785
	880	768,6	1012,7	
	740	793,8	863,3	
	767	909,2	716,6	
	925	1058,0	968,1	
	760	965,0	918,0	
	600	1072,0	833,0	
	775	904,0	861,0	
	645	1025,0	844,0	
	608	859,0	1346,0	
	690	820,0	850,0	
	735	1303,0	843,0	
	755	1051,0	989,0	
	730	997,0	863	
	1255,0	900,0	1005	
	937,0	899,0	860	
	917	1262,0	675	
	791	1101,0	925	
785	1201,0	765		
990	826,0	885		
Promedio	890,4 (19,1)		866,5 (14,6)	

De la tabla anterior se observa que la tenacidad obtenida en los hormigones con 4 kg de fibra por metro cubico de hormigón, es mayor que la tenacidad de los paneles con dosificación de 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón en aproximadamente 2,69 %.

4.4 Equivalencia entre ensayo BCN 100 y BCN 150

En el punto 2.7 se encontró una equivalencia entre el ensayo Barcelona para testigos de 100 mm y el ensayo Barcelona para testigos de 150 mm, para su obtención se compararon las áreas de fractura que se generan al momento de someter las probetas o testigos a cargas externas. En el instante que se supera la carga máxima que puede resistir la matriz de hormigón, se generan grietas radiales perpendiculares a los planos concéntricos de tensiones generados al aplicar la carga por medio del punzón. El modo de falla típico presenta tres planos de fractura radial, sin embargo en otras ocasiones se puede encontrar planos de falla entre dos y cuatro, sin embargo independiente del número de planos de falla la relación encontrada indica que el área de fractura del ensayo Barcelona BCN150 es equivalente a 2,25 veces el área de fractura del ensayo Barcelona BCN100.

Al ser el tamaño la única variable entre estos dos ensayos, y basándose en que la energía absorbida por cada probeta o testigo está directamente relacionada con el área de fractura, es posible plantear que la energía absorbida por el ensayo Barcelona BCN150 es equivalente a 2,25 veces la energía absorbida por el ensayo Barcelona BCN100 ($E_{BCN\ 150} = 2,25 * E_{BCN\ 100}$).

En la tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo Barcelona BCN100 y ensayo Barcelona BCN150, además se calculó el coeficiente de variación correspondiente a cada resultado.

Tabla 9- Resumen Energía absorbida ensayo Barcelona y CV.

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 Kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN100) [J]	125,3 (13,4)	116,1 (12,8)
E (BCN100 eq. 8) [J]	132,1 (25,8)	127,0 (11,7)
E (BCN100-eq. 9) [J]	87,5 (45,4)	83,7 (22,5)
E (BCN150) [J]	269,1 (14,2)	260,9 (9,0)
E (BCN150 eq. 8) [J]	201,5 (13,1)	235,9 (6,8)

Se aplicó la equivalencia antes mencionada ($E_{BCN 150} = 2,25 * E_{BCN 100}$) a los resultados de energía absorbida de BCN100 presentados en la tabla 9, y se comparó con el valor real de energía absorbida, el cual corresponde a E(BCN150) [J], para esto se calcula el error porcentual entre el valor equivalente y el valor real.

Tabla 10-Resultados equivalencia $E_{BCN 150} = 2,25 * E_{BCN 100}$ y error porcentual.

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN100) [J]	282,0 (4,8)	261,3 (0,1)
E (BCN100 eq. 8) [J]	297,1 (10,4)	285,8 (9,5)
E (BCN100 eq.9) [J]	196,9 (26,8)	188,4 (27,8)

Como se observa en la tabla 10, al comparar los resultados de tenacidad se tiene que los valores obtenidos luego de aplicar la relación de equivalencia difieren muy poco con respecto al valor real de tenacidad, se determinó un error porcentual de 4,8 % para la tenacidad calculada de forma tradicional, es decir, en la que se utilizó la deformación circunferencial para su cálculo, en testigos con 4 kg de fibra por metro cubico de hormigón, mientras que para los testigos con 5 kg de fibra se determinó un error porcentual de 0,1%.

En el caso de la tenacidad obtenida mediante el método que propuso Carmona et al. (2011), debido a valores más altos de energía absorbida se observa un incremento en el error llegando a valores de 10,4% y 9,5% para testigos con 4 y 5 kg de fibra respectivamente.

Finalmente al comparar los valores obtenidos mediante el método analítico que propuso Blanco et al.2013, se observa la mayor diferencia entre las 3 formas de calcular la tenacidad, ya que este método subestimo los valores de energía absorbida, dado lo anterior se obtuvo un error de 26,8% para testigos con 4 kg de fibra y 27,8% para testigos con 5 kg de fibra por metro cubico de hormigón.

4.5 Equivalencia entre ensayo BCN 150 y Panel EFNARC.

En el punto 2.7 se hizo referencia a la formula obtenida por Carmona et al. (2018) la cual se identifica en el presente estudio como ecuación (11), dicha ecuación relaciona E_{25} con E (BCN).

Los resultados de tenacidad para el ensayo BCN150 y ensayo de panel EFNARC se presentan en la tabla 11 además de su coeficiente de variación respectivo.

Tabla 11- Resumen tenacidad BCN150 y Panel EFNARC y CV

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 Kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN150) [J]	269,1 (14,2)	260,9 (9,0)
E (BCN150 eq.8) [J]	201,5 (13,1)	235,9 (6,8)
E_{25} [J]	890,4 (19,2)	866,5 (14,6)

Se aplicó la ecuación (11) a los resultados de energía absorbida de BCN150 presentados en la tabla 11, y se comparó con el valor real de energía absorbida, el cual corresponde a la energía absorbida por el panel hasta una deformación de 25 [mm] (E_{25} [J]), para comparar estos resultados se calcula el error porcentual entre el valor equivalente y el valor real.

Tabla 12- Resultados de equivalencia entre ensayo BCN150 y Panel EFNARC y error porcentual.

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 Kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN150)	1002,1 (12,5)	973,3 (12,3)
E (BCN150 eq. 8)[J]	763,9 (14,2)	885,7 (2,2)

En la tabla 12 se observa que al aplicar la ecuación 11 al ensayo Barcelona, en el cual se utilizó la deformación circunferencial para calcular la energía absorbida, se obtiene un resultado sobrestimado al compararlo con el valor real proveniente del ensayo de panel EFNARC, para cuantificar esta diferencia se calculó el error porcentual el que como se puede apreciar da un valor de 12,5% en testigos de 4 Kg de fibra por metro cubico de hormigón. Igualmente para testigos con 5 Kg de fibra por metro cubico de hormigón, se obtuvo un valor equivalente mayor al esperado con un error porcentual de 12,3 %. Se aplicó el mismo análisis a los resultados obtenidos mediante la generalización del ensayo Barcelona, en los cuales se aprecia un error porcentual de 14,2 % y 2,2 % para testigos de 4 y 5 kg de fibra respectivamente.

4.6 Equivalencia entre ensayo BCN 100 y Panel EFNARC.

En el punto 2.7 se hizo referencia a la formula obtenida por Carmona et al. (2018) la cual se identifica en el presente estudio como ecuación (11), a dicha ecuación se le aplico la equivalencia entre el ensayo BCN100 y BCN150 mencionada anteriormente resultando en la ecuación (15).

Los resultados de tenacidad para el ensayo BCN100 y ensayo de panel EFNARC se presentan en la tabla 13 además de su coeficiente de variación respectivo.

Tabla 13- Resumen tenacidad BCN100 y Panel EFNARC *CV

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 Kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN100-tcod) [J]	125,3 (13,4)	116,1 (12,8)
E (BCN100 eq. 8) [J]	132,1 (25,8)	127,0 (11,7)
E (BCN100 eq. 9) [J]	87,5 (45,4)	83,7 (22,5)
E ₂₅ [J]	890,4 (19,1)	866,5 (14,6)

Se aplicó la ecuación (15) a los resultados de energía absorbida de BCN100 presentados en la tabla 13, y se comparó con el valor real de energía absorbida, el cual corresponde a la energía absorbida por el panel hasta una deformación de 25 [mm] (E (25) [J]), para comparar estos resultados se calcula el error porcentual entre el valor equivalente y el valor real.

Tabla 14- Resultados de equivalencia entre ensayo BCN100 y Panel EFNARC. Error Porcentual.

Ensayo	Hormigón reforzado con fibras Barchip 54.	
	4 Kg de fibra	5 kg de fibra
E (BCN100) [J]	1046,9 (17,6)	974,5 (12,5)
E (BCN100 eq. 8) [J]	1099,5 (23,5)	1060,1 (22,3)
E (BCN100 eq. 9) [J]	747,5 (16,0)	717,0 (17,3)

En la tabla 14 se observa que al aplicar la ecuación 15 al ensayo Barcelona, en el cual se utilizó la deformación circunferencial para calcular la energía absorbida, se obtiene un resultado sobrestimado al compararlo con el valor real proveniente del ensayo de panel EFNARC para ambos contenidos de fibras, en el caso de testigos con 4 kg el error porcentual calculado es de 17,6 % mientras que para testigos con 5 kg de fibra es de 12,5 %.

Para el caso en que se utilizó la generalización del ensayo Barcelona por Carmona et al. 2011, al igual que el caso anterior se obtuvo resultados mayores a los provenientes del ensayo Panel EFNARC, aumentando el error porcentual a 23,5 % para testigos con 4 kg de fibra y a 22,3% a testigos con 5 kg de fibra.

Finalmente se aplicó el mismo análisis al caso en que se utilizó la nueva generalización del ensayo Barcelona por Pujadas et al. 2013. Los valores obtenidos presentan errores porcentuales de 16 y 17,3 % para testigos de 4 y 5 kg de fibra respectivamente, cabe destacar que los valores en este caso son menores en comparación a los obtenidos en el ensayo de Panel EFNARC.

5 Conclusiones

En esta memoria se presentó un estudio comparativo entre los resultados de tenacidad aplicando el ensayo Barcelona sobre testigos y probetas de 100 y 150 mm de diámetro respectivamente. A las tenacidades resultantes del ensayo Barcelona, se les aplicó una ecuación que permite estimar el resultado de la energía absorbida, la que se obtiene originalmente al aplicar el ensayo de panel EFNARC. De los resultados obtenidos se derivan las siguientes conclusiones.

Se planteó una equivalencia entre los resultados de tenacidad del ensayo Barcelona para testigos de diferentes tamaños basada en el área de fractura, en la que la tenacidad para testigos de 150 mm correspondería a 2,25 veces mayor que la tenacidad obtenida en testigos de 100 mm para un mismo tipo de hormigón. Dado los resultados y al realizar la comparación, se concluye que la equivalencia encontrada es una buena forma de estimar los resultados, ya que al aplicarla se encontraron errores porcentuales de 4,8% y 0,1% para probetas con 4 y 5 kg de fibra respectivamente. Complementariamente se aplicó la equivalencia a los métodos en los que se usa el desplazamiento axial para encontrar la tenacidad del ensayo Barcelona, en lo que se obtuvo un error porcentual de 10,4% y 9,5% para el método de generalización del ensayo Barcelona y de 26,8% y 27,8% para el modelo analítico del ensayo Barcelona, en testigos de 4 y 5 kg de fibra. Lógicamente los errores son mayores al mencionado primeramente, sin embargo los valores del método generalización del ensayo Barcelona son aceptables.

Al aplicar la ecuación de correlación de tenacidad entre el ensayo Barcelona y ensayo de panel EFNARC, se obtuvo un error porcentual que varía entre 2,2% y 14,2%. Al extender la correlación a probetas testigos de diámetro 100 mm se obtuvo un error porcentual en los resultados de 17,6% para testigos con 4 kg de fibra y 12,5% para probetas testigo con 5 kg de fibra, lo que pone de manifiesto que existe una correlación clara entre el ensayo de panel EFNARC y ensayo Barcelona para probetas de distintos diámetros.

De esta forma, los resultados obtenidos permiten aplicar de forma fiable el método de prueba ensayo Barcelona para determinar la tenacidad del hormigón reforzado con fibras a probetas de diámetro 100 y 150 mm, de modo que puedan relacionarse entre sí y con el ensayo de panel EFNARC.

6 Referencias

UNE 83515 (2010) “Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.”.-

ACI544.1R. (1996). Report on Fiber Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544.

Aguado A., Mari A y Molins C. (2005), Estudio de viabilidad del ensayo Barcelona. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Zaragoza 14 - 17 de noviembre de 2005. Vol. 1. Gestión de Estructuras, pp 275 - 288.

Carmona S, Aguado A, Molins C, (2011) Generalization of the Barcelona Test for the Toughness Control of FRC, aceptado por Materials and Structures, mayo 2011.

Carmona S, Aguado A, Molins C, Cabrera M, (2009), Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona), Revista Ingeniería de Construcción, 24 (2), 22

Carmona S; Molins C, Garcia S, (2018) Use of Barcelona Test for Controlling Energy Absorption Capacity of FRS in Tunelling, Journal Tunnelling and Underground Space Technology.

Chen W. F. (1970), Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 67 (2), pp 993 – 995.

Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente. A. and Aguado A. (2012), “New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement”, Journal of Civil Engineering and Management.

Saludes S., Aguado A. y Molins C. (2007), Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (Ensayo Barcelona). Cátedra BMB Innovación en tecnología del hormigón. 1 ed. Barcelona: Publicacions del Dept. d'Enginyeria de la construcció. 338 pp.

Catalogo Elasto Plastic Concrete. Ficha de Producto - BarChip 54.

7 Anexos

Grafico 1- Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 100.

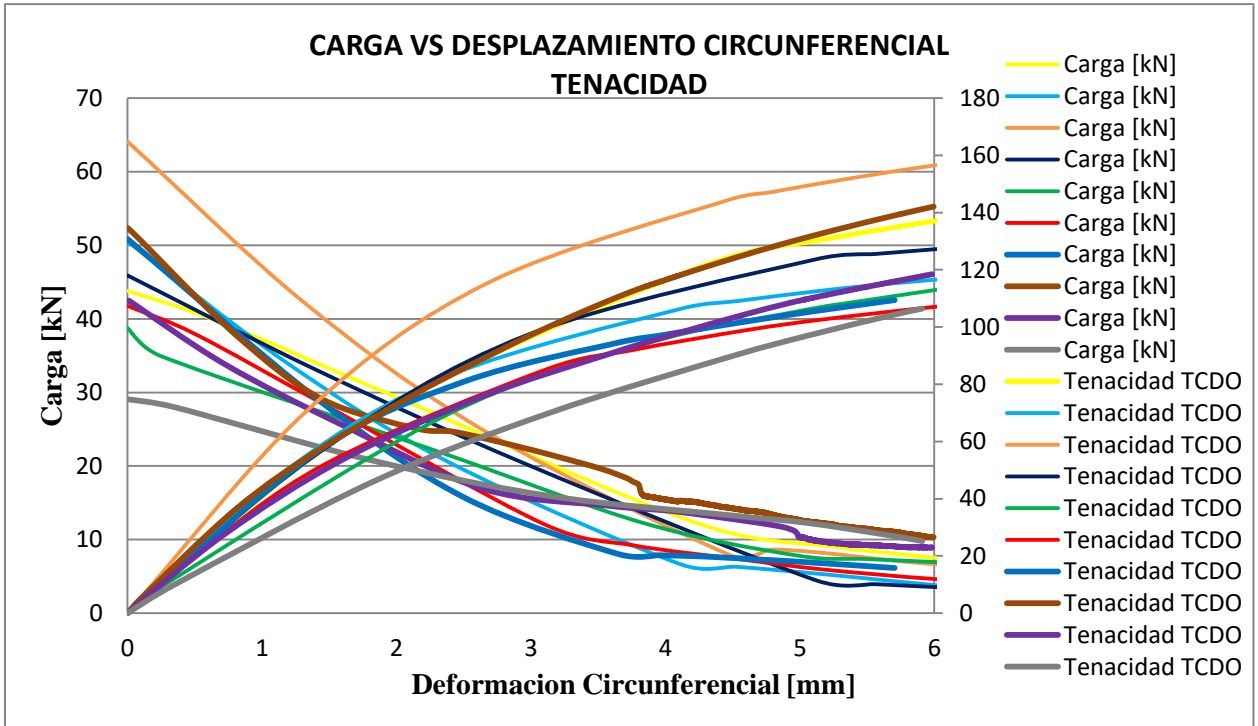


Grafico 2- Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 100.

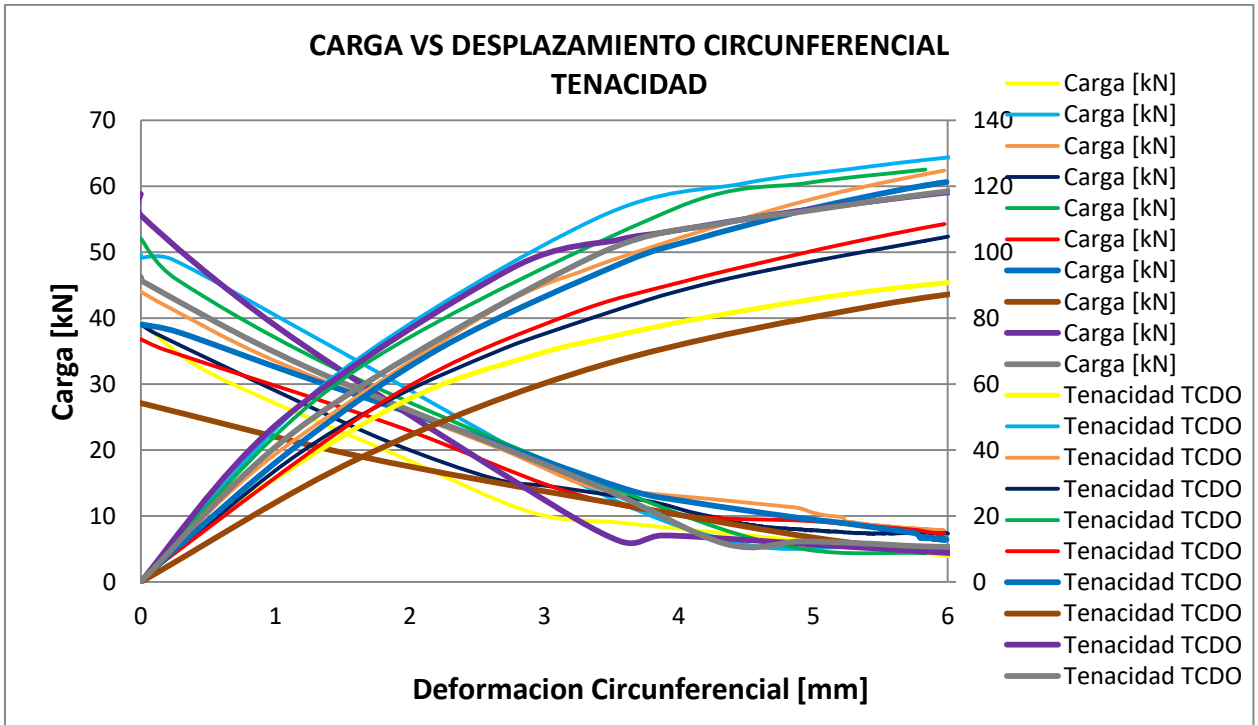


Grafico 3- Carga [kN] y Energía [J] vs Desplazamiento Axial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 100.

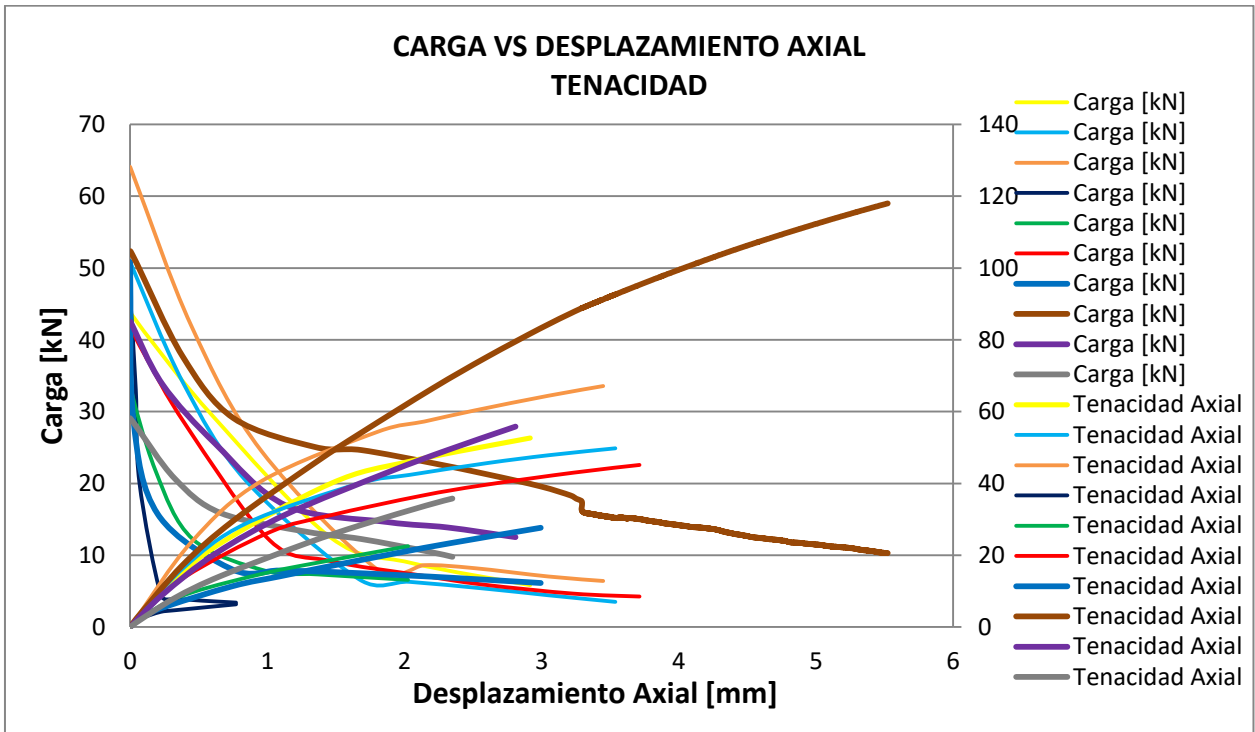


Grafico 4- Carga [kN] y Energía [J] vs Desplazamiento Axial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 100.

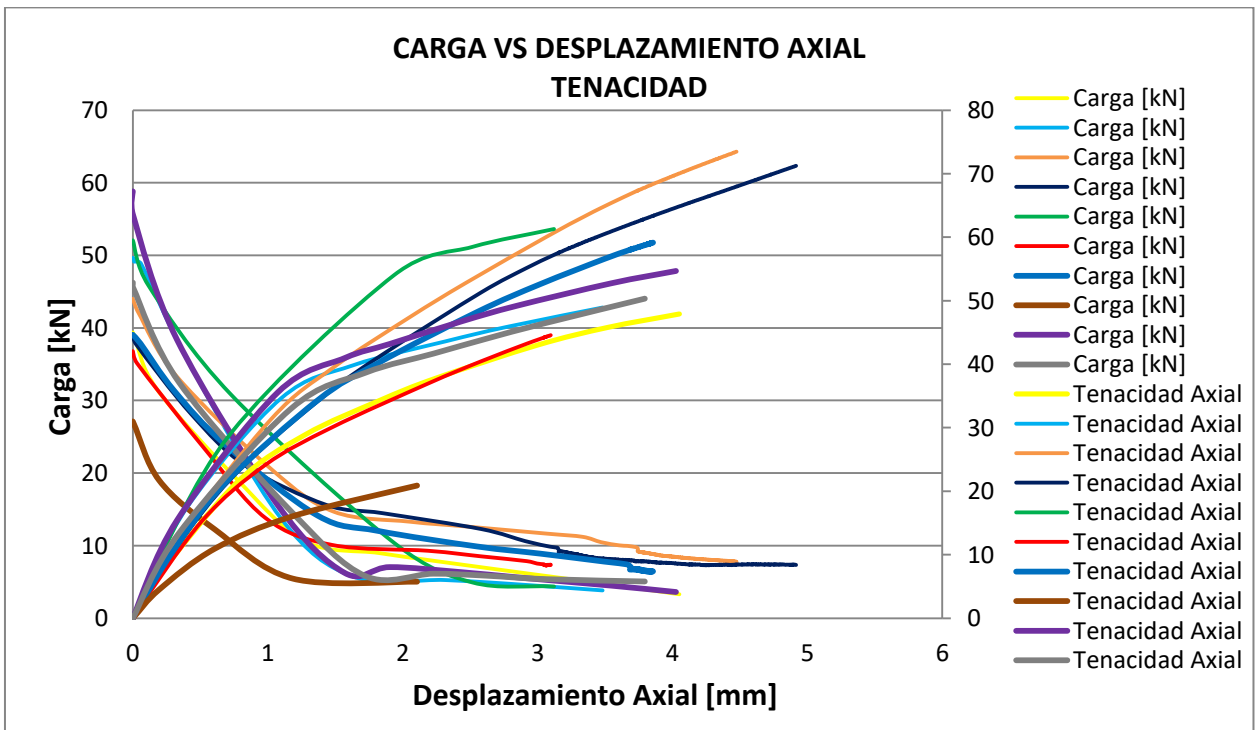


Grafico 5-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

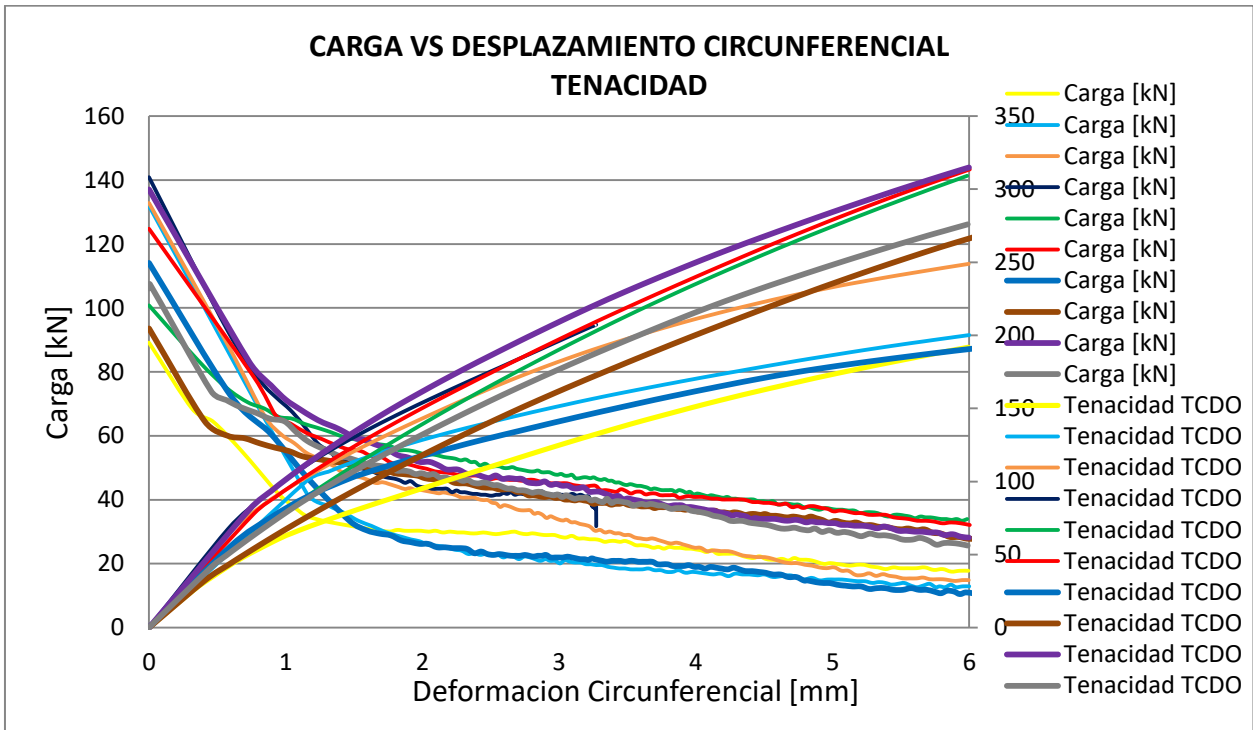


Grafico 6-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

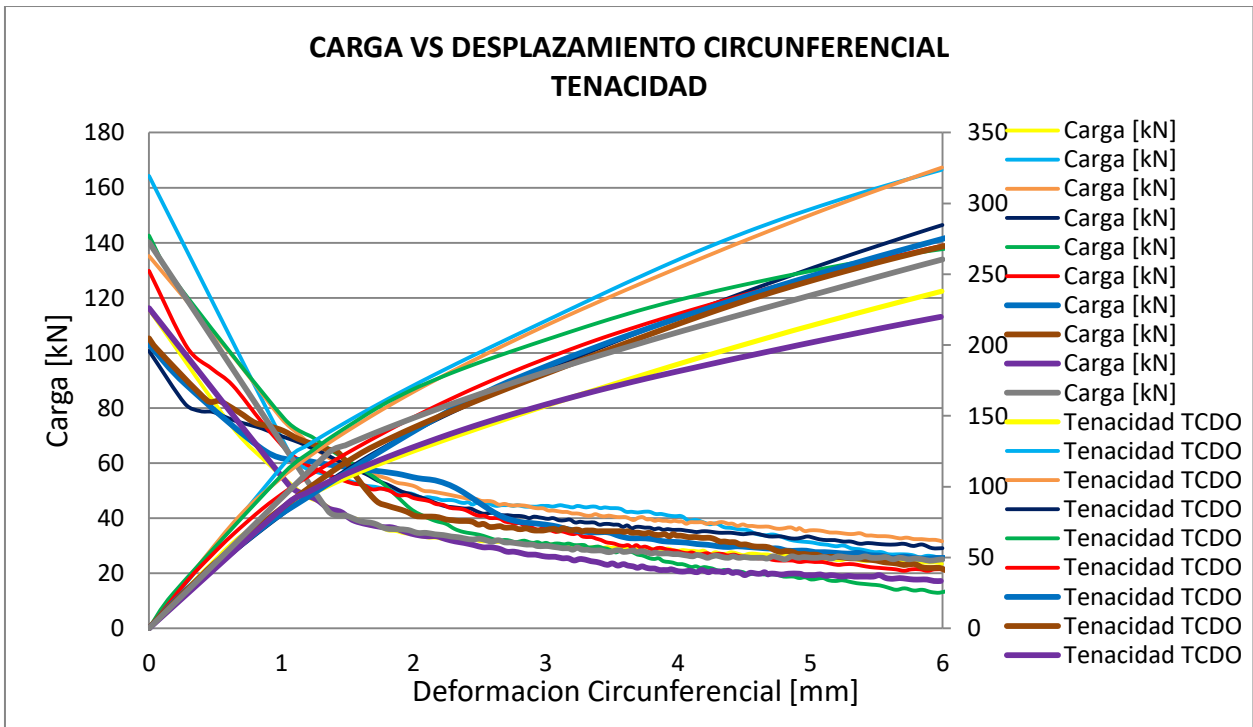


Grafico 7-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

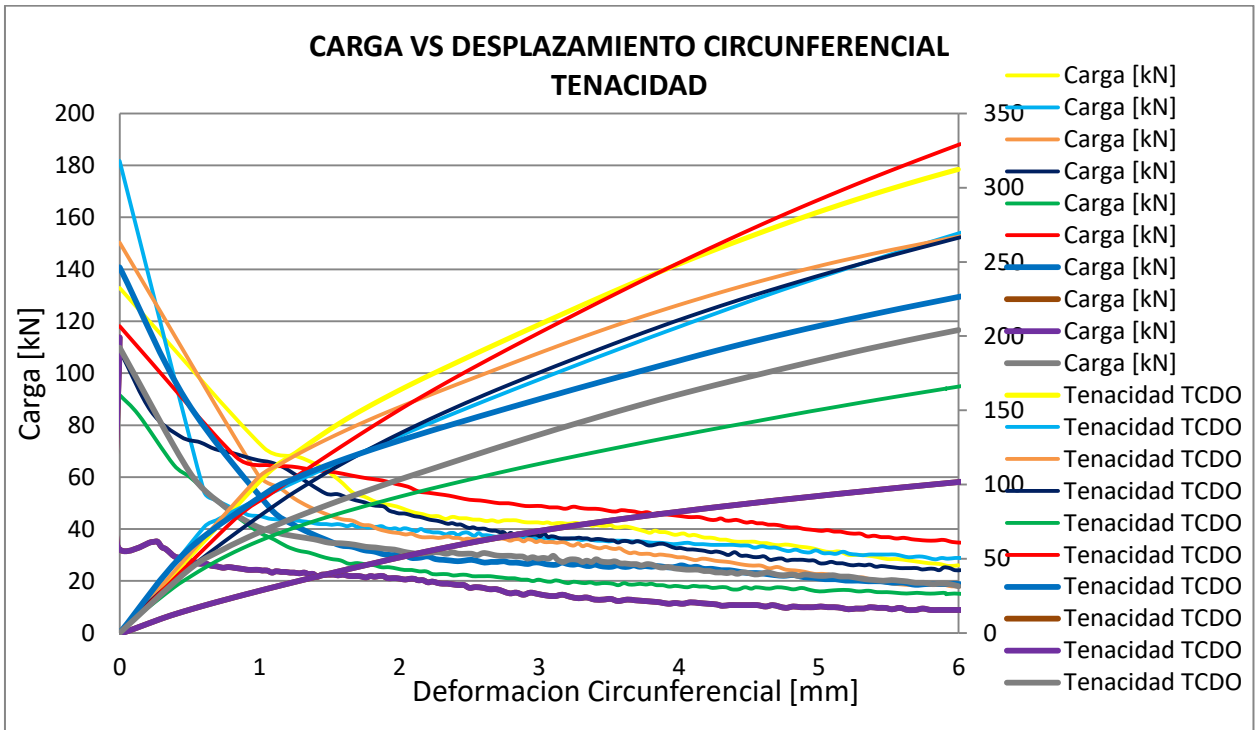


Grafico 8-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

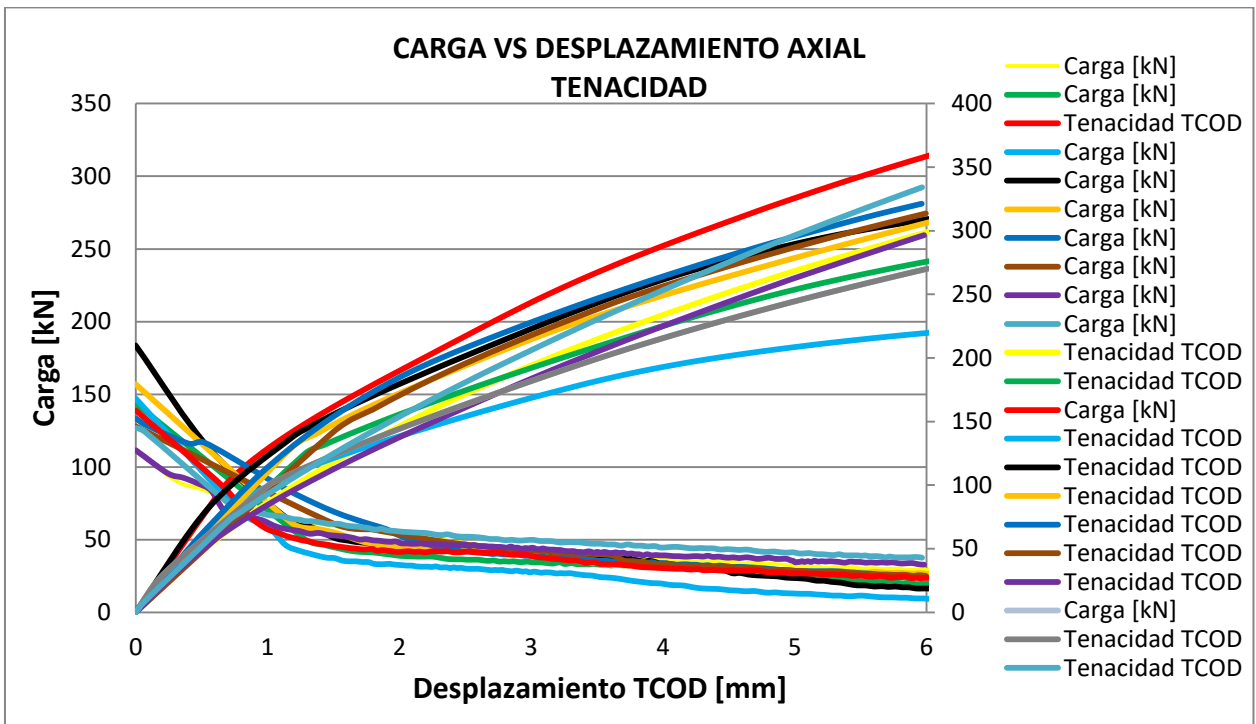


Grafico 9-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

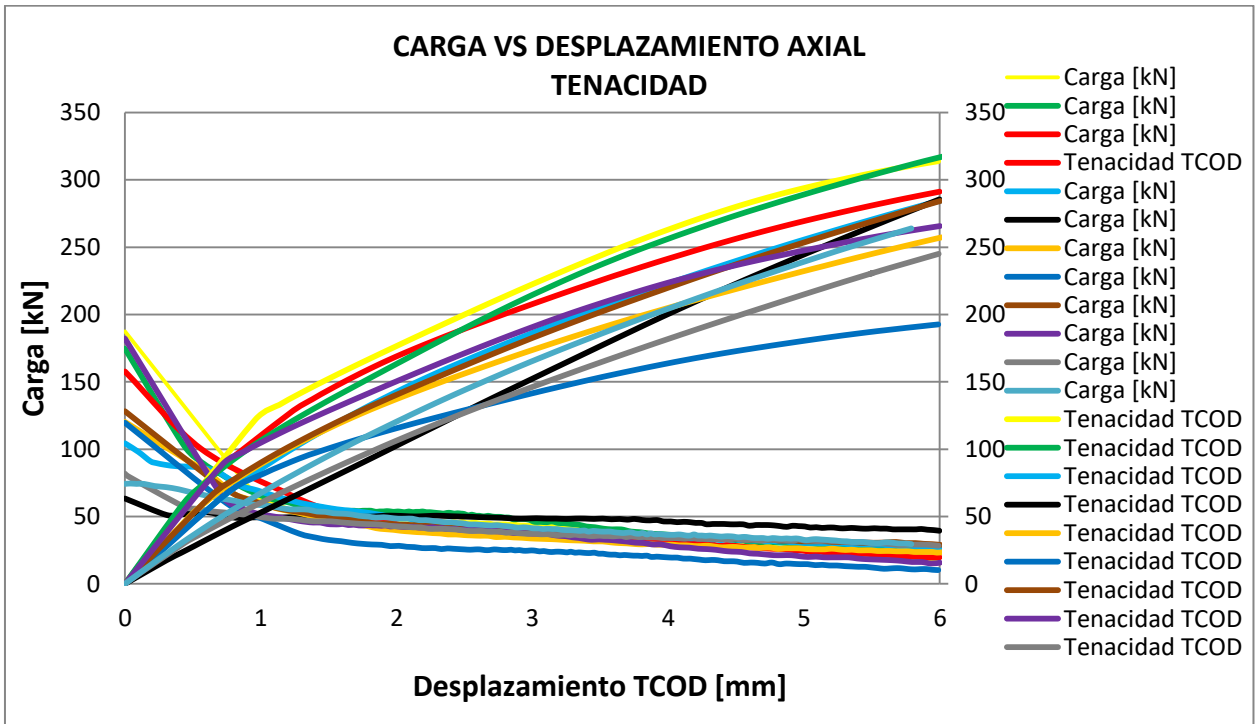


Grafico 10-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

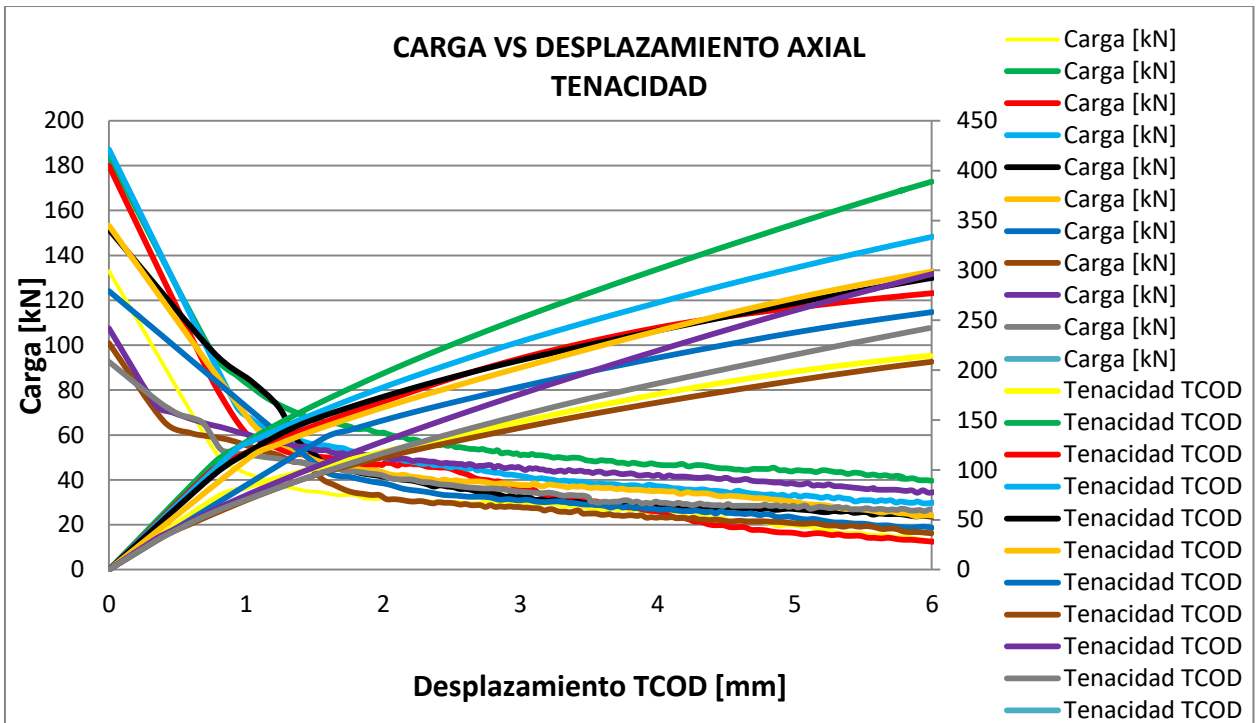


Grafico 11-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 150.

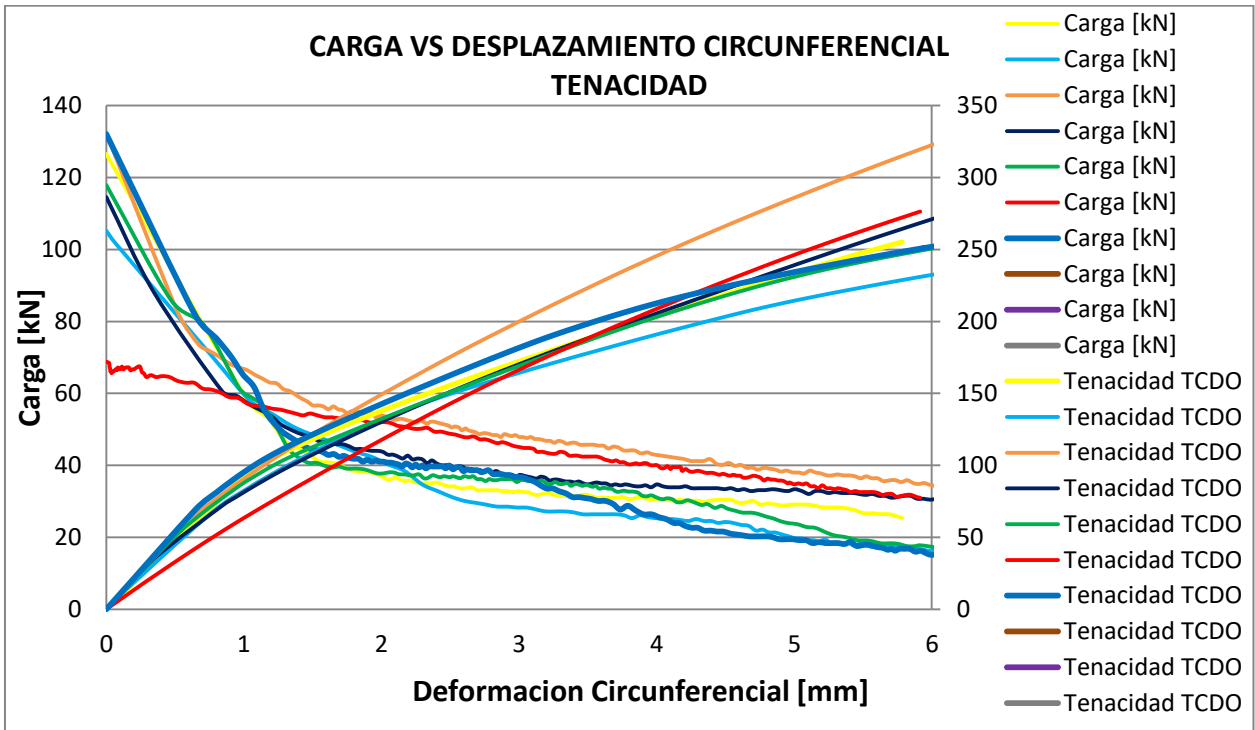


Grafico 12-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 150.

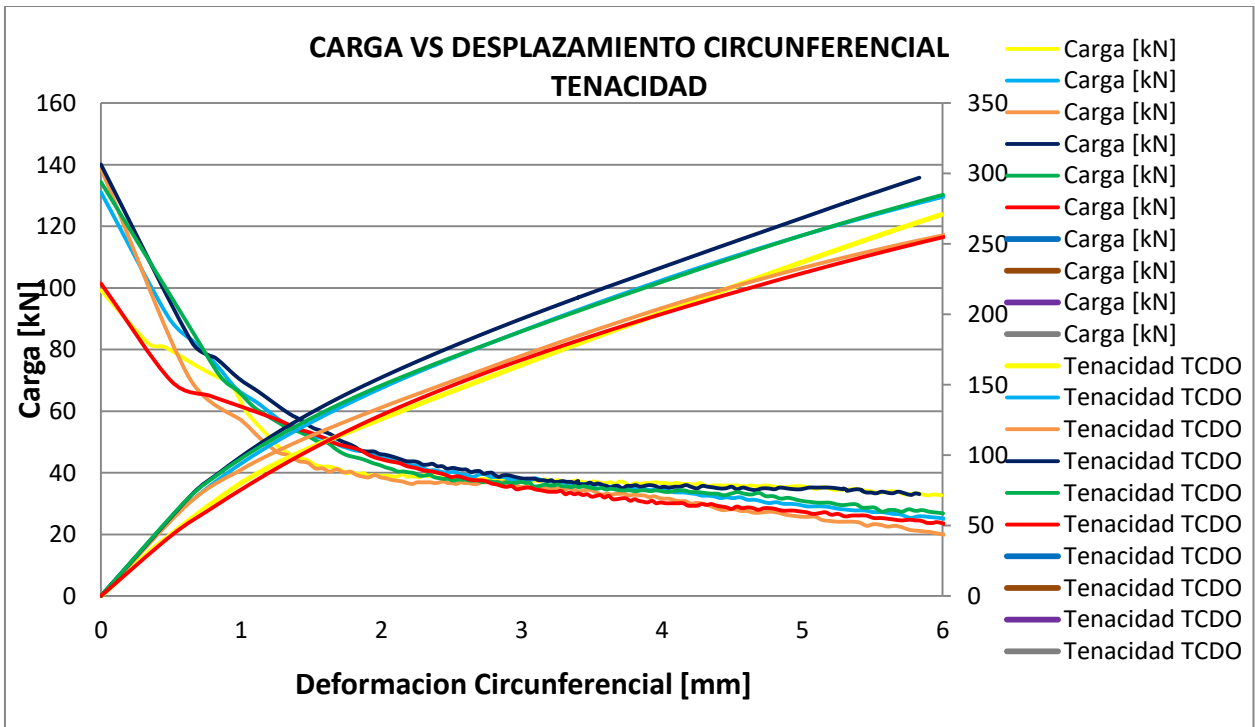


Grafico 13-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Circunferencial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 150.

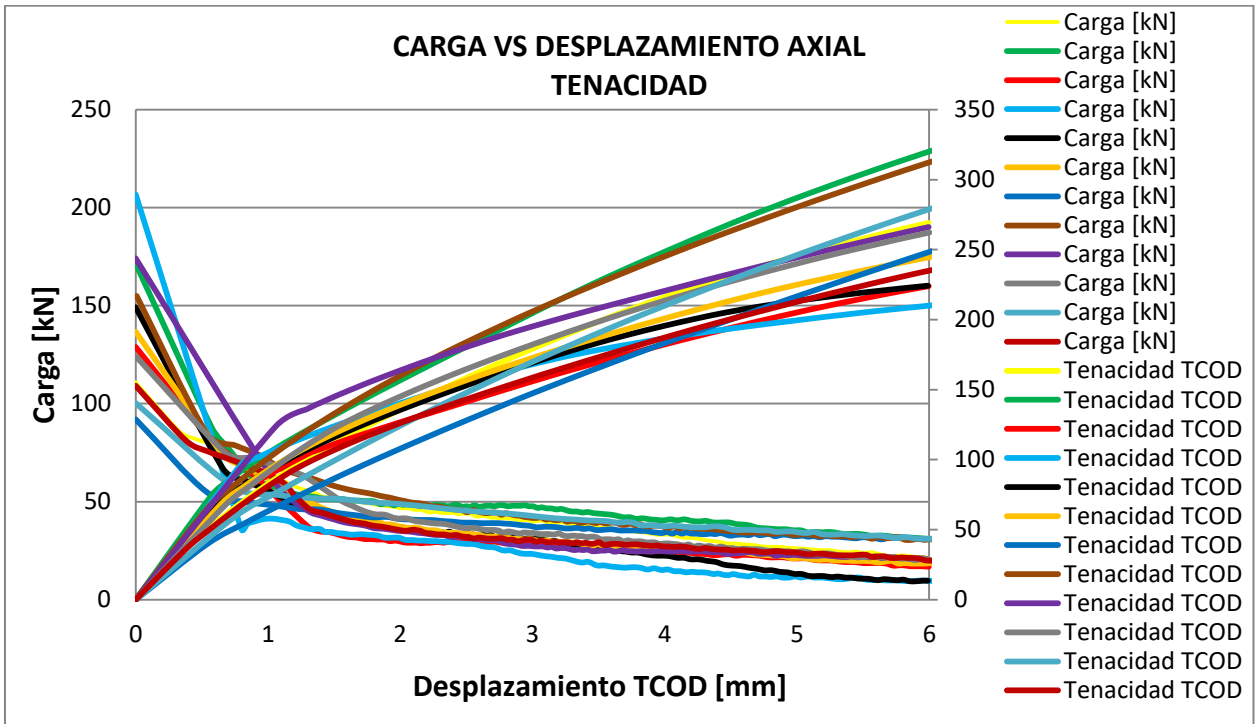


Grafico 14-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Axial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

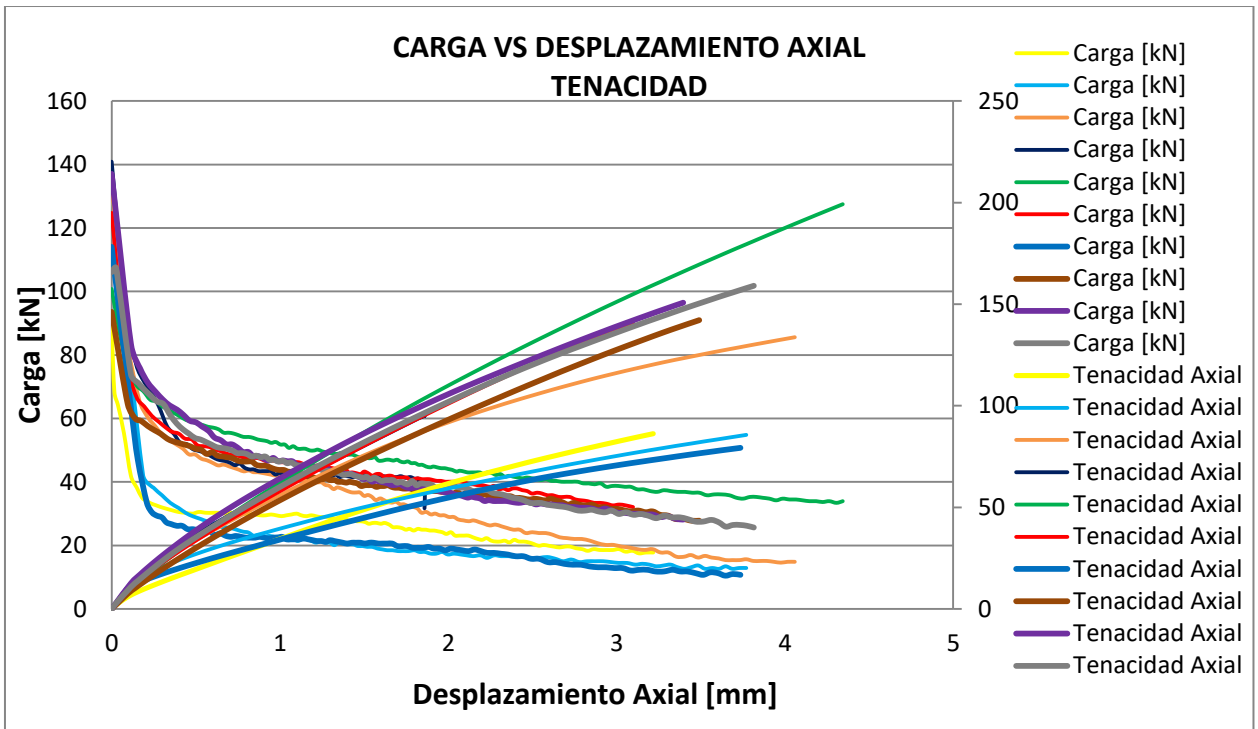


Grafico 15-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Axial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

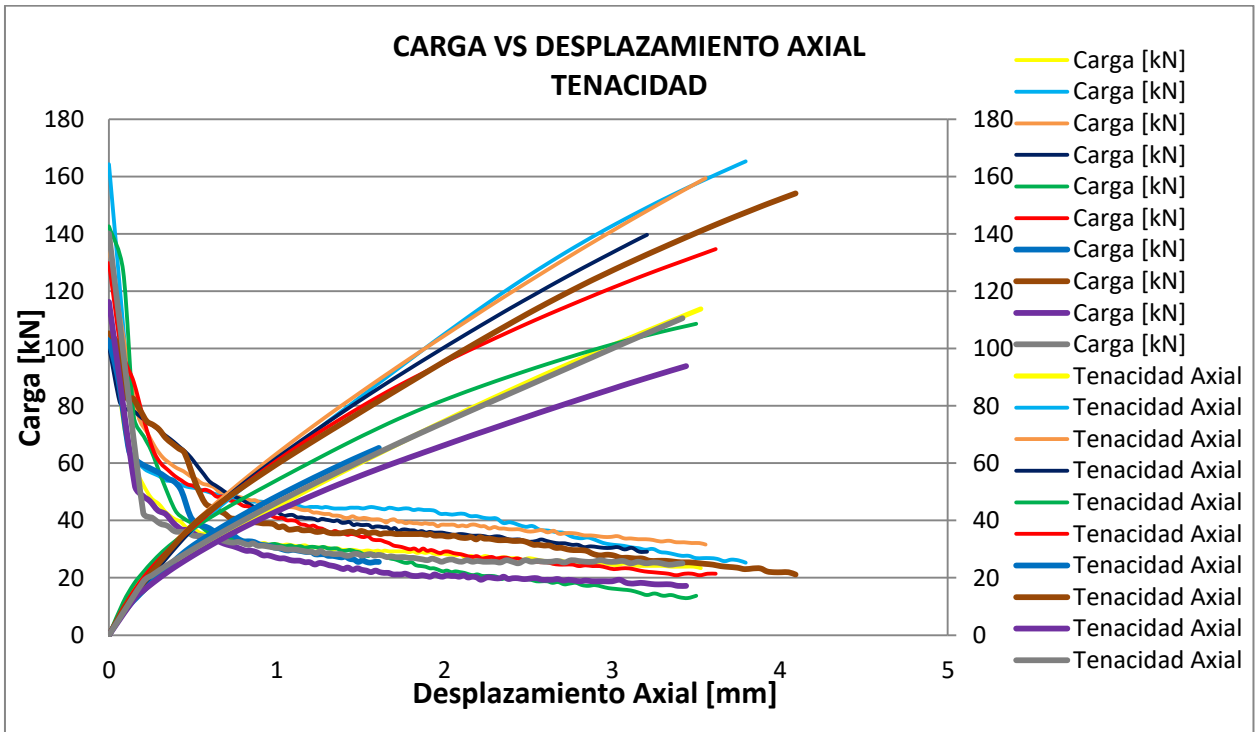


Grafico 16-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Axial [mm] para 4 [kg/m³] BCN 150.

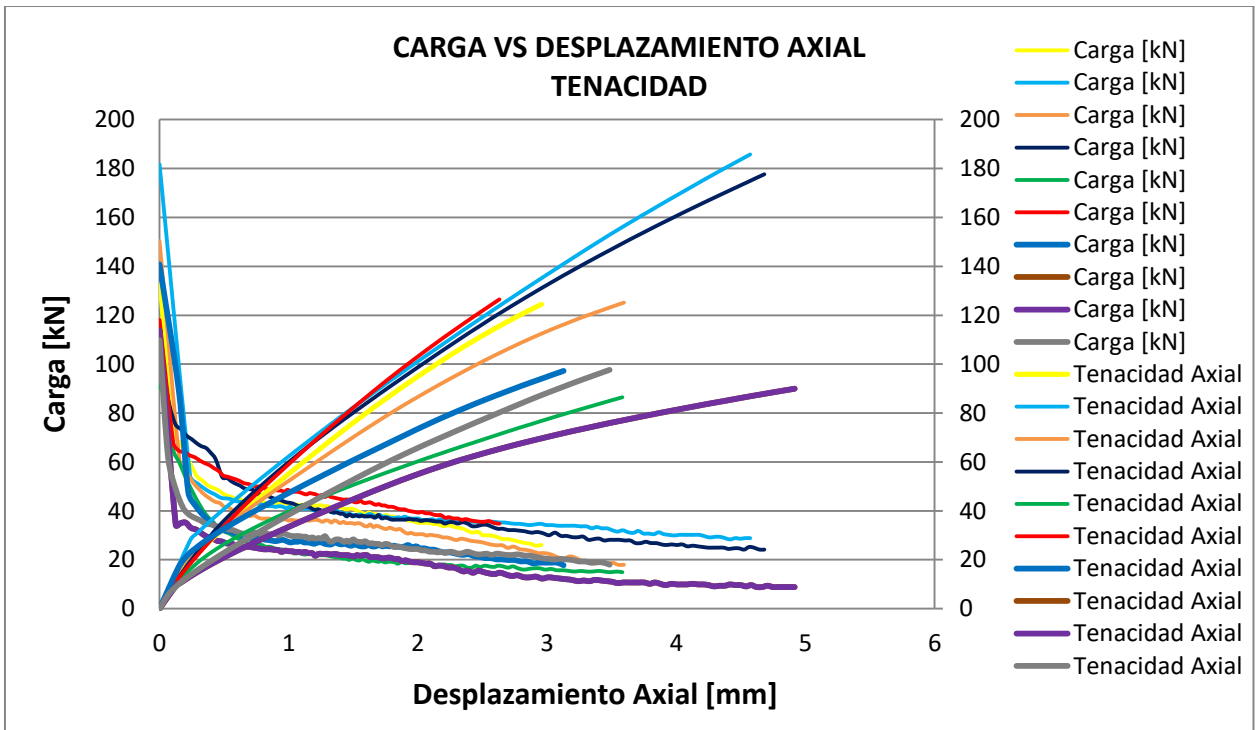


Grafico 17-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Axial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 150.

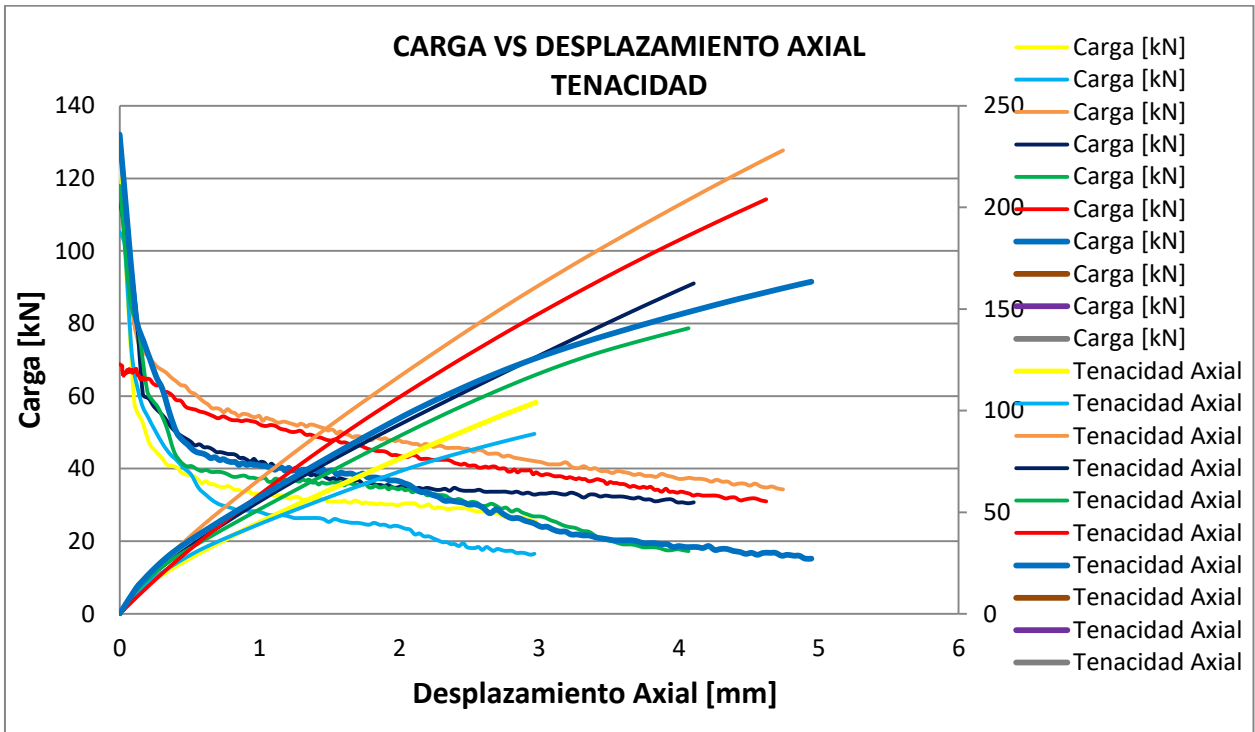


Grafico 18-Carga [kN] y Energía [J] vs Deformación Axial [mm] para 5 [kg/m³] BCN 150.

