

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
E.T.S DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

MÁSTER EN INGENIERIA DEL HORMIGON

PROYECTO DE FIN DE MÁSTER

TEMA:

**“METODOLOGIA DE ENSAYO PARA LA
CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DE
TIRANTES DE HORMIGON DE MUY ALTA RESISTENCIA”**

ELABORADO POR:

JOAQUIN ESTEBAN ESPINOZA BARZALLO

TUTOR

JUAN NAVARRO GREGORI

COTUTOR

PEDRO SERNA ROS

Índice

Índice

Resumen

Abstract

Agradecimientos

1.- INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

1.2 Contenido

1.3 Objetivos

2.- ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

2.2 Comportamiento de Tirantes de Hormigón Armado

2.2.1 Tirantes de Hormigón de Normal y Alta Resistencia con barras de acero

2.3 Hormigón de muy Alto Rendimiento UHP

2.3.1 Introducción

2.3.2 Propiedades

2.3.3 Desarrollo

2.3.4 Comportamiento en Tracción

2.3.5 Durabilidad

2.3.6 Normativa

2.4 Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento UHPC

3.- DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGIA DE ENSAYO

3.1 Fundamentos del Ensayo

3.2 Metodología Inicial de Ensayo

3.2.1.- Instrumentación Utilizada

- 3.2.1.1 Bastidor de Ensayo
- 3.2.1.2 Gato Hidráulico
- 3.2.1.3 Célula de Carga
- 3.2.1.4 Transductor de Desplazamiento
- 3.2.1.5 Discos Demec
- 3.2.1.6 Cuñas de Anclaje
- 3.2.1.7 Lámparas de Iluminación
- 3.2.1.8 Cámara Fotografía
- 3.2.1.9 Computadora

3.2.2 Ensayos Iniciales

3.3 Metodología Final de Ensayo

3.3.1 Ensayo Final con Mordazas

4.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

4.2 Materiales

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Gráficos de Alargamiento vs Carga

5.2 Análisis de Resultados

6.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Resumen

El Hormigón de muy Alto Rendimiento, si bien es cierto es un material no muy utilizado en la mayoría de los países es cada vez de mayor aplicación en estos tiempos. Cuando hablamos de Hormigones de Ultra Alta Resistencia decimos que son hormigones cuya resistencia sobrepasa los 150 MPa que su desempeño tiene características especiales y sus materiales tienen que cumplir estrictos controles de calidad.

El objetivo de esta Trabajo Fin de Máster es encontrar una Metodología de Ensayo para determinar el comportamiento de tirantes armados de Hormigón de muy Alto Rendimiento, tanto en Estado Límite de Servicio como en Estado Límite de Rotura. Se realizará una campaña experimental con tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con diferentes geometrías, así como también utilizaremos una armadura longitudinal que pasará por el centro de la probeta a modo de refuerzo.

Dicha armadura será una armadura activa o cordón que se utiliza para las Estructuras de Pretensado, ya que con su alto límite elástico de alrededor 1860 MPa y trabajando con un Hormigón de muy Alto Rendimiento, nos podrán dar pautas importantes sobre el proceso de fisuración y también con la distribución de tensiones internas que se producen en el Hormigón. Por otra parte, se pretende también ensayar tirantes armados con aceros de resistencia convencional.

Para dicho ensayo se utiliza instrumentación física que se va a instalar en unos mecanismos externos al tirante para que no se vean afectados con ninguna rotación o desplazamiento en el momento de ejercer tracción mediante un gato hidráulico a la armadura longitudinal. A su vez se emplean captadores de desplazamiento en cada uno de los extremos de la probeta y para medir los desplazamientos internos de la probeta se utilizan discos Demec para medir los alargamientos de la probeta.

También se utilizarán cámaras fotográficas con el fin de medir los alargamientos y poder tener medidas redundantes de los alargamientos.

Después de realizar el programa experimental y de analizar todos los resultados obtendremos un panorama claro sobre cómo se pueden realizar los ensayos de los tirantes de HMAR, ya sean estos con armadura activa o pasiva, que sometidos a esfuerzos de tracción conseguiremos estudiar el comportamiento de este en su fase de fisuración.

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1 Antecedentes

La resistencia a tracción de elementos estructurales con Hormigón de muy Alto Rendimiento y el desarrollo de la fisuración en estos elementos son temas que están abiertos en el estado del conocimiento.

El hormigón convencional nos proporciona una gran cantidad de ventajas y beneficios, es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial. Sin embargo, existen proyectos con requisitos más exigentes por lo que es necesario desarrollar hormigones que sean capaces de aportar mayores resistencias mecánicas.

Se han realizado varios estudios con referencia a los tirantes de Hormigón Armado que los realizaron KISHI y LLORAIN, en los cuales con una metodología empleada y con parámetros establecidos, llegan a estudiar el comportamiento de los tirantes sometidos a esfuerzos de tracción y sus resultados nos han dado una idea de cómo trabaja el hormigón cuando posee una armadura longitudinal por el centro de su probeta y se somete a esfuerzos de tracción estirando de ella se puede ver como existe una distribución de tensiones y por consiguiente un proceso de fisuración del elemento .

Ya que un Hormigón convencional no tiene las mismas características que un Hormigón de muy Alto Rendimiento, puesto que sus características con mucho mejores tanto mecánicas como de durabilidad, es necesario un estudio tanto metodológico de cómo se pueden realizar los ensayos, qué variables tenemos que tener en cuenta cuando vayamos a realizar cada ensayo y qué resultados vamos a obtener tomando en cuenta el alargamiento del elemento y su resistencia a la tracción.

También de manera muy discreta y superficial se podrán estudiar los procesos de fisuración de los elementos

1.2 Contenido

El contenido o metodología empleado en esta tesis está dividido en 7 capítulos, en los cuales se van tratando diferentes aspectos.

Después de unos antecedentes y objetivos planteados que los expondremos en el Capítulo 1, nos centraremos a estudiar brevemente el material que será el Hormigón de muy Alto Rendimiento y veremos que normativas lo tienen en cuenta y haremos un estudio de cómo se comportan los tirantes de Hormigón Armado y los tirantes de HMAR, veremos sus características y variables, también sus comportamientos ya que al ser 2 materiales con diferentes características mecánicas se comportan de diferente forma todo esto irá en el Capítulo 2.

En el Capítulo 3 hablaremos sobre los métodos de ensayo que se han utilizado, tanto los que nos han dado resultados positivos como también los ensayos preliminares que han servido como pauta para mejorar la metodología y las variables de los ensayos que realicemos, veremos toda la instrumentación necesaria tanto electrónica como no electrónica que emplean y todos los materiales utilizados en los ensayos.

El Capítulo 4 será más práctico puesto que realizaremos toda la campaña experimental propuesta para la Trabajo Fin de Master, veremos toda la planificación tanto de la preparación del Hormigón de muy Alto Rendimiento como de los tirantes ya sean estos con armadura longitudinal activa o pasiva. Veremos de que se trata los ensayos a tracción en tirantes que se hayan estudiado y cómo trabaja el hormigón sometido a esfuerzos de tracción y su fase de fisuración que se va a producir en hormigón.

En el Capítulo 5 hablaremos sobre los resultados obtenidos, presentaremos todas las gráficas que obtengamos, tanto de carga vs alargamiento del tirante y también de la carga vs alargamiento de cada Demec. Veremos el proceso de fisuración de la probeta, mediremos aberturas de fisura y también la separación entre cada una de ellas, haremos un estudio mediante fotografías para ver las diferentes fases del ensayo tanto en carga como en alargamiento interno de la probeta y para terminar en el Capítulo 6 haremos un análisis de todos los resultados obtenidos en los cuales veremos el alargamiento total de la probeta y también de la armadura.

Finalmente, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones alcanzadas en la Trabajo Fin de Máster y las futuras líneas de investigación que quedan abiertos para posteriores trabajos.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo Fin de Master (TFM) es el de encontrar una metodología de ensayo para tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento. Más concretamente se quieren conseguir los siguientes objetivos particulares:

- 1.- Revisión de los trabajos existentes sobre metodologías de ensayo de tirantes de Hormigón sometidos a esfuerzos de tracción y también los procesos de fisuración de los tirantes.
- 2.- Encontrar una metodología apropiada, los parámetros y variables necesarias para realizar ensayos de Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento, sometidos a esfuerzos de tracción.
- 3.- Analizar el Alargamiento del Tirante de HMAR mediante los captadores de desplazamiento y la fotogrametría, encontrar una correlación entre los valores.
- 4.- Analizar las diferencias en cuanto a alargamiento del tirante en los diferentes ensayos que vamos a realizar y así encontrar una metodología adecuada de ensayo.
- 5.- Averiguar y medir en un tirante armado cual es la contribución del hormigón y del acero a la resistencia completa del tirante.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Introducción

A pesar de que en los últimos tiempos el Hormigón de muy Alto Rendimiento, ha sido muy estudiado por varios investigadores y se han realizado diferentes métodos para caracterizarlo tanto a compresión como a tracción,

Sobre el comportamiento a tracción del Hormigón de muy Alto Rendimiento se han realizado numerosas investigaciones, gracias a las cuales una gran cantidad de códigos y normativas tanto de España como del resto del mundo, han incorporado capítulos exclusivamente para ofrecer información tanto del comportamiento como también de cálculos y parámetros que sirven como guía en todo lo que se refiere al HMAR.

En este capítulo se proporciona una visión general sobre el comportamiento a tracción tanto del Hormigón Armado como del Hormigón de muy Alto Rendimiento. Además, se trata sobre las características y propiedades del HMAR.

2.2 Comportamiento de Tirantes de Hormigón Armado

El comportamiento de los Tirantes de Hormigón Armado sometidos a esfuerzos de tracción simple nos da una idea del comportamiento del material en este caso un Hormigón normal con una resistencia de compresión entre los 30 a 50 MPa.

Se supone que la única fuerza que actúa sobre el tirante es una fuerza axial monotónica, en la cual el tirante presenta una primera etapa en la cual no está fisurada solo hasta que alcanza la resistencia a tracción del hormigón en alguna parte a lo largo de su eje, en este caso aparece una primera grieta.

Para realizar la evaluación de las características de fisuración en el Hormigón Armado la podemos realizar a través de tirantes simples con un refuerzo longitudinal de acero que estará sometido a una fuerza de tensión axial pura, existen dos razones por las cuales podemos explicar el uso de los tirantes para estudiar la fisuración en el hormigón: una es la carga que vamos a aplicar y la segunda se refiere al posible alcance que vamos a tener sobre los resultados obtenidos en los tirantes los cuales los podríamos llevar a elementos más complejos como pueden ser vigas o losas.

La formación de una única fisura nos introduce en una discontinuidad física en la cual el hormigón sufre consecuencias tanto en deformaciones, tensiones y esfuerzos, tanto en el hormigón como en el acero.

Si dicha fuerza axial se incrementa, se van a producir nuevas fisuras distribuidas de manera indistinta a lo largo de todo el elemento. Esta fase de formación de fisuras va a terminar cuando la resistencia a tracción del elemento en ninguna parte pueda superarse esto quiere decir que cuando la resistencia a tracción supere su máximo, nos dirá que el elemento ha fracasado.

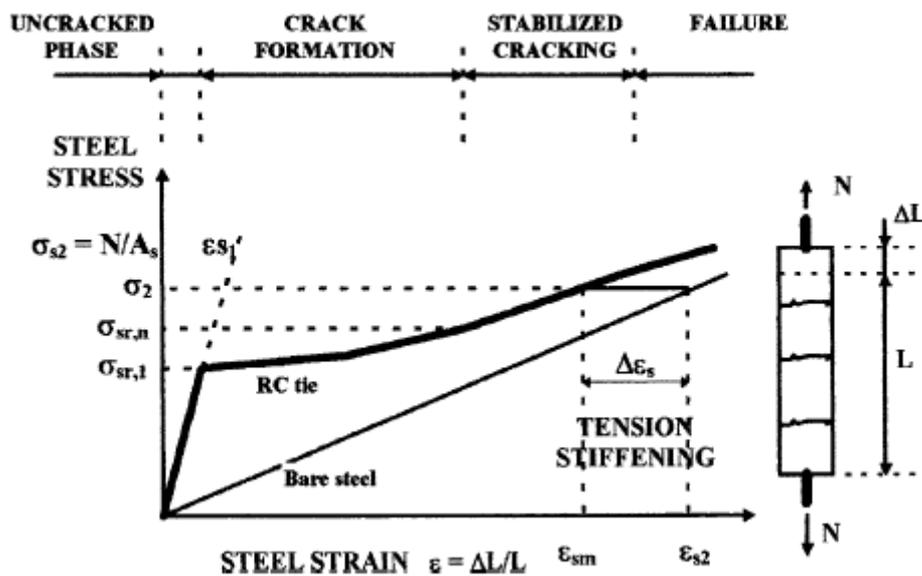


Fig. 1- Comportamiento de un Tirante de Hormigón Armado (Lorrain, Maurel and Seffo 1998)

Después del proceso de fisuración, no existe tensión de tracción en el hormigón en el cual se ubican las fisuras. En la formación de las primeras fisuras se reduce el esfuerzo de tracción promedio en el hormigón entre las fisuras y mientras más fisuras se produzcan la tensión media en el hormigón se reducirá aún más.

Los Principios generales sobre la teoría de fisuración por tensión en las estructuras de Hormigón Armado, según las extensas investigaciones realizadas a lo largo del tiempo nos pueden mostrar con exactitud el comportamiento de fisuración en las estructuras de Hormigón Armado. El espaciamiento medio entre las fisuras en la fase de fisuración estabilizada se lo puede definir a través de una relación semi empírica, teniendo siempre en cuenta una distribución de la tensión del refuerzo y los parámetros geométricos del elemento.

Existe una relación en la cual nos dice que la tensión media de la resistencia a tracción del hormigón casi siempre permanece constante debido a un aumento de la resistencia a compresión del hormigón.

La influencia para lograr mejores resultados mecánicos del hormigón en función del ancho de fisura de los elementos de Hormigón Armado depende en un gran porcentaje basándose en un criterio de comparación en el cual nos dice: “que a un nivel de carga dado o a un nivel de deformación dado, en ciertas ocasiones es mejor utilizar un Hormigón de muy Alto Rendimiento para disminuir la fisuración de un 20 a 40 %” (Lorrain, Oliver and Seffo, 1998).

Broms BB en su estudio realizado “Crack width and crack spacing in reinforced concrete members”, caracterizo dos tipos de fisuras con geometrías diferentes en las cuales nos dice que una fisura a la que le llama principal es la que es más visible y la que alcanza la superficie del hormigón y otra secundaria que son las fisuras que no logran llegar a la superficie siendo estas un tipo de fisuras internas producidas en el hormigón, en el caso de un mayor recubrimiento la cantidad de fisuras internas que se produzcan a un cierto nivel de fuerza de tracción serán fisuras secundarias.

También llega a una conclusión en la que nos dice que con unas muestras de diferentes dimensiones que podemos utilizar para representar el comportamiento de los elementos estructurales la dispersión de los resultados aumenta de cierta forma que reduce la fiabilidad de los resultados.

Si nos ponemos a estudiar la influencia de la barra de refuerzo en el tirante, las diferentes investigaciones que se han realizado en los últimos años todas llegan a la conclusión de que cuanto mayor es la relación de acero de refuerzo esto quiere decir que mientras tenemos una barra de mayor diámetro menos es el ancho de fisura medio que se produzca en el tirante. De hecho, el ancho de fisura medio que se produce en el tirante siempre va a disminuir mientras se aumente la relación del acero de refuerzo sin importar que hormigón sea.

También se dice que el espaciamiento entre las fisuras producidas en el elemento depende de gran manera de la relación del acero de refuerzo y que en un elemento no se observan cambios muy significativos sea cual sea la resistencia del hormigón obtenida.

En torno a el recubrimiento en los tirantes de Hormigón Armado, Darwin, McCabe, Idun y Schoenekase en su artículo “Development length criteria: bars not confined by transverse reinforcement” ellos dicen que, en los elementos estructurales diseñados con un requisito mínimo de recubrimiento, el hormigón puede ser capaz de no resistir las fuerzas que causan un proceso de fisuración longitudinal

Una posible reducción de el recubrimiento en los tirantes que a menudo está relacionado con la barra de acero de refuerzo que tenemos en la parte central de nuestro tirante, podría darnos una inesperada apertura de la longitud de las fisuras producidas y también una posible pérdida de rigidez del elemento puesto que la cantidad de hormigón es menos para soportar los diferentes esfuerzos producidos por la fuerza de tracción en el elemento. Sin embargo un mayor recubrimiento en el tirante probablemente pueda retrasar la formación de las fisuras transversales y esto puede producir que las propiedades de las fisuras sean aún más complicadas de estudiar.

En este artículo científico que vamos a revisar es uno de los más recientes que se realizó en el mes de Noviembre del año 2016 en el cual los investigadores Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”, en la cual nos dicen que si bien es cierto no existe una configuración para un ensayo estándar para los elementos de hormigones sometidos bajo tensión, la prueba de tracción directa es el ensayo experimental más utilizado. Utilizan un prisma de hormigón reforzado con una barra de refuerzo en el centro del tirante y esta durante el ensayo se fijará en unos agarres que irán a la máquina de la prueba y esta realizara un control de fuerza sobre la barra de acero, tal como mostramos en el siguiente gráfico:

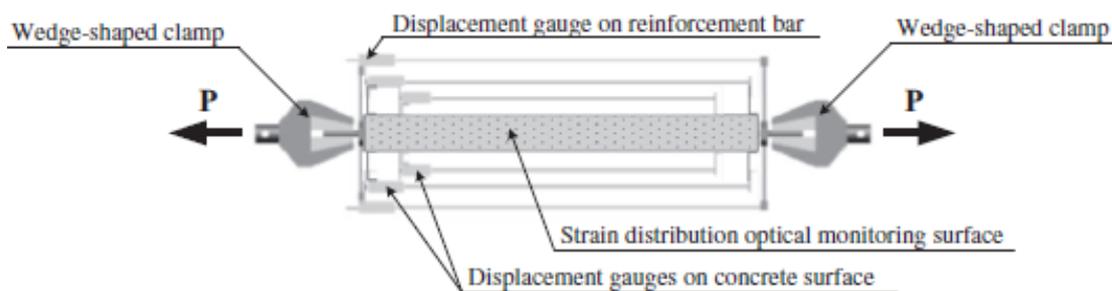


Fig. 2.- Diseño común de la prueba de tracción y posible disposición del equipo de monitoreo (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

Ellos asumen que en general se supone que el área total del hormigón es efectiva bajo efectos de tensión, aunque esta suposición es adecuada solo para ciertos hormigones con un limitado recubrimiento hacia la barra de hacer de refuerzo. También trabajan bajo la suposición de que toda la tensión que se produzcan en las fisuras que por el ensayo aparezcan en nuestro tirante sea soportada por la barra del acero de refuerzo.

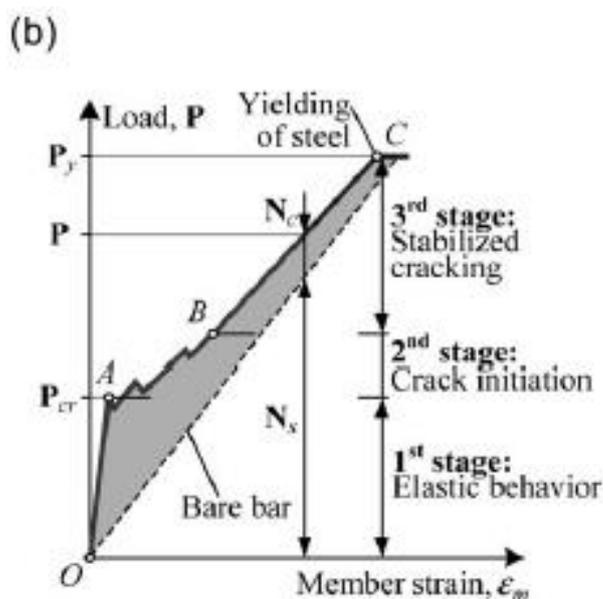


Fig. 3.- Comportamiento promedio de deformación (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

En la figura 19 podemos ver el comportamiento promedio de la deformación en la cual podemos ver que existen 3 etapas en el comportamiento del Hormigón en el ensayo de tracción al que está sometido nuestro tirante de Hormigón Armado, como observamos tenemos una primera etapa en la cual tenemos un comportamiento elástico de los materiales tanto del hormigón como del acero, en la etapa segunda tenemos la iniciación del proceso de fisuración como podemos ver en la imagen los saltos que tiene nuestra curva de carga-tensión y en la tercera es una etapa de estabilización de la fisura en la cual muestra un comportamiento de deformación de las fisuras transversales desarrolladas y se caracteriza por la pérdida gradual de la resistencia de la unión de la fisura.

Realizan una campaña de ensayos experimentales en los cuales utilizan 12 tirantes de Hormigón Armado con medidas de 60x60 mm, 80x80 mm y de 100x100 mm con una longitud de 640 mm, en las cuales los tirantes de 60x60 utilizaran una barra de acero de refuerzo de 10mm con unas características $E_s = 199.5$ Gpa y $f_y = 510.1$ Mpa. No así los tirantes de 80x80 y los de 100x100 que tienen unas características de materiales $E_s = 200.7$ Gpa y $f_y = 503.9$ Mpa el hormigón para todos los tirantes es igual a C30/37.

Los ensayos de estos tirantes se realizaron en una maquina electromecánica que tenía una capacidad de carga de 100 KN aplicando la fuerza directa a el acero de refuerzo tal como lo indica la Fig. 18, y se utilizaron transductores de desplazamiento para medir las deformaciones en la superficie del concreto y también el alargamiento o deformación de la barra de acero.

Además, utiliza un sistema DIC (Digital Image Correlation) por sus siglas en ingles que no es más que una técnica de seguimiento y registro de imágenes digitales para mediciones en 2D y 3D del cambio que puedan ocurrir entre cada imagen. Este método se puede utilizar para

medir los desplazamientos o alargamientos que se produzcan en los elementos, así como también para perseguir fisuras que puedan originarse cuando el elemento se somete a diversos esfuerzos ya sean estos de compresión o tracción.

También utilizan Galgas extensométricas las cuales están colocadas en los dos extremos del tirante para poder medir las deformaciones en los 2 extremos iniciales del tirante medidos desde una medida base de 40 mm hasta una longitud de 80 mm.

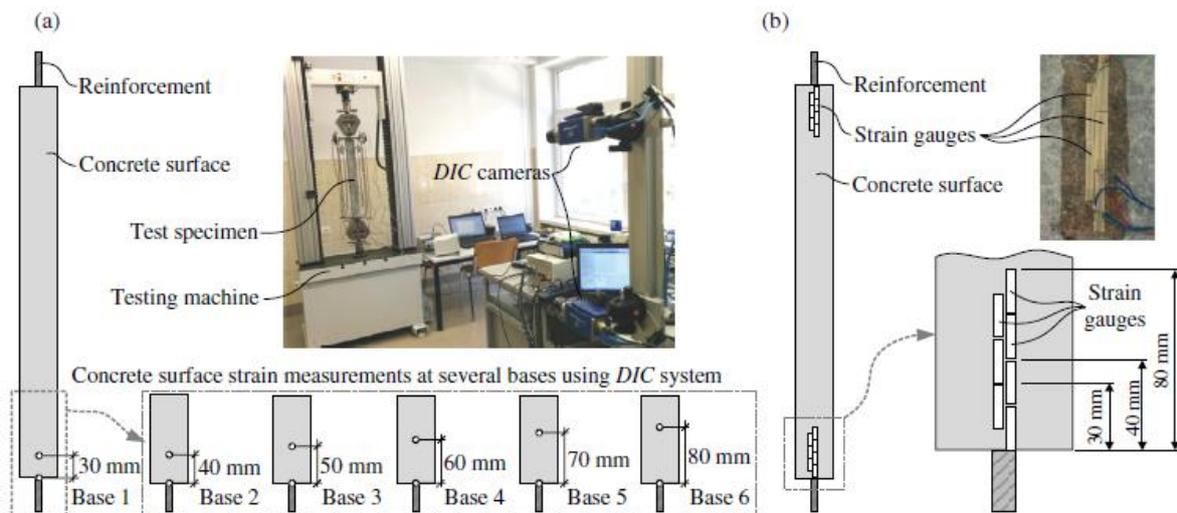


Fig. 4.- Sistema de Ensayo utilizado mediante el sistema DIC y las Galgas Extensométricas. (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

Como podemos ver en la imagen (Fig. 20), es la disposición del ensayo tomado en cuenta por estos investigadores en la cual su tirante está colocado verticalmente y se somete a un esfuerzo de tracción desde un extremo del mismo y también la colocación del sistema DIC y también como están colocadas las galgas extensométricas en cada uno de los extremos de la probeta.

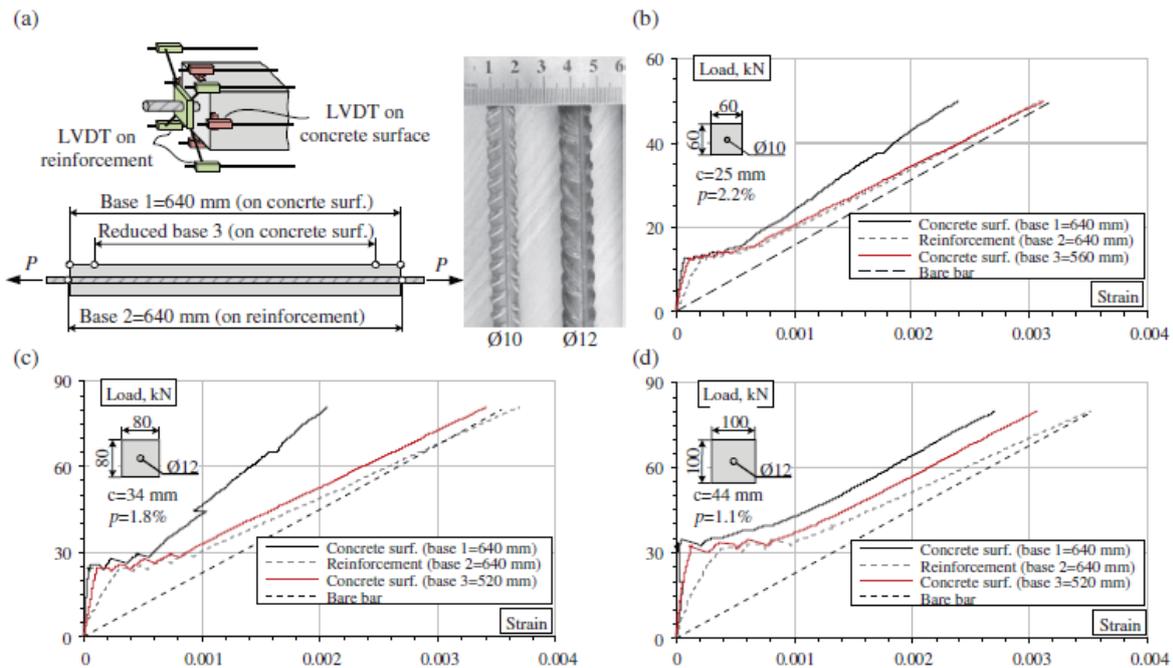


Fig. 5.- Resultados de los Transductores de desplazamiento (LVDT), evaluación de las deformaciones promedio en los 3 tirantes con sección transversal de 60x60, 80x80 y 100x100 mm. (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

Como podemos ver en la imagen tenemos los cuadros comparativos de carga-tensión de cada uno de los tirantes y también un esquema de las distintas longitudes de estudio como son la del hormigón, del acero de refuerzo y en la parte de las galgas extensométricas. Podemos ver que las deformaciones promedio en la superficie del hormigón y en el acero de refuerzo son características para todas las muestras.

Viendo el grafico del tirante de 60x60 y de 100x100 podemos ver que la condición de compatibilidad en deformaciones es constante es decir que tienen una tendencia las curvas tanto del hormigón, del acero y del hormigón reducido por la colocación de las galgas extensométricas. No así en los tirantes de 80x80 en los cuales la curva del Hormigón no tiene una tendencia parecida a las otras curvas tanto del acero como del hormigón reducido por las galgas extensométricas por lo que para un estudio más exhaustivo ha sido desechada esa geometría para su estudio.

Los resultados del ensayo indicaron que el recubrimiento se correlaciona con la dispersión de las deformaciones promedio de los tirantes, tanto en la barra de acero de 10mm y de 12mm podemos ver que el incremento de deformación se debe al nivel de tensión en el acero de refuerzo con lo que los resultados entre las dos barras se pueden comparar. Lo más probable es que la dispersión que existe en el ensayo es debido a que ciertas fisuras internas no logren alcanzar la superficie del hormigón.

Dicho esto, se realizó un estudio solamente con los tirantes de 60x60 mm puesto que se pensó que los resultados anteriores tenían más correlación por lo que se realizaron dos tipos de especímenes A y B, el primero representa un elemento convencional muy utilizado para los

ensayos experimentales y el segundo para tratar de representar la deformación de un elemento estructural teniendo en cuenta la incapacidad para controlar las deformaciones del acero de refuerzo.

Se realizaron 19 especímenes de cada tipo con un hormigón convencional C30/37 y con una armadura de refuerzo de 10mm y un recubrimiento de 25mm tal como lo explicamos en la siguiente imagen:

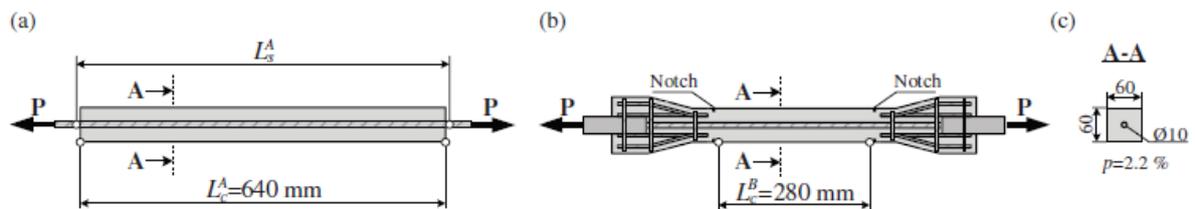
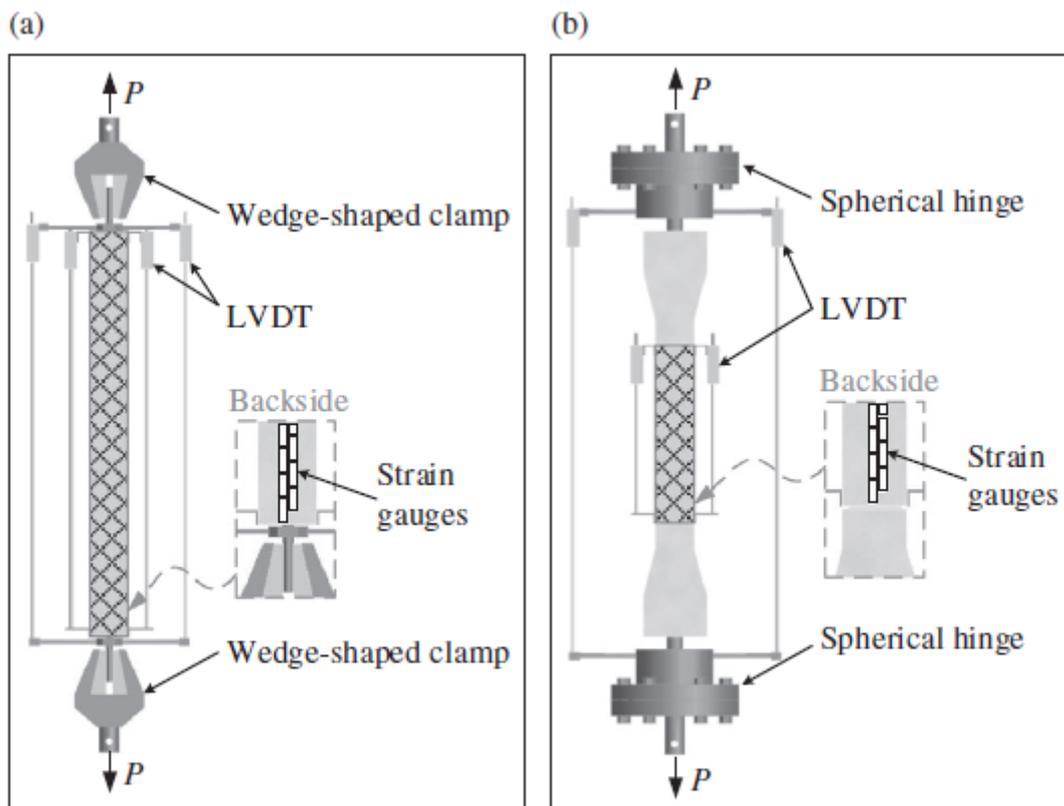


Fig. 6.- Especímenes A (a) y B (b) del ensayo (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

El método de ensayo fue el mismo utilizado en los primeros tirantes, utilizando transductores de desplazamiento (LVDT), galgas extensométricas y el sistema de cámara DIC para poder medir las deformaciones tanto en el hormigón como en el acero de refuerzo y también para poder encontrar el momento en el cual se inicia el proceso de fisuración en el tirante.



Area monitored by the DIC system

Fig. 7.- Configuración del ensayo. (Gribniak, Rimkus, Torres y Jakstaite los cuales presentan un estudio sobre el “Análisis de la deformación de tirantes de Hormigón Armado: geometría representativa”)

El ensayo se realizó en 3 etapas: la primera es una en la cual el sistema de sujeción está colocado en las armaduras y el equipo de medición (LVDT) esta sujetado en la superficie del hormigón y también en el acero de refuerzo, la segunda etapa es en la que se estudian las relaciones de carga-desplazamiento y en la tercera etapa se comparan las deformaciones promedio en el tirante.

Los resultados obtenidos en torno a la deformación de los dos especímenes es la siguiente:

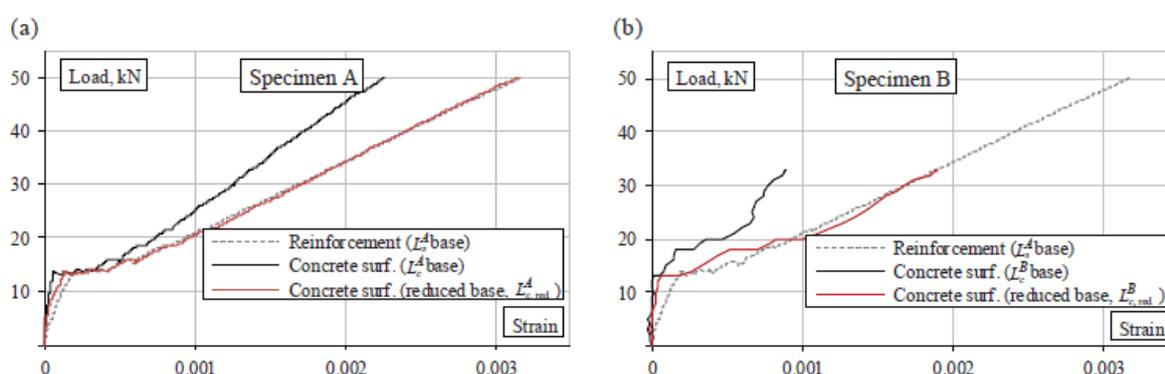


Fig. 8.- Diagrama de deformaciones Especímen A y B

En esta imagen se determinó que la deformación del acero de refuerzo que se va a establecer como referencia para la comparación de las deformaciones superficiales del hormigón para ambos tipos de tirante va a ser la del espécimen A y vemos que en ambos casos las deformaciones promedio del hormigón son menores que las de referencia.

En cuanto a la fisuración en este ensayo se utilizó una carga de servicio que fue el 60 % de la capacidad de carga máxima, se observó que existió una alta dispersión en cuanto a los anchos de las fisuras lo cual complica en gran parte para realizar un análisis del comportamiento de fisuración del tirante, por lo tanto, se elige utilizar un alargamiento acumulativo para poder identificar y comparar los parámetros de fisuración en los tirantes. Decimos que el ancho de la fisura se define por la diferencia de las deformaciones que se produzcan entre el hormigón y el acero de refuerzo y que una adecuada determinación de estos mecanismos se puede considerar un parámetro clave para un análisis correcto en torno a la fisuración.

Para llegar a unas conclusiones de este ensayo experimental sobre la fisuración de los tirantes de hormigón armado y a pesar de la aparente simplicidad del ensayo se vio una variedad de factores responsables de la dispersión de los resultados, ya que la idea principal de este estudio experimental es el de reducir o minimizar el efecto final de los tirantes de Hormigón

Armado que no es más que el proceso de fisuración que sufre la probeta cuando se transmite un esfuerzo de tracción a su acero de refuerzo.

Una de las conclusiones que se llegó con este estudio fue que, mediante el efecto final, podemos llegar a identificar los parámetros representativos en cuanto a la fisuración de los tirantes de Hormigón Armado.

Otra conclusión fue que se valida la hipótesis de Navier-Bernoulli que es característica en la etapa de fisuración estabilizada cuando la fisura es relativamente grande, pero en la etapa de prefisuración las deformaciones promedio del hormigón y de la armadura de refuerzo difieren ya que es típico que las deformaciones en la parte interna del tirante son más pequeñas que en el hormigón superficial.

El gradiente de deformación del hormigón varía tanto a lo largo de la barra y también dentro del recubrimiento que tengamos en nuestro tirante, y que un aumento en el recubrimiento nos da mucha dispersión en los resultados.

2.2.1 Tirantes de Hormigón de Normal y Alta Resistencia con barras de acero

Los tirantes de Hormigón de Normal y Alta Resistencia con una armadura longitudinal de refuerzo con un acero con un límite elástico de 500 MPa, han sido estudiados en los últimos tiempos y existen varios trabajos experimentales para poder caracterizarlos, en este apartado vamos a citar algunos de ellos con sus parámetros y sus resultados obtenidos para posteriormente explicar nuestro proceso del ensayo de los tirantes, con los parámetros que hemos tomado en cuenta la realización del ensayo y los resultados que obtendremos tomando en cuenta ciertas características de los materiales utilizados.

El primer artículo que vamos a estudiar se realizó en el año de 1996 en el cual Homayoun H. Abrishami y Denis Mitchell realizaron para la revista estructural del ACI el estudio “Influence of Splitting Crack on Tension Stiffening”, el programa experimental lo realizaron con Hormigón Normal y con Hormigón de Alta Resistencia que, para nuestro estudio, no es el mismo material que vamos a utilizar, pero nos dará pautas y parámetros de como tendríamos que realizar nuestro estudio.

El propósito que tuvieron estos investigadores fue el de demostrar la influencia de la formación de las fisuras para reducir el efecto “Tension Stiffening”, se investigan los efectos que puede tener el tamaño del acero de refuerzo y también la resistencia del hormigón cuando se empiezan a producir las fisuras.

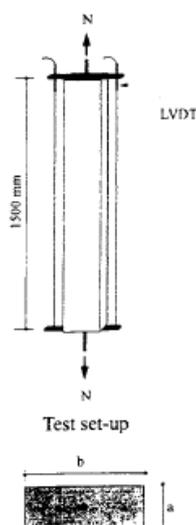


Fig. 9.- Espécimen del tirante que se realizara el ensayo a tracción. (Influence of Splitting Crack on Tesion Stiffening, Abrisham, Mitchell, 1996)

En la Figura 9 podemos apreciar el detalle del tirante que ellos utilizaron, realizaron las probetas de los tirantes con diferentes secciones transversales y también con diferentes tipos de acero y con dos tipos de hormigones: un hormigón normal con resistencias a compresión de 34,9 MPa y con un hormigón de alta resistencia con una resistencia a compresión de más de 90 MPa.

Specimen	Cross-sectional dimensions $a \times b$, mm	d_b , mm	Measured yielding stress f_y , MPa	Type of cracks	$\frac{N_{1p}}{A_s f_y}$	Average transverse crack spacing, mm	Maximum transverse crack spacing, mm
HUC-10	90 x 90	11.3	420	T	—	167	300
HUC-15	95 x 170	16.0	490	T-S	0.42	500	750
HUC-20	100 x 245	19.5	440	S	0.36	—	—
HUC-25	105 x 387	25.2	440	S	0.26	—	—
HUC-30	110 x 515	29.9	530	S	0.18	—	—

Tabla 1.- Detalle de los Especímenes con sus secciones transversales y el Limite elástico del acero de refuerzo. (Influence of Splitting Crack on Tesion Stiffening, Abrisham, Mitchell, 1996)

El hormigón de Alta Resistencia tiene una resistencia a tracción de 6.3 MPa, y se trabajó con aceros de refuerzo con diámetros desde los 10 mm hasta 30 mm con un límite elástico de 400 MPa.

“La configuración del ensayo que realizaron consistió en un marco de carga que trasmite la carga a través de un conjunto de agarres de tensión en los extremos sobresalientes en la parte superior e inferior de la barra de refuerzo. Esto dio como resultado la transferencia de tensión desde la barra de refuerzo de acero al elemento de hormigón armado, dos LVDT se

sujetarán en la barra de refuerzo justo afuera del hormigón para medir el alargamiento total de la muestra de hormigón reforzado”, tal como está mostrado en la Figura 18.

La medición de cada fisura que se producía se las realizo mediante un comparador de ancho de fisuras, las cuales se realizaron en cada etapa de carga y una respuesta completa del comportamiento del tirante se puede describir realizando la gráfica de tensión aplicada frente al alargamiento medio del elemento.

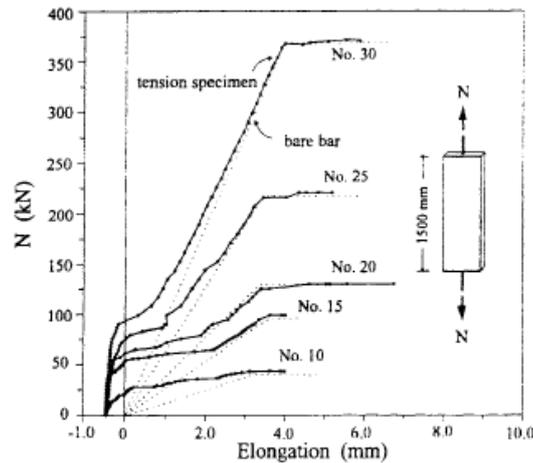


Fig. 10.- Grafica Tension vs Alargamiento medio de los tirantes. (Influence of Splitting Crack on Tension Stiffening, Abrisham, Mitchell, 1996)

En esta gráfica podemos ver el comportamiento del tirante entre la tensión frente a el alargamiento del mismo, y podemos ver que cada tirante tiene regiones elásticas no fisuradas, postfisuradas y regiones posteriores y que a medida que aumentamos el tamaño de la barra se produce una reducción del efecto “tension stiffening”. Si utilizamos una barra con un mayor diámetro la respuesta de postfisuración se inclina hacia una respuesta como si fuera solamente una barra que se está sometiendo a un esfuerzo de tracción.

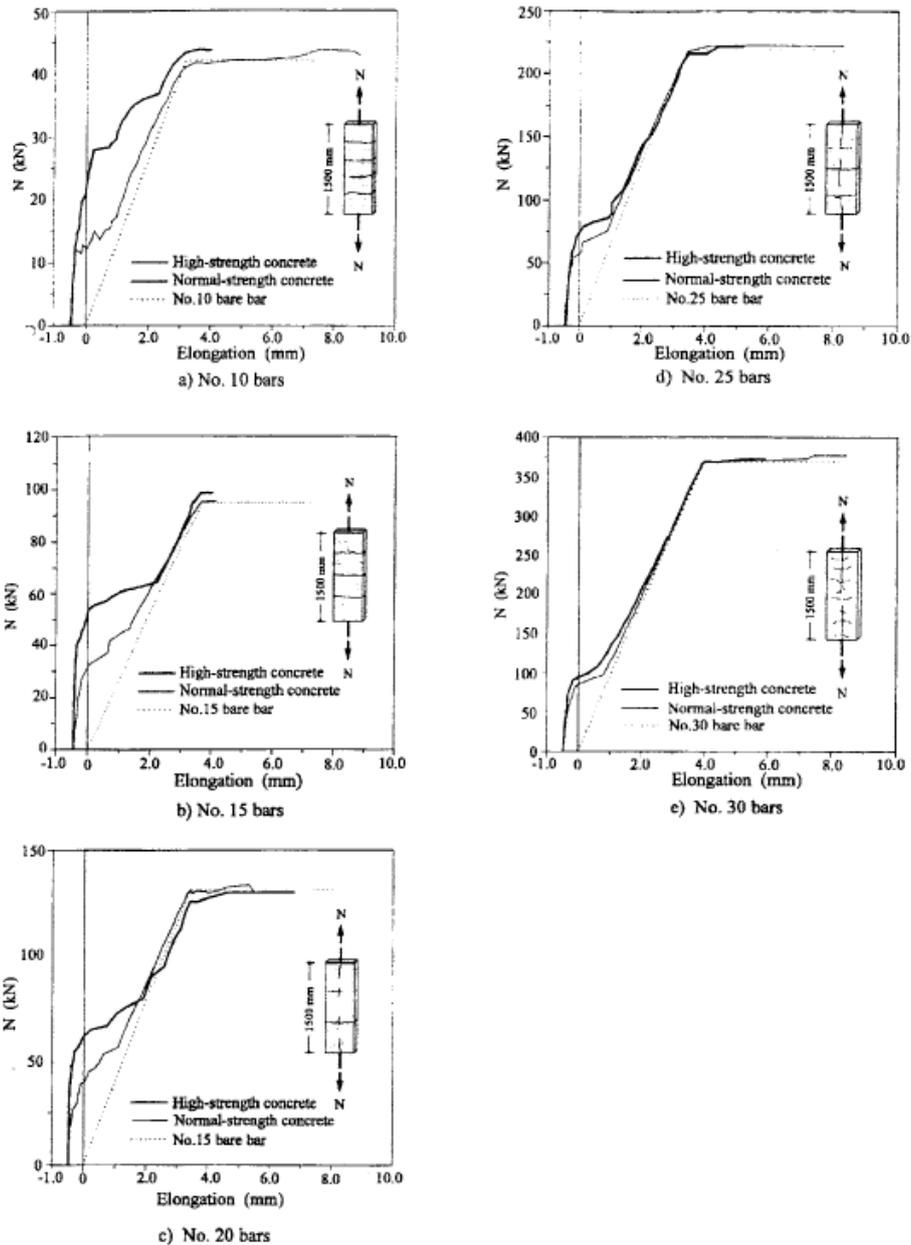


Fig. 11.- Influencia del Hormigón de Alta Resistencia contra tirantes de Hormigón Normal reforzados. (Influence of Splitting Crack on Tension Stiffening, Abrisham, Mitchell, 1996)

Lo que nos tratan de explicar con la gráfica anterior (Fig. 11), es que los tirantes de Hormigón de Alta Resistencia tienen una mayor carga de fisuración y también una mayor rigidez en la fase de prefisuración que las de las muestras del Hormigón Normal. Podemos decir que viendo la gráfica los tirantes con una barra de refuerzo de 10 mm, nos muestran solamente fisuras transversales con lo que el hormigón de alta resistencia nos da una mayor rigidez después de la fase de fisuración, no así los tirantes con una barra de refuerzo de 30 mm nos muestran fisuras de división ósea que la barra de acero de refuerzo dentro del tirante ha llegado más allá de su límite elástico y se ha producido una fractura definida con separación de los dos elementos, con lo cual a medida que se forman fisuras de división

significativas perdemos los beneficios que nos puede otorgar un Hormigón de Alta o Ultra Alta Resistencia y nuestros tirantes pierden toda su rigidez a la tensión cuando se produzcan alargamientos significativos y la respuesta se parece mucho a una barra sometida a esfuerzos de tracción.

Las fisuras de división no se forman en los tirantes con una barra de refuerzo de 10 mm, no es así en los tirantes de Hormigón Normal con barras de refuerzo de 15 mm en las cuales las fisuras empiezan a aparecer justo cuando la barra de acero empieza a ceder en el hormigón. Las fisuras empezaron a ser más largas en la parte superior e inferior de los tirantes de una medida que la barra de acero de refuerzo empieza a ser de mayor diámetro.

La separación promedio de fisuras se midió en las muestras que tienen fisuras transversales y como resultado dio que los tirantes con barras de acero de refuerzo de un diámetro menor tienen separaciones de fisuras más pequeñas en relación con los tirantes que tienen barras de mayor diámetro, y en cuanto al hormigón, los tirantes con Hormigón de Alta o Ultra Alta Resistencia tienen separaciones de fisuras mayores en relación con los de Hormigón Normal.

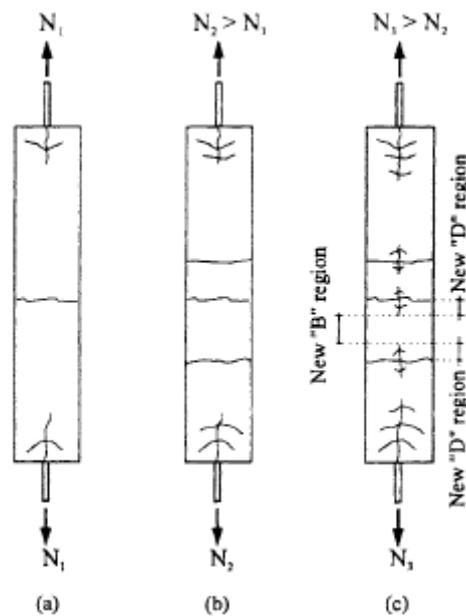


Fig. 12.- Regiones B y D producidas en tirantes sometidos a esfuerzos de tracción. (Influence of Splitting Crack on Tension Stiffening, Abrisham, Mitchell, 1996)

Como podemos ver en la imagen (Fig. 28), tenemos que en los tirantes sometidos a fuerzas de tracción que estarán aplicados en los dos extremos de la barra de acero de refuerzo pueden sufrir diferentes efectos, esto debido a la tensión de adherencia que se pueda producir en el tirante.

Podemos decir que una región D es que mediante “la fuerza de tracción aplicada se transfiere desde la barra de refuerzo al hormigón mediante la tensión de adherencia en las zonas extremas del tirante”, esto quiere decir que en esa zona existe un flujo desequilibrado de tensiones.

La región B como la llaman los investigadores es que *“la tensión de adherencia es cero y las tensiones en el hormigón y el acero son iguales a lo largo del tirante antes de que se produzca la fisuración”*, con lo que podemos decir que las fisuras de división o longitudinales se producen en las regiones D y las fisuras transversales en las regiones B.

Las fisuras transversales se producen cuando la tensión máxima de tracción del hormigón alcanza la tensión de fisuración del tirante, después se forman las fisuras transversales, se forman nuevas regiones D que van a estar situadas cerca de las fisuras antes producidas y en las regiones B la tensión de adherencia va a ser igual a cero justo antes del proceso de fisuración y vemos que la tensión de tracción en el hormigón es máxima, con lo que las fisuras transversales solo se forman en las regiones B. Podemos decir que el tipo de fisuración que se produzca en el hormigón depende mucho de la fuerza de unión que tenga el hormigón y la barra de acero de refuerzo y también por la resistencia a tracción que tenga el hormigón.

Con todos estos resultados los investigadores llegaron a unas conclusiones las cuales vamos a citar las más relevantes para nuestro estudio:

- Observaron la posibilidad de formar fisuras divisorias o longitudinales se aumenta a medida que el diámetro de la barra de refuerzo es de un diámetro mayor y que esto puede resultar en una disminución de la rigidez.
- La formación de fisuras de división es significativa cuando la relación entre el recubrimiento de hormigón y el diámetro de la barra de acero sea menor que 2.5.
- Con el programa experimental realizado por los investigadores se observó que los tirantes de Hormigón de Alta o Ultra Alta Resistencia nos muestra separaciones de fisuras más grandes que las del Hormigón Normal.
- A medida que se aumenta el diámetro de la barra de refuerzo la influencia que beneficia el hormigón de Alta o Ultra Alta resistencia a la tensión se reduce al mínimo.

El siguiente artículo que vamos a revisarlo se realizó en el año de 1998 y lo realizaron los investigadores Michel Lorrain, Olivier Maurel y Mohamed Seffo, en el cual realizan el estudio de *“Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties”*.

En este artículo científico los investigadores su objetivo era el estudio experimental del comportamiento de fisuración en Hormigón de resistencia Normal y Hormigón de Alta Resistencia bajo una fuerza de tracción. Se toman en cuenta 3 parámetros para este ensayo: La resistencia mecánica del hormigón, la relación del acero de refuerzo y el límite elástico de las barras de acero, la fuerza con la que se produce la fisura aumenta proporcionalmente a la resistencia a la tracción del hormigón y disminuye cuando se aumenta el diámetro de la barra de acero de refuerzo o se disminuye el recubrimiento esto quiere decir que la relación del acero de refuerzo aumenta y esto es debido a las tensiones propias.

Lo que tratan de realizar en este artículo es realizar una comparativa del comportamiento de fisuración en los tirantes de Hormigón de Alta Resistencia con el Hormigón Normal,

mediante las curvas de deformación por tensión del acero y también la curva de espaciado y ancho de fisura.

Los efectos que se pueden tener después de realizar el ensayo experimental y también comparar con los resultados del Hormigón normal pueden ser:

- Mayores rendimientos mecánicos
- Relación del acero de refuerzo
- El nivel de carga
- El acero de alto límite elástico

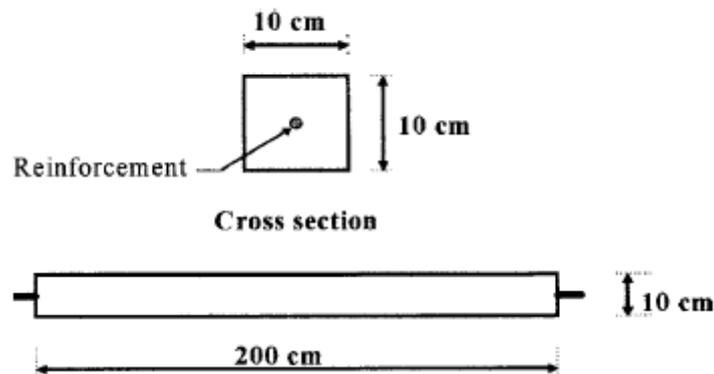


Fig. 13.- Detalles del Tirante: Corte transversal. (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

Como podemos ver en la imagen, los tirantes tienen una longitud de 200 cm, con una sección transversal de 10 cm x 10 cm y en su centro tienen la barra de acero de refuerzo que en este caso será variable, lo que les interesa a los investigadores para poder establecer una relación con el recubrimiento de hormigón y la producción de fisuras.

Los resultados que puedan presentar los investigadores después de haber realizado los ensayos en los tirantes ayudarán mucho a los ingenieros en el momento de realizar cálculos en estructuras en este caso los miembros tensores para tener una fiabilidad sobre la resistencia en estado límite de agrietamiento.

El ensayo que va a servir para determinar una evaluación una caracterización de fisuración se realiza a través de tirantes reforzados con una sola barra, la misma que se va a someter a un esfuerzo de tensión axial pura con lo que se podrá controlar la magnitud de la fuerza que se va a aplicar.

El programa experimental se basó en realizar 25 tirantes con 5 dosificaciones diferentes de las cuales dos son de Hormigón Normal y 3 son de Hormigón de Alta Resistencia y sus resistencias a compresión las mostramos en la siguiente tabla:

Concrete type	CA	CB	CC	CD	CE
Mean compressive strength f_{cm28} , MPa	42	52	85	92	101
Mean splitting strength f_{ts28} , MPa	3.5	3.7	5.8	6.1	6.6
Mean bending strength f_{ib28} , MPa	4	4.4	5.3	5.8	5.9
Mean pure tensile strength f_{tp28} , MPa	3.1	3.3	4.1	4.2	4.6
Elastic modulus, E_{i28} , GPa	38.2	41	48.3	49.6	51.2

Tabla 2.- Diferentes resistencias de los 5 diferentes tipos de Hormigón (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

Se utilizaron 4 distintos tipos de diámetros de la barra de acero de refuerzo, estas son de 10, 12, 16 y 20 mm, de la cual se utilizó barras de 16 mm de límite elástico normal y de un alto límite elástico (830MPa), por lo que realizaron 5 tirantes con un tipo de hormigón y de barra de acero de refuerzo.

La fuerza de tensión a la que va a ser sometido nuestro tirante será de 250 KN, que será mediante un gato hidráulico que estará en un extremo de la probeta y que la barra de acero estará anclada a este mediante una cuña de anclaje y se someterá al esfuerzo de tensión axial, se utilizan captadores de desplazamiento (LVDT) para medir los alargamientos del hormigón que estarán colocados en los dos extremos de la probeta.



Fig. 14.- Configuración del Ensayo. (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

Como podemos ver en la imagen (Fig.14), en ensayo se realiza mediante un bastidor que esta sobre dos apoyos que a su vez están anclados a la losa de hormigón del lugar. Dentro de este bastidor esta la probeta que está anclada en sus dos extremos el uno en la placa del final y el otro extremo está anclado a el gato hidráulico con el que se va a realizar el ensayo sabiendo que estará anclado mediante su barra de acero de refuerzo.

Podemos ver el gato hidráulico que está en él un extremo del bastidor que será el encargado de ejercer la fuerza de tensión a la barra de refuerzo, tiene una capacidad de 250 kN para realizar el ensayo, vemos que están colocados transductores de desplazamiento en la cara lateral izquierda del tirante y esos están conectados a una caja de conexiones que será la encargada de recibir la información que estos entreguen y tenemos un ordenador que será el encargado de procesar toda esta información y entregarnos los alargamientos producidos en el tirante.

En cuanto a los resultados obtenidos tienen en cuenta la relación tensión - deformación, en la cual bajo una carga impuesta la resistencia mecánica de un hormigón reforzado mejora. Por lo tanto, si se cambia el Hormigón por uno mejorado en este caso un Hormigón de Alta Resistencia tendremos que tener en cuenta algunos aspectos que se pueden producir realizando una gráfica de tensión - deformación del Hormigón Normal y el Hormigón de Alta Resistencia reforzado con una barra de acero longitudinal concéntrica.

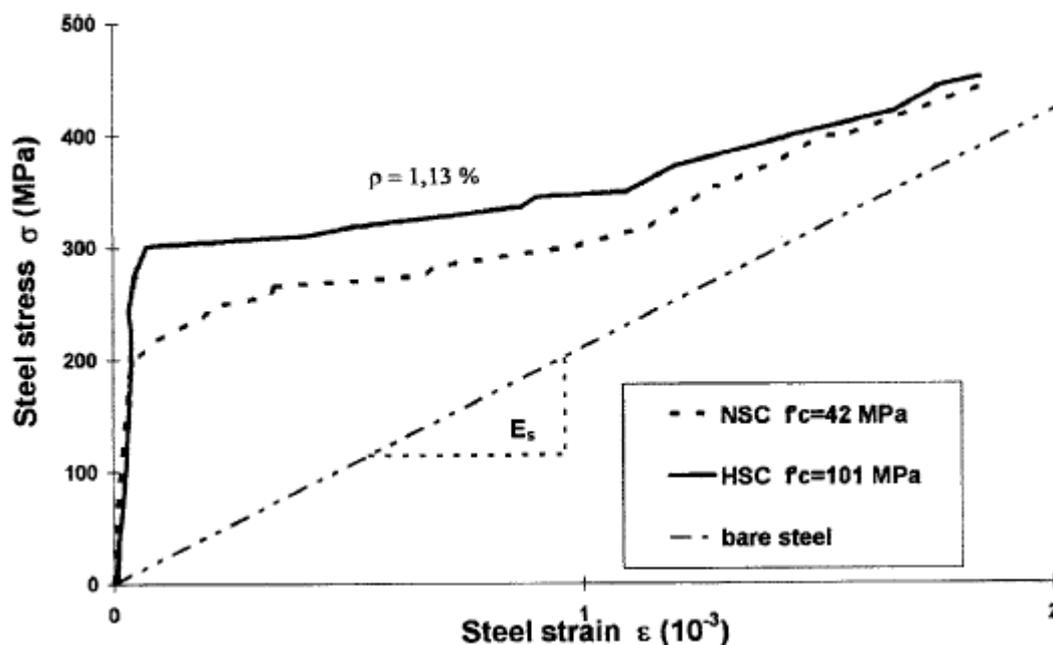


Fig. 15.- Relación Tensión - Deformación del Hormigón Normal y Hormigón de Alta Resistencia. (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

Como podemos ver en la imagen (Fig.15) podemos ver que la tensión en el acero aumenta al mejorar las características mecánicas del hormigón, pero en cuanto a la deformación del acero observamos que va a ser la misma con los dos tipos de hormigón con lo que la barra de acero se deformara igual, con lo que los investigadores mediante esta grafica nos explican lo siguiente:

- Se observa un aumento de la tensión de fisuración del Hormigón de Alta Resistencia.

- Se produce un aumento de la carga de fisuración debido a que el Hormigón de Alta Resistencia posee una mayor resistencia a tracción que un Hormigón Normal.
- Un mejor enlace de la barra de acero al Hormigón de Alta Resistencia debido a tensiones más bajas y a mayores efectos del fenómeno “tensión stiffening”.

Para un tirante de Hormigón de Alta Resistencia con una baja relación de acero de refuerzo dicen que una barra deformada puede alcanzar un rendimiento óptimo sin que se forme una red de fisuración, esto es muy interesante ya que nos permite evitar una formación de fisuras cuando el elemento se encuentre en un Estado Limite de Servicio.

Mientras mayor sea la relación de acero de refuerzo, la resistencia a la fisuración será mucho menor ya que la barra que tiene influencia en cuanto a la contracción del hormigón origina unas tensiones iniciales que se desarrollaran en el hormigón y si es mayor la relación de acero de refuerzo aumenta, estas tensiones iniciales que se producirán van a ser mayores por lo que tiene una influencia en el material y creara una debilidad en cuanto al inicio del proceso de fisuración en el tirante.

Mientras la barra de acero de refuerzo sea de un diámetro mayor (16 o 20 mm), las tensiones iniciales por contracción del hormigón van a ser mayores y por lo tanto el debilitamiento del hormigón en cuanto a la resistencia de fisuración en los tirantes de hormigón reforzados, por lo tanto un parámetro de estudio es la contracción del hormigón debido a las tensiones iniciales que se puedan producir en este y se pueda producir una reducción de la resistencia de fisuración mientras la barra de acero de refuerzo aumente de diámetro.

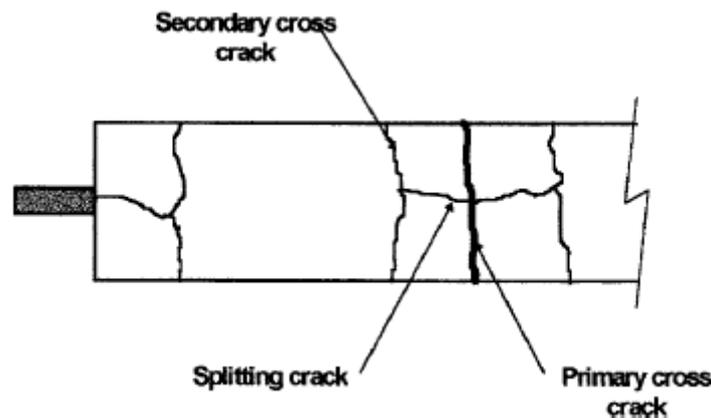


Fig. 16.- Formación de Fisuras (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

Este esquema que nos presentan los investigadores es una idea de cómo se forman las fisuras en un tirante de Hormigón con una barra de acero de refuerzo sometido a una fuerza de tracción, con lo que tenemos una fisura primaria transversal que va desde el un extremo al otro extremo del tirante y se forma bajo una carga creciente. Después con una carga mayor se formarán unas fisuras axiales o longitudinales a causa de una rotura del hormigón debido a la

formación de la primera fisura primaria y por último se produce una red de fisuras transversales secundarias que se formarán a partir de las fisuras axiales o longitudinales. Este patrón de fisuración se mantiene hasta que el acero de refuerzo llega a su plastificación y para calcular la separación media experimental entre fisuras tomamos en cuenta solamente las fisuras secundarias ya que son las que más se van a formar en el elemento.

En cuanto a la separación entre fisuras se observa un patrón de fisuración que nos lleva a tener unos valores mínimos, medios y máximos de la separación para los diferentes tipos de hormigón y los diferentes diámetros de la barra de refuerzo que presentan en la siguiente tabla:

Bar diameter d_b , mm	Reinforcement ratios ρ , percent	Crack spacing, cm	Concrete type				
			CA	CB	CC	CD	CE
10	0.785	min.	14	17	16	17	13.5
		mean	19.2	21	19	22.2	22.6
		max.	25	27	25	25	32
12	1.13	min.	15.1	10	14	10	8
		mean	16	17.3	17.5	16.7	15.5
		max.	27	22	22	23	22
16 (HYS)	2.01	min.	10	7	7	6.5	7
		mean	12.5	13.1	12.8	14.2	14.1
		max.	21	20	20	20	19
16 (NYS)	2.01	min.	10	9	12	9	7.5
		mean	13.8	13.9	14.3	12.9	13.3
		max.	21	20	20	20	19
20	3.14	min.	6	8.5	10	7	8.5
		mean	12.1	12.5	12.5	11.7	12.9
		max.	17	17	17	18	19

Tabla 3.- Separaciones mínimas, medias y máximas entre fisuras. (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

La figura 34 “nos muestra que la resistencia del hormigón reforzado con una barra de acero de refuerzo tiene una baja influencia en el espaciado medio de fisuras debido a la dispersión estrecha en las curvas que representan diversos hormigones, mientras que la proporción de porcentaje de proporción de la barra de acero es el parámetro más influyente en el comportamiento del espaciado de las fisuras” (Llorain, Maurel y Seffo, 1998 – Pag 6)

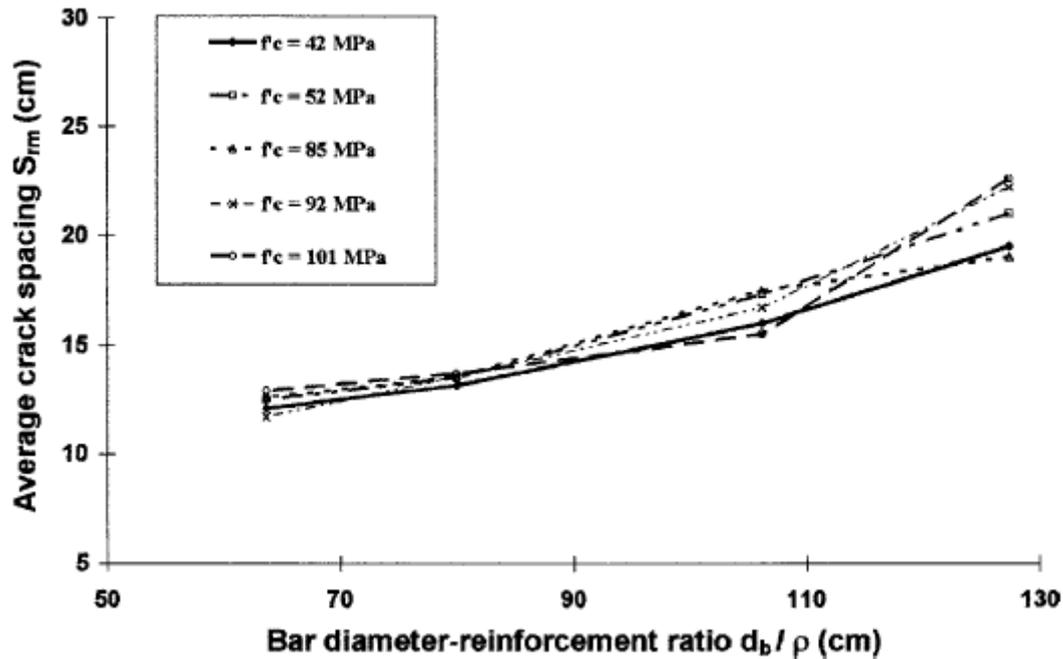


Fig. 17.- Influencia del radio del diámetro de la barra sobre la relación del refuerzo en la separación media de las fisuras. (Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties, Llorain, Maurel y Seffo, 1998)

El programa experimental que realizaron estos investigadores les permitió detallar los efectos que sufren los tirantes de hormigón en torno al comportamiento de fisuración que puedan tener bajo cargas impuestas si se pasa de un Hormigón Normal a un Hormigón de Alta Resistencia (40MPa a 100 MPa) y también la relación de la barra de acero dependiendo el diámetro de la barra, y pudieron sacar las siguientes conclusiones:

- La resistencia a la fisuración aumenta proporcionalmente a la resistencia a la tracción del hormigón y esta puede disminuir mientras se aumente la barra de acero de refuerzo, también el uso de un Hormigón de Alta Resistencia nos puede permitir que una estructura de hormigón armado cuando este en un Estado Limite de Servicio no se fisure.
- El efecto del fenómeno “Tension Stiffening” en la fase de formación de fisuras se mejora notablemente y en la fase estabilizada de fisuración su tendencia es a disminuir debido a que se produce un daño en la unión entre el hormigón y el acero de refuerzo.
- En cuanto a la separación de fisuras se ve que depende mucho de la relación del acero de refuerzo esto quiere decir que depende mucho del diámetro de la barra de acero que se vaya a utilizar y que así se aumente la resistencia del hormigón no habrá cambios significativos.
- Si se utiliza un Hormigón de Alta Resistencia (100 MPa) permite una reducción del ancho de fisura de un 10 al 60 % debido a la reducción de tensión.

Los investigadores plantean que se tenga en cuenta otros factores como la fluencia, la contracción, la disposición del acero, el recubrimiento que exista y las proporciones de materiales en la mezcla del hormigón.

Como lo dije anteriormente en este apartado estamos tomando ensayos que se realizaron de tirantes sometidos a esfuerzos de tracción con un Hormigón Normal y de Alta Resistencia, que en este caso para nuestro estudio nos sirve simplemente como una base con los resultados que ellos obtuvieron y también tomar los parámetros en los cuales los investigadores tienen en cuenta el rato de realizar su programa experimental. También tener en cuenta la configuración del ensayo para así tener una base más sólida en el momento de realizar nuestros ensayos.

2.3 Hormigón de muy Alto Rendimiento

2.3.1 Introducción

Para poder hablar sobre el Hormigón de muy Alto Rendimiento tenemos que ir a sus orígenes, por eso nos vamos al año de 1950 en el que Otto Graf logra producir un hormigón con una resistencia de 70 N/mm^2 lo cual fue algo muy interesado en esa época y todo el medio de la construcción se vio asombrado por el producto que se había fabricado. Pero en el año de 1966 Kurt Walz intento probar que con unas técnicas especiales y solamente con la adición de humo de sílice y superplastificantes era posible lograr un hormigón con una resistencia de 140 N/mm^2 y que su trabajabilidad sea aceptable.

No fue sino hasta el final de los 80's, que fue posible producir hormigones con unas resistencias entre los 100 y 115 N/mm^2 y se descubrió el efecto que produce el humo de sílice en la fabricación del hormigón, se vio que es un material fino, reactivo y probó la eficiencia de los aditivos superplastificantes en el desarrollo de este material.

Si queremos ir más allá e incrementamos la resistencia del hormigón hasta valores de 120 N/mm^2 , se consideró muy poco realista debido a la fuerza que iba a tener el agregado puesto se cree que es el componente más débil en la mezcla y que es de alrededor de un 75% del total del volumen del hormigón que se fabrique.

Un pensamiento innovador que prometía mucho con la fabricación de Hormigón de muy Alto Rendimiento fue el desarrollo del SIFCON(Slurry Infiltrated Fibre Concrete), que en su traducción al español sería un Hormigón Infiltrado de Fibra de Lechada el cual es un material que estuvo en desarrollo nos involucra a la adición de fibras de acero en el encofrado y los espacios que queden entre las fibras van a ser llenados por la matriz cementante del

hormigón, este método nos da como resultado un contenido de fibra de entre 15% que corresponde a un aumento de 10 veces la caracterización del hormigón a deformación.

Un nuevo descubrimiento vino con el desarrollo de un nuevo concepto en la composición del Hormigón de muy Alto Rendimiento, basado en este concepto fue posible la fabricación de hormigones con una resistencia a la compresión de 200 N/mm^2 con un contenido de fibras de 2.5% del total del volumen del hormigón siempre y cuando se siga las siguientes reglas:

- El tamaño máximo de agregado debes ser menor del agrado tradicional ocupado en hormigones normales puesto que los agregados grandes producen concentraciones de tensiones en el interior del hormigón que no conducen a una disminución de la fuerza.
- Una densidad de compenetración óptima para el agregado es algo importante, se la puede lograr con la adición de materiales finos que nos van a reducir las tensiones en la superficie de contacto y nos asegura que las micro fisuras no comiencen a formarse sino hasta que el hormigón alcance un nivel más alto de tensión.
- La cantidad de cemento utilizada debe ser tal como para que el agua y el cemento estén totalmente confinados y las partículas de cemento no hidratadas actuaran como filler.
- La adición de fibras de acero al hormigón será para garantizar un mayor comportamiento dúctil.

En el año de 1981 un investigador Danes llamado Hans Hendrick Bache fue el primero en reconocer y aplicar los principios para fabricar un Hormigón de muy Alto Rendimiento reforzado con una gran cantidad de acero de refuerzo.

Después de esto, varios investigadores y proyectos fueron publicados como por ejemplo el primer puente peatonal que se realizó en Sherbrooke, Canadá en 1997 o los 3500 elementos prefabricados con Hormigón de muy Alto Rendimiento para el estadio Jean Bouin en Paris, Francia.

Las primeras reglas para diseño del Hormigón de muy Alto Rendimiento fueron publicadas en Francia en el año de 2002 y en el país de Japón recién en el año 2004 apareció la primera guía sobre estos materiales. En la actualidad sigue teniendo un poco de oposición por la gente puesto que el costo por metro cubico es muy alto en relación con el hormigón convencional ya que aumenta entre 4 a 5 veces el precio.

2.3.2 Propiedades

Debido a la densa microestructura del Hormigón de muy Alto Rendimiento (HMAR), aparte de poseer una muy alta resistencia también posee una mayor rigidez con respecto a los hormigones normales o los hormigones de alta resistencia. Se conoce que el comportamiento del hormigón se convierte mucho más frágil mientras la fuerza se incrementa.

Sin embargo, este fenómeno puede ser contrarrestado efectivamente con la adición de fibras que pueden ser de acero las cuales nos traen una mejora considerable en el comportamiento pico tanto en compresión como en tracción. Además, la fuerza que se puede utilizar en el

elemento puede incrementarse en su mayoría de veces para los esfuerzos de tensión que se produzcan en el elemento.

Varias propiedades mecánicas del Hormigón de muy Alto Rendimiento hoy en día son muy discutidas en la medida en que sean pertinentes y relevantes sobre todo con la influencia de la adición de fibras, que siempre su distribución y la orientación de ellas tiene que ser considerada.

2.3.3 Desarrollo

La tecnología sobre los nuevos métodos de fabricación de los nuevos Hormigones que en estos tiempos están en el mercado de la construcción ha realizado numerosos y notables avances en los últimos años, en donde en el año de 1988 en la edición de la norma DIN 1045 nos habla sobre una clase del hormigón B55 con una resistencia a la compresión de 55 N/mm², pero en la presente edición de la norma DIN EN 206/ DIN 1045-2 tenemos que se incluye clases de hormigones que van desde C55/C67 hasta C100/C115 esto nos quiere decir que los hormigones tienen una resistencia a la compresión de 55 N/mm² en probetas cilíndricas y una resistencia de 67N/mm² en probetas cubicas, lo mismo seria con la clase C100/C115 pero a este tipo de material le llaman Hormigón de Alta Resistencia.

En los últimos 15 años se han realizado muchas investigaciones y trabajos sobre el desarrollo y las propiedades del Hormigón de muy Alto Rendimiento, para poder llegar a niveles en los cuales se pueda aplicar este nuevo material en obras que necesiten ciertas características especiales que utilizando un hormigón normal no las conseguiríamos y que su resistencia a la compresión sea entre 150 N/mm² hasta los 200N/mm², los cuales son valores muy cercanos a los del acero.

Un Hormigón reforzado con fibras de acero que tienen una alta fuerza de tracción, se convierte en un hormigón muy dúctil y por lo tanto su resistencia a esfuerzos de tracción supera los 15 N/mm² y su resistencia a la flexión supera los 50 N/mm².

Si queremos comparar el Hormigón normal con el Hormigón de muy Alto Rendimiento (HMAR) en torno a la porosidad capilar tenemos que el HMAR nos muestra una microestructura mucho más densa lo que nos permite decir que no existen poros que sean profundos y por lo tanto es casi imposible que líquidos y gases ingresen al interior del hormigón y en el caso que este contenga acero de refuerzo la corrosión que esto puede ocasionar es prácticamente nula. Debido a la gran durabilidad que obtenemos con el Hormigón de muy Alto Rendimiento el costo de mantenimiento de la estructura es muy bajo y también existe un ahorro considerable en cuanto a materiales se refiere en el proceso de elaboración del material.

El avance practico vino con el desarrollo de un eficiente aditivo superplastificante que nos permita la producción de un hormigón con una alta proporción de partículas ultrafinas muy compactas y al mismo tiempo una extrema relación baja de agua/binder de tan solo 0.20 con una consistencia muy fluida. La optima combinación de estos dos principios es lo que nos

puede garantizar las propiedades especiales que posee el Hormigón de muy Alto Rendimiento.

2.3.4 Comportamiento en Tracción

Los Ensayos de Tension Axial sobre el Hormigón de muy Alto Rendimiento nos arrojan de una manera directa de cómo se puede comportar el material cuando se somete a esfuerzos de tracción.

Los ensayos que se realicen en muestras no entalladas nos van a servir para determinar con un poco más de seguridad la resistencia a la tracción que tendrá ese hormigón, mientras que los ensayos que realicemos en muestras con muescas es mucho más apropiado para determinar una relación que es muy importante en este tipo de ensayos que es la relación entre el ancho de fisura y la tensión que va a tener el hormigón en dicha fisura sobre todo cuando se trata de Hormigones de Ultra Alta Resistencia con la adición de fibras de acero.

Un valor típico de la resistencia a tracción del HMAR está en un rango entre 7 y 11 N/mm², sin embargo la resistencia a la tracción de este hormigón está muy influenciado principalmente por la adición de Humo de Sílice el rato de la fabricación del hormigón ya que como sabemos este material posee características especiales que las adiciona al hormigón el rato de su fabricación, y podemos ver que sin la adición de fibras ya sean estas de acero o de cualquier otro material una rotura o fallo se puede producir en tensión.

Debido a la muy alta resistencia de la matriz cementante que posee el Hormigón de muy Alto Rendimiento las fisuras típicamente van a través de los granos del agregado y también los bordes de las fisuras son muy lisos lo que significa que los efectos de entrelazar que puede tener un hormigón normal están casi ausentes en el Hormigón de muy Alto Rendimiento. Pero hasta que no esté completa la separación de las dos caras de la fisura, la energía requerida para que esto se complete está en un rango entre 50 y 100 N/mm² dependiendo si los agregados son finos o gruesos.

Sin embargo, la adición de fibras al hormigón nos va a favorecer para aumentar la resistencia a la tracción por un lado y también tienen las fibras las características de transferir la fuerza entre cada cara de la fisura esto quiere decir que cuando se produzca una fisura en un Hormigón de muy Alto Rendimiento en la parte de la fisura el hormigón ya no va a trabajar y el único elemento que va a soportar la fuerza que se produzca ahí serán las fibras.

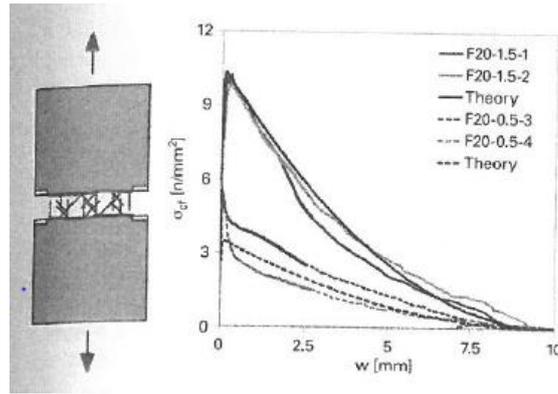


Fig. 18. Relación tensión – abertura de fisura en probeta de Hormigón con contenido de fibras entre 0.5% hasta 1.5% (Ultra-High Performance Concrete UHPC, Beton Kalender 2014)

Esta situación en torno a la adición de fibras puede ocurrir cuando una suficiente cantidad de fibras que se hayan adicionado en el hormigón tengan una favorable orientación en la matriz cementante, un incremento de resistencia es luego posible luego de la primera fisura que se produzca en la matriz cementante del hormigón.

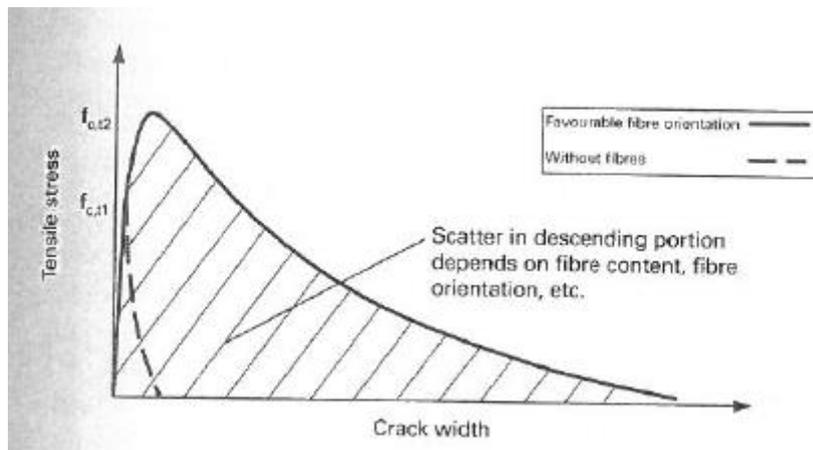


Fig. 19. Comportamiento del ancho de fisura contra la tensión en una prueba de tracción en Hormigón de Ultra Alta Resistencia (Ultra-High Performance Concrete UHPC, Beton Kalender 2014)

Como podemos ver en la imagen (Fig. 3), la dependencia del comportamiento post-fisuración depende mucho de la orientación de las fibras ya que en principio son los mismos parámetros los que determinan el pico en respuesta a las acciones que estén afectando al hormigón en ese momento.

En tanto que la fuerza o tensión posible en torno a la activación de las fibras excede la tensión admisible de la matriz por lo que luego pueden formarse fisuras y el comportamiento de endurecimiento del hormigón por deformación es posible.

Podemos decir que el término “fuerza de post-fisuración” es muy común ya que originariamente viene del hormigón normal reforzado con fibras, en donde el efecto de la

adición de fibras siempre en cantidades normales es generalmente insuficiente para mantener la tensión a un valor cercano al de la resistencia a la tracción del hormigón.

Si queremos hablar de hormigón armado reforzado con fibras podemos decir que no solo el comportamiento de las fibras es decisivo ya que también hay otros factores que tenemos que tomar en cuenta por ejemplo el comportamiento de todas las fibras que cosen la fisura en varios ángulos y con diferentes longitudes que estas estén embebidas en el hormigón en cada uno de los lados de la fisura; sin embargo cuando las fibras que están cosiendo la fisura empiezan a ser arrancadas debido a un alto esfuerzo de tracción que está siendo sometido el hormigón, hay una caída considerable de la fuerza medida que la fisura sigue abriéndose.

2.3.5 Durabilidad

Podemos decir que el Hormigón de muy Alto Rendimiento tiene un aspecto cerámico debido a su muy densa microestructura de su matriz y que tenemos una mayor resistencia a los ataques de muchas sustancias que de cierta forma destruyen al hormigón o a su acero de refuerzo, lo que no ocurre con el Hormigón Normal ya que sabemos que este es mucho más susceptible a diferentes ataques que pueden ser de hielo – deshielo, ácidos, etc.

El efecto de una muy alta densidad y en unión con una muy baja relación de agua/binder de aproximadamente 0.2, podemos decir que el HMAR no posee poros capilares lo cual es favorable para este material ya que al no poseer poros los ataques por cloruros van a tener un porcentaje de efectividad muy bajo. Como podemos ver en la siguiente figura (Fig. 4) tenemos una distribución del radio de los poros que se pueden producir en 4 tipos de Hormigón: el primero un Hormigón Normal C45/55, el segundo un Hormigón de Alta Resistencia C90/105 y dos Hormigones de Ultra Alta resistencia ya que fijándonos en la imagen vemos que los dos HMAR tienen una muy baja penetración de sustancias que pueden atacar y dañar al hormigón, no es el caso del Hormigón Normal el cual vemos que su penetración de sustancias es muy alto y eso lo hace mucho más susceptible a ataques que desfavorezca a una considerable baja de la resistencia o en algunos casos a el fracaso del material.

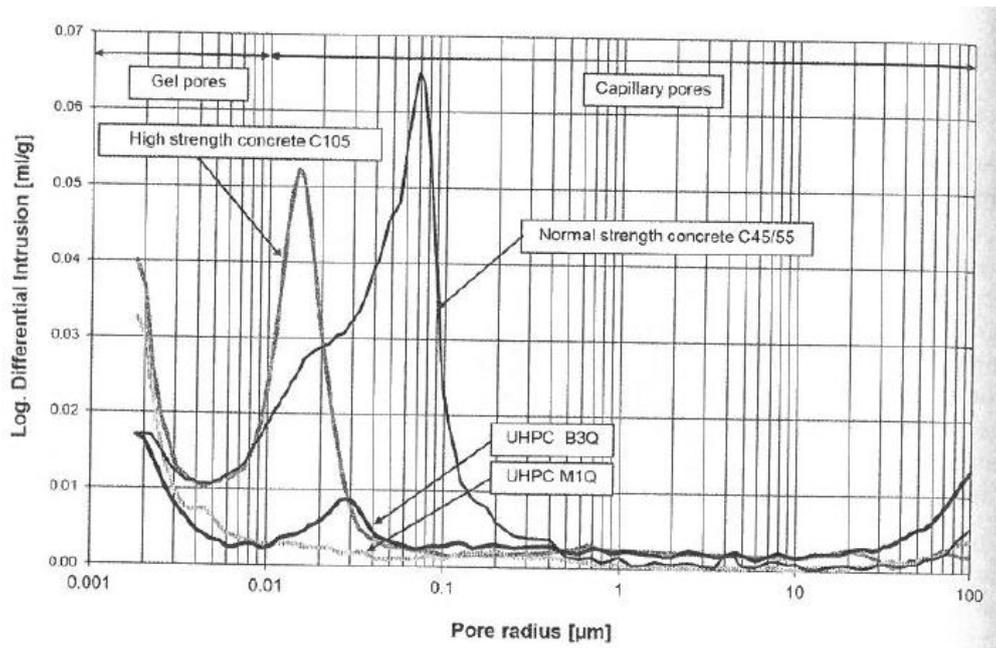


Fig. 20.- Distribución del Radio de Poros (Ultra-High Performance Concrete UHPC, Beton Kalender 2014)

Como resultado de la muy densa microestructura de la matriz del Hormigón de muy Alto Rendimiento, su resistencia a la difusión de iones de cloruro procedentes de las sales de deshielo o que ocurren en un medio altamente marino o de la costa es significativamente mayor a la normal de un Hormigón Convencional, por lo tanto, una estructura de Hormigón de muy Alto Rendimiento proporciona una mayor protección al acero de refuerzo contra la corrosión.

Debido a estos hallazgos encontrados y respaldados por los resultados de los estudios y de investigadores que se han realizado en los últimos tiempos, nos permitirán concluir que cuando utilizemos Hormigón de muy Alto Rendimiento es generalmente posible reducir los espesores de recubrimiento cuando se trabaje con acero de refuerzo.

En un Hormigón de muy Alto Rendimiento con fibras, se puede decir que el beneficio de la contribución de las fibras puede ser tomadas en cuenta en el momento de calcular y especificar el acero de refuerzo requerido para satisfacer todas las necesidades del diseño de la estructura debido a la experiencia práctica de que solo las fibras en la superficie se corroen.

La resistencia hacia los ácidos también es mucho mejor en el HMAR, por lo tanto, es muy adecuado para la producción de tubos ligeros con un grosor de pared reducido para el uso de instalaciones de saneamiento de ciudades y también revestimientos con una resistencia mucho mejor en cuanto a las aguas residuales industriales.

La falta de poros capilares se refleja en que la absorción de agua es mucho menor que lo normal, ya que se puede dar un tratamiento térmico y está producido con una escoria de alto horno y es muy conveniente para el material, y debido a los estudios e investigaciones realizadas se puede proponer una clase de exposición XA3 con lo que no es necesario proporcionar medidas de protección adicionales que suelen ser necesarias.

En el caso de estructuras que estén expuestas a ciclos de hielo – deshielo, no es solo particularmente adecuado debido a su resistencia especialmente a la alta difusión de iones cloruro sino también debido a su alta resistencia a las sales de hielo – deshielo sin la adición de aire ocluido.

Además, el recubrimiento del acero de refuerzo en estructuras de Hormigón de muy Alto Rendimiento puede reducirse significativamente en muchos de los casos, lo que facilita mucho a la construcción de los elementos y que sean estructuras duraderas.

2.3.6 Normativa

En cuanto a la normativa, tenemos que tanto el Eurocódigo 2 y la normativa española EHE-08 no contemplan en ninguno de sus capítulos y no existen recomendaciones sobre las investigaciones y construcciones que se hayan realizado con Hormigones de Ultra Alta Resistencia, no es así en el caso de la norma de la Asociación Francesa de Ingeniería Civil en la cual en su capítulo 47 nos habla sobre las recomendaciones sobre el rendimiento del Hormigón de muy Alto Rendimiento y también el Departamento de Transporte de los Estados Unidos mediante la Administración Federal de Carreteras se ha dedicado a la investigación sobre los usos óptimos del Hormigón de muy Alto Rendimiento.

En el primer caso de la norma Francesa en su publicación en el año 2002, contribuyo con un cierto desarrollo de este nuevo material en los campos de la construcción y también se han llevado ciertas investigaciones y desarrollo sobre el comportamiento del Hormigón de muy Alto Rendimiento en cuanto al comportamiento a bajas y altas temperaturas, resistencia al corte, resistencia a tensión, etc. De acuerdo con la experiencia y los resultados obtenidos se consideró necesario actualizar las recomendaciones de la Asociación Francesa de Ingeniería Civil de ser coherentes y también contemplar un nuevo material y su implementación en las normas europeas como lo es el Eurocodigo.

En su numeral 47.2.3.6 la Asociación Francesa de Ingeniería Civil nos habla sobre la resistencia a la tracción que puede soportar este tipo de material lo cual en nuestro caso es lo que nos interesa ya que en nuestro ensayo someteremos nuestro tirante a un esfuerzo de tracción con lo cual tenemos que tener en cuenta las recomendaciones que nos da esta norma.

Se realizaron numerosas pruebas con las cuales se examinó el comportamiento a tracción del Hormigón de muy Alto Rendimiento y se llegaron a la conclusión de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El HMAR cuenta con una ley constitutiva característica de endurecimiento por tensión directa en la cual solo muy pocos materiales pueden endurecer sometándose a tensión pura, pero esto conlleva que el contenido en fibras sea muy alto.
- El HMAR con una ley constitutiva media de endurecimiento sometido a tensión directa, pero con una característica de debilitación del hormigón que en su mayoría la tienen los Hormigones de Alta Resistencia.
- Los materiales que debilitan al hormigón tienen una ley de debilitamiento cuando se someten a esfuerzos de tensión directa lo cual sucede cuando el Hormigón de muy Alto Rendimiento tiene un bajo contenido en fibras.

2.4 Comportamiento de Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento

En este apartado estudiaremos las recientes investigaciones que se han realizado sobre los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con una barra de acero como refuerzo y sometidos a esfuerzos de tracción, en los cuales veremos qué factores son influyentes para realizar dicho ensayo y también la configuración con la que ellos realizan el programa experimental de los tirantes. Veremos qué conclusiones obtienen, las que nos servirán para poner en práctica y definir ciertas características en nuestro ensayo.

Un Hormigón de muy Alto Rendimiento está caracterizado con una resistencia a compresión de alrededor de 200 N/mm^2 y una resistencia a la tracción de 8 N/mm^2 , para añadir más ductilidad al hormigón podemos añadir fibras con lo cual su resistencia a la tracción puede incrementarse hasta 10 N/mm^2 y durante la fase de fisuración se logra un comportamiento de endurecimiento por deformación. Sin embargo, para conseguir fallas dúctiles convencionales es necesario introducir acero de refuerzo en las estructuras.

Si comparamos un Hormigón Normal con un Hormigón de muy Alto Rendimiento con acero de refuerzo, tenemos que el segundo tiene una mayor resistencia a la tracción y también un comportamiento de endurecimiento en tensión.

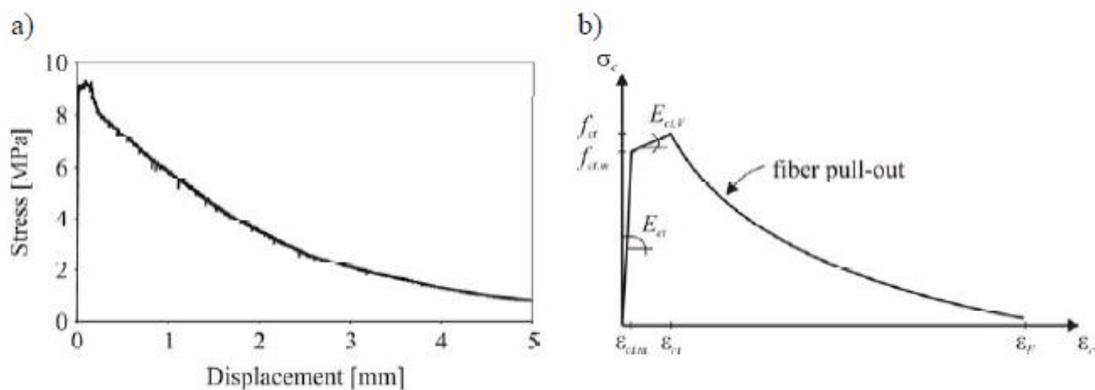


Fig. 21.- Comportamiento del Hormigón de Ultra Alta Resistencia reforzado con fibras: Diagrama tensión – desplazamiento (Reinforced UHPFRC Tension Chords, Rauch and Sigrist, 2008)

El Hormigón de muy Alto Rendimiento puede transmitir sus fuerzas a través de la fisura esto debido a la adición de las fibras ya que estas trabajan como un puente entre las dos paredes de la fisura y evitar que el hormigón fracase. También podemos ver que la influencia del efecto tensión stiffening es un factor de tener en cuenta y que no tiene que ser descuidado a la hora de realizar un diseño. Las fibras nos garantizan anchos de fisura pequeños cuando estamos en estado límite de servicio y en general las fibras son responsables de una reducción de la elongación del elemento en todas las etapas.

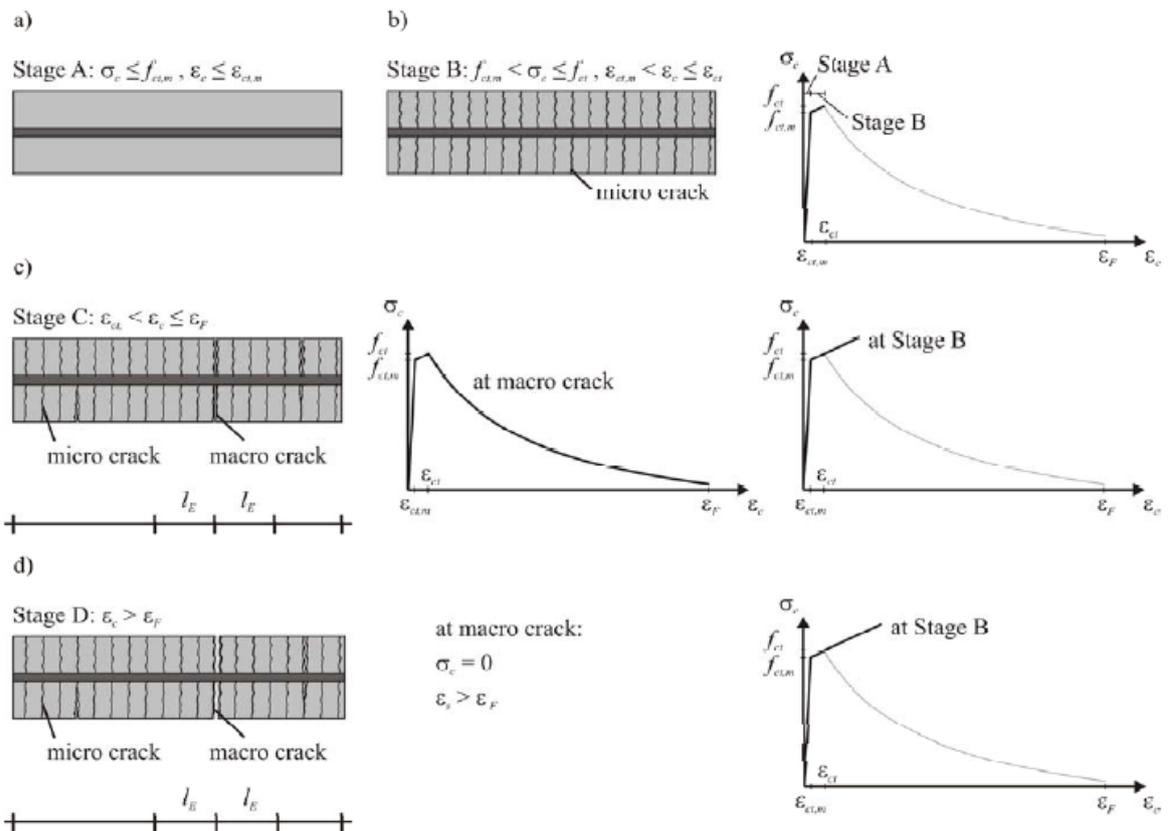


Fig. 22.- Comportamiento en sus diferentes etapas, del Hormigón de Ultra Alta Resistencia con acero de refuerzo. (Reinforced UHPFRC Tension Chords, Rauch and Sigrist, 2008)

Como podemos ver en la imagen (Fig. 6), vemos el comportamiento de los Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con acero de refuerzo que los podemos dividir en 4 etapas:

Etapas A: Etapa antes del proceso de fisuración.

Etapas B: Etapa del proceso de micro fisuración.

Etapas C: Etapa de la macro fisura.

Etapas D: Etapa en la cual las fibras han sido arrancadas debido al alto esfuerzo de tracción.

Para que este tipo de comportamiento se de en este tipo de hormigón, tenemos que tener en cuenta el tipo de acero de refuerzo y también el diámetro que vamos a utilizar todo eso para poder determinar la máxima carga que podemos alcanzar en el elemento. Podemos decir que para el acero de refuerzo cuya producción sea de laminado en caliente se define usualmente por el inicio de su límite elástico y por el comportamiento del rendimiento de dicho acero y que su fallo puede ser controlado por una macro fisura que se produzca en el elemento. Para los aceros de refuerzo laminados en caliente la máxima carga está definida por el inicio de su límite elástico.

La contribución de fibras empieza a decrecer para niveles de tensión cuando el acero de refuerzo laminado en caliente llegue a su límite elástico. Por lo tanto y en consecuencia de eso no se pueden activar los incrementos de tensión en las barras de acero para resistir las tensiones que ha liberado las fibras que han sido arrancadas del hormigón.

Es muy típico que el comportamiento de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento es controlado por solo una y crítica macro fisura que puede ser muy peligroso y en este caso las fibras están continuamente siendo arrancadas y la respuesta global del elemento puede reducirse. Dependiendo de la longitud del elemento, esto puede incluso dar lugar a un comportamiento de retroceso en el material.

Como la lo dijimos anteriormente que la carga máxima que puede soportar el acero depende mucho del diámetro y la característica de endurecimiento por deformación. Para radios comunes del acero de refuerzo la fuerza correspondiente a la resistencia a la tracción del refuerzo es mucho menos a la carga máxima, sin embargo, para aceros laminados en frío que tienen un comportamiento por endurecimiento diferente su carga máxima que va a soportar coincide con la resistencia a la tracción.

La combinación de la fuerza de las fibras y del acero de refuerzo a través de las fisuras transmite una fuerza de tracción máxima que usualmente suele ser mayor que la resistencia máxima cuando está trabajando el acero de refuerzo solo.

Un Tirante de Hormigón normal sometido a esfuerzos de tracción necesita cuidados y requerimientos para poder asegurar una satisfacción a un comportamiento en servicio, caso que no es el que sucede con un tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento el cual como pudimos ver con la adición de fibras y de un acero de refuerzo nos da mucha más ductilidad se asegura un buen comportamiento en estado límite de servicio y también nos mejora enormemente el control de fisuración pero nos puede conducir a un inadecuado comportamiento en el estado límite último porque al tener más ductilidad el fallo puede ser impredecible.

Lo que sabemos también es que el comportamiento en tensión en estado límite de servicio esta positivamente afectado por la interacción entre el HMAR y el acero de refuerzo, ya que a significantes niveles de carga las fisuras son muy delgadas y con mucho espacio entre ellas.

Varias investigaciones se han realizado sobre los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con una barra de acero como refuerzo y sometidos a esfuerzos de tracción, en los cuales veremos qué factores son influyentes para realizar dicho ensayo y también la configuración con la que ellos realizan el programa experimental de los tirantes. Veremos qué conclusiones obtienen, las que nos servirán para poner en práctica y definir ciertas características en nuestro ensayo.

El primer Artículo que tomaremos para nuestro estudio es el de “Testing of reinforced high performance fibre concrete members in tensión”, que lo realizo Dario Redaelli en el año de

2006 que fue presentado en el 6^{to} Simposio Internacional de Ingeniería Civil realizado en Zúrich, Suiza.

Los Hormigones de Ultra Alta Resistencia reforzados con fibras son materiales que en los últimos años se han estudiado bastante para poder tomarlos en cuenta como un material de construcción, ya que son una clase de hormigones con compuestas cementosos con una matriz fuerte y compacta con una base de polvo y fibras de acero o sintéticas, que al hormigón les proporcionan una ductilidad mayor con respecto a los hormigones convencionales.

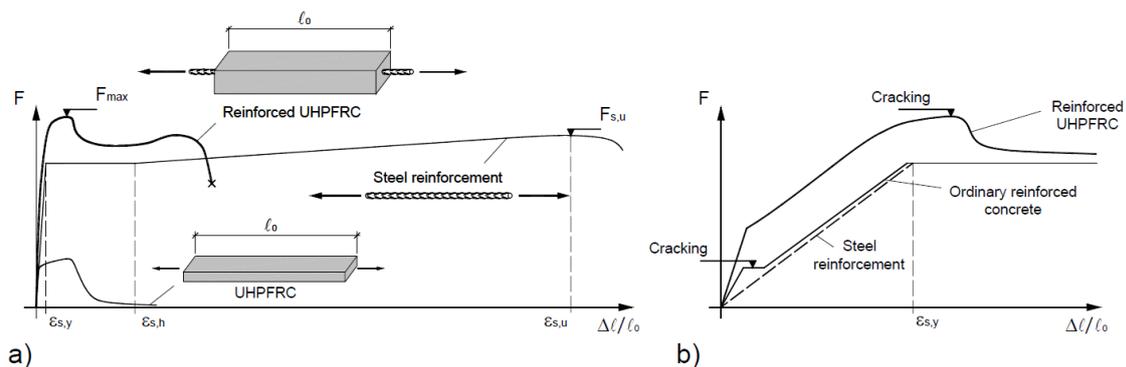


Fig. 23.- a) Diagrama fuerza vs deformación de un Hormigón de Ultra Alta Resistencia con acero de refuerzo y sin refuerzo sometido a esfuerzo de tracción y b) Comparación con un Hormigón normal para pequeños alargamientos. (“Testing of reinforced high-performance fiber concrete members in tension”, Dario Redaelli)

Como podemos ver en la imagen (Fig. 7 a) vemos que hormigón de Ultra Alta Resistencia con acero de refuerzo y fibras a ciertos niveles de carga, no, así como lo hace un hormigón normal y en la Fig. 7b podemos darnos que el limite elástico del acero de refuerzo es mucho mayor a la carga de fisuración.

En este artículo científico, los investigadores tomaron en cuenta los resultados experimentales que los realizaron (Fischer y Li 2002, Leutbecher y Fehling 2004), en los cuales ellos obtienen ciertas conclusiones, las cuales servirán como pautas para su propio programa de ensayos que van a realizar en los cuales ellos dicen lo siguiente:

Como vemos en la figura (a), se puede ver que la contribución de las fibras empieza a disminuir para niveles de deformación en las cuales el acero ha llegado a su límite de fluencia, con lo cual todos los aumentos de tensión que se produzcan en el elemento serán contrarrestados por las barras de acero y empezara a resistir las tensiones que sean liberadas por las fibras esto supone un aumento de tensión que tendrá que soportar la barra de acero.

Depende mucho de la longitud del elemento para poder tener en cuenta el comportamiento del elemento ya que en algunos casos puede significar un comportamiento de retroceso eso quiere decir que puede ser que mientras el elemento sea de mayor longitud el comportamiento puede ser peor y tendríamos resultados desfavorables.

El comportamiento de elementos ordinarios con un hormigón convencional que sean diseñados apropiadamente en los cuales el límite elástico del acero es mucho mayor que la carga de fisuración es muy diferente a los elementos fabricados con HMAR puesto que la fuerza que se produce en las fisuras que va a ser la fuerza máxima de tracción será mayor que la resistencia del acero de refuerzo.

En el programa experimental que realizan los investigadores ellos tienen en cuenta una forma de probeta o elemento que es el llamado “Hueso de Perro” o llamado también “Dog Bone” en el cual el esquema lo presentamos a continuación:

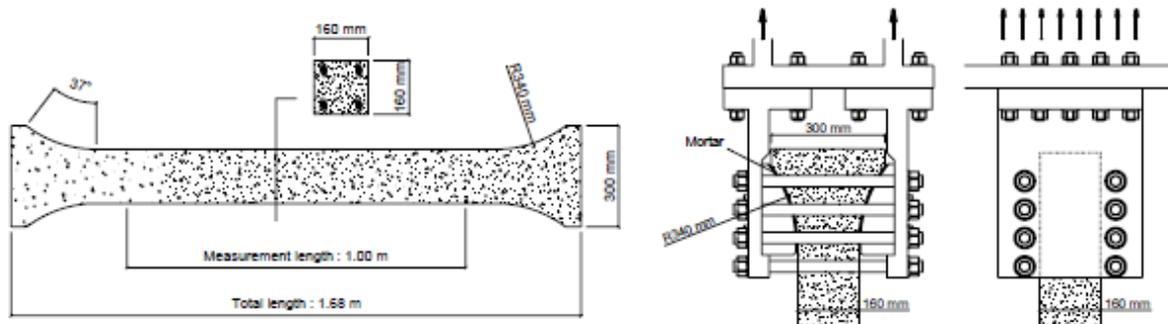


Fig. 24.- Características del Espécimen y sistema de agarre de la probeta. (Testing of reinforced high-performance fiber concrete members in tension, Dario Redaelli)

Como podemos ver en la imagen, el espécimen tiene una longitud total de 1.68 mts, pero tan solo tiene 1 mt. en longitud recta con una sección de 160 x 160 mm. En sus dos extremos la sección cambia a una sección de 300 x 300 mm, teniendo un Angulo de giro de 37° para llegar a esa sección.

Podemos observar también el sistema de sujeción que tiene este tipo de ensayos en el cual con unas especies de barras que cruzan en los extremos de la probeta justo en el lugar en donde tiene la curvatura con lo cual quieren lograr un mayor agarre y también para evitar el desarrollo de excentricidades y también que no se produzcan rotaciones en la probeta.

El radio de curvatura lo optimizaron los investigadores para minimizar las concentraciones de tensiones de tracción en la probeta y también para que las fuerzas de tracción actúen sobre el dispositivo de anclaje y no sobre la probeta. A continuación, se muestra la configuración real y el sistema de ensayo utilizado por los investigadores:



Fig. 25.- Configuración del ensayo e instrumentación utilizada (Testing of reinforced high performance fibre concrete members in tension, Dario Redaelli)

En este caso los investigadores tienen en cuenta una configuración de ensayo vertical, la cual en su extremo inferior tienen un sistema de sujeción antes mencionado y que a su vez es un punto fijo en el ensayo mediante un sistema de y en su otro extremo ejercerán la fuerza de tracción mediante un gato hidráulico. Utilizan un sistema de fotografías para monitorizar el ensayo y también un sistema de galgas extensométricas con las cuales lograron medir el valor promedio del desplazamiento de la probeta.

La prueba se realizó con una velocidad impuesta de 0.5 mm/min, con una máquina de 10 MN con un control de desplazamientos impuestos.

Se observaron diferentes fases de fisuración en la probeta después de realizar el ensayo que mostramos a continuación en la siguiente imagen:

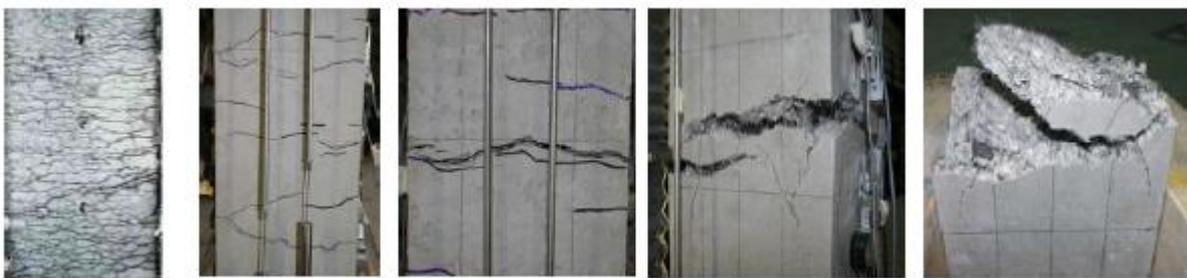


Fig. 26.- Fases de fisuración de la probeta (Testing of reinforced high performance fibre concrete members in tension, Dario Redaelli)

Como podemos ver en la figura (10), en la primera imagen tenemos una fase de fisuración elástica lineal en la cual se producen un patrón de micro fisuración en la cual se caracteriza por fisuras muy finas con separaciones muy corta de más o menos 10 mm entre ellas.

En las siguientes imágenes de la figura (10), podemos ver que se comienzan a desarrollar fisuras mucho más visibles, las cuales tienen una separación entre 20 y 100 mm, con lo que el patrón de fisuración se rige por la longitud de transferencia entre las barras del acero de refuerzo y el hormigón. En el caso del HMAR, este patrón está influenciado por la presencia de las fibras que se ubican en las fisuras, lo que nos conduce a un patrón irregular de fisuras y este hace que exista más espacio entre fisura y fisura y también que sean más finas que las del hormigón convencional.

Podemos ver en las dos últimas imágenes el hormigón fracasa, esto es debido a un aumento de desplazamiento impuesto en el ensayo por lo que la fisura localizada se abre más fácilmente y en el último caso se produce un desprendimiento del hormigón ocasionando una rotura de las fibras y de las barras del acero de refuerzo.

Con estos resultados obtenidos ellos plantean unas posibles soluciones alternativas que van desde utilizar productos de acero especial, esto quiere decir que se puede utilizar barras de acero de un mayor límite elástico con lo que se puede tener unas relaciones de tensiones mucho más altas, también nos dicen que podemos adaptar una mejor composición del HMAR para poder obtener valores diferentes en sus propiedades mecánicas como son: resistencia a la tracción y tensión máxima en el momento de la tracción ya que nos puede garantizar un buen control de las fisuras en servicio.

Por último, obtienen unas conclusiones basándose en los resultados experimentales de los ensayos y también teniendo en cuenta las posibles soluciones alternativas las cuales son las siguientes:

- En estado límite de servicio los elementos sometidos a tracción se ven afectados positivamente por la interacción entre el HMAR y las barras de acero, con lo que a niveles de carga significativos las fisuras son finas y muy poco espaciadas y el efecto “tensión stiffening” es mucho más efectivo que en un concreto normal.
- Los elementos de HMAR sometidos a tracción no pueden hacerse completamente dúctiles cuando se refuerzan con un acero de refuerzo normal, se necesitan encontrar alternativas para solucionar este problema.
- Proponen una definición alternativa en cuanto a la cantidad de acero mínima de refuerzo esto debido a solventar las fallas frágiles en los elementos de HMAR sometidos a tracción.

El siguiente artículo que vamos a tener en cuenta para nuestro estudio es el que lo realizan V. Sigrist & M. Rauch, “Deformation behavior of reinforced UHPFRC tension elements” el cual lo realizaron el año de 2008 en el Institute of Concrete Structures en la Hamburg University of Technology en Hamburgo, Alemania.

En este artículo los investigadores mediante un estudio experimental se elabora un estudio analítico en los cuales se tiene en cuenta el comportamiento de fisuración y deformación de los elementos, teniendo en cuenta la unión del hormigón con las barras de acero de refuerzo.

El objetivo de los investigadores es tratar de desarrollar métodos confiables para el diseño de elementos estructurales de Hormigón de muy Alto Rendimiento con un refuerzo de acero.

Como ya sabemos el HMAR es un material que se caracteriza por tener una muy alta resistencia a la compresión de más o menos unos 200 MPa y también una resistencia a la tracción de 10 MPa y sus propiedades de durabilidad se han mejorado notablemente. Se agregan al Hormigón fibras de acero cortas para mejorar un poco la ductilidad del material y para lograr fallas dúctiles en el Hormigón cuando se trate de esfuerzos de tracción es necesario acero de refuerzo en el Hormigón.

Para analizar las propiedades mecánicas del HMAR, como un material de construcción, se realizó un estudio experimental en el laboratorio de estructuras de la Universidad Tecnológica de Hamburgo en Alemania, en la cual los investigadores realizaron tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento reforzados con barras de acero de refuerzo.

El punto de atención en el estudio se realizó en la tensión del elemento, en el proceso de fisuración y también en el comportamiento de deformación al cual puede someterse y llegar el tirante dependiendo los niveles de carga a los que se someta el elemento.

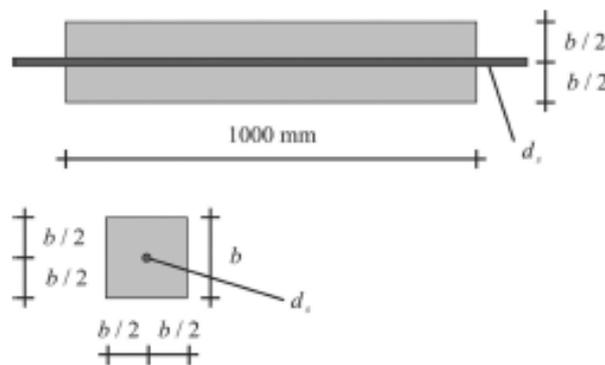


Fig. 27.- Características de los tirantes del programa experimental. (Deformation behavior of reinforced UHPFRC tensión elements, V. Sigrist & M. Rauch).

En el programa experimental se realizaron 12 tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con una barra de acero de refuerzo en las cuales se realizaron pruebas de tensión. Tal como podemos ver en la imagen (11), los tirantes tienen una longitud de 1 mt. y la barra de acero de refuerzo cruza justo en el centro de la probeta.

Los tirantes fueron tratados térmicamente por 2 días a una temperatura de 90° C, el hormigón alcanza la fuerza que se esperaba en tan solo 4 días después de que se desencofraran los tirantes.

El programa experimental se realizó mediante pruebas de tensión a los tirantes en los cuales en una primera parte se aplicaba una fuerza de 750 MPa y 500 MPa a la barra de acero de refuerzo y se descargaban por completo los tirantes, posteriormente se vuelve a cargar las muestras con una deformación constante hasta que llegue a su fallo.

Se midieron los anchos de fisura en las etapas de carga y cuando falle el tirante, así como también las deformaciones y la fuerza con la que se realiza el ensayo se registran constantemente.

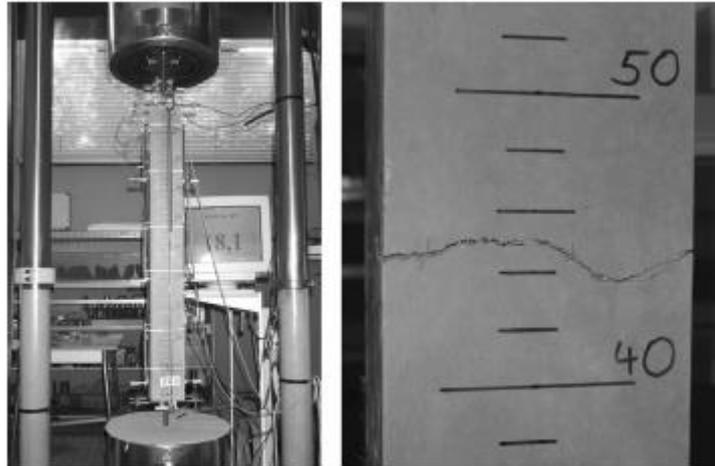


Fig. 28.- Configuración del Ensayo y detalle de las fisuras. (“Deformation behavior of reinforced UHPFRC tension elements”, V. Sigrist & M. Rauch)

Como Podemos ver en la Imagen (12) también se realizó las mediciones de las deformaciones en el extremo superior en la barra de acero de refuerzo, se midió también en toda la longitud del tirante que tenía 1 mt de longitud y 3 mediciones de deformaciones locales en una longitud de alrededor 200 mm cada una de ella.

Type of reinforcement	bars
Steel grade	S 500
Yield strength f_y [MPa]	500
Tensile strength f_u [MPa]	550
Width of specimen b [mm]	170
Diameter of bar/strand d_s [mm]	28
Geometrical reinforcement ratio ρ [%]	2.13
Mechanical reinforcement ratio ω [%]	5.33

Tabla 2.- Características de las barras del acero de refuerzo.

Después de realizar el programa de ensayos y obtener los resultados, la gráfica que se obtiene dependiendo la tensión y la deformación es la siguiente:

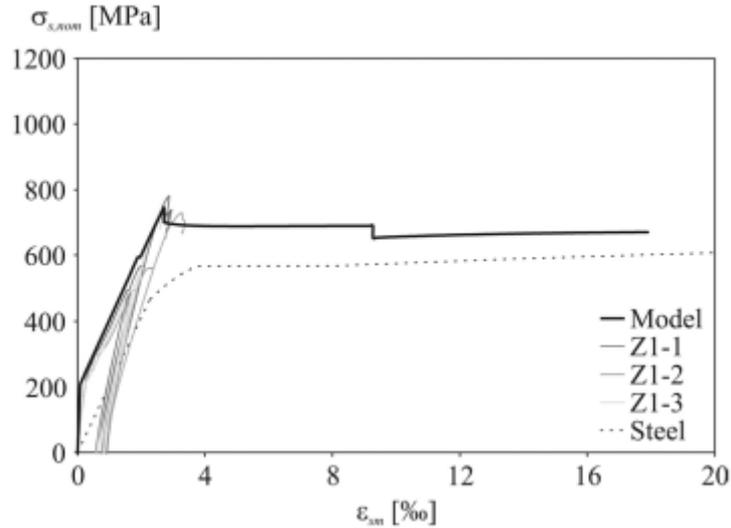


Fig. 29.- Grafica de Tension - Deformación de los tirantes (“Deformation behavior of reinforced UHPFRC tension elements”, V. Sigrist & M. Rauch)

Como podemos ver en la imagen los tirantes tienen un comportamiento elástico casi lineal antes de que se produzca el proceso de fisuración y la rigidez de los tirantes prácticamente se controla por la rigidez del Hormigón de muy Alto Rendimiento.

En este caso toman en cuenta los efectos de contracción las tensiones aplicadas en el hormigón en el momento que se producen las micro fisuras son menores a la resistencia a la tracción de la matriz del hormigón, en la etapa de fisuración las curvas de tensión-deformación son prácticamente lineales y van más o menos en paralelo con las barras de acero de refuerzo.

Debido al programa experimental que realizaron los investigadores se dieron cuenta que el espacio entre fisuras era muy pequeño, los anchos de fisuras tenían una abertura considerable para tener en cuenta en el funcionamiento del elemento.

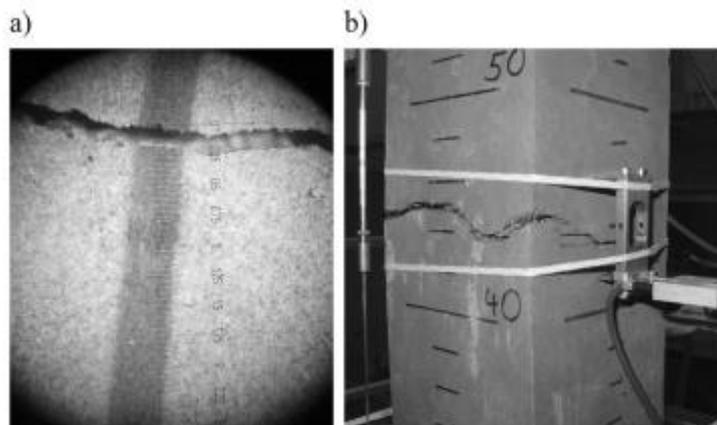


Fig. 30.- Pruebas de tensión: a) detalle de la fisura cuando el acero de refuerzo en su límite de fluencia, b) detalle de la fisura a la carga máxima.

La aparición de macro fisuras en el tirante tan solo tiene una influencia menor en cuanto a la rigidez de los tirantes sometidos a esfuerzos de tracción, y debido a la meseta del rendimiento y de la relación de fuerza utilizada, la carga aplicada al tirante en el momento del ensayo disminuye y la macro fisura se convierte en la que controla el comportamiento de todo el elemento y tan pronto como las fibras del hormigón se rompen por completo los tirantes fallan por ruptura del acero de refuerzo.

Como conclusiones de este programa experimental que realizaron los investigadores es en torno al comportamiento de fisuración y de deformación de los elementos de hormigón armado reforzados con barras de acero, se enfocan en la eficiencia de dicha barra de refuerzo.

A partir de los ensayos realizados concluyen que existe una unión rígida entre el hormigón y el acero de refuerzo y que la rigidez a la tensión tanto como la característica de deformación por tensión en el acero influye significativamente en el comportamiento del tirante tanto en deformación como en los mecanismos de falla del elemento.

Además, como conclusión deducen que se puede utilizar un acero de refuerzo de alta resistencia combinado con el Hormigón de muy Alto Rendimiento ayuda al comportamiento del elemento debido a la mayor resistencia a la tracción que tiene el elemento y se pueden elegir cuantías o relaciones de refuerzo mucho más bajas y moderadas.

En si la investigación del estado del arte nos da conclusiones positivas en torno a los parámetros que tenemos que tener en cuenta para realizar los ensayos para la caracterización de los tirantes de HMAR, se tienen que tener en cuenta el acero de refuerzo que vamos a utilizar, tanto si es armadura activa o pasiva.

También tenemos que tener en cuenta la disposición de la armadura ya que esta puede estar en el centro de la probeta o con alguna excentricidad con respecto al centro del tirante, también el método de ensayo esto es el bastidor donde se van a realizar los ensayos, la disposición de todos los elementos que forman parte de ella y de los sistemas de medición que se van a utilizar.

Capítulo 3

Diseño y Desarrollo de la Metodología de Ensayo

3.1 Metodología Inicial de Ensayo

3.1.1 Instrumentación Utilizada

En este capítulo vamos a revisar toda la instrumentación necesaria para las diferentes metodologías de ensayo sobre los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

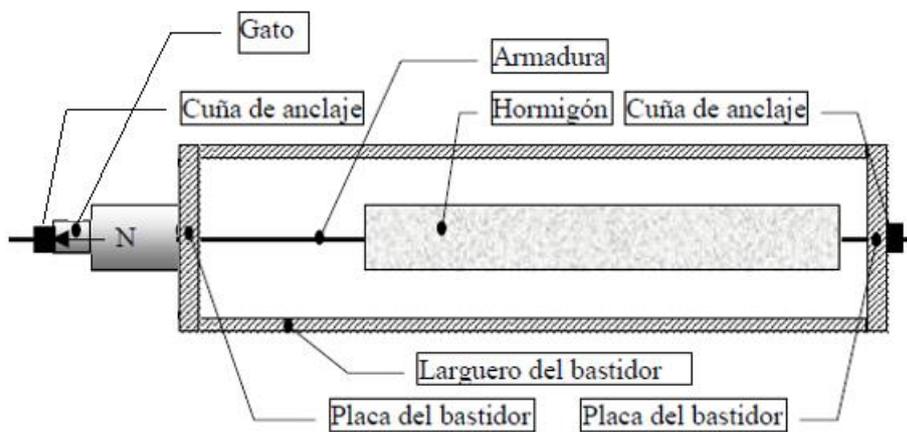


Fig. 31.- Esquema del bastidor para la realización de los ensayos

En el grafico anterior mente mostrado (Fig. 8), vemos un esquema de los elementos que se utilizan para realizar los ensayos, en el cual existen elementos básicos como sería un bastidor que va a soportar las cargas que haga presión el gato el momento de ejercer la fuerza de tracción para realizar el ensayo y otros elementos que vamos a detallarlos a continuación:

3.1.1.1 Bastidor de Ensayo



Fig. 32.- Bastidor de Ensayo

En la Fig. 32 podemos ver el bastidor en los cuales se van a realizar los ensayos de tracción de los tirantes, como vemos en la imagen se trata de una estructura rígida e indeformable que nos va a satisfacer las necesidades del ensayo las cuales serán de soportar las cargas que va a ejercer el gato hidráulico y lo que necesitamos es que la estructura no se deforme y así no nos dé resultados erróneos.

La estructura está compuesta de una sección cuadrada con 4 perfiles de acero hueco ST.52.2 de medidas 60x60x8mm, con unos extremos sólidos para realizar las roscas para atornillar las placas que son SM – 70 son unas medidas de 320x320x50mm.

El Bastidor fue modelado en SAP 2000, para las diferentes etapas del ensayo que son tensión y anclaje, también se consideran dos situaciones con respecto a la eficacia de los perfiles y las placas roscadas: como junta perfecta y como articulación. Como resultado se obtuvieron resultados con los cuales se puede obtener tensiones de trabajo de los materiales de máximo 30% del límite de elasticidad de los materiales.

Los marcos del bastidor fueron diseñados para soportar una carga de 140 KN para la fuerza considerada al tensionar y de 200 KN para la fuerza en el anclaje y siempre garantizar que todos los componentes del bastidor estén alineados para así obtener resultados favorables.

3.1.1.2 Gato Hidráulico



Fig. 33.- Gato Hidráulico

Como podemos ver en la imagen, el gato hidráulico va a ser el actuador que nos va a proporcionar en nuestro ensayo el esfuerzo de tracción que necesitamos, en este estará anclado con una cuña el cable de pretensado o la barra de acero la cual soportará un axil que traccionará al cable o barra. Este instrumento tiene una capacidad para ejercer una fuerza de tracción de hasta 30 Tn.

Este tiene una entrada y una salida como podemos ver en la imagen (Fig. 33), la entrada nos sirve para que el aceite hidráulico que será enviado mediante un tablero que va a controlar la presión que queremos conseguir en el gato hidráulico y en el ensayo para poder controlar y que la carga o la fuera de tracción que se ejerza sobre el cable no se incremente en forma muy acelerada y la salida la tenemos para cuando se termine el ensayo al tener el gato con una presión y ejerciendo una fuerza de tracción sobre el cable, conectamos una toma de aire y vamos a quitarle toda la presión que tiene este y así quitarle tensión al cable o barra y poder quitar la cuña de anclaje que teníamos en ese extremo del cable o barra.

3.1.1.3 Célula de Carga



Fig. 34.- Célula de Carga

Con este instrumento en nuestro ensayo podremos medir la fuerza existente en el momento que estemos realizándolo, este estará colocado en el otro extremo del bastidor y estará en contacto con la placa del bastidor y en su otro extremo estará anclada la barra o cable mediante una cuña de anclaje.

Este tipo de célula es un transductor de fuerza diseñado para medir grandes fuerzas de compresión y de tracción, tiene aplicaciones en la construcción, en el procesamiento de metales y también en la monitorización de procesos y ensayos en el sector naval y ferroviario. Esta Célula de carga es una barra de compresión y este sistema resulta muy útil especialmente para medir tensiones en amarras y para monitorizar anclas.

La Célula de carga posee desplazamientos muy cortos por lo que resulta muy idóneo para medir grandes fuerzas con mucha rapidez tal como lo es en nuestro ensayo y tiene una capacidad de carga de hasta los 500 KN.

3.1.1.4 Transductor de Desplazamiento



Fig. 35.- Transductor de Desplazamiento o LVDT

Este instrumento es uno de los más importantes para poder realizar en ensayo de los tirantes ya que este nos mide o nos da longitudes ya sean de compresión o de alargamiento del hormigón y también podemos medir el alargamiento del acero de refuerzo que tenemos.

Los sensores de desplazamiento de tipo inductivo, también conocidos como sensores de desplazamiento DT por sus siglas en inglés que quiere decir Linear Variable Differential Transformer se basa su funcionamiento en el movimiento de un núcleo dentro del cuerpo del sensor que tiene arrollados los bobinados, de ahí que puede decirse que es un transformador de núcleo móvil. Se trata de un sensor sin rozamiento que ya que es inductivo la variación es por un campo magnético que se produce en el interior del transductor y este viene con un cable incorporado al instrumento que será conectado a una caja de comandos que ira conectada a un computador y así poder controlar y visualizar los desplazamientos producidos y medidos en el ensayo.

Son habituales para mediciones de bajos y medios rangos, estos pueden llegar hasta a medio 500 mm y cuentan con opciones como los muelles de retorno, montaje, rotulas, etc. En nuestro caso utilizaremos un transductor de 50 mm que es adecuado para el tipo de ensayo que vamos a realizar ya que al ser un Hormigón de muy Alto Rendimiento el alargamiento que se va a producir en a la probeta no va a ser mayor a ese rango de medida por lo que son instrumentos esenciales.

3.1.1.5 Discos Demec



Fig. 36.- Discos Demec y Galga

Este método de medida es muy bueno ya que es un sistema muy preciso ya que se puede utilizar en muchos tipos de estructura para la medición de deformaciones y también para el control de fisuras que se pueden formar al aplicar la fuerza de tracción a dicho elemento.

El medidor de deformación mecánico desmontable (DEMEC) fue desarrollado para permitir mediciones de deformaciones en diferentes partes de una estructura utilizando un solo instrumento. Este consiste en un calibrador estándar o digital acoplado en una barra invar, un punto cónico fijo que está montado en un extremo de la barra y otro punto móvil que está montado en un pivote del borde en el extremo opuesto y el movimiento de este segundo punto se mide mediante un comparador.

El otro elemento que necesitamos para poder medir son los discos, que como podemos ver en la imagen (Fig. 36), son discos de acero inoxidable preperforados en su cara superior que se unen o pegan a la estructura o elemento mediante un pegamento especial de cianocrilato para que estos queden seguros y no haya el riesgo de que se mueva o se desprenda del elemento de hormigón.

Cada vez que se tenga que tomar una medida, el punto cónico del calibre fijo se inserta en un disco y el punto que esta sobre el pivote se lo inserta en otro disco y se indica la lectura en el indicador digital que tiene una tolerancia de 0.001 mm, tiene una exactitud de $\pm 5 \times 10^{-6}$ en la mayoría de las condiciones de la prueba de laboratorio.

Para lograr una mayor precisión de la lectura se tiene que utilizar un calibrador de medida que consiste en una pequeña barra en la cual tiene dos puntos en sus extremos a una distancia que puede variar entre los 50 y 200 mm que son las medidas que existen estos aparatos de medida.

Nosotros utilizaremos el sistema de medida DEMEC para medir las deformaciones que se produzcan en la sección intermedia del tirante y comprobar el alargamiento o acortamiento

que pueda sufrir el Hormigón de muy Alto Rendimiento cuando se produzcan los esfuerzos de tracción.

3.1.1.6 Cuñas de Anclaje



Fig. 37.- Cuñas de Anclaje

Como podemos ver en la figura 37, las cuñas de anclaje son elementos que nos permitirán que la fuerza que se transmite del cable o barra de nuestra probeta al hormigón, estas irán conectadas o ancladas en la placa del extremo y otra ira en la parte del gato hidráulico.

Este tipo de anclajes están formados por unas cuñas y un barrilete, además es un anclaje muy utilizado por su facilidad de colocación y también por su precio que no es muy elevado, durante la ejecución del ensayo nos permite una inspección del mismo para revisar que no tengamos ningún problema con los anclajes.

Podemos decir que un anclaje es un dispositivo que transmite la fuerza del cable al hormigón, su función principal es absorber las fuerzas tan elevadas que se producen en su núcleo y distribuir las adecuadamente al interior de la masa de hormigón. Un parámetro que puede decidir la elección de un sistema de pretensado es la cantidad de fuerza que se pierde debido a la acción que realiza el gato para transmitirla hacia el hormigón.

Existen 3 tipos de anclajes pero solo vamos a estudiar uno de ellos que es el que mas nos importa:

- Anclajes Activos

Anclajes Activos. - Son los que reciben directamente la fuerza procedente de los cables de tesado, los más comunes son los anclajes de cuña que son los que vamos a utilizar en nuestro ensayo y su funcionamiento se basa en el rozamiento entre el cable o la barra y la cuña y en la conversión de las fuerzas longitudinales en unas fuerzas radiales por el principio del plano inclinado (José Antonio Bellido, Elementos Pre y Postensados de Hormigón, 2002).

Una parte importante es la placa de anclaje de cuñas que es un elemento en el cual quedan fijadas las cuñas que presionan a los cables por lo que posee un número determinado dependiendo de la cantidad de torones, cables o barras que vamos a anclar en ella. Estos orificios o perforaciones tienen que ser troncocónicas para que las cuñas puedan introducirse dentro de ellas.

3.2.1.7 Lámparas de Iluminación



Fig. 38.- Lámpara de Iluminación

Son elementos auxiliares que podemos utilizar para nuestro ensayo pero no así menos importantes puesto que la iluminación es importante para poder realizar el análisis mediante las fotografías o fotogrametría, ya que para poder perseguir o encontrar las fisuras se necesita que el tirante este muy bien iluminado y así mediante el software que vamos a utilizar para medir el alargamiento o acortamiento del tirante poder correlacionar los resultados con las

mediciones que vamos a obtener con los discos demec y con los transductores de desplazamiento o LVDT.

Son lámparas de una potencia de 400 Watts, con un voltaje de 230 Voltios y también una potencia máxima de uso de 500 Watts para poder conseguir una iluminación adecuada.

3.1.1.8 Cámara Fotográfica



Fig. 39.- Cámara Fotográfica

La cámara fotográfica la vamos a utilizar para hacer nuestro estudio de fotogrametría en nuestro ensayo para conseguir tener la capacidad de disponer de otro valor de medida que se sumara a los métodos antes indicados de medida y así poder realizar una comparación ajustada de el alargamiento de nuestra probeta y también poder perseguir las fisuras que se produzcan en el momento de realizar nuestro ensayo.

Realiza fotos y videos con una calidad de 18 megapíxeles, una calidad muy buena para las necesidades que debemos solventar en nuestro ensayo y también tiene un nuevo procesador de imágenes que nos garantizan una velocidad y calidad el rato de realizar las fotografías. Tiene un sensor de imágenes de 22.3 mm x 14.9 mm lo cual nos garantiza que las fotografías lo suficientemente nítidas como para poder realizar nuestro ensayo.

Tiene una capacidad de tomar hasta de 3 fotos por segundo, que si bien es cierto no es una cantidad de fotografías muy grande sin embargo para nuestro ensayo será suficiente y también tiene una capacidad de autofocus que se presenta en 9 puntos de enfoque en la cual la cámara será la encargada de ajustar todos los parámetros para poder conseguir mejores fotografías.

La distancia focal con la cual realicemos las fotografías es muy importante ya que es la distancia entre el centro óptico del lente y el punto focal que vamos a realizar las imágenes,

para nuestro caso tenemos una distancia focal igual a 18mm puesto que mientras es menor es mejor puesto que para corregir las distorsiones es recomendable una distancia más pequeña.

3.1.1.9 Ordenador

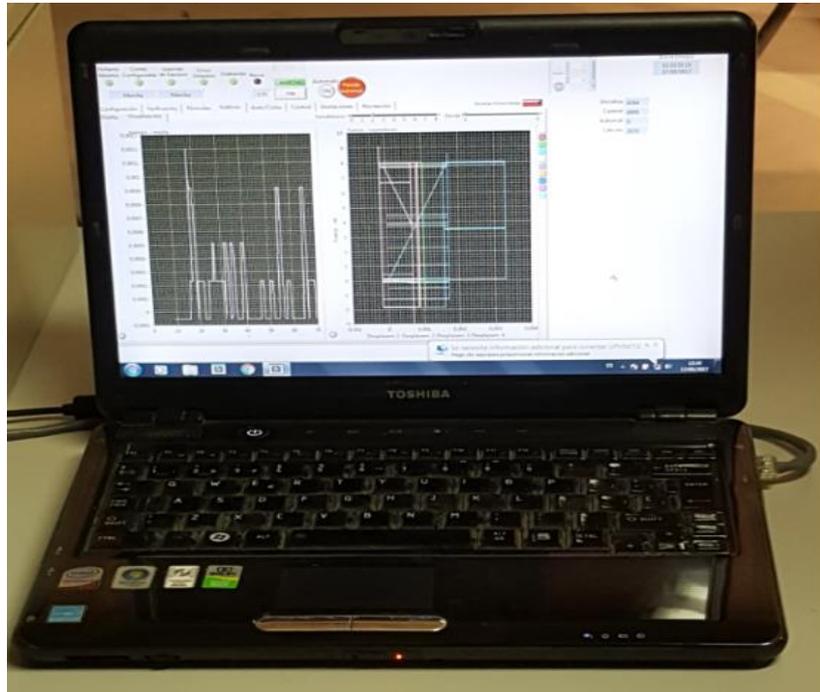


Fig. 40.- Ordenador

Para el procesamiento de todos los datos obtenidos ya sea mediante los transductores de desplazamiento, los discos demec y de las fotografías necesitaremos un ordenador para poder procesar los datos y convertirlos en medidas que después nos servirán para comparaciones y comprobaciones del ensayo.

También necesitaremos de softwares propios para las mediciones de los transductores de desplazamiento que estarán instalados en el tirante y también controlar la fuerza de tracción que está ejerciendo el gato hidráulico sobre la barra de acero o cable de pretensado y también un software para el procesamiento de las fotografías para lo cual será uno para el tema de la distorsión de cada fotografía que hay que corregirlas y otro para las mediciones de los desplazamientos producidos en el tirante.

3.2.2 Ensayos Iniciales

En este apartado hablaremos de todos los ensayos experimentales que realizamos y todas las dificultades que se tuvieron en el transcurso del programa experimental, antes de llegar a una metodología de ensayo que se cree es la correcta, de acuerdo con los resultados obtenidos.

En el primer ensayo que se realizó, de una serie de ensayos para encontrar una metodología apropiada para poder caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento, se utilizaron captadores para poder medir el alargamiento de la probeta que estaban dispuestos en un sistema compuesto por 2 terminales con forma de estrella de 3 puntas y 3 barras auxiliares que son las que van a conectar a los 2 terminales. Los terminales se fijan mediante unos tornillos acopladores que irán sujetos a la armadura de refuerzo que se utilizó en la probeta que se ensayó.

En estos terminales en forma de estrella se disponen de orificios en cada uno de sus brazos para que por ahí pasen las barras auxiliares, las mismas que van a estar sujetas mediante tornillos en cada uno de los brazos de los brazos y también estas barras mediante unos acopladores con unos tornillos incorporados se fijaran los captadores de desplazamiento con los cuales podremos medir si ha existido un alargamiento de la probeta mientras se realiza el ensayo.



Fig 41.- Configuración de ensayo mediante el sistema de terminales tipo estrella (Fuente propia)

Como podemos ver en la figura (41), vemos la configuración del ensayo realizada en el cual vemos los terminales en forma de estrella en cada uno de los extremos del tirante, que a su vez están sujetos a la barra de refuerzo, también vemos que existen unos terminales que sujetan a los captadores de desplazamiento que están puestos en la armadura de refuerzo y el

otro extremo del captador está apoyado contra la placa del bastidor del ensayo, esto con la finalidad de poder medir si la armadura también sufre de algún alargamiento debido al esfuerzo que se está produciendo mediante el gato hidráulico en el momento del ensayo realizado.

En este caso la probeta con la que se realizó el ensayo se fabricó con un Hormigón de muy Alto Rendimiento, pero en esta ocasión no se adicionaron fibras con lo que, al ser un ensayo de prueba que se realizó se produjeron algunas fisuras como lo muestra la figura que vamos a mostrar a continuación:

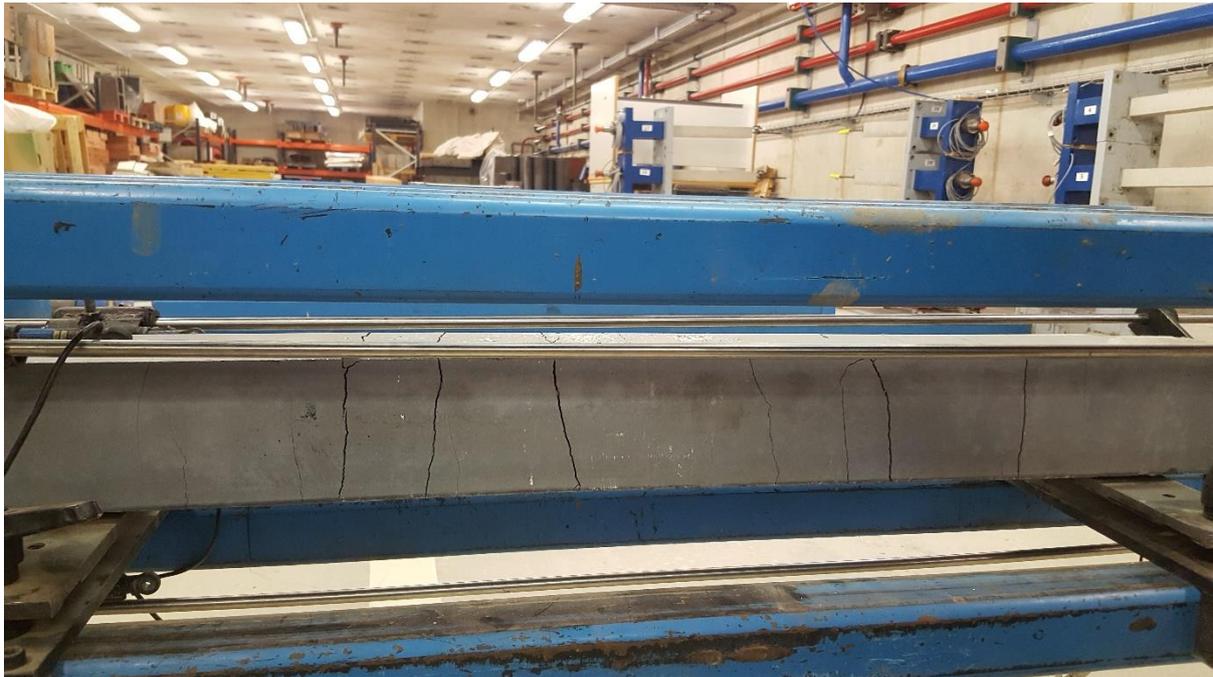


Fig 42.- Fisuras producidas en el primer ensayo realizado (Fuente propia)

En este caso se puede observar que se produjeron algunas macro fisuras, esto debido a que el hormigón al no tener una adición de fibras, perdió ductilidad y su resistencia a la tracción disminuyó y los resultados para poder encontrar una metodología correcta para caracterizar el material no son significativos, a más de ello se notó que podía existir algún tipo de excentricidad el momento de realizar el ensayo y cuando el gato hidráulico empieza a realizar el esfuerzo de tracción a la armadura, podía el tirante rotar dentro de su propio eje y así los resultados de los 3 captadores podrían no ser iguales lo cual nos indica que en este caso esta metodología de ensayo puede no ser la mejor.

Como segunda metodología de ensayo, al darnos cuenta de que los resultados obtenidos de acuerdo a la configuración anterior no fueron los esperados y realizando un estudio de investigadores que se han dedicado al estudio de la caracterización de diferentes materiales, se decidió probar con una configuración de metodología diferente como lo vamos a mostrar en la siguiente figura:



Fig 43.- Sistema de Medida de la segunda metodología de ensayo (Fuente Propia)

En esta segunda prueba para encontrar una metodología correcta para la caracterización de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento, se realizó mediante unos terminales que estaban colocados en la armadura de refuerzo del tirante para así poder medir si existe algún tipo de alargamiento en el acero.

En cuanto al Tirante, se utilizó un sistema de medición que lo vemos en la siguiente imagen:



Fig 44.- Elementos utilizados para el sistema de medición en la segunda metodología de ensayo (Fuente Propia)

En este caso y con los resultados anteriores obtenidos, se intentó que los captadores con los que se iba a medir el alargamiento que se produzca en el tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento, sus mediciones sean un poco más acertadas y más confiables ya que, en la configuración de la metodología anterior no se medía con los captadores directamente al hormigón sino lo hacíamos mediante los terminales de tipo estrella, no se estaba midiendo lo que realmente necesitábamos que era la probeta de hormigón, por lo que al emplear este nuevo sistema de medición que consistía en una especie de ménsula la cual va atornillada al bastidor en un extremo, en el otro extremo va apoyado en una especie de apoyo en tipo de cojinete que está compuesto por platinas en forma de U y que tiene cruzado un pedazo de varilla redonda lisa el cual servirá para que se asiente el extremo de la ménsula, este a su vez está asentado en los 2 tubos laterales del bastidor.



Apoyo de la Mensula

Fig 45.- Apoyo de la ménsula en la configuración del ensayo (Fuente Propia)

Con este sistema de medida que utilizamos para encontrar una metodología de ensayo adecuada los resultados no fueron satisfactorios puesto que los alargamientos que conseguíamos mediante los captadores que estaban sostenidos en este sistema tipo ménsula, no eran lo suficientemente acertados puesto que la medida era demasiado pequeña y también no se producían microfisuras, la barra de acero de refuerzo plastificaba antes de que se iniciara una fase de fisuración en la probeta del hormigón con lo que se necesitaba algún sistema de

medida adicional para poder comprobar los alargamientos que se produzcan en el tirante y así poder ver si existe una correlación entre dichas medidas.

Posterior a eso se pensó en utilizar un sistema de fotogrametría para poder encontrar correlaciones entre las mediciones de los captadores y las medidas que nos dé mediante fotografías.

En este sentido y en la primera prueba que realizamos tuvimos inconvenientes puesto que para poder realizar una medición mediante fotografías del alargamiento del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento, se necesitaba puntos de referencia que estén dentro de la probeta o exterior a ella esto quiere decir que podía ser en el bastidor.



Fig 46.- Sistema de Medición mediante fotografías. (Fuente Propia)

Con estos problemas que nos encontramos, se tomó la decisión de utilizar el sistema de medición mediante discos “DEMEC”, que es un sistema fácil de medición y que posiblemente nos diera pautas para poder seguir en un camino adecuado en cuanto a encontrar una metodología adecuada para caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.



Fig 47.- Sistema de Medición mediante discos “DEMEC” (Fuente Propia)

Como podemos ver en la figura 47 en esta configuración del ensayo de los tirantes, decidimos utilizar un sistema de medición mediante los discos “DEMEC” y también la medición mediante los captadores de desplazamiento tanto en la armadura como también en la probeta de hormigón. En este caso en los resultados como los veremos más adelante existió una correlación entre las mediciones de ambos sistemas tanto de los captadores como de los DEMEC, a pesar de que en la probeta no se produjeron fisuras y la barra de acero llegó a su límite elástico por lo que se tuvo que terminar el ensayo antes de que se produjeran las mismas, se decidió añadir las fotografías en los nuevos ensayos y así comprobar que los 3 sistemas de medición sean lo más aproximados posibles.

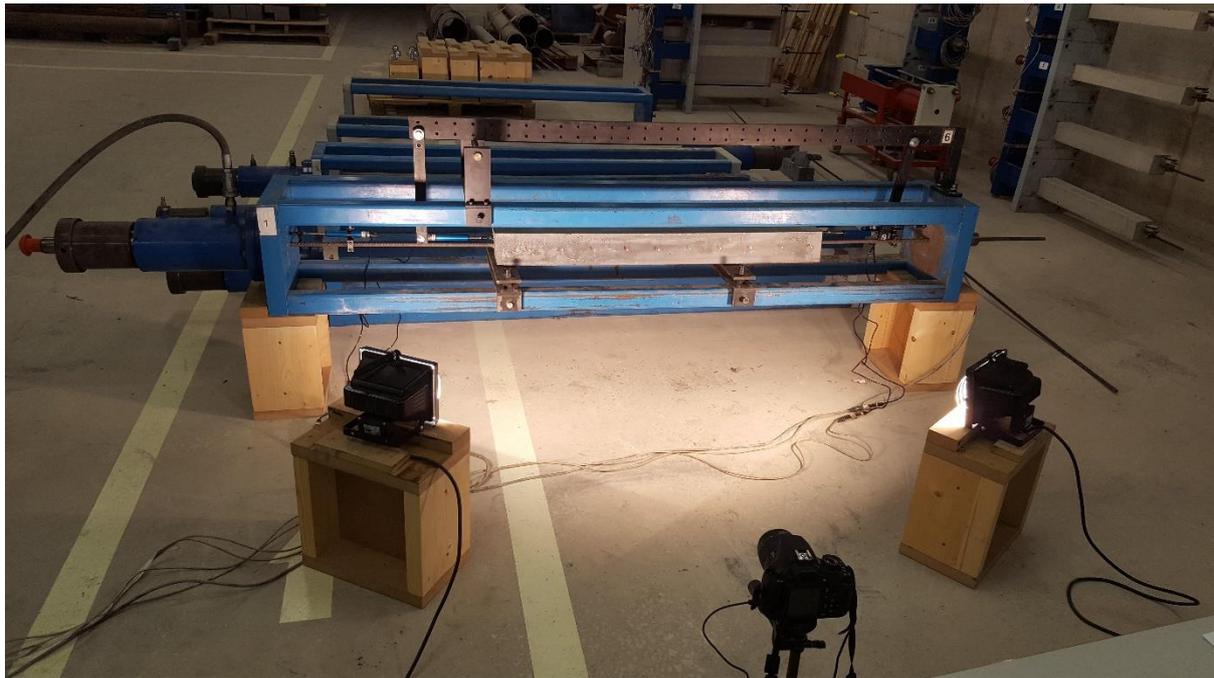


Fig 48.- Sistema de Medición mediante Captadores, discos “DEMEC” y Fotografías. (Fuente Propia)

En este caso se realizaron elementos de apoyo para la medición como lo son unos cuadros para las mediciones de los discos DEMEC y así llevar una secuencia de hora y de carga obtenida en cada medición como lo mostraremos a continuación:

TIRANTES HMMAR

FECHA ENSAYO	16/7/2017
PROBETA	B1
DIMENSIONES	LONGITUD 1655mm DIAMETRO 100x100
ARMADURA	ACT/PAS 8/2

Con DEMEC / Ene Detrás

$h_{202} = 100$
 $h_{205} = 102$
 $h_{208} = 104$

99
102 mm
102

FECHA AMASADO PROBETA		DISTANCIA DEMEC (Medidos mm.)									
FECHA AMASADO PROBETA	205/2017										
HORA	CARGA	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	
10:27	0	-0,278	-0,125	1,573	-2,214	0,098	-1,444	0,272	3,444	-2,909	
10:45	1	-0,194	-0,115	1,626	-2,185	0,111	-1,485	0,270	3,448	-2,906	
10:53	2	-0,250	-0,123	1,644	-2,139	0,117	-1,480	0,295	3,451	-2,901	
10:56	3	-0,233	-0,106	1,665	-2,175	0,133	-1,486	0,203	3,454	-2,897	
10:59	4	-0,216	-0,104	1,640	-2,173	0,113	-1,473	0,211	3,461	-2,898	
11:00	5	-0,193	-0,089	1,721	-2,179	0,147	-1,474	0,223	3,458	-2,900	
11:06	6	-0,178	-0,094	1,746	-2,166	0,163	-1,471	0,229	3,457	-2,900	
11:10	7	-0,164	-0,081	1,786	-2,167	0,181	-1,465	0,131	3,447	-2,890	
11:12	3,5	-0,189	-0,102	1,729	-2,131	0,158	-1,472	0,211	3,464	-2,903	
11:22	0	-0,244	-0,118	1,653	-2,186	0,138	-1,483	0,262	3,455	-2,906	

Fig 49.- Cuadro de Apoyo para la medición de los discos DEMEC. (Fuente Propia)

Con estas hojas de apoyo que se elaboraron se tenía un control y se llevaban las mediciones entre cada par de DEMEC con lo que luego se podía comprobar esas medidas con las de las fotografías, en ese sentido se utilizó un software para poder procesar las imágenes y lograr medir las distancias entre cada disco DEMEC.



Fig 50.- Software para la medición mediante fotografías. (Fuente Propia)

Con este software teníamos la oportunidad de realizar una medición del alargamiento de las probetas entre cada disco Demec, pero se tienen que seguir algunos pasos para que las mediciones sean correctas:

- Lo primero es realizar una corrección de la distorsión de la fotografía mediante un software externo ya que la fotografía teniendo un lente de focal variable o de focal fija la fotografía en sus 4 esquinas se verá como que la fotografía esta abombada por lo que se realiza esta corrección como lo mostramos a continuación:



Fig 51.- Corrección de la distorsión de las fotografías mediante un software. (Fuente Propia)

Como se puede ver en la figura 28, en la fotografía de la izquierda vemos en las 4 esquinas como lo dijimos antes que la fotografía esta distorsionada esto quiere decir que debido al lente de la cámara fotográfica y a su apertura, el punto focal se distorsiona y eso produce que la fotografía se vea así. En la fotografía de la derecha se ha corregido la distorsión que existía y se puede notar una mejoría en cuanto a la horizontalidad de la foto, podemos ver que en las esquinas no existe ese efecto de que la fotografía está abombada con lo que se supone que los puntos de los DEMEC están horizontales con lo que podríamos medir las distancias entre ellos.

- Como se van a utilizar discos DEMEC como puntos de referencia para la medición de las distancias de la probeta, se tienen que sacar los centros de gravedad de cada uno y así tener una referencia exacta para que el programa pueda seguir cada punto y encontrar medidas.

En el caso de este software trabaja mediante la medición de pixeles esto quiere decir que depende de cuantos pixeles tiene la fotografía y la distancia que el programa va a medir son en pixeles, luego se realiza una conversión de medida y podemos obtener distancias en mm o cm de ser así el caso.

- Para poder procesar las fotografías en el software, se necesitan 4 medidas de referencia para poder medir los pixeles y obtener una precisión en cuanto a pixeles se refiere lo recomendable es que sus 4 puntos de referencia sean los vértices de un cuadrado, estos pueden estar dentro o fuera de la probeta, se tienen que medir sus distancias y sus diagonales.
- Posterior a esto y por último vamos marcando cada punto que deseamos seguir, esto quiere decir que tenemos que seleccionar el centro de cada disco DEMEC para que posterior a eso, los datos obtenidos se exportan a una hoja de Excel y así poder analizar los resultados y encontrar las distancias medidas.

Se realizaron algunos ensayos utilizando los 3 sistemas de medida los captadores, los discos DEMEC y las fotografías encontrando algunos resultados positivos y otros no tanto puesto que existía mucha diferencia entre las medidas que daba cada sistema.



Fig 52.- Metodología de ensayo mediante los 3 sistemas de medida. (Fuente Propia)



Fig 53.- Configuración de la metodología de ensayo. (Fuente Propia)

Como podemos observar en la figura 53, al existir una variación en las medidas obtenidas tanto de los captadores como de los discos DEMEC, se vio la necesidad de utilizar un captador de desplazamiento que este trabajando sobre el tirante de hormigón, eso lo logramos realizando 2 pequeños orificios en el hormigón y con unos tornillos pequeños sujetar al captador a la probeta del hormigón y así medir entre 3 discos DEMEC



Fig 54.- Disposición del captador de desplazamiento para medición entre discos DEMEC.
(Fuente Propia)

Como observamos en la imagen, nos fijamos que en este caso se ubicó al captador de desplazamiento sobre la probeta y lo que se intentaba medir en el tirante era la distancia entre 2 discos DEMEC, estos estaban ubicados cada 10 cm de distancia con lo que el captador tenía q estar a la misma distancia y así poder comparar las distancias obtenidas en cada sistema de medida y encontrar una correlación.

Existía un pequeño problema con este sistema y era que para poder sujetar el captador se tenían que realizar 2 orificios en el tirante con un taladro para poner unos tacos Fischer y así poder atornillar y que el captador no sufra ningún movimiento y la medición no se altere, con lo que esto podría ser un causante de que justo en el lugar donde se realizaban los orificios, se produzcan fisuras, con lo que en esa parte del tirante es más vulnerable, pero al ser el orificio demasiado pequeño de alrededor de 4 mm de diámetro y con una profundidad de 2 cm, se llegó a una conclusión de que no afectaba en sí a la resistencia del tirante sometido a esfuerzos de tracción y si se producían fisuras en ese lugar serían un tipo de fisuras localizadas con lo que no afectarían al desarrollo del ensayo y se podría encontrar una metodología correcta para caracterizar a los tirantes.

Con todos estos resultados e inconvenientes que se tuvo en los diferentes ensayos se propuso la siguiente metodología de ensayo:



Fig 55.- Metodología de ensayo mediante 3 captadores y discos Demec (Fuente Propia)

En esta metodología de ensayo que se realizó se utilizaron 3 captadores de desplazamiento, uno en cada cara de la probeta y en la cara restante se colocaron discos DEMEC para realizar mediciones en sus 4 lados.



Fig 56.- Metodología de ensayo mediante 3 captadores y discos DEMEC. (Fuente Propia)

Como podemos observar en las figuras (55 y 56), en este ensayo se realizó la medición de 3 captadores de desplazamiento en 3 de las 4 caras del tirante de hormigón, y en la otra cara se colocaron discos DEMEC cada 10 cm, con lo que se quería encontrar una media en la medida de los 3 captadores y comparar con la distancia medida en los discos DEMEC.

En este caso se probó que los captadores no sean atornillados contra la probeta y así evitar que en el lugar donde se realicen los orificios se produzcan fisuras por lo que se optó por colocar una especie de angulares pegados a el hormigón mediante silicona y que tengan unos huecos para poder sujetar los captadores mediante unos pernos, con eso se esperaba que al no realizar los huecos para poder sujetar los captadores no se produzca ninguna fisura.

Al contrario de lo que se pensaba se produjeron fisuras justo en donde estaba pegados los angulares que sujetaban los captadores se produjeron fisuras como vamos a mostrar a continuación:



Fig 57.- Fisuras producidas en el ensayo. (Fuente Propia)

Como vemos en la imagen 57 se pueden observar las fisuras producidas durante el ensayo que se realizó en un tirante de 6x6 cm con una barra de acero de refuerzo de 12 mm, con lo que se podría decir que esta metodología se acerca a lo que necesitamos para nuestro ensayo puesto que se produjeron fisuras y también la barra de acero y el hormigón se comportaron como se esperaba, pero se planteó una hipótesis de que al estar los angulares pegados ahí podía existir una acumulación de tensiones o que por el simple hecho de que exista un elemento que este pegado al hormigón se pueda producir fisuras así sean superficiales, esto sin encontrar una causa con fundamentos.

Por lo que en estas aproximaciones iniciales para encontrar una metodología adecuada para caracterizar los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento, nos encontramos con muchos problemas, las mediciones realizadas mediante los 3 sistemas de medición los captadores muchas de las veces no eran iguales o al menos no había una correlación entre las medidas obtenidas, a veces eran similares las medidas de captadores y DEMEC pero las medidas obtenidas de las fotografías tenían una variación, o viceversa con lo que se decidió no realizar los 3 sistemas de medición juntos y solamente utilizar los captadores de desplazamiento para poder medir el alargamiento que se produzca en el tirante.

Cabe recalcar también que en ninguno de los ensayos iniciales que se realizaron el tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento se produjeron fisuras, solamente en el ultimo ensayo realizado se dieron una especie de macro y micro fisuras en el tirante en los lugares donde estaban pegados los angulares para sostener los captadores, con lo que se propuso una nueva metodología de ensayos y así ver si los resultados obtenidos son los esperados.

Se realizaron ensayos que los vamos a mostrar a continuación:

- Ensayo del 27 de Junio del 2017

En este caso se realizó en el ensayo con un tirante de 10 x 10 cm, con un cable de pretensado, aunque los resultados obtenidos no fueron los esperados ya que fue el primer ensayo que se realizó y sirvió como pauta para los siguientes ensayos.

En este caso el ensayo se realizo con 4 captadores, el 1 y 4 estaban colocados en la barra de acero y los captadores 2 y 3 estaban contra la probeta de hormigón, en lo cual podemos darnos cuenta de que en los captadores que estaban colocados para medir el alargamiento del hormigón tenemos una medida de 0.135 mm aproximadamente, con lo que es un valor muy pequeño como para que nos de pautas sobre el comportamiento del tirante. Al ser este tirante con una barra de pretensado se llevo a una fuerza de traccion de 16 Tn.

- Ensayo del 10 de Julio del 2017

En este ensayo se realizo en un tirante de 10 x 10 cm, con una barra de acero de 12 mm de diámetro en la cual se trató de encontrar con esta metodología una correlación entre las mediciones de los captadores y las de los discos Demec en las cuales no existió una correlación coherente puesto que hubo una variación de medidas considerables a pesar de ser muy pequeñas las medidas.

Como podemos ver en esa tabla tenemos las medidas que se realizaron con los discos Demec en el cual tenemos un alargamiento total del tirante que es de 0.612 mm y se llevo a una fuerza de traccion de 7.5 Tn

- Ensayo del 10 de Octubre del 2017

Este ensayo se realizo con un tirante de 6 x 6 cm con una barra de 12 mm de diámetro, también se utilizo los discos Demec y también se intentó encontrar una relación de las dos medidas anteriores con las de las fotografías que se realicen en el momento del ensayo, por eso se colocaron 5 discos Demec con una separación de 10 cm entre cada uno de ellos y también se coloco 2 discos superiores y 2 discos inferiores en la mitad del tirante esto con la finalidad de obtener una precisión en cuanto a las fotografías se refiere.

El captador de desplazamiento estuvo colocado en la parte superior del tirante a una distancia del Demec 2 al 4 con lo que se quería comprobar las mediciones que se realicen en esos dos demec con el captador y las fotografías.

- Ensayo del 23 de Octubre del 2017

En este ensayo se intentó realizar el mismo procedimiento del ensayo anterior y asi poder comprobar si los resultados siguen iguales a los anteriores o en si existe alguna mejoría en cuanto a la correlación de las mediciones que se realice mediante los métodos antes mencionados, en este caso no se rea lizo fotografías puesto que se intento que exista en este caso una mejor aproximación entre el captador y los discos DEMEC.

- Ensayo del 01 de Noviembre del 2017

La metodología utilizada en este ensayo es la misma de los anteriores con un captador de desplazamiento que esta sujeto en el hormigón y que está colocado para medir entre 3 demec ósea una distancia de 20 cm, están colocados discos Demec cada 10 cm y en este caso se utilizó las fotografías pero se hizo la prueba con una cámara de focal fija, esto con la intención de mejorar la distorsión que existe en cada foto que se realiza en el ensayo y asi poder mejorar la medición mediante el programa de fotogrametría y tratar de que exista una mayor relación entre los valores de las medidas realizados por cada sistema de medición.

- Ensayo del 22 de Noviembre del 2017

Con los resultados anteriores de los ensayos ya realizados, con la metodología utilizada se realizo un ultimo ensayo de un tirante de 10 x 10 cm y con un cable de pretensado como armadura de refuerzo con lo que se intentaba que el ensayo llegue a una fuerza de carga mayor puesto que el limite elástico del cable de pretensado es mayor al de una barra de acero normal.

En este caso se utilizaron discos Demec y el captador de desplazamiento que está colocado en la parte superior del tirante y mide una distancia de 20 cm que sería una longitud entre 3 Demec.

- Ensayo del 30 de Noviembre del 2017

En este ensayo se intentó probar otra metodología para poder comprobar los resultados obtenidos y así poder encontrar una metodología correcta para la caracterización de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

En este caso se utilizaron 3 captadores, uno en cada cara y en el lado restante se utilizaron discos demec para poder comprobar las 2 medidas obtenidas después de realizar el ensayo.

Para sostener los captadores se utilizaron una especie de platina que estaba pegada al tirante el captador estaba atornillado a esta platina y en su otro extremo del captador estaba un pie de amigo pegado a la probeta y la terminación del captador estaba sostenido por el otro lado del pie de amigo. Los captadores están colocados para medir una distancia de 20 cm ósea el espacio entre 3 discos demec con lo cual se esperaba encontrar una correlación de las medidas obtenidas de los 2 sistemas.

3.3 Metodología final de Ensayo

En cuanto a encontrar una metodología adecuada con la cual podamos obtener los resultados esperados que sería que se produzcan fisuras en el tirante de hormigón y que sus resultados sean acordes en cuanto a resistencia a tracción del Hormigón de muy Alto Rendimiento se procedió a proponer la siguiente configuración de ensayo.

3.3.1 Ensayo Final con Mordazas.

Con el fin de encontrar una metodología correcta para poder caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento y que se produzcan fisuras, se propuso un sistema de mordazas. Para esto se tuvo que modificar el bastidor de ensayo y se tuvieron que realizar piezas externas nuevas para que el ensayo pueda realizarse.

Adicionalmente de eso se propuso un cambio en los tirantes puesto que, la transmisión de tensiones en el interior del hormigón mediante la armadura de refuerzo puesta en el tirante no era la óptima porque la armadura plastificaba mucho antes de que el hormigón empiece a

aportar en tracción con lo que las tensiones en la mitad de la probeta en su interior eran muy pequeñas por lo que no se producían fisuras.

Con esto se optó por reforzar los 2 extremos del tirante colocando más barras de acero de refuerzo para poder lograr que la transferencia de tensiones dentro del hormigón sea gradualmente con lo que podremos llegar con unas tensiones en el hormigón en la mitad de la probeta lo suficiente como para que el hormigón empiece a trabajar y se pueda producir las fisuras que necesitamos trabajar.

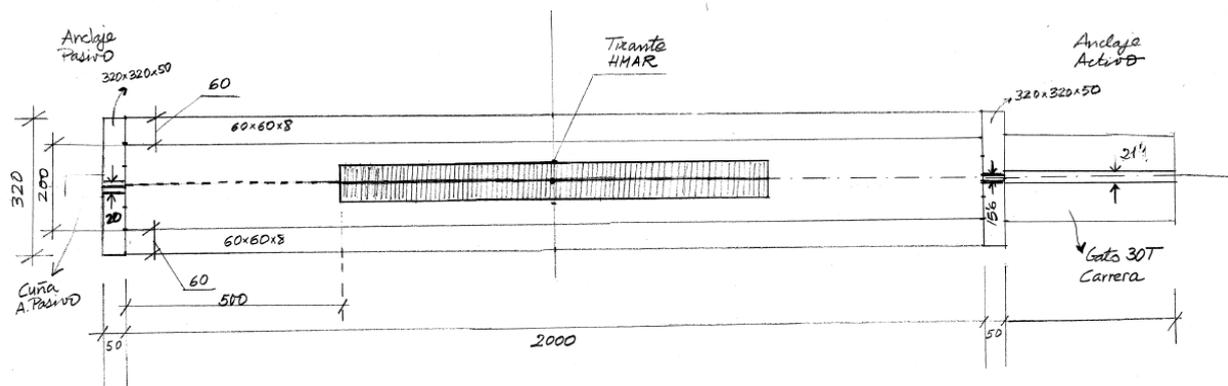


Fig 58.- Croquis de la nueva configuración del ensayo. (Fuente Propia)

En este croquis se proponían medidas de la nueva configuración del ensayo que vamos a realizar, utilizando el mismo bastidor, pero realizando unas modificaciones en los 2 orificios de los extremos para que pueda pasar la varilla lisa de alto límite elástico para poder soportar la fuerza que realice el gato hidráulico.

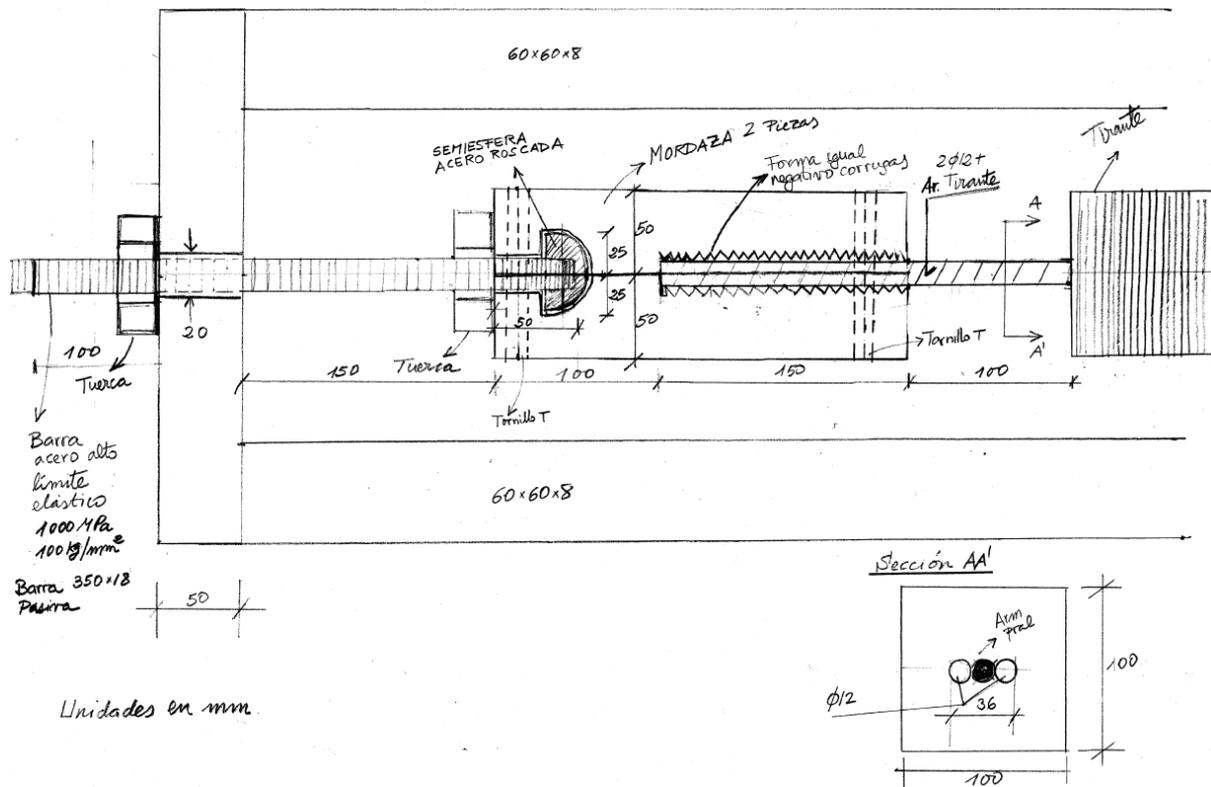
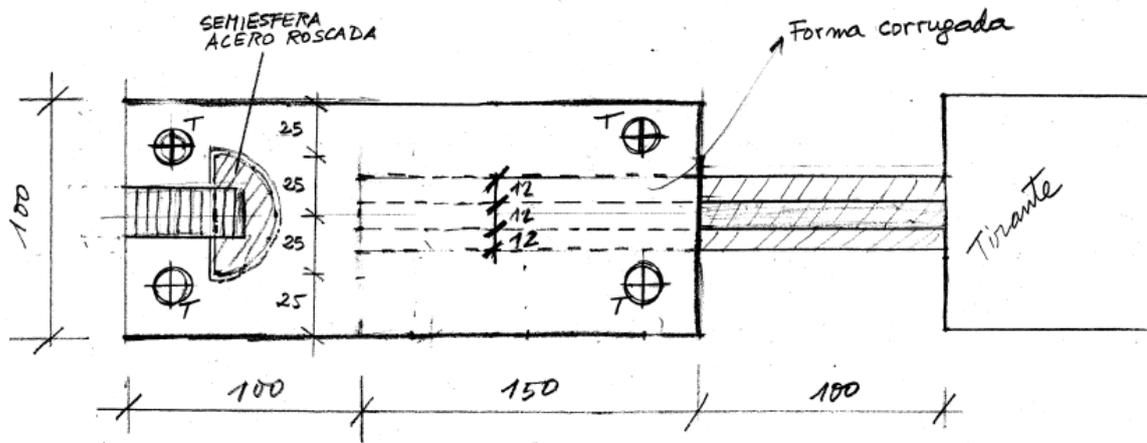


Fig 59.- Croquis de el anclaje pasivo y de la mordaza en alzado (Fuente Propia)

En este dibujo que se realizo en forma de croquis, se trató de plasmar la idea de las mordazas que se van a necesitar para poder realizar el ensayo y también las posiciones de las nuevas piezas que se van a fabricar.



2 Piezas atornilladas por 4 tornillos T

Fig 60.- Croquis de la mordaza en planta (Fuente Propia)

En esta figura tenemos un croquis de la mordaza que se va a fabricar y también la disposición de las armaduras de los tirantes que se van a fabricar.

En cuanto a las mordazas son 2 piezas en forma de tenazas que van a estar unidos por 6 tornillos en cada una de sus esquinas, en su extremo estará una varilla lisa roscada de alto límite elástico la cual va a ser el enlace entre el extremo del bastidor en donde estará sujeta mediante una tuerca y donde estará también la célula de carga. En el otro extremo estará sujeta por el gato hidráulico.



Fig 61.- Configuración del ensayo con las mordazas (Fuente Propia)

Las mordazas para poder sujetar las varillas y que no exista ninguna especie de deslizamiento entre los 2 elementos, se realizó una especie de forma corrugada dentro de las mordazas para que con las corrugas de las varillas del acero de refuerzo este se mantenga bien apretado, con lo que con los 6 tornillos se tiene que sujetar bien y evitar cualquier inconveniente en el momento que se ejerza el esfuerzo de tracción mediante el gato hidráulico.

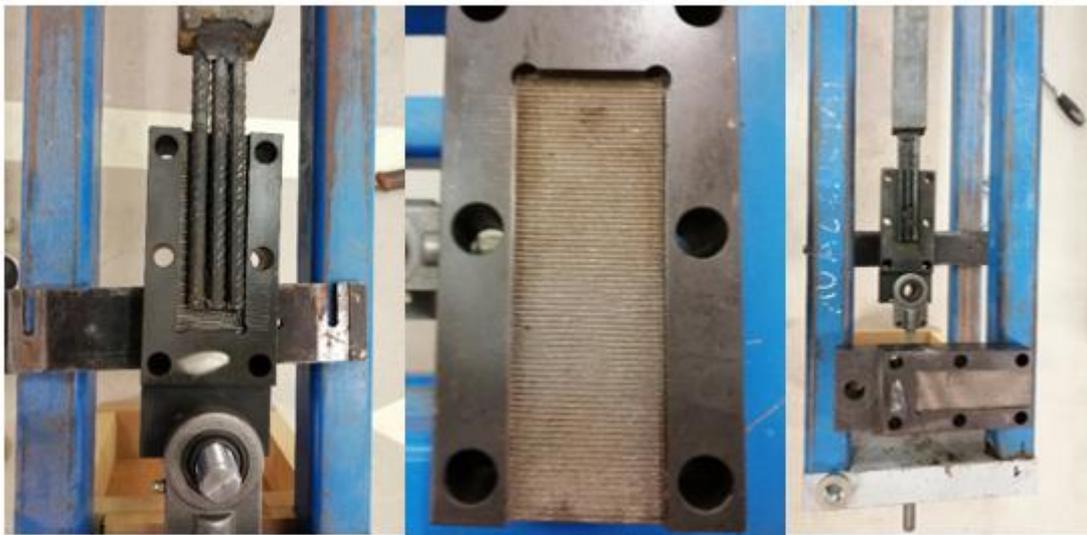


Fig 62.- Sistema de Sujeción de las varillas en los tirantes mediante mordazas. (Fuente Propia)

Como se dijo anteriormente este tipo de sistema de sujeción nos da más seguridad en cuanto a en ensayo de los tirantes, ya que mediante la fabricación de la forma corrugada en las mordazas tendremos un deslizamiento casi nulo en las varillas con lo que nos favorece para nuestro ensayo.

En cuanto a los tirantes como se dijo anteriormente se modifico la armadura de refuerzo, en este caso se continuo con una varilla que cruza de el tirante y que esta en el centro de la probeta, pero adicionalmente a eso se añadieron 2 varillas más, una a cada lado de la varilla longitudinal que cruza el tirante esto con la finalidad de que la transferencia de tensiones no se produzca en una parte inicial del extremo del tirante sino que sea en la parte central del tirante que la transferencia de tensiones sea la máxima. Con esto las 2 varillas que se añaden tienen una longitud de 25 cm cada una en cada uno de los extremos del tirante con eso nos queda una distancia en la cual esta solamente la varilla del centro de la probeta de 50 cm con lo que es la parte central y se espera que en ese lugar el hormigón empiece a trabajar junto al acero de refuerzo y poder caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento y se produzcan las fisuras que necesitamos.



Fig 63.- Refuerzos dispuestos a la varilla de refuerzo del tirante. (Fuente Propia)

Como podemos ver en la figura 63 la sujeción de las varillas adicionales se realizó mediante una soldadora eléctrica, esto para que en el momento de la fundición de el tirante las varillas adicionales que ponemos en la probeta no se muevan y así no tener problemas con las mordazas y estas puedan sujetar bien al tirante en el momento de realizar el ensayo y que no exista ningún tipo de deslizamiento ni movimiento.

En cuanto a los resultados que se obtuvieron con esta metodología de ensayo, nos pudimos dar cuenta que se produjeron fisuras en el tirante, tanto macro como micro fisuras y también se midió un alargamiento de la probeta con lo que se deduce que las tensiones en el interior del hormigón en la parte central del tirante son las esperadas y que tanto el hormigón como el acero están trabajando conjuntamente en esa parte de la probeta.



Fig 64.- Fisuras producidas en el tirante con las mordazas. (Fuente Propia)

Podemos fijarnos que se produjeron algunas fisuras en el tirante, pero la más importante es la macro fisura la cual nos sirve en nuestra investigación para encontrar una metodología correcta para poder caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

Se colocaron 4 captadores en el tirante, 1 en cada cara esto con la finalidad de poder comprobar las mediciones de cada uno de ellos y poder darnos cuenta si en algún momento el tirante puede girar en su eje y existir una especie de excentricidad en la probeta, también se encuentra una media de las 4 medidas y con eso tendremos un alargamiento de la probeta después de realizado el ensayo.

Los captadores estaban sujetos a el tirante mediante el sistema antes mencionado, mediante unos tacos Fisher que están colocados en unos orificios pequeños que se hicieron en el hormigón y que a su vez con unos tornillos se los sujeta para que no exista movimiento alguno en el momento del ensayo.

Se realizaron los siguientes ensayos para encontrar la metodología adecuada en los cuales, se utilizó la metodología de las mordazas que no es mas que un sistema de sujeción de la barra de acero de refuerzo como se explicó anteriormente, este ensayo se realizó en un tirante de 6 x 6 cm con el sistema de barra de refuerzo y 2 pedazos extras en cada extremo de la barra de refuerzo.

Para esta metodología de ensayo se utilizaron 8 captadores de desplazamiento, 2 en cada cara los cuales estarán situados uno contra otro, con esa razón se podrá obtener una media de las

medidas de cada par de captadores en cada cara y con esto se podrá obtener una media total de los captadores y esta será la medida del alargamiento que exista en el tirante después de realizado en ensayo.

Se realizaron 4 ensayos con esta metodología y sus resultados serán expuestos en capítulos posteriores.

Capítulo 4

Programa Experimental

4.1 Introducción

En cuanto al programa experimental que realizamos no fue muy extenso por todos los problemas que se suscitaban en el momento de las pruebas y los ensayos que realizamos, para los ensayos iniciales se realizaron 6 probetas de las cuales fueron 4 de 10 x 10cm con varilla de 12 mm de diámetro y 2 fueron de 6 x 6cm igualmente con varilla de 12 mm de diámetro. Cabe indicar que el primer tirante que se fabrico se lo realizo sin la adición de fibras para poder observar como se comportaba este material.

Para los ensayos que se realizaron con las mordazas, se realizaron 4 tirantes de los cuales fueron 2 de 6x6 cm con la varilla longitudinal y los 2 refuerzos en cada extremo del tirante fueron de 12 mm de diámetro y los otros 2 tirantes fueron de 10x10 cm y con la misma configuración de las varillas que se utilizo en los otros tirantes.



Fig 65.- Fabricación de los tirantes para la configuración de ensayo con las mordazas. (Fuente Propia)

4.2 Materiales

En cuanto a los materiales utilizados para la fabricación de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento tenemos dos que son el hormigón y las varillas de acero utilizadas como refuerzo.

En cuanto al hormigón se realizaron en cantidades de 50 litros o 0.05 m^3 en cada mezcla que se realizó, con lo cual nos servía para poder fabricar 2 tirantes ya sean estos de $6 \times 6 \text{ cm}$ o de $10 \times 10 \text{ cm}$, también se realizaban probetas cúbicas y cilíndricas para la caracterización del hormigón en cuanto a resistencia a la compresión se trata. La dosificación que se utilizó para la elaboración del hormigón fue la siguiente:

Dosificación de Hormigón de Ultra Alta Resistencia

	1m ³	50 Litros o 0.05 m ³
Cemento 42.5 SRS	800 Kg	40 Kg
Humo de Sílice Elkem 940 No Densificado	175 Kg	8.8 Kg
Harina US-500	225 Kg	11.25 Kg
Arena Fina	302 Kg	15.1 Kg
Arena Media	565 Kg	28.25 Kg
Aditivo 20-HE	30 Kg	1.5 Kg
Fibras	175 Kg	8.8Kg
Agua	165 Litros	8.25 Litros

Tabla 5.- Dosificación del Hormigón de muy Alto Rendimiento utilizado en la fabricación de los tirantes. (Fuente Propia)

Como observamos en la tabla anterior se encuentran todos los materiales que se utilizaron para la fabricación del hormigón, en este caso se utilizó un cemento 42,5 SRS lo cual nos indica que es un cemento de endurecimiento rápido según la norma española EHE-08, tenemos un Humo de Sílice no densificado que es un mejor material que el densificado puesto que las partículas son más uniformes y finas por lo que será una masa cementante más compacta.

Utilizamos una Harina de Sílice físicamente es como un polvo con lo que nos favorece en la fabricación del hormigón puesto que no se producirán poros con lo que el ataque de agentes externos hacia el hormigón será casi nulo.

Utilizamos los Áridos en este caso tenemos una arena fina y una arena media con partículas pequeñas que nos ayudan mucho para que se consolide y el núcleo cementante del Hormigón sea mucho más resistente, a más de eso utilizamos un aditivo plastificante para que el hormigón obtenga un poco de trabajabilidad ya que al tener una gran cantidad de cemento y de áridos finos, el hormigón tiende a tener un endurecimiento mucho más rápido que un hormigón convencional.

Por ultimo se adiciono fibras metálicas al Hormigón para que tenga un poco más de ductilidad el hormigón, y también para que gane un poco mas de resistencia a traccion puesto que en el momento del ensayo de estirar a el tirante las fibras van a trabajar cuando se empiece a producir una fisura con lo que la transmisión de tensiones de un lado al otro de la fisura se realizara mediante las fibras que tengamos en el hormigón.



Fig 66.- Materiales para la fabricación del Hormigón de muy Alto Rendimiento (Fuente Propia)

Para la elaboración del hormigón se utilizó una mezcladora de 1 litro de capacidad, al ser el Hormigón de muy Alto Rendimiento un material muy compacto y con mucho material fino se necesita mucha más energía de mezclado para su elaboración que el de un hormigón convencional con lo que esta mezcladora nos abastecía con esta energía de mezclado.



Fig 67.- Mezcladora Utilizada para la fabricación del Hormigón de muy Alto Rendimiento (Fuente Propia)

Después del proceso de elaboración del hormigón y una vez colocado el acero de refuerzo que se va a utilizar en los tirantes dentro de los moldes utilizados para la fabricación de las probetas, se procede al hormigonado y nos queda un resultado de tirantes como lo vamos a mostrar a continuación:



Fig 68.- Probetas de los tirantes después de hormigonado. (Fuente Propia)

Se realizaron ensayos a compresión de las probetas cubicas que se obtuvieron en el momento de la fabricación del Hormigón de muy Alto Rendimiento, de los cuales los resultados fueron satisfactorios de acuerdo a la dosificación que se utilizo para este tipo de material.



Fig 69.- Ensayo de Compresión de las probetas cubicas del Hormigón de muy Alto Rendimiento. (Fuente Propia)

También se realizaron ensayos de flexo tracción de las probetas cilíndricas que se elaboraron en el momento de la fabricación de los Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento, estos se realizaron con 6 probetas con fechas de fabricación del 15 de Junio del 2017 y del 30 de Octubre del 2017.

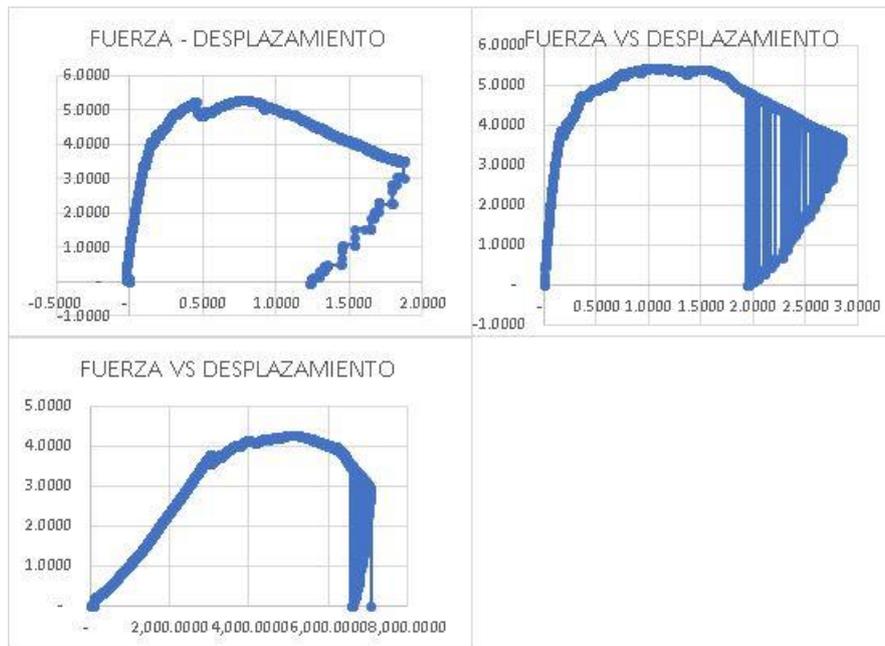


Fig 70.- Ensayos de Flexo tracción de las probetas del 15 de Junio del 2017 (Fuente Propia)

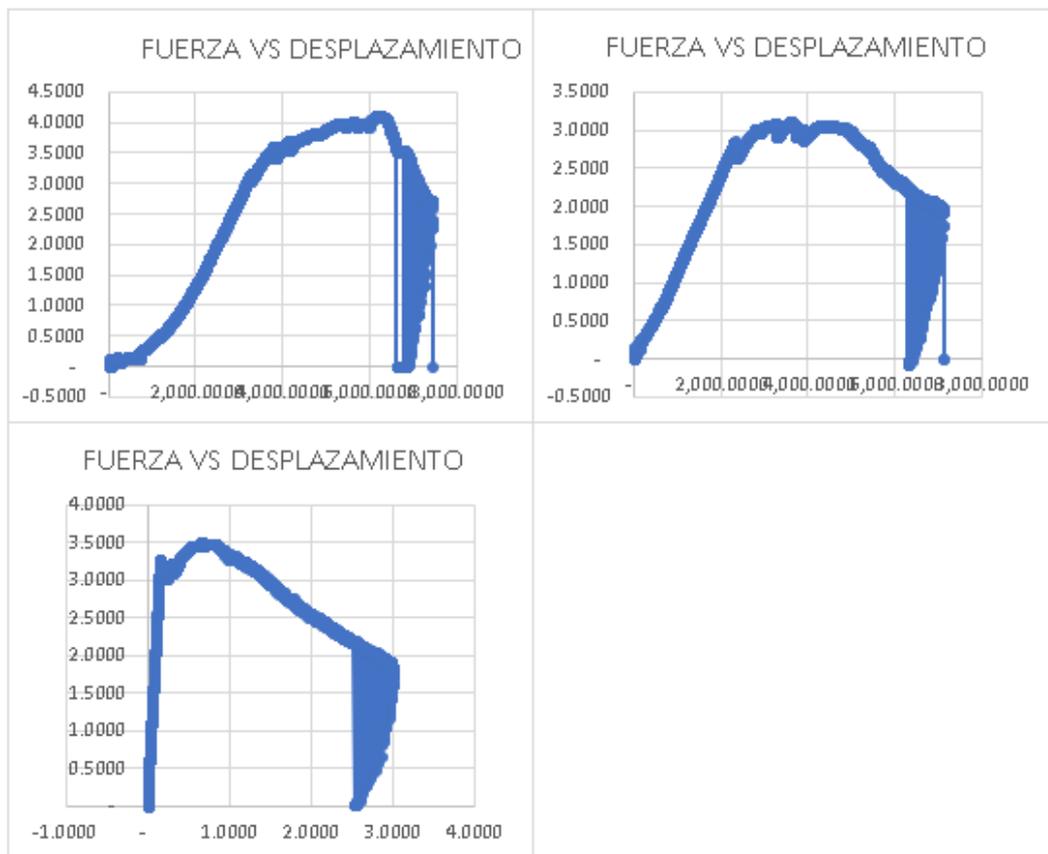


Fig 71.- Ensayos de Flexo tracción de las probetas del 15 de Junio del 2017 (Fuente Propia)

Como vemos en las graficas de los resultados de los ensayos a flexo tracción de las probetas cilíndricas del Hormigón de muy Alto Rendimiento, podemos ver un comportamiento muy

parecido en las diferentes probetas puesto que el desplazamiento o alargamiento de cada una es parecido y también su fuerza que resiste, por lo que podríamos obtener la resistencia en cualquier punto de la curva de Fuerza vs Desplazamiento del ensayo.

En cuanto a la conservación de las probetas y los tirantes, esto se realizó mediante cuartos húmedos a una temperatura constante de 20°C, con lo que se supone una temperatura promedio.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

En cuanto a los resultados obtenidos, se realizaron 8 ensayos con tirantes diferentes con lo que tenemos algunos resultados que podremos analizarlos y obtener una idea de la metodología necesaria para poder caracterizar a los Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

5.1 Graficas de Carga vs Alargamiento

Como se dijo anteriormente se realizaron 8 ensayos diferentes que los vamos a detallar a continuación con sus respectivas graficas de los resultados.

- Ensayo del 27 de Junio del 2017



Fig 72.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con 4 captadores de desplazamiento. (Fuente Propia)

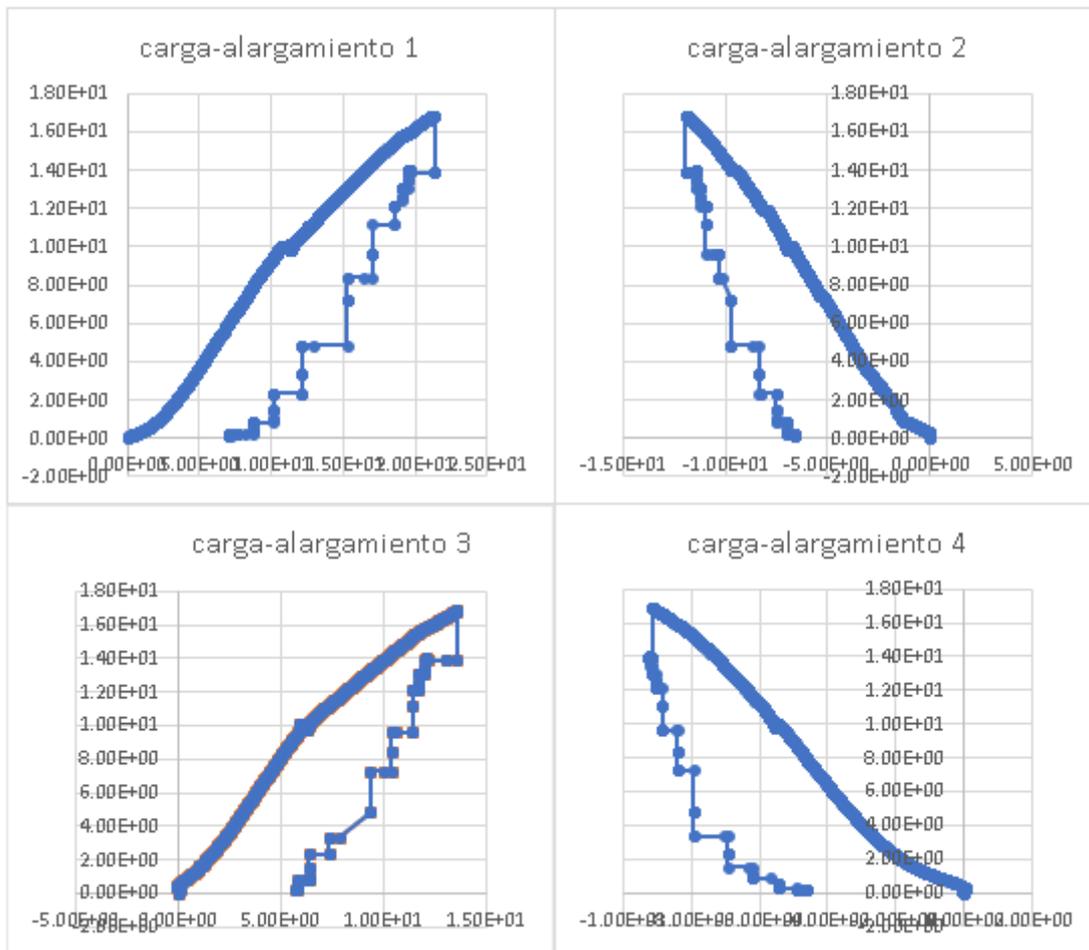


Fig 73.- Graficas de Carga vs Alargamiento del ensayo del tirante con cable de pretensado (Fuente Propia)

- Ensayo del 10 de Julio del 2017



Fig 74.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con discos Demec.
(Fuente Propia)

DEMEC	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
ALARGAMIENTO	0.135	0.034	0.193	0.057	0.083	0.029	0.059	0.003	0.019
TOTAL	0.612								

Tabla 6.- Resultado de las medidas con los discos Demec. (Fuente Propia)

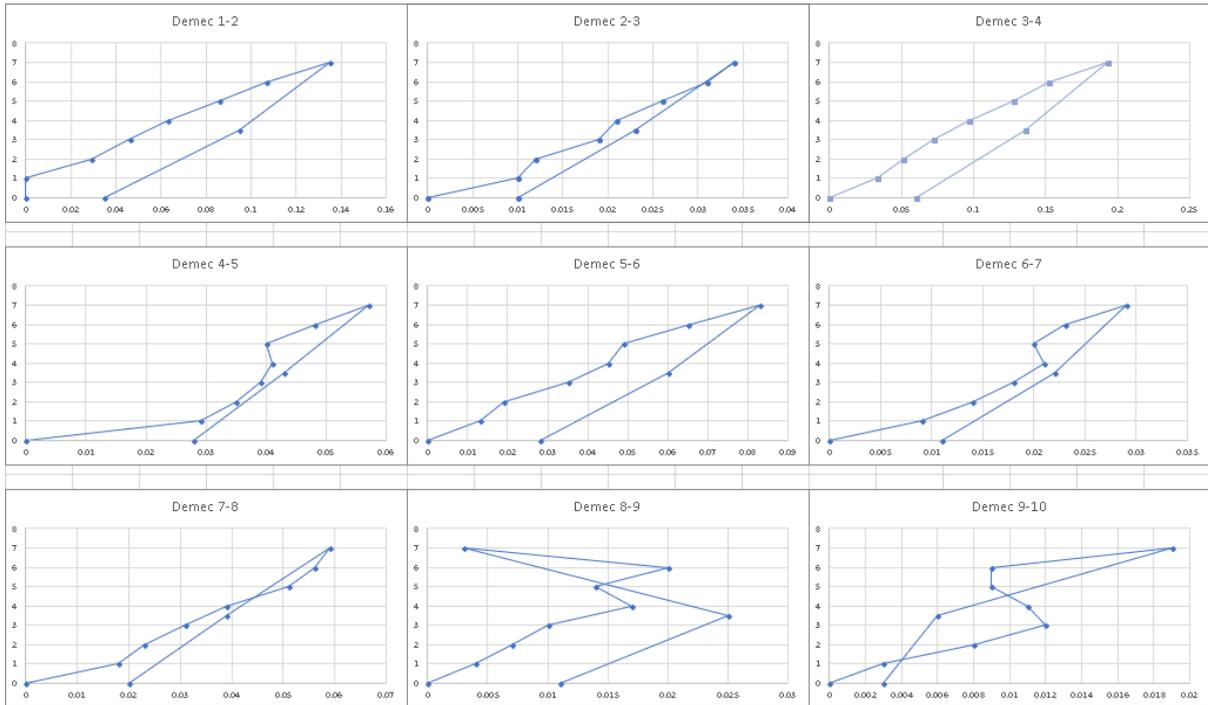


Fig 75.- Graficas del alargamiento de los Discos Demec. (Fuente Propia)

Como podemos observar en la figura 75, vemos que en los demec 1-2 y en los 3-4 el alargamiento es similar mientras que en los otros Demec el alargamiento es mucho menos y en uno de los casos el alargamiento es negativo con lo cual se procede a comparar con las mediciones que se realicen con los captadores de desplazamiento.

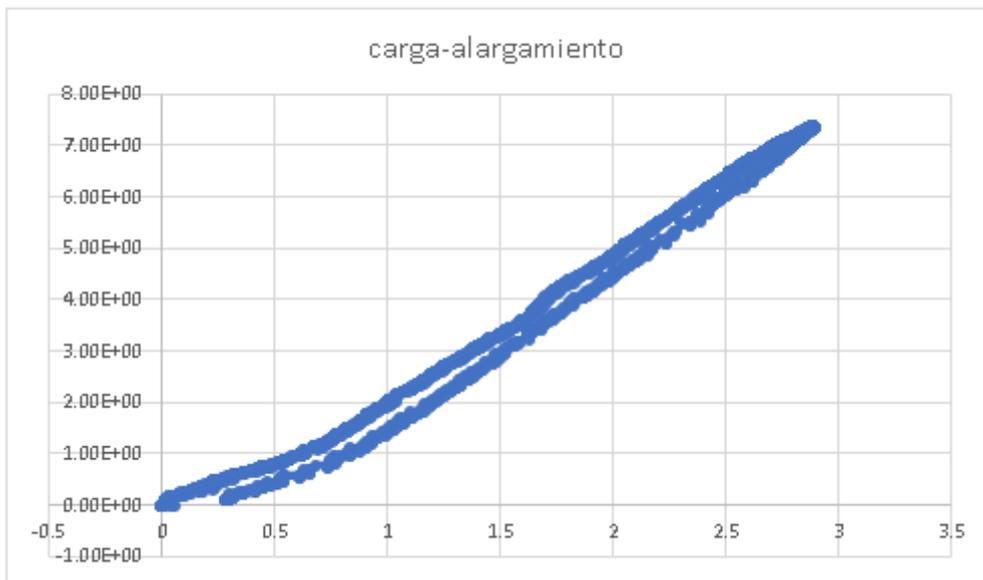


Fig 76.- Graficas de Carga vs Alargamiento del ensayo del tirante con captadores de desplazamiento (Fuente Propia)

En este ensayo se utilizaron 2 captadores de desplazamiento, uno en cada extremo del tirante y su medición se realizó en el hormigón para poder encontrar un alargamiento después de que se realice la fuerza de tracción, como resultado se obtuvo que el tirante tuvo un alargamiento de 2.87 mm a una carga de 7.35 Tn con lo que no existe correlación alguna con las mediciones de los discos Demec.

Con estos resultados se pudo observar que la metodología no es la correcta al no existir una correlación de resultados y también al tener un alargamiento demasiado pequeño y no producirse fisuras en el tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

- Ensayo del 10 de Octubre del 2017



Fig 77.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con discos Demec y con fotogrametría. (Fuente Propia)

DEMEC	1-2	2-3	3-4	4-5
ALARGAMIENTO	0.227	0.274	0.112	0.243
TOTAL	0.856			

Tabla 6.- Medición entre los discos Demec. (Fuente Propia)

Como podemos ver en la tabla se tomaron las mediciones a cada tonelada de fuerza con la cual se realizaba el ensayo, en este caso se llegó a 6 toneladas de fuerza, teniendo un

alargamiento entre los 5 Demec que estaban colocados en el centro de la probeta fue de 0.856 mm.

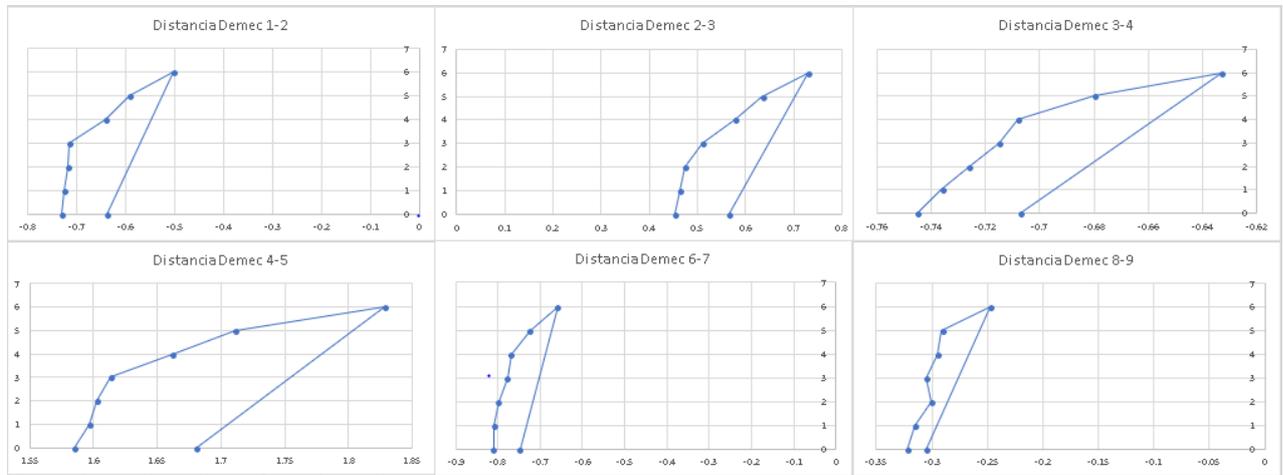


Fig 78.- Graficas de los alargamientos de los Discos Demec. (Fuente Propia)

En nuestro caso y al tener el captador de desplazamiento entre los Demec 2 y 4 tenemos los siguientes resultados:

DEMEC	2-3	3-4
ALARGAMIENTO	0.274	0.112
TOTAL	0.386	

Tabla 7.- Alargamiento entre los Demec 2 y 4. (Fuente Propia)

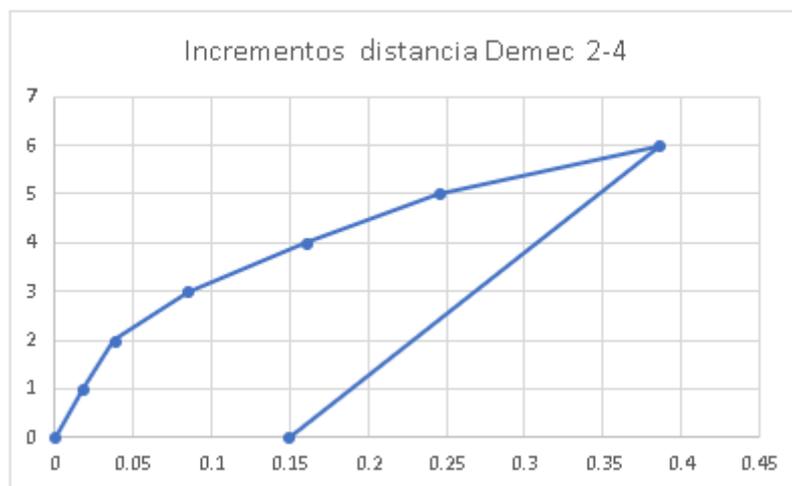


Fig 79.- Alargamiento entre los discos Demec 2 – 4. (Fuente Propia)

Como se observa entre los Demec 2 y 4 tenemos un alargamiento de la probeta de 0.386 mm lo cual es una medida muy pequeña, pero la vamos a comparar con la medición obtenida del captador.

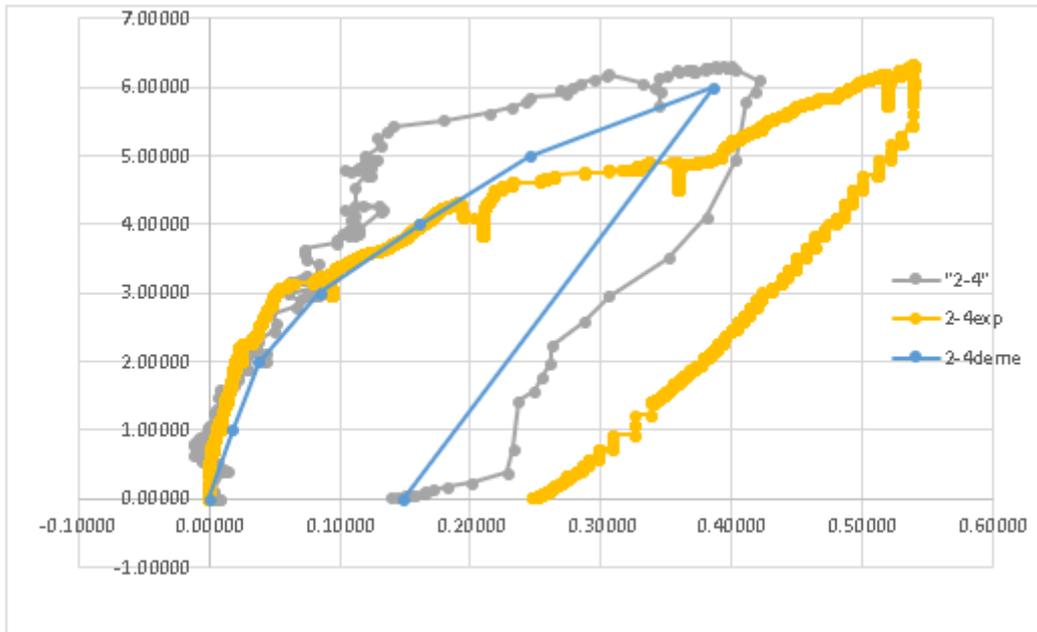


Fig 80.- Comparación de las mediciones realizadas por el captador, discos Demec y Fotografía. (Fuente Propia)

Podemos ver que en la figura 80 se comparan las 3 mediciones realizadas con el fin de encontrar una correlación entre dichas medidas, pero nos encontramos que, si bien entre la fotografía y los discos Demec la variación es muy pequeña, el captador nos da una medida mayor.

	DEMEC	CAPTADOR	FOTOS
ALARGAMIENTO	0.38600	0.53900	0.42100

Tabla 8.- Mediciones de cada dispositivo de medida. (Fuente Propia)

Si bien es cierto que las diferencias no son muy abultadas, pero al ser medidas muy pequeñas que nos pueden dar pautas para encontrar la metodología adecuada, en este ensayo los resultados no fueron los esperados.

- Ensayo del 23 de Octubre del 2017



Fig 81.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con discos Demec y captador de desplazamiento (Fuente Propia)

DEMEC	1 - 2	2 - 3	1 - 3
ALARGAMIENTO	0.193	0.094	0.287
TOTAL	0.287		

Tabla 9.- Tabla de medición de los Demec. (Fuente Propia)

En este caso se llegó a una carga de 6 toneladas en el ensayo y las gráficas de alargamiento de los DEMEC son las siguientes:

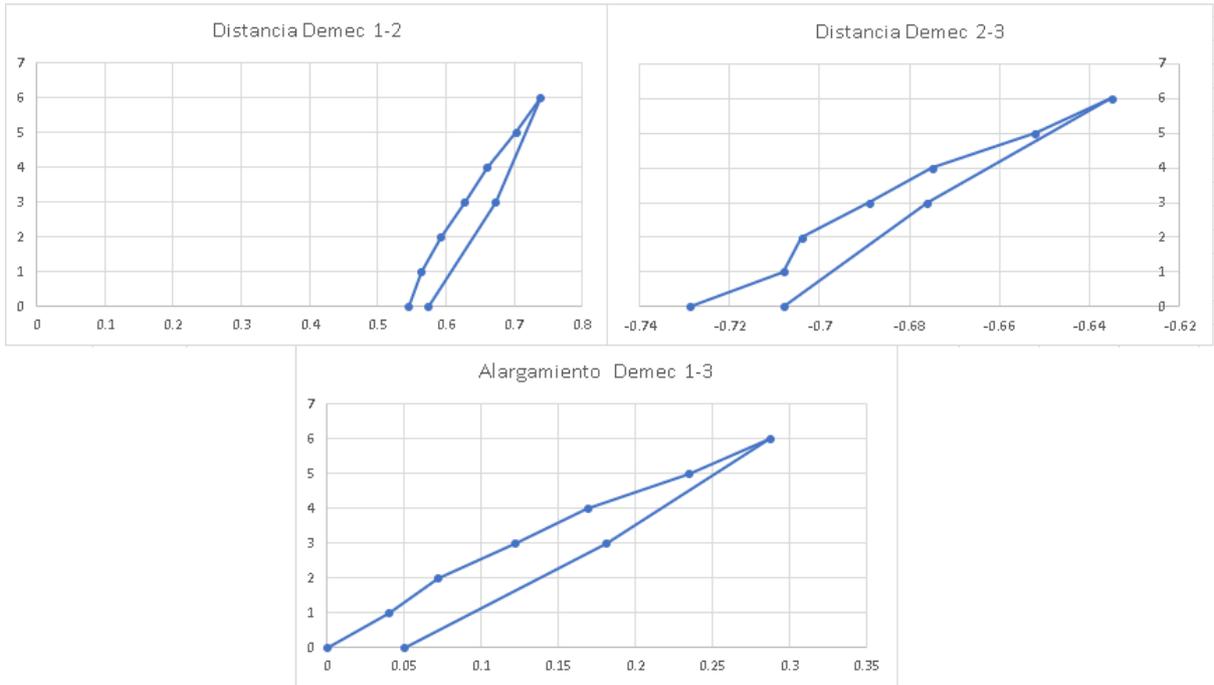


Fig 82.- Graficas de los alargamientos de los Discos Demec. (Fuente Propia)

En este caso como vemos las mediciones con los discos DEMEC nos da un alargamiento de 0.287 mm, lo cual vamos a comprobar con las mediciones que nos entregó el captador de desplazamiento que estuvo colocado entre los DEMEC 1 y 3.

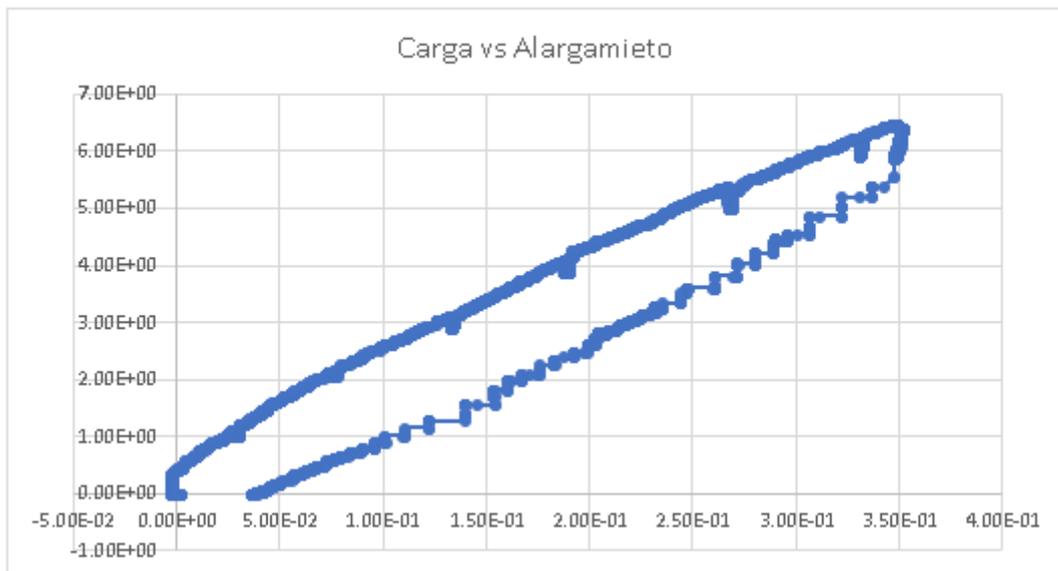


Fig 83.- Grafica Carga vs Alargamiento del captador de desplazamiento en el ensayo. (Fuente Propia)

En este caso la carga a la que se llegó fue de 6.5 Tn y se obtuvo un alargamiento del Tirante de 0.352 mm

	DEMEC	CAPTADOR
ALARGAMIENTO	0.287mm	0.352mm
DIFERENCIA	0.065mm	

Tabla 10.- Diferencia entre la medida de los discos DEMEC y el captador de desplazamiento.
(Fuente Propia)

Se podría decir que las medidas tienen una cierta correlación en cuanto al captador y a los Demec ya que su diferencia es de 0.065mm, pero al encontrarnos con tirantes de geometrías pequeñas, las mediciones tienen que ser lo mas precisas con un margen de error casi nulo.

- Ensayo del 01 de Noviembre del 2017

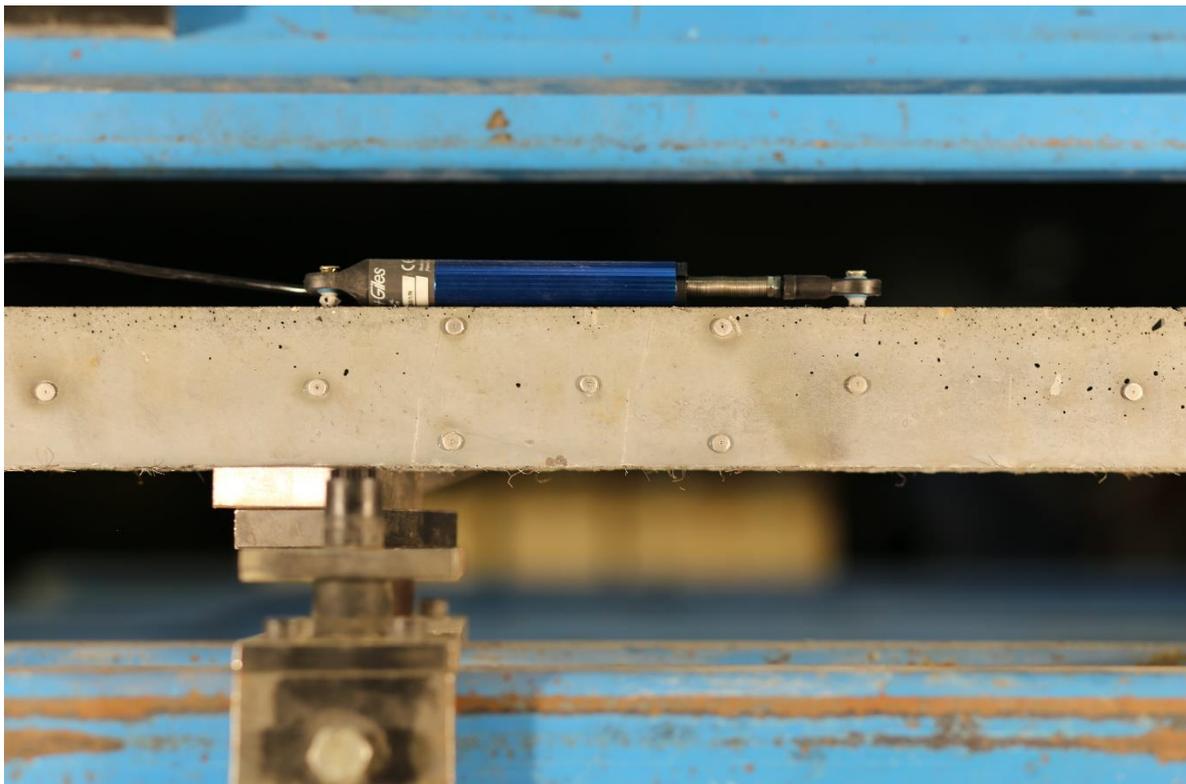


Fig 84.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con discos Demec, captador de desplazamiento y con fotogrametría. (Fuente Propia)

En cuanto a los resultados de los discos Demec son los siguientes:

DEMEC	1-2	2-3	3-4	4-5
ALARGAMIENTO	0.16mm	0.205mm	0.095mm	0.164mm
TOTAL	0.624mm			

Tabla 11.- Medición de los Discos Demec. (Fuente Propia)

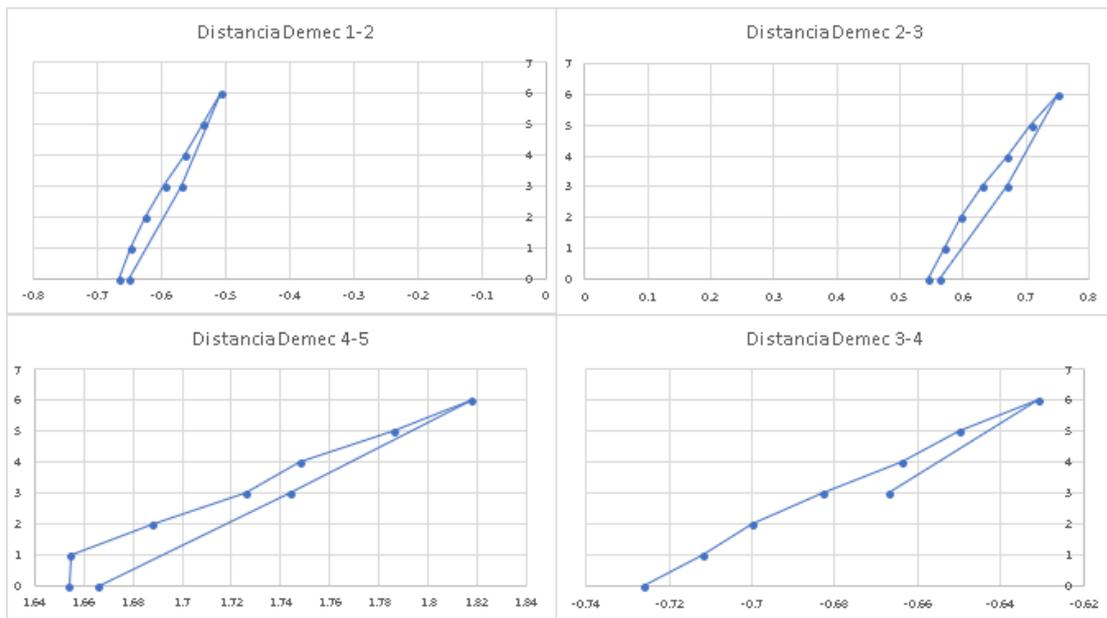


Fig 85.- Graficas de los Alargamientos de los demec del 1 al 5. (Fuente Propia)

En este caso entre el Demec 1 al 5 existe un alargamiento de la probeta de 0.624 mm ósea en una distancia de 40 cm del tirante existe un alargamiento de 0.624 mm con lo que es un valor muy pequeño, en este caso ahora comprobaremos si las medidas de los demec 2 al 4 con iguales o existe una correlación con las del captador y también con las fotografías.

DEMEC	2-3	3-4
ALARGAMIENTO	0.205	0.095
TOTAL	0.3	

Tabla 12.- Distancia de los Demec 2 al 4. (Fuente Propia)

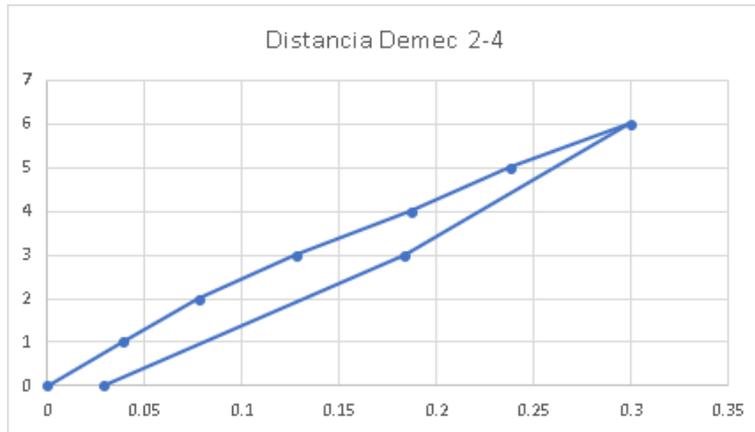


Fig 86.- Grafica de Carga vs Alargamiento de los Demec 2 – 4. (Fuente Propia)

En este caso podemos observar que existe un alargamiento de 0.3 mm, en una distancia de 20 cm con lo cual se compara con las medidas obtenidas del captador y las fotografías.

	DEMEC	CAPTADOR	FOTOGRAFIA
ALARGAMIENTO	0.3mm	0.341mm	0.206mm

Tabla 13.- Medidas obtenidas de los 3 sistemas de medición. (Fuente Propia)

Como observamos en la tabla 13, podríamos decir que encontramos una correlación entre las medidas del Demec y el captador ya que existe una diferencia de 0.041 mm, no así podemos decir que el sistema de medición mediante las fotografías no dio resultado puesto que existe mucha distorsión de las fotos de ensayo y existe una diferencia muy grande de las medidas que es de 1 mm más o menos con diferencia de los demec y el captador.

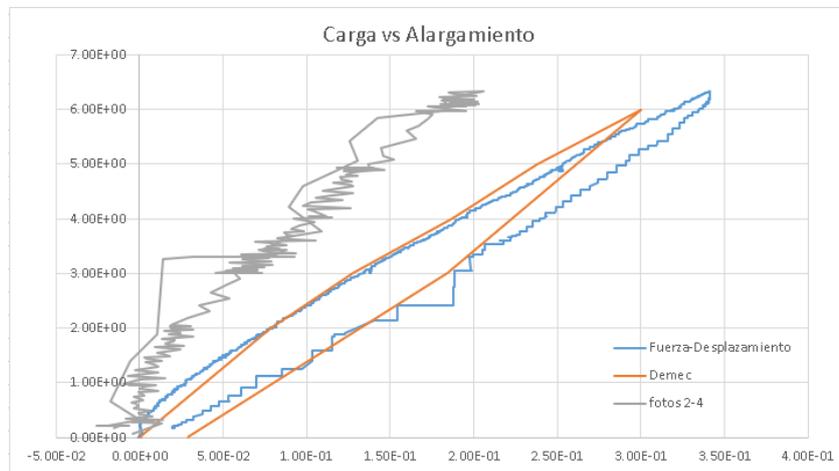


Fig 87.- Grafica de Carga vs Alargamiento de los Demec, Captador y Fotogrametría. (Fuente Propia)

- Ensayo del 22 de Noviembre del 2017



Fig 88.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con cable de pretensado con discos Demec y captador de desplazamiento. (Fuente Propia)

Se obtuvo las siguientes mediciones de los discos Demec:

DEMEC	2-3	3-4
ALARGAMIENTO	0.139mm	0.095mm
TOTAL	0.234mm	

Tabla 14.- Medición de los Discos Demec 2-4. (Fuente Propia)

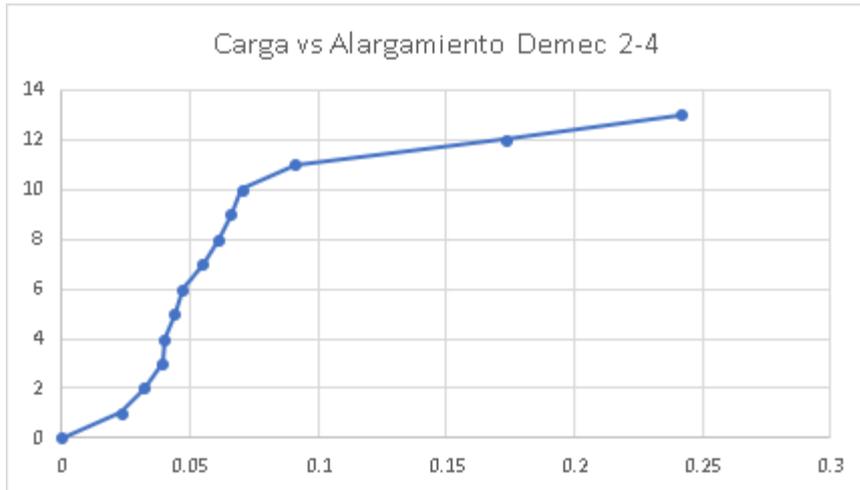


Fig 89.- Grafica de Carga vs Alargamiento entre los Demec 2-4. (Fuente Propia)

En este caso al ser un cable de pretensado la armadura de refuerzo del tirante, se llego a una carga de 12.8 toneladas y en la medición que obtuvimos de los Discos demec observamos que en una longitud de 20 cm que es la distancia entre los Demec 2 – 4 existió un alargamiento de 0.234 mm siendo una medida inferior a las antes obtenidas en los ensayos anteriores.

Ahora vamos a comparar ese alargamiento con el obtenido por la medición del captador de desplazamiento.

	DEMEC	CAPTADOR
ALARGAMIENTO	0.234mm	0.097mm
DIFERENCIA	0.137mm	

Tabla 15.- Diferencia de medida entre los demec y el captador de desplazamiento en el ensayo. (Fuente Propia)

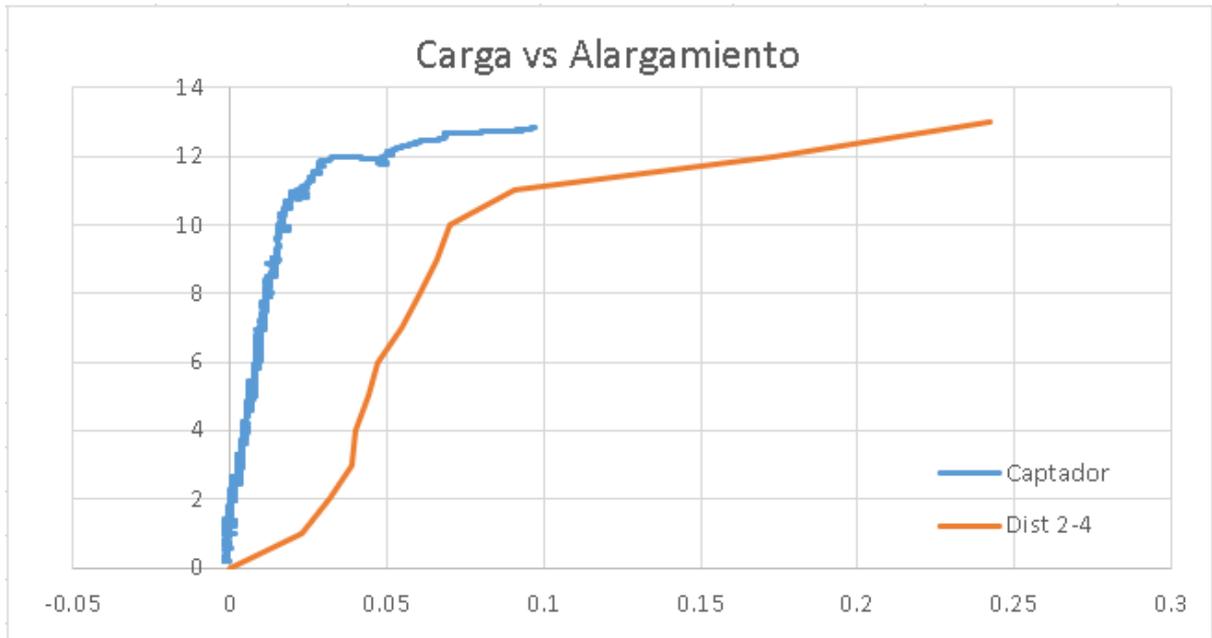


Fig 90.- Grafica de carga vs alargamiento, comparación entre el captador y los demec.
(Fuente Propia)

En este caso y en este ensayo con la metodología utilizada obtuvimos resultados que no se esperaban, ya que en este caso el captador nos dio un alargamiento mucho mas pequeño que el obtenido por los discos Demec.

- Ensayo del 30 de Noviembre del 2017



Fig 91.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con 3 captadores de desplazamiento y discos Demec. (Fuente Propia)

A continuación, vamos a revisar las medidas obtenidas por los discos Demec para luego compararlas con las de los captadores:

DEMEC	1-2	2-3	3-4
ALARGAMIENTO	0.141	0.113	0.361
TOTAL	0.615		

Tabla 17.- Medidas de los Demec 1 al 4. (Fuente Propia)

Para poder comparar con las medidas de los captadores tenemos que ver las medidas del Demec 2 al 4 que son las siguientes:

DEMEC	1-2	2-3
ALARGAMIENTO	0.141	0.113
TOTAL	0.254	

Tabla 18.- Medición entre el Demec 1 al 3. (Fuente Propia)

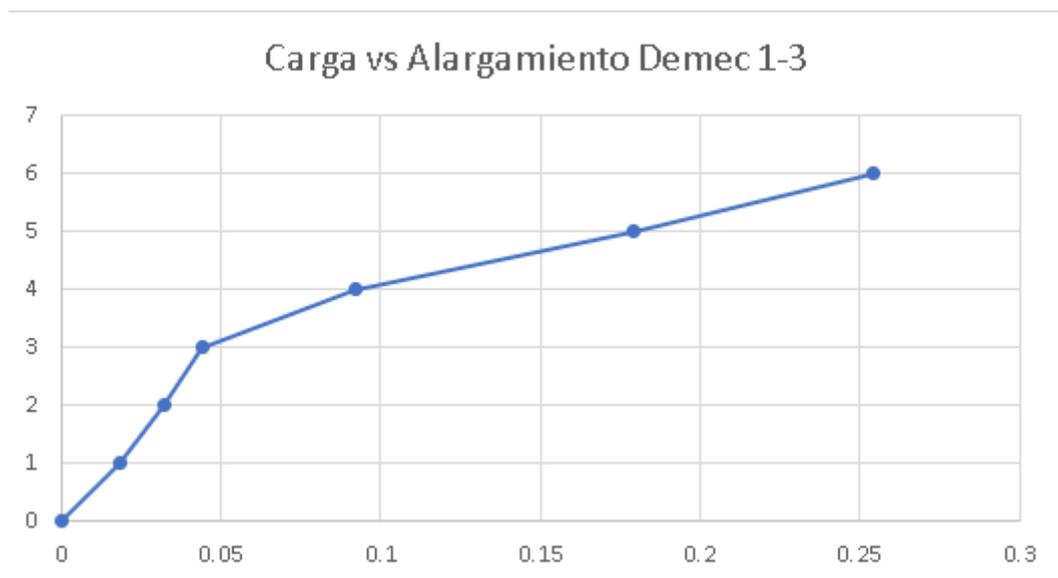


Fig 92.- Grafico de Carga vs Desplazamiento de los demec 1-3. (Fuente Propia)

Como vemos existe un alargamiento de 0.254 mm en una distancia de 20 cm, si bien es cierto es una medida pequeña es un alargamiento que se ha obtenido en los resultados anteriores o esta en un rango medio con lo que se piensa que van a ser resultados parecidos a los otros ensayos y con estos resultados comparamos con los resultados obtenidos por los captadores de desplazamiento.

	DEMEC	MEDIA CAPTADOR
ALARGAMIENTO	0.25 mm	0.251 mm
DIFERENCIA	0.001 mm	

Tabla 18.- Diferencia de medida entre Media de captadores y discos Demec. (Fuente Propia)

Como podemos ver la diferencia entre las medidas obtenidas de los captadores y los Demec es casi nula, con lo que se puede decir que existe una correlación entre dichas medidas, ahora lo veremos en la gráfica del ensayo:

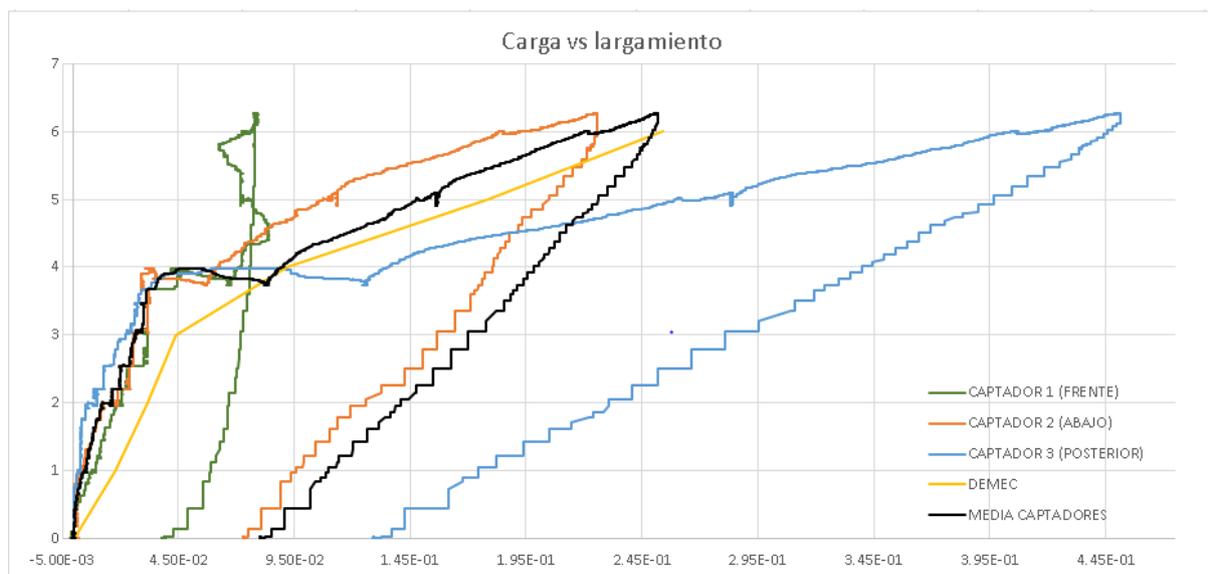


Fig 93.- Grafica de Carga vs Alargamiento del ensayo. (Fuente Propia)

En la figura 93 se observa que existe una correlación de medidas entre las de los discos Demec y la media de los 3 captadores, aun asi se puede ver que las medidas de los captadores son muy dispersas entre cada una de ellas con lo que asumimos que existe una rotación del tirante es por eso que existe una variación de medidas, aunque haciendo una media entre los 3 captadores no da un valor igual al de los Demec.

En este caso se evidenciaron fisuras en el tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento como las mostramos a continuación:



Fig 94.- Fisuras producidas en el ensayo realizado. (Fuente Propia)



Fig 95.- Fisuras producidas en el ensayo realizado. (Fuente Propia)

Como pudimos observar, con esta metodología de ensayo se nos produjeron fisuras en el tirante, aunque el alargamiento medido mediante los Demec y el captador no es muy alto, en torno con los Demec 3-4 se nota que existe un alargamiento mucho mayor con lo que se asume que en ese sector existió unas tensiones superiores que produjeron las fisuras.

Se tenía como hipótesis también de las apariciones de las fisuras que estas se producen justo en el lugar en el cual esta pegado el sistema de sujeción de los captadores al tirante con lo que se temía que por esa unión entre el hormigón y el silicón fuera la razón de la aparición de las fisuras.

ENSAYOS CON LAS MORDAZAS

- Ensayo del 21 de Diciembre del 2017



Fig 96.- Ensayo del tirante de Hormigón de muy Alto Rendimiento con 8 captadores de desplazamiento, 2 en cada cara y con las mordazas. (Fuente Propia)

CAPTADORES	1 - 5	2 - 6	3 - 7	4 - 8
ALARGAMIENTO	0.805mm	1.81mm	1.52mm	1.73mm

Tabla 19.- Alargamientos medidos mediante los captadores en cada cara del tirante. (Fuente Propia)

Como podemos observar en el cuadro anterior están los alargamientos medios medidos en cada una de las caras del tirante, con esto vemos que en cada cara se presenta una medida diferente, pero podemos observar que las medidas realizadas son mucho mayores a las medidas en las metodologías de ensayo anteriormente explicadas, así también presentamos las gráficas que se obtuvieron:

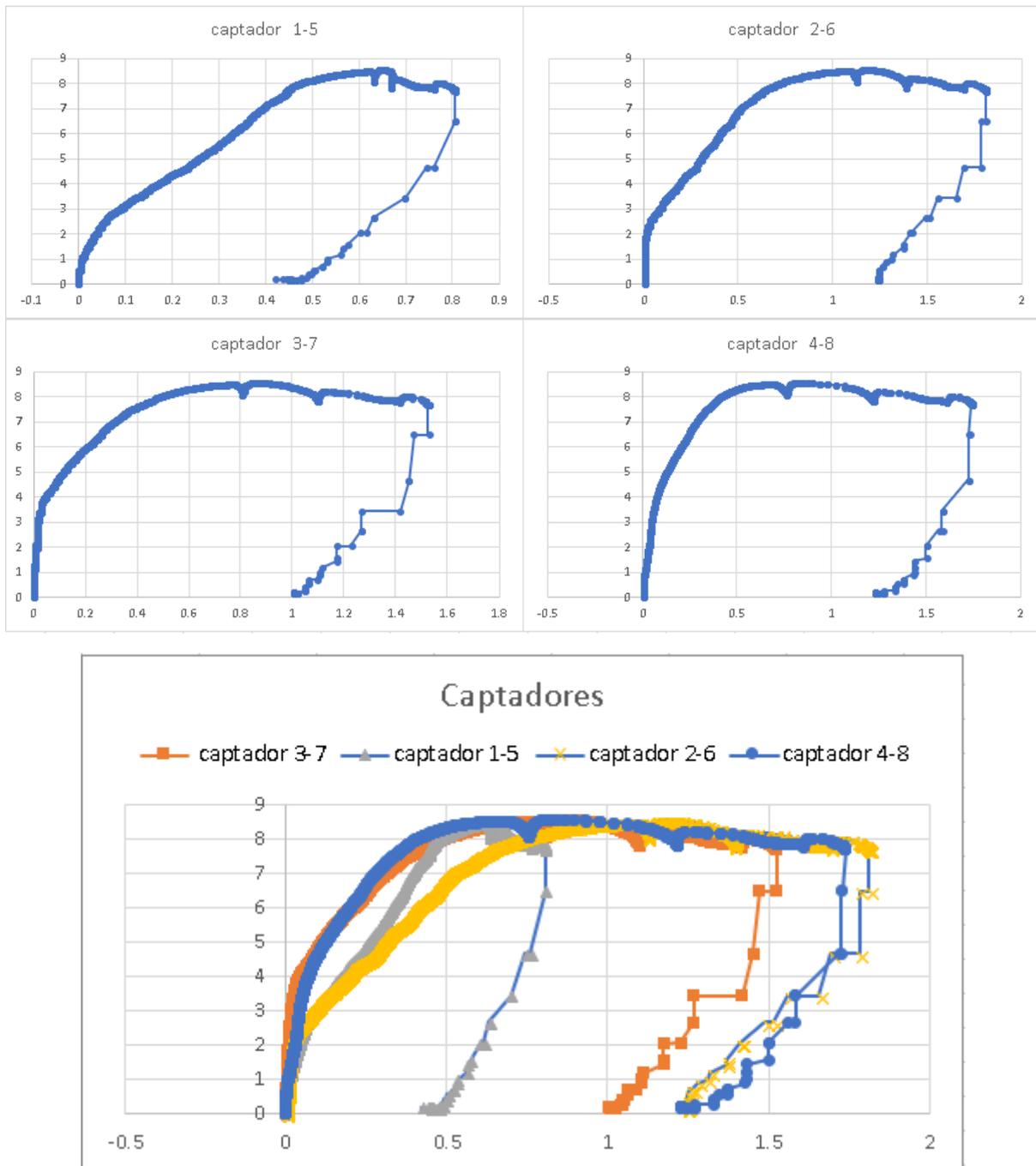


Fig 97.- Graficas de Carga vs Alargamiento en cada cara del tirante. (Fuente Propia)

Se puede ver que el comportamiento de cada grafica es parecido, y que sus valores tienen una correlación, no tanto así las del captador 1-5 que su medida es casi la mitad de los otros pares de captadores.

Con esto se obtuvo una media de las 4 medidas y nos dio el siguiente resultado:

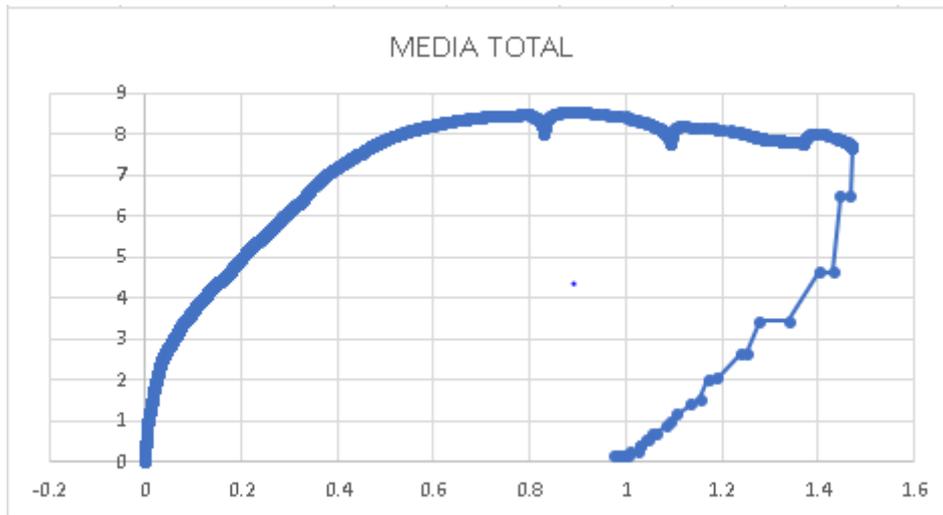


Fig 98.- Media Total de los captadores. (Fuente Propia)

En la gráfica que presentamos nos damos cuenta de que el comportamiento de dicha grafica es igual a los mostrados en la figura 97, y en este caso se obtuvo que el tirante tuvo un alargamiento de 1.46 mm y se produjeron macro fisuras en dicho tirante con lo que se puede decir que se encontró una metodología adecuada para poder caracterizar los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.



Fig 99.- Fisuras producidas en el ensayo mediante la configuración de las mordazas. (Fuente Propia)

Con esta configuración se realizaron 3 ensayos mas y sus resultados los mostramos a continuación:

- Ensayo del 18 de Enero del 2018

CAPTADORES	A	B	C	D	MEDIA
ALARGAMIENTO	0.69mm	0.27mm	0.5mm	0.89mm	0.59mm

Tabla 20.- Alargamientos medidos mediante los captadores en cada cara del tirante 6x6 cm. (Fuente Propia)

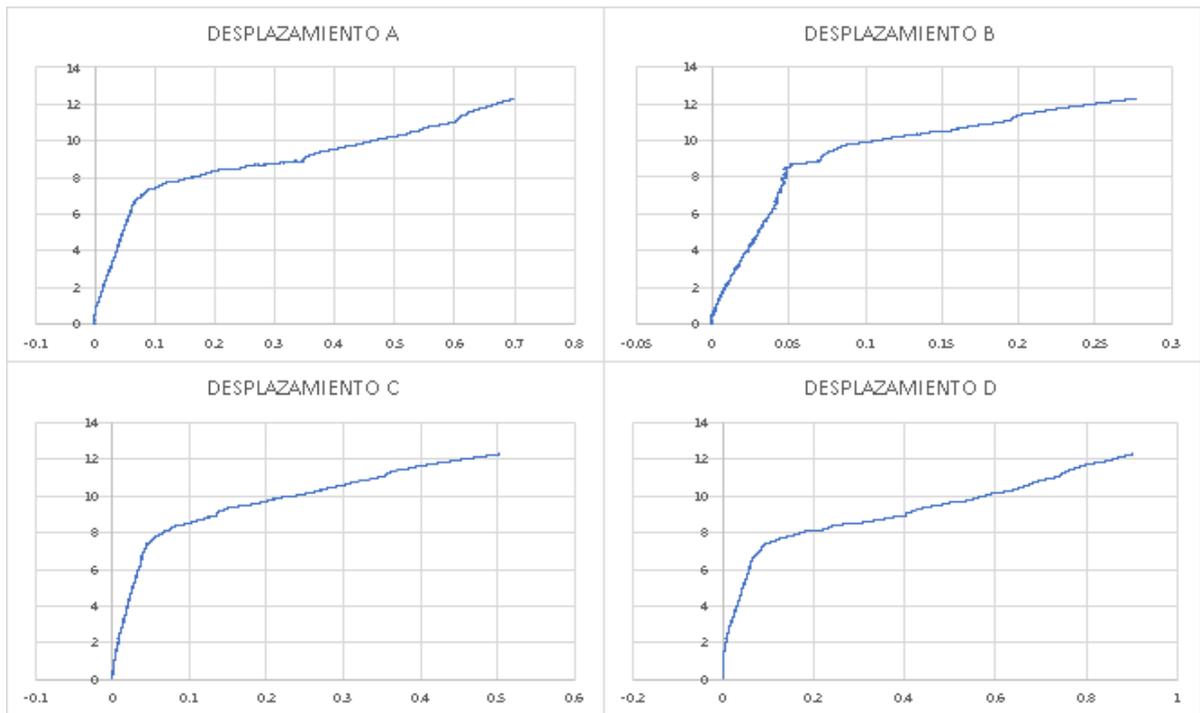


Fig 100.- Graficas de Carga vs Alargamiento en cada cara del tirante de 6x6 cm. (Fuente Propia)

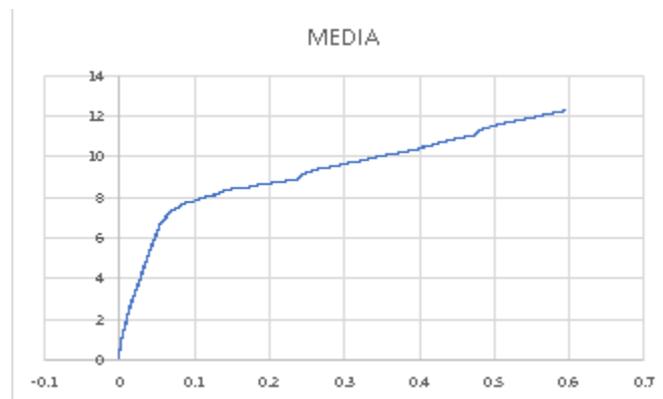


Fig 101.- Media Total de los captadores. (Fuente Propia)

- Ensayo del 18 de Enero del 2018

CAPTADOR	A	B	C	D	MEDIA
ALARGAMIENTO	1.15mm	0.95mm	0.86mm	1.03mm	1.01mm

Tabla 21.- Alargamientos medidos mediante los captadores en cada cara del tirante 10X10 cm. (Fuente Propia)

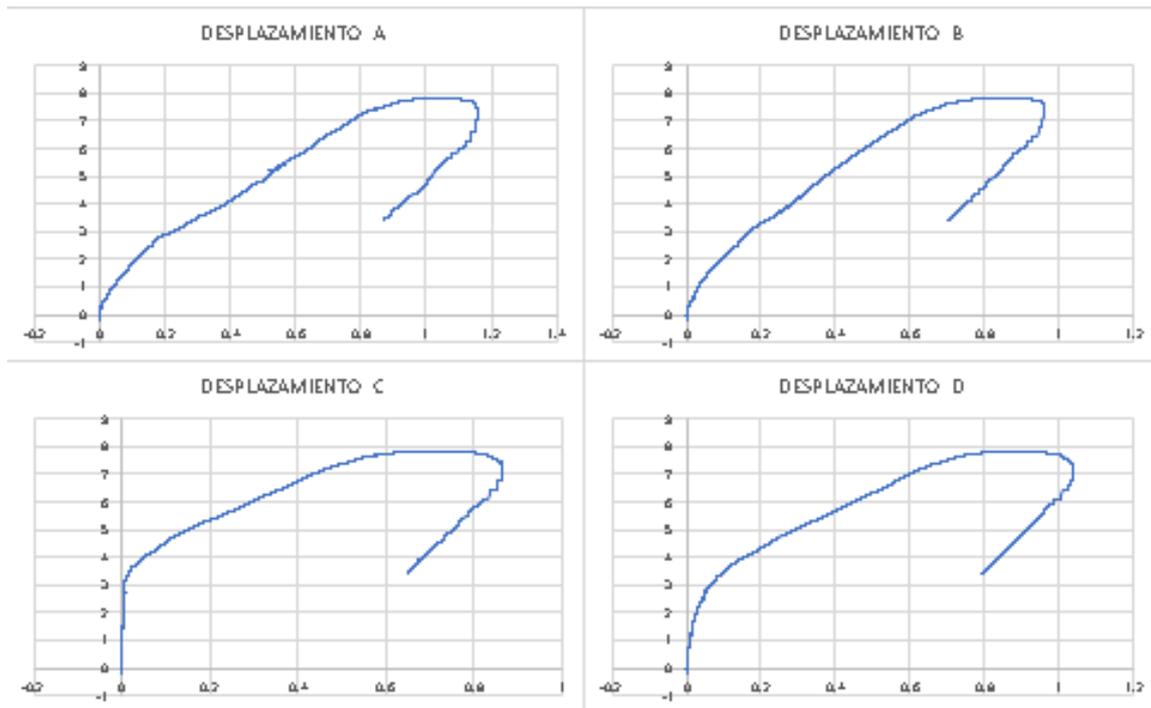


Fig 102.- Graficas de Carga vs Alargamiento en cada cara del tirante 10X10 cm. (Fuente Propia)

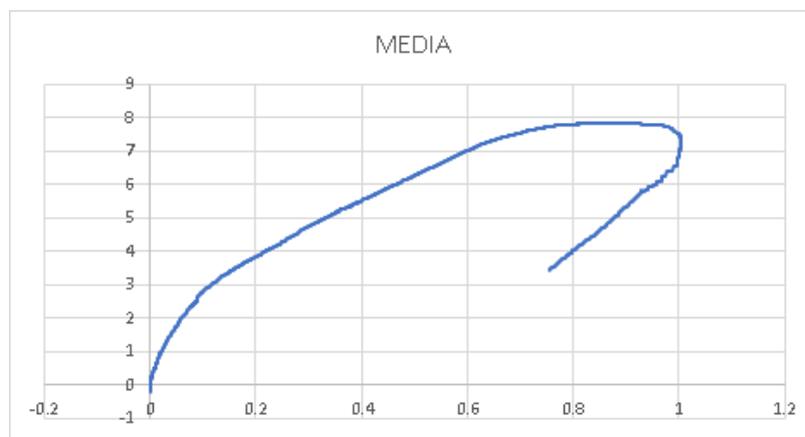


Fig 103.- Media Total de los captadores 10X10 cm. (Fuente Propia)

- Ensayo del 23 de Enero del 2018

CAPTADOR	A	B	C	D	MEDIA
ALARGAMIENTO	1.18mm	1.24mm	0.13mm	0.65mm	0.77mm

Tabla 22.- Alargamientos medidos mediante los captadores en cada cara del tirante 10X10 cm. (Fuente Propia)

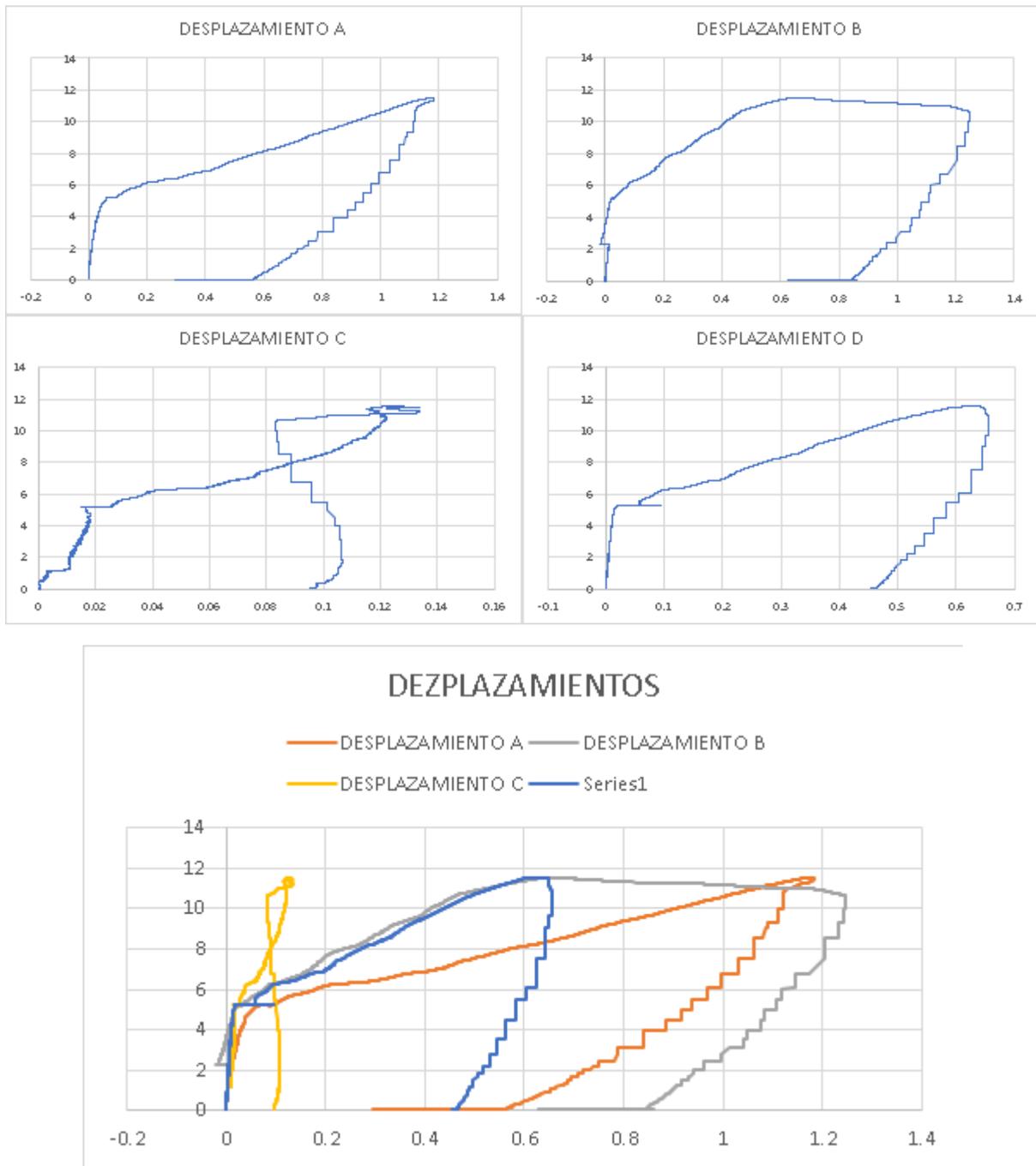


Fig 104.- Graficas de Carga vs Alargamiento en cada cara del tirante 10X10 cm. (Fuente Propia)

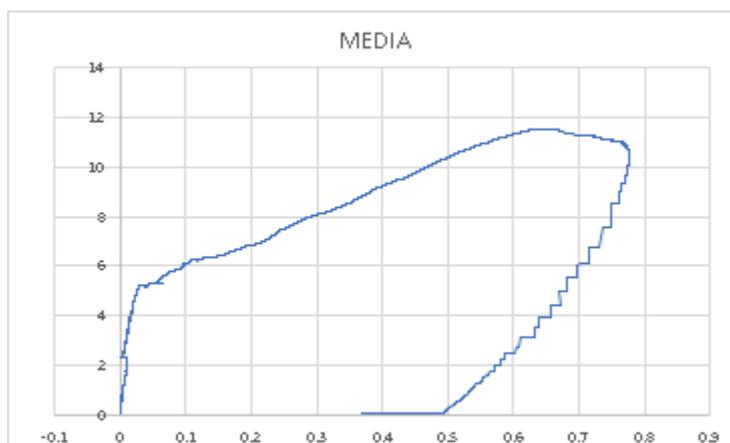


Fig 105.- Media Total de los captadores 10X10 cm. (Fuente Propia)

5.2 Análisis de Resultados

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos de todos los ensayos, cada uno con una metodología diferente podemos decir que la metodología de los tirantes con captadores, demec y fotografías no nos brindo resultados favorables en cuanto a el alargamiento de los tirantes y tampoco en cuanto a que se produzcan fisuras importantes en los tirantes.

Los alargamientos que se obtuvieron fueron demasiado pequeños y las mediciones realizadas de los Demec y el captador, no existía una correlación adecuada puesto que existía mucha diferencia entre ambos valores, en este caso también pudimos observar que las caras se deforman de diferente manera, esto puede ser que existe una rotación en la probeta en el momento de realizar los ensayos.

Si analizamos los resultados obtenidos de los ensayos realizados con la metodología de las mordazas como sistema de sujeción de las barras de acero de refuerzo de los tirantes, encontramos que existen alargamientos considerables y que se producen fisuras que a la final nos pueden dar una idea del comportamiento de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.

TIRANTE	6X6 cm	6x6 cm	10x10 cm	10x10 cm
FECHA ENSAYO	21/12/2017	18/1/2018	18/1/2018	21/1/2018
ALARGAMIENTO MEDIO	1.46 mm	0.59 mm	1.01 mm	0.77 mm
FISURAS	SI	SI	SI	SI

Tabla 23.- Comparación del alargamiento medio medido en cada tirante utilizando la metodología de las mordazas. (Fuente Propia)

Como podemos observar encontramos que 2 ensayos el primero con un tirante de 6 x 6 cm y el otro de 10 x 10 cm, los alargamientos medios medidos son mayores a 1 mm, teniendo en cuenta la deformación de los tirantes podemos decir que en estos dos ensayos los elementos se deforman de mayor manera que en los otros puesto que el alargamiento es mayor en el momento que se produce el ensayo con lo que esta metodología de ensayo nos entrega resultados positivos y si bien es cierto las medidas no son muy grandes se produjeron fisuras las cuales son considerables en el comportamiento del tirante. Se observa también que en los otros 2 ensayos los alargamientos medios medidos son inferiores a 1 milímetro, pero se produjeron fisuras en el momento del ensayo.

Capítulo 6

Conclusiones y futuras líneas de Investigación

En cuanto a las conclusiones que podemos obtener de los ensayos realizados y de encontrar una metodología adecuada para la caracterización de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento tenemos las siguientes:

- En cuanto al estado del arte de este Trabajo de Fin de Máster, se realizó un estudio de los artículos y ensayos más parecidos con nuestra metodología de ensayo para la caracterización de los Tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento con lo cual nos sirvió para tener pautas en cuanto a los parámetros y variables considerables para realizar nuestro ensayo y tener en cuenta estos para proponer un ensayo apropiado con el cual obtengamos resultados positivos.
- Para encontrar una correlación de los datos obtenidos por las mediciones tanto de los discos Demec, Captadores y Fotografía, se necesita un software más completo para el procesamiento de datos de las fotografías que obtenemos en cada ensayo y también una corrección mucho más aproximada de la distorsión de las fotografías puesto que se encontró que uno de los fallos se encontraba ahí y que existía métodos para corregir eso por lo que tendríamos que realizar un estudio más exhaustivo en cuanto al procesamiento de datos de las fotografías para encontrar resultados positivos y correlación entre estos.
- Al tener un Hormigón de muy Alto Rendimiento y solamente una barra de acero como refuerzo del tirante, la transmisión de tracciones al interior del tirante en el hormigón es muy baja por lo que no se producen fisuras y el fallo de la probeta se produce en la armadura, con lo que se planteó una metodología de las mordazas para encontrar resultados positivos, con lo cual un parámetro a tenerlo en cuenta en el momento de realizar los ensayos fue la armadura de refuerzo que nos influye de gran manera en la transmisión de tensiones al interior del hormigón.
- Los alargamientos medidos en los ensayos son muy pequeños, por lo que no son valores con lo cuales podamos caracterizar el comportamiento de los tirantes de HMAR.

- Se encontró que la metodología de ensayo para la caracterización de los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento más apropiada era con el sistema de mordazas ya que primero se encontraron alargamientos mayores en los ensayos realizados así como también se produjeron fisuras en los tirantes, además se piensa que la transmisión de tensiones al interior del hormigón es mejor porque el tirante no plastifica por la armadura de refuerzo sino por el hormigón mismo, con lo que en base a los resultados obtenidos se puede decir que la metodología de las mordazas es la adecuada.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, se siguen realizando ensayos con la metodología de las mordazas, en este caso se han realizado modificaciones en cuanto a los captadores para realizar medidas más exactas y que los resultados cada vez sean más concluyentes al momento de caracterizar a los tirantes de Hormigón de muy Alto Rendimiento.



Fig 106.- Ensayos que se están realizando con las modificaciones en el sistema de medición de los captadores. (Fuente Propia)

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] V. SIGRIST & M. RAUCH, “Deformation behavior of reinforced UHPFRC elements in tension.” Institute of Concrete Structures, Hamburg University of Technology (TUHH). 2008
- [2] V. GRIBNIAK, A. RIMKUS, L. TORRES & R. JAKSTAITE, “Deformation analysis of reinforced concrete ties: Representative geometry.” Research Laboratory of Innovative Building Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). 2016
- [3] M. LORRAIN, O. MAUREL & M. SEFFO, “Cracking Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Tension Ties.” ACI Structural Journal. 1998
- [4] M. RAUCH & V. SIGRIST, “Reinforced UHPFRC Tension Chords.” 17th IABSE Congress, Chicago. 2008
- [5] D. REDAELLI, “Testing of Reinforced High Performance Fibre Concrete Members in Tension.” 6th International PhD Symposium in Civil Engineering, Zurich. 2006
- [6] B. KALEDER, “Ultra High-Performance Concrete UHPC.” Ernst & Sohn GmbH & co. 2014
- [7] H. HOMAYOUN, H. ABRISHAMI & D. MITCHELL, “Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening.” ACI Structural Journal. 1996
- [8] “Hormigón Armado y Pretensado, Practicas de Laboratorio 4° ICCP.” Universidad Politécnica de Valencia. 2004
- [9] DARWIN, McCABE, IDUN & SCHOENKASE, “Development length criteria: bars not confined by transverse reinforcement.”
- [10] Y. KUSUMAWARDANINGSHI, F. EKKEHARD, I. MOHAMMED & M. ATTITOU, “Tensile strength behavior of UHPC and UHPRFC.” The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum. 2015
- [11] Y. KARINSKI, A. DANCYGIER & A. KATZ, “Crack Distribution n Fibrous Reinforced Concrete Tensile Prismatic Bar.” ACI Structural Journal. 2015
- [12] YUKISAMA GOTO, “Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars.” ACI Structural Journal. 1971
- [13] R. SAHAMITMONGKOL & T. KISHI, “Tension Stiffening effect and bonding characteristics of chemically prestressed concrete under tension.” Materials and Structures. 2011
- [14] G. BALAZ, “Cracking analysis Based on Slip and Bond Stresses.” ACI Materials Journal. 1993

- [15] L. ELFGREN & K. NOGHABAI, "Tension of reinforced concrete prisms. Bond properties of reinforcement bars embedded in concrete tie elements." *Materials and Structures*. 2002
- [16] G. CHUNPING, Y. GUANG & S. WEI, "Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspective." *Technological Sciences*, Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015
- [17] PH. BISCHOFF, "Tension stiffening and cracking on steel fiber-reinforced concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2003
- [18] B. GERARD, D. BREYSSE & A. AMMOUCHE, "Cracking and permeability of concrete under tension." *Materials and Structures*. 1996
- [19] J. DE OLIVEIRA, A. LUIZ, D. DE LIMA T. FIHO & R. DIAS, "Tension Stiffening on steel fibre-reinforced concrete." *ACTA Scientiarum Technology*. 2016
- [20] A. SOKOLOV, G. KAKLASUKAS & R. JAKUBOVSKIS, "Ties." *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016
- [21] LEE, GI-YEOL, KIM & WOO, "Cracking and Tension stiffening behavior of High-Strength Concrete tension members subjected to Axial Load." *Advances in Structural Engineering*. 2009