



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Análisis numérico del comportamiento de elementos continuos pretensados con tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP)

Trabajo realizado por:

Francesc Fabregat Trenchs

Dirigido por:

Antonio Ricardo Marí Bernat

Eva Maria Oller Ibars

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, 27 de junio de 2023

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

Agradecimientos

Al ir cerrando etapas siempre es bueno acordarte de aquellas personas que tienes a tu lado y no se cansan de animarte y motivarte para que cumplas tus objetivos. En este caso mis padres y mi hermana los cuales se han hartado de escuchar fin de semana tras fin de semana mis problemas durante este máster sin entender la mitad de las cosas que les contaba.

A mis amigos, que me han sufrido, sobre todo en este mes final en el cual salía del trabajo dirección a mi escritorio para pasarme tarde y noches redactando y calculando, y los pocos ratos que pasábamos juntos solo oían quejas, que para ellos no tenían ningún sentido, pero sus consejos siempre eran buenos.

A Eva Oller, Alexis Ramírez y Galo Ortiz quienes han sido profesores y coordinadores que me han ayudado a llevar a cabo esta tesis y los cuales nunca han puesto pegas en ayudarme a salir de los varios problemas que me iba encontrando a lo largo de este semestre. Sin ellos seguramente aún estaría aprendiendo a hacer un modelo con ABAQUS e investigando sobre el FRP.

¡Muchas gracias a todos!

Resumen

El estudio de nuevos materiales en el mundo de la construcción es un síntoma de avance y mejora de las técnicas de proyección y construcción actuales. Un proceso natural que con el paso del tiempo va experimentando con modelos numéricos o campañas experimentales, con la finalidad de obtener unos resultados suficientemente buenos, como para en un futuro llegar a recoger esta innovación en una normativa mundialmente reconocida con unos estándares de cálculo y diseño.

Una de las mayores problemáticas de las estructuras de hormigón armado y pretensado es la corrosión de sus armaduras. En estructuras pretensadas, la corrosión bajo tensión es especialmente preocupante pues puede provocar el colapso de las estructuras. Desde inicios de este siglo, se han empezado a introducir los polímeros reforzados con fibras (FRP) en el campo de la construcción como alternativa al acero de armar. Durante el desarrollo de este trabajo se ha hecho una investigación bibliográfica, recogiendo datos desde 1992 sobre campañas experimentales y otros estudios de elementos de FRP en forma de cable o de barra utilizados como armadura activa y/o pasiva, estudiando cuales fueron los inicios de este proceso y cuáles han sido las estructuras proyectadas con este tipo de sistema.

Este trabajo está enmarcado en un proyecto de investigación llamado Straduravius, en el cual se están estudiando las diferentes propiedades y/o características de las armaduras de polímeros reforzadas con fibras bajo diferentes tipos de sollicitaciones. Longitud de anclaje, adherencia o comportamiento estructural son algunos de los conceptos que se han ido evaluando.

La metodología de trabajo seguida se ha basado en el programa de cálculo de elementos finitos Abaqus, gracias al cual se ha conseguido hacer una modelación de las diferentes situaciones de carga que se darán. Pretensado de los cables CFRP de las vigas en las instalaciones de Alvipré, transporte de estas hasta el laboratorio de la UPC, hormigonado de la losa superior y aplicación de la carga, en este caso puntual, y bajo la cual se debe dar el colapso de la estructura de la pasarela compuesta. Con el modelado realizado vamos a obtener una predicción, que va a ser muy parecida a la realidad, pues se definirán las condiciones de contorno de la mejor manera para tener un comportamiento paralelo al caso real. Esta predicción nos proporcionará las reacciones en los apoyos, la deformada en todos los puntos de la pasarela, las tensiones, tanto de compresión como de tracción, en el hormigón y en los cables, y nos permitirá evaluar la carga de fallo y el motivo por el cual se produce el colapso de la estructura. Con estos datos también podremos hacer una comparación con los valores teóricos utilizados para realizar el dimensionamiento del tesado de los cables de polímeros reforzados con fibras de carbono y de las diferentes fases de construcción de la pasarela en cuestión.

La culminación y valoración de los resultados obtenidos en esta tesis se dará a finales de Julio de 2023 con el ensayo de una pasarela escala 1/3 en las instalaciones de la Universitat Politècnica de Catalunya bajo la supervisión de los coordinadores a cargo del proyecto y de los técnicos de laboratorio.

Resum

L'estudi de nous materials al món de la construcció és un símptoma d'avenç i millora de les tècniques de disseny i construcció actuals. Un procés natural que amb el pas del temps va experimentant amb models numèrics o campanyes experimentals, amb la finalitat d'obtenir uns resultats prou bons, com per arribar en un futur a recollir aquesta innovació en una normativa mundialment reconeguda amb uns estàndards de càlcul i disseny .

Una de les problemàtiques més grans de les estructures de formigó armat i pretesat és la corrosió de les seves armadures. En estructures pretesades, la corrosió sota el efectes de la tensió és especialment preocupant ja que pot provocar el col·lapse de les estructures. Des de començaments d'aquest segle, s'han començat a introduir els polímers reforçats amb fibres (FRP) al camp de la construcció com a alternativa a l'acer d'armar. Durant el desenvolupament d'aquest treball s'ha fet una investigació bibliogràfica, recollint dades des de 1992 sobre campanyes experimentals i altres estudis d'elements de FRP en forma de cable o barra utilitzats com a armadura activa i/o passiva, estudiant quins van ser els seus inicis i quines han estat les estructures projectades amb aquest tipus de sistema.

Aquest treball està emmarcat en un projecte de recerca anomenat Straduravius, on s'estan estudiant les diferents propietats i/o característiques de les armadures de polímers reforçats amb fibres sota diferents tipus de sol·licitacions. Longitud d'ancoratge, adherència o comportament estructural son alguns dels conceptes que s'han anat avaluant.

La metodologia de treball seguida s'ha basat en el programa de càlcul d'elements finits Abaqus, gràcies al qual s'ha aconseguit fer una modelació de les diferents situacions de càrrega que es donaran. Pretesat dels cables CFRP de les bigues a les instal·lacions d'Alvipré, transport d'aquestes fins al laboratori de la UPC, formigonat de la llosa superior i aplicació de la càrrega, en aquest cas puntual, i sota la qual s'ha de donar el col·lapse de l'estructura de la passarel·la composta. Amb el model realitzat obtindrem una predicció, que serà molt semblant a la realitat, ja que es definiran les condicions de contorn de la millor manera possible per tenir un comportament paral·lel al cas real. Aquesta predicció ens proporcionarà les reaccions en els suports, la deformada en tots els punts de la passarel·la, les tensions, tant de compressió com de tracció, al formigó i als cables, i ens permetrà avaluar la càrrega de fallada i el motiu per el qual es produeix el col·lapse de l'estructura. Amb aquestes dades també podrem fer una comparació amb els valors teòrics utilitzats per fer el dimensionament del tesat dels cables de polímers reforçats amb fibres de carboni i des de les diferents fases de construcció de la passarel·la en qüestió.

El punt i final, i la valoració dels resultats obtinguts en aquesta tesi, es donarà a finals de juliol de 2023 amb l'assaig d'una passarel·la escala 1/3 a les instal·lacions de la Universitat Politècnica de Catalunya sota la supervisió dels coordinadors a càrrec del projecte i de els tècnics de laboratori.

Abstract

The study of new materials in the world of construction is a symptom of the progress and improvement of current design and construction techniques. A natural process that over time is experimenting with numerical models or experimental campaigns in order to obtain sufficiently good results and collect them into a globally recognized standard with standards of calculation and design.

One of the biggest problems of reinforced and prestressed concrete structures is the corrosion of their reinforcement. In prestressed structures, corrosion in stress situations is particularly worrying as it can cause the collapse of the structures. Since the beginning of this century, fibre reinforced polymers (FRP) have been introduced into the construction field as an alternative to reinforced steel. During the development of this work, a bibliographic investigation has been made, collecting data from experimental campaigns and other studies of elements of FRP in the form of cable or bar used as active and/or passive reinforcement since 1992, studying which was the beginning of this process and which have been the structures projected with this type of system.

This work is part of a research project called Straduravius, which is studying the different properties and characteristics of fibre reinforced polymer reinforcements under different types of stresses. Anchor length, adhesion, or structural behaviour are some concepts that have been evaluated.

The methodology followed has been based on Abaqus, a finite element calculation program, thanks to that it has been possible to model the different load situations that will occur. Pre-tensioning of CFRP cables of the four beams in the Alvipré facilities, transport of these to the UPC laboratory, concreting of the upper slab and application of the concentrated load, in this case, and under which the structure of the composite pedestrian bridge must collapse. With the modelling carried out, we will obtain a prediction, which will be very similar to reality, because the boundary conditions will be defined in the best way to have a behaviour parallel to the real case. This prediction will give us the reactions at the supports, the deformed at all points of the structure, the stresses, both compression and traction, in the concrete and in the cables, and allow us to assess the fault load and the reason of the structure collapse. With this data we can also make a comparison with the theoretical values used to make the sizing of the tensioning of carbon fibre reinforced polymer cables and the different phases of construction of the bridge in question.

The culmination and evaluation of the results obtained in this thesis will be given at the end of July 2023 with the trial of a 1/3 scale structure in the facilities of the Universitat Politècnica de Catalunya under the supervision of the coordinators in charge of the project and the laboratory technicians.

Índice de contenido

1.	Introducción	8
1.1.	Planteamiento del problema.....	8
1.2.	Objetivos	9
1.2.1.	Objetivo general	9
1.2.2.	Objetivos específicos	9
1.3.	Estructura del documento.....	10
2.	Estado del conocimiento	11
2.1.	Historia	11
2.2.	Campañas de investigación	13
2.3.	Guía de diseño.....	20
2.4.	Ejemplos de estructuras con FRP	21
2.5.	Descripción de los polímeros reforzados con fibras (FRP)	23
2.5.1.	Pretensado con cables de fibra de carbono	25
2.6.	Conclusiones del estado del conocimiento	29
3.	Campaña experimental	30
3.1.	Objeto de estudio.....	30
3.2.	Geometría	31
3.3.	Materiales.....	32
3.3.1.	Hormigón.....	32
3.3.2.	Acero	33
3.3.3.	Fibra de vidrio.....	36
3.3.4.	Armadura activa de polímeros reforzados con fibra de carbono (Tendones CFCC)	39
3.4.	Montaje para el tesado CFRP	42
3.4.1.	Procedimiento de tesado	42
3.4.2.	Resumen de las fases de ejecución para el tesado	46
3.5.	Predimensionamiento y verificación del tablero de puente continuo	46
3.5.1.	Revisión de las vigas aisladas.....	47
3.5.2.	Revisión de las vigas tras el postensado de continuidad.....	53
3.5.3.	Consideración del tiempo de aplicación de hormigonado de la losa superior en el laboratorio.....	57
3.5.4.	Revisión de la sección compuesta	60
3.6.	Apoyos.....	61
3.7.	Estado actual	62
4.	Modelo con Abaqus	66
4.1.	¿Qué es Abaqus?	66
4.1.1.	Geometría	67

4.1.2.	Propiedades.....	67
4.1.3.	Ensamblaje	68
4.1.4.	Casos de cargas o pasos “steps”	68
4.1.5.	Interacciones	68
4.1.6.	Cargas	68
4.1.7.	Mallado.....	68
4.1.8.	Optimización.....	68
4.1.9.	Trabajos	69
4.1.10.	Visualización	69
4.2.	Creación del modelo del tablero de puente continuo objeto de estudio de la campaña experimental	69
4.2.1.	Creación de las partes	69
4.2.2.	Definición de las propiedades de los materiales y las secciones	72
4.2.3.	Definición de las secciones y asignación de estas a cada parte	74
4.2.4.	Creación de los ensamblajes a analizar	74
4.2.5.	Creación de los “steps” o casos de cargas	76
4.2.6.	Designación de las interacciones i restricciones	77
4.2.7.	Asignación de los apoyos y aplicación de las cargas	80
4.2.8.	Generación del mallado	82
4.2.9.	Creación de los trabajos para hacer los cálculos.....	84
4.2.10.	Visualización de los resultados.....	84
4.3.	Resultados	85
4.3.1.	Resultados del Modelo nº1- (viga aislada)	85
4.3.2.	Resultados del Modelo nº2- (2 vigas conectadas)	87
4.3.3.	Resultados del Modelo nº3- (2 vigas conectadas + Losa superior)	91
4.3.4.	Modelo alternativo con un solo apoyo central	95
5.	Conclusiones y futuras líneas de investigación	98
5.1.	Conclusiones.....	98
5.2.	Futuras líneas de investigación.....	100

REFERENCIAS

ANEJOS

A1 - Cálculos del postensado de continuidad

A2 - Planos constructivos

A3.1, A3.2 y A3.3 - Planos de experimentación

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Las técnicas de construcción que se utilizan en nuestro país van muy relacionadas con el hormigón, ya sea en forma de vigas, pilares, paneles o losas. Así pues, los técnicos especialistas en estructuras han ido desarrollando día a día esta tipología de estructuras ya que son una de las más utilizadas. Dentro de la construcción con hormigón podemos encontrar diferentes técnicas para mejorar su comportamiento como es el caso del hormigón armado con barras de acero. Estas aportan la resistencia a tracción necesaria de la cual carece este material de construcción hecho a base de cemento, arenas y gravas. Más adelante se descubrió que dichas barras podían aportar una mejoría general a la estructura si se tensaban con la finalidad de transmitir, al relajar la barras o cables, un esfuerzo de compresión en una parte del elemento y que en fase de servicio el conjunto de la estructura trabajara de la mejor manera posible. Esta técnica se conoció con el término de pretensado.

Más adelante y con la evolución de esta técnica, se desarrollaron los aceros de alta resistencia, el ámbito de construcción se expandió y pasaron a proyectarse estructuras mucho más grandes como fue el caso de puentes colgantes. Aun habiendo optimizado y mejorado las estructuras seguían habiendo inconvenientes con las armaduras de acero y es que el efecto de la corrosión generada por carbonatación o por la presencia de cloruros producía una degradación del material, con una reducción del diámetro de la armadura activa. Para intentar evitar este tipo de patología en los años 2000 se introdujo el uso de armaduras de polímeros reforzados con fibras (FRP) en el sector de la construcción. La utilización de armaduras de FRP fue evolucionando con el paso del tiempo hasta el momento que se han empezado diseñar proyectos sustituyendo las armaduras activas de acero, las de pretensado, por este tipo.

Hasta el momento, en algunos proyectos se ha llevado a cabo el uso de armadura FRP en lugar de acero, sin embargo, su uso como sustituto de los cables pretensados es poco común debido a la falta de sistemas de anclaje y estudios detallados sobre su comportamiento, como pueden ser investigando sobre la adherencia, longitud de transferencia, el comportamiento a flexión o cortante o las pérdidas de pretensado. Debido a esto no se ha conseguido implementar una base para el diseño en la normativa y estándares internacionales que sirva de referencia para proyectar estructuras con este tipo de armadura. Aun así, hay varios países y organismos que han adaptado su legislación para el uso de este tipo de armaduras. Existen algunas recomendaciones o guías de diseño que contemplan ese tipo de armaduras, principalmente pasivas.

Entre 2019 y 2022, se ha desarrollado un proyecto de investigación coordinado entre la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y la Universidad de Coruña (UdC), que bajo el acrónimo Straduravius, tenía como objetivo contribuir al estado del conocimiento de elementos pretensados con armadura de FRP, para aportar datos técnicos sobre su comportamiento como armadura activa.

En este trabajo se pretende desarrollar una modelización numérica mediante un modelo a escala con Abaqus CAE del puente continuo de dos vanos pretensado con cable de CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) a escala 1/3 que se va a ensayar en el laboratorio de la UPC. Este ensayo de un elemento continuo va a ser de los primeros en el mundo, y constituirá una aportación al estado del arte.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es el análisis numérico del comportamiento de un tablero de puente continuo de dos vanos formado por dos vigas doble T pretensado con armadura pretesa de CFRP y con armadura pasiva de GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) a escala 1/3 para reproducir y predecir los resultados que se obtendrán en la campaña experimental que tendrá lugar en julio de 2023. El tablero presenta una zona maciza en el apoyo central para poder albergar una zona de postensado y dotar de continuidad a la pasarela.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos.

-Entender el proceso de innovación que supone el uso de armaduras FRP, y sus propiedades mecánicas.

-Generar un modelo de elementos finitos con el programa Abaqus que permita predecir los resultados experimentales que se obtendrán fruto de los ensayos a flexión y cortante a realizar.

-Realizar un análisis de los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos. Obtener valores de tensiones y desplazamientos una vez realizado el análisis de elementos finitos.

Obtener valores de tensiones y desplazamientos una vez realizado el análisis de elementos finitos.

-Obtener una predicción lo más precisa posible sobre como seria el comportamiento de la fase experimental.

-Obtener la carga última de la pasarela y los motivos de su fallo.

-Obtener unas conclusiones coherentes con el diseño inicial.

1.3. Estructura del documento

El presente trabajo se estructura en forma de 5 capítulos con sus correspondientes apartados para que la comprensión sea mucho más sencilla.

El Capítulo 1 de Introducción, presenta el planteamiento del problema y los objetivos que se propone alcanzar con este trabajo. El Capítulo 2 resume el estado actual del conocimiento donde se ha hecho una tabla con los artículos y las conclusiones principales a las cuales se llegó después de realizar las campañas teóricas y/o experimentales.

Seguidamente el tercer y cuarto capítulo se encaran al modelo a realizar tanto a nivel de modelado en ordenador como en el caso real que se llevará a ensayo. Aquí se hace una descripción de los componentes, materiales, modelo y tipo de análisis a realizar y seguidamente una descripción de la realización del modelo con Abaqus a modo de guía para futuros usuarios.

Finalmente, una vez ejecutado el análisis de elementos finitos se van a obtener los datos necesarios para poder hacer una evaluación lo más precisa posible y poder elaborar el Capítulo 5 de conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. Estado del conocimiento

Este apartado pretende resumir el estado del conocimiento relativo al comportamiento de elementos pretensados con tendones de polímeros reforzados con fibras y aportar y recopilar datos de campañas relacionadas con cualquier tipo de experiencias con las armaduras FRP. Des de las armaduras adicionales para las zonas de anclaje, hasta los cables de fibra de carbono para tesar que se van a utilizar en la parte experimental de esta tesis.

Esta investigación ha permitido entender como ha sido la evolución de las armaduras de polímeros reforzados con fibras y cuáles han sido los obstáculos encontrados y avances realizados con el paso de los años.

El principal problema de las armaduras activas de acero es su debilidad frente a la corrosión, y aunque se proporcione el suficiente recubrimiento de hormigón, cuando se produce la aparición de fisuras, este recubrimiento puede llegar a no ser suficiente para asegurar el correcto funcionamiento de la estructura a lo largo de los años. En la actualidad el uso de cables de fibra de carbono ha ido cogiendo fuerza gracias a su gran resistencia a la corrosión, la cual permite reducir o eliminar los posibles costes de reparación de estructuras ya existentes a lo largo de su vida útil.

Además, la relación resistencia/peso y rigidez/peso es muy alta, por lo que su uso como alternativa al acero puede resultar competitivo en determinados ambientes agresivos. Sin embargo, es necesario incorporar estas armaduras en las guías de diseño o en las normativas para lograr un mayor uso de estos materiales en el diseño y construcción de estructuras.

2.1. Historia

Los inicios de los cables de polímeros reforzados con fibras se remontan hasta la década de los 30 del siglo pasado cuando se introdujo el concepto de las fibras. En este caso fueron de vidrio pero no se desarrollaron hasta los años 50 cuando los ingenieros del ejército norteamericano se interesaron en el uso de estas como refuerzo. Años más tarde y gracias al deterioro por corrosión de las armaduras de los puentes, hasta entonces de acero convencional, se reactivó el interés para conseguir armaduras resistentes a la corrosión en ambientes muy agresivos como en zonas con acumulación de nieve o emplazamientos afectados por la salinidad marina.

Aunque desde 1930 se conocían los polímeros reforzados con fibras no fue hasta mucho más tarde cuando se empezaron a diseñar campañas experimentales relacionadas con las armaduras fabricadas con estos materiales.

Durante las siguientes dos décadas, en los años 50 y 60, el ejército norteamericano hizo varias campañas de la mano de Mather, Tye, Pepper, Wine, Dietz y Hawley pero no se avanzó lo esperado. Pero una década más tarde debido a la corrosión en estructuras existentes, en Europa se empezó el estudio de cables con fibra de vidrio. A partir de aquí creció el interés por los cables no metálicos y AKZO y HBG, una empresa química y un intermediario, respectivamente, empezaron a desarrollar armaduras de polímeros reforzados con fibras de aramida (AFRP) para aplicar en el mundo del pretensado. Paralelamente en el continente asiático, Japón promovió

esta nueva técnica con un programa nacional para el estudio de estructuras de hormigón armado con FRP.

Seguidamente se mostrará una tabla (Tabla 2.1.1) creada a partir del boletín FIB 40 FRP Reinforcement in RC Structures donde se destacan los principales avances en el campo del pretensado FRP.

Año	Hecho
1818	Se funda el Instituto de ingenieros civiles en Reino Unido
1849	Se crea el hormigón armado
1887	La CSCE se funda en Canadá
1904	Se funda instituto americano del hormigón (ACI)
1910	Se finaliza la primera norma de la ACI
1941	Primera edición de la ACI 318 se publica
1953	El comité Euro-Internacional du Béton (CEB) se funda
1964	Se publican las primeras recomendaciones del CEB
1970s	Se empieza a usar el concepto de hormigón armado con fibras
1987	La JSCE establece un comité sobre los materiales reforzados con fibras (hormigón con fibras)
1991	La ACI funda el Comité 440 sobre fibras de polímeros
1992	El JSCE publica un estado del conocimiento sobre el refuerzo con materiales reforzados con fibras
1993	Comienza el proyecto Euroconcrete
1996	JSCE, CEB y Euroconcrete publican recomendaciones sobre el FRP
1997	El CEB funda el TMR Network ConFibreCrete
1998	EL CSCE publica recomendaciones sobre armaduras FRP en puentes
1999	La institución de ingenieros Estructurales publica recomendaciones. Se publica el código nacional de Suecia de FRP RC
2000	The Concrete Society publica un informe sobre la adherencia en armaduras FRP. FIB publica el boletín número 10 sobre adherencia
2001	FIB publica el boletín número 14 sobre adherencia
2002	El comité 440 de la ACI publica las primeras recomendaciones de diseño para FRP.
2003	El comité 440 de la ACI publica la segunda versión de las recomendaciones de diseño para FRP.
2004	La ACI publica información sobre pretensado FRP
2006	CRN National Research Council da recomendaciones para el refuerzo interno de FRP

Tabla 2.1.1 Avances en el campo del FRP según el boletín FIB 40 FRP Reinforcement in RC Structures

2.2. Campañas de investigación

Los países que más han invertido en cuanto a investigación quedan claramente destacados por encima del resto y son Canadá, Estados Unidos y Japón.

Europa con el EUROCONCTETE formado por socios de Reino Unido, Holanda, Suiza, Francia y Noruega empezó varios proyectos en el año 93 y se dedicó al estudio de durabilidad en ambientes agresivos para determinar el comportamiento estructural y el posible desarrollo de guías de diseño.

Antonio Nanni, en 1992, fue el primero en realizar ensayos de laboratorio de elementos pretensados con FRP y tras él fueron muchos otros más investigadores con el afán de aportar la información al mundo.

Seguidamente se ha hecho una recopilación de estados del arte y campañas experimentales relacionadas con el mundo del FRP en modo de tabla (Tabla 2.2.1). Adherencia, anclaje, durabilidad, comportamiento estructural o aplicaciones. Todos ellos sirvieron de base para futuras investigaciones.

Campañas relacionadas con las armaduras FRP		
Autor/es y año	Título del estudio/campaña	Conclusión/es relevantes
Antonio Nanni 1992	Estudio de la zona de anclaje de pretensado con AFRP	Los cercos alrededor del cable no evitan la fisuración pero si la propagación de estas Las mejores maneras de evitar la aparición de fisuras son: -Colocación de un serpentín de fibra de carbono alrededor del cable -Cubrir parcialmente el tendón en la zona de anclaje (reduce la tensión en el hormigón 33-55%)
A.A. Abdelrahman G. Tadros S.H. Rizkalla 1995	Ensayo a escala del primer puente de CFRP en Canadá	El fallo se dio por rotura de los cables El comportamiento de los cables es lineal hasta el fallo Los cálculos se hicieron siguiendo el modelo de ductilidad y los resultados en cuanto a tensiones y deformada son muy parecidos.

<p>Amir Z. Fam 1995</p>	<p>Pretensado con CFRP y armadura a cortante para puentes de carretera</p>	<p>-La ratio de armadura a cortante con cercos, su configuración y diámetros afecta a la tensión en el hormigón y a la profundidad de la fisura pero no de manera proporcional -El comportamiento a flexión de las vigas pretensadas con CFRP fue muy similar a las pretensadas con acero convencional</p>
<p>Nolan G. Domenico 1995</p>	<p>Propiedades de anclaje de los cables pretensados con CFRP</p>	<p>La longitud de anclaje de los cables de acero es de 2.5 a 4 veces superior a la del CFRP Los cables CFRP transfieren 3 veces más tensión por adherencia al hormigón que los de acero y la transferencia de tensión por flexión es 5 veces superior a la del acero</p>
<p>Harry G. Harris 1998</p>	<p>Nueva armadura híbrida de FRP para estructuras de hormigón</p>	<p>Diagrama tensión-deformación es bilineal</p>
<p>Sang Yeol Park Antonio E. Naaman 1999</p>	<p>Comportamiento a cortante de vigas pretensadas con FRP</p>	<p>Los cables FRP tiene una baja resistencia a cortante y el modelo de fallo es único y es por rotura del tendón debido a la dovela de cortante La capacidad de las vigas pretensadas con FRP es un 15% inferior a las pretensadas con acero La fisura antes de romper es entre un 33 y un 50% menor que en el caso de cables de acero (también el fallo se da antes)</p>
<p>Zhen Lu Thomas E. Boothby 2000</p>	<p>Longitud de transferencia de los tendones FRP</p>	<p>Las longitudes de transferencia son un 25% superiores a las calculadas según la ACI La tensión de adherencia de los cables FRP es superior a la de los cables de acero</p>

<p>Francesco Micelli Antonio Nanni 2004</p>	<p>Durabilidad de las varillas FRP en estructuras de hormigón</p>	<p>Las fibras de carbono no mostraron debilidad a los agentes alcalino, aún con el fluido penetrando en las grietas de la matriz de resina.</p>
<p>Patrick X.W. Zou 2007</p>	<p>Comportamiento de los cables CFRP con el tiempo</p>	<p>CFRP son los que tienen menor fluencia y más tensión por un módulo elástico algo superior</p>
<p>Nabil Grace Tsuyoshi Enomoto Ahmed Abel-Mohti Yahia Tokal Sreejith Puravankara 2008</p>	<p>Comportamiento a flexión de vigas cajón prefabricadas postesado con CFRP</p>	<p>Un mayor nivel de fuerza de pretensado total prolonga el desarrollo de grietas y reduce el número y el tamaño de las grietas que se desarrollan bajo la carga y se reduce la flexión residual</p>
<p>Francis T.K. Au 2008</p>	<p>Deformada de vigas de hormigón con pretensado no adherente FRP</p>	<p>Cuando la ratio c/d_p es 0.3 o superior la estructura falla por compresión en el hormigón</p>
<p>Mirpayam Nabipaylashgari 2012</p>	<p>Resistencia a cortante de vigas pretensadas con CFRP</p>	<p>El mínimo refuerzo a cortante con estribos FRP no es útil en vigas altas con $a/d=1.5$</p>
<p>Martin Noël Khaled Soudki 2013</p>	<p>Efecto del pretensado en el rendimiento de las losas armadas con GFRP</p>	<p>Las losas con GFRP muestran más rigidez que la reforzadas con acero convencional usando ratios similares</p>
<p>Zhi Fang Kuangyi Zhang Bing Tu 2013</p>	<p>Ancoraje adherente de un sistema de múltiples tendones FRP</p>	<p>El hormigón de altas prestaciones es capaz de anclar los tendones CFRP ya sean únicos o varios.</p>
<p>Maximus Pearson Ted Donchev 2013</p>	<p>Comportamiento de vigas de homrigón pretensadas con BFRP</p>	<p>Las pérdidas con BFRP son menores que en el caso de los tendones de acero. El comportamiento a fluencia del BFRP y el acero son en principio diferentes pero para los casos de carga utilizados se obtuvieron resultaos muy similares.</p>
<p>Payam Nabipay Dagmar Svecova 2014</p>	<p>Comportamiento a cortante de vigas en T pretensadas con CFRP</p>	<p>Si la relación a/s se reduce de 2.5 a 1.5 la rigidez aumenta considerablemente</p>

<p>Martin Nöel Khaled Soudki 2014</p>	<p>Comportamiento a cortante de losas postensadas con FRP</p>	<p>Las barras de cortante con anclaje en ambos extremos presentan la mejor combinación de facilidad de construcción y comportamiento estructural</p>
<p>M. Mirshekari T. Donchev D. Petkova M. Limbachiya 2015</p>	<p>Influencia del grado de pretensado en el comportamiento de vigas pretensadas con BFRP</p>	<p>La capacidad máxima de todas las vigas reforzadas con BFRP es mayor que la capacidad de las vigas reforzadas con acero y aumenta con el nivel de pretensado. Alcanza el 73% de diferencia entre la viga de control (S0) y el 40% de la viga pretensada BFRP (B40)</p>
<p>Mantas Atutis Juozas Valivonis Edgaras Atutis 2015</p>	<p>ELS de vigas pretensadas con GFRP</p>	<p>El pretensado ofrece un mayor grado de control de fisuración que respecto un elemento solo con armadura pasiva</p>
<p>Nabil F. Grace Soubhagya K. Rout Kenichi Ushijima Mena Bebawy 2015</p>	<p>Rendimiento de los cercos CFRP en vigas T</p>	<p>La fisuración es directamente proporcional al nivel de pretensado y a la relación luz/altura</p>
<p>Cristian Maluk Giovanni Pietro Terrasi Luke Bisby Alex Stutz Erich Hugi 2015</p>	<p>Resistencia al fuego en losas finas pretensadas con CFRP</p>	<p>Se observaron diferentes respuestas en las 5 muestras y eso nos indica del ensayo marcado por la normativa es algo pobre</p>
<p>Jared C. Bymaster Canh N. Dang Royce W. Floyd W. Micah Hale 2015</p>	<p>Pérdidas de pretensado en vigas in-situ</p>	<p>El modelo con LW-SCC (lightweight self-consolidated) experimentó menos retracción que el NW-SCC (normal weight)</p>
<p>Tiejiong Lou Sergio M.R. Lopes Adelino V. Lopes 2015</p>	<p>Estudio comparativo entre pretensado con FRP y cables de acero</p>	<p>Con un alto índice de refuerzo los tendones AFRP tienen un mayor ancho de fisura que en el caso de tendones CFRP</p>

<p>Wit Derkowski 2015</p>	<p>Oportunidades y riesgos de utilizar FRP para refuerzo de estructuras</p>	<p>El pretensado de estructuras con FRP se utiliza muy poco debido a su coste inicial, pero hay que recordar que en el caso de rehabilitación se reduce este.</p> <p>El remplazo o rehabilitación de cables FRP suele ser mucho más rápido.</p> <p>Algunos compuestos FRP solo trabajan correctamente en una dirección, pues en sentido perpendicular de las fibras no son capaces de resistir esfuerzos considerables.</p> <p>Se debe considerar un sistema de anclaje sostenible a la carga de fatiga.</p>
<p>Hamed Fergani Matteo Di Benedetti Maurizio Guadagnini Cyril Lynsdale Cristina Mias 2016</p>	<p>Efectos a largo plazo de barras GFRP bajo cargas combinadas</p>	<p>La temperatura y la humedad han sido los factores que más afectan a la degradación.</p> <p>No se observaron cambios significativos pasados los 90 días de exposición a un ambiente más severo (solución alcalina a 60^a)</p>
<p>Edgaras Atutis Juozas Valivonis Mantas Atutis 2016</p>	<p>Estudio experimental de vigas de hormigón pretensadas con fibras de basalto bajo cargas cíclicas</p>	<p>Las barras BFRP mostraron suficiente resistencia a fatiga.</p> <p>El nivel de pretensado tiene un efecto significativo en la fatiga</p>
<p>Tiejiong Lou Sergio M.R. Lopes Adelino V. Lopes 2016</p>	<p>Respuesta de vigas continuas pretensadas con FRP y tendones de acero</p>	<p>El uso de tendones no adherentes puede prevenir la rotura de vigas de hormigón pretensado.</p>
<p>Brahim Benmokrane Ahmed H. Ali Hamdy M. Mohamed Adel ElSafty Allan Manalo 2017</p>	<p>Rendimiento de durabilidad de viniléster, barras de poliéster y vidrio epoxi-FRP para estructuras de hormigón</p>	<p>Las barras de GFRP mostraron una reducción por inmersión de 17%. Esto indica que la conexión entre fibras y la resina de poliéster es menor que la que se dio entre las fibras de vidrio y la resina epoxy.</p>
<p>Abdeldjelil Belarbi 2017</p>	<p>Guia para el diseño de puentes de hormigón con vigas pretensadas con sistemas CFRP</p>	<p>La mayoría de las disposiciones actuales de AASHTO son aplicables para el CFRP.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Metodología y enfoque de diseño -Pérdidas por fluencia, retracción y acortamiento elástico.

<p>Keller, M.L.a Pahn, M.a Kopietz, M.b Wetzel, B.b 2017</p>	<p>Efectos a largo plazo de barras GFRP en ambiente alcalino</p>	<p>Se confirma una reducción de significativa de la resistencia a la tracción cuando se somete a un ambiente agresivo, magnificado por la carga aplicada</p>
<p>Abdeldjelil Belarbi Mina Dawood Matthias Bowman 2017</p>	<p>Pilas de puentes pretensadas con CFRP</p>	<p>Descubrieron que se podía usar un 25% menos de pretensado CFRP, del diseño inicial, para lograr unas capacidades muy similares</p>
<p>Fei Peng Weichen Xue 2018</p>	<p>Aproximación de diseño de la capacidad a flexión de vigas T con refuerzo FRP pretensado y no pretensado</p>	<p>Se identifican tres tipos de fallos diferentes (rotura de los tendones, rotura de las armaduras FRP, aplastamiento del homrigón)</p>
<p>Saverio Spadea Marco Rossini Antonio Nanni 2018</p>	<p>Comportamiento de las vigas doble T con CFRP</p>	<p>Los tendones CFRP mostraron una eficiencia mecánica similar a la de los tendones de acero.</p>
<p>T.D'Antino M.A. Pisani 2018</p>	<p>Influencia de la tensión sostenida en la durabilidad del GFRP</p>	<p>El nivel de tensión sostenida tiene efecto sobre la relación de tensiones residuales</p>
<p>A.Belarabi M.Redá P.Poudel H.Tahsiri M. Dawood B. Gencturk 2018</p>	<p>Aplicaciones del pretensado con CFRP</p>	<p>La deformabilidad de las vigas postensadas con cables CFRP no adherentes es mayor que en caso de las pretensadas, sin embargo la resistencia obtenida fue menor.</p>
<p>Tan D. Le Thong M. Pham Hong Hao Yifei Hao 2018</p>	<p>Comportamiento a flexión del pretensado no adherente CFRP</p>	<p>La viga pretensada de CFRP con juntas secas se comportó de manera similar a la viga con juntas no adheridas. Las vigas pretensadas de CFRP con epoxi las juntas mostraron una relación lineal de carga y desplazamiento hasta la falla</p>
<p>H. Mazaheripour J.A.O. Barros F. Soltanzadeh J. Sena-Cruz 2018</p>	<p>Flecha y fisuración de vigas armadas con GFRP y acero</p>	<p>El sistema híbrido no mostró una contribución significativa cuando las vigas estaban sobre reforzadas. En términos de deformabilidad se obtuvieron buenos resultados sin una pérdida deflexión de la viga, lo cual da un aumento notable de la ductilidad.</p>

Marco Rossini Antonio Nanni 2019	Cables de materiales compuestos para el pretensado (GFRP)	Las pérdidas durante el anclaje son de entre el 1.6 y el 8.3%
Katarzyna Zdanowicz Renata Kotynia Steffen Marx 2019	Elementos de hormigón con FRP pretensado	En el mercado solo están disponibles dos sistemas de anclaje (Anclaje HEM y anclajes para tendones CFCC) y la única norma para ensayar anclajes es la que aparece en el estándar ACI. Hay la necesidad de desarrollar un estándar para evaluar la ductilidad del hormigón armado con FRP. Debido a los costes de estos materiales los tendones FRP solo son adecuados cuando el coste de mantenimiento es considerable.
Fei Peng Wenyuan Xue Weichen Xue 2020	Análisis de datos de resistencia a cortante de elementos de hormigón con FRP	Para elementos de hormigón sin estribos, el CSA S860 y los métodos de Nehdi et al proporcionan predicciones precisas
Fei Peng Weichen Xue 2021	Comportamiento a cortante de vigas postensadas con FRP sin refuerzo transversal	No se observó rotura del refuerzo FRP debido a la dovela de cortante. Con el aumento de cantidad de barras se observa una disminución en el ancho de fisura y un aumento de la resistencia a flexión.
Fei Peng Weichen Xue 2022	Comportamiento a cortante de vigas postensadas con FRP con armadura de cortante	El aumento de la resistencia a compresión del hormigón en un 42% solo aumenta un 8.6% la resistencia a cortante.
Ning Duan Ji-Wen Zhang Jun Cheng 2023	Vigas continuas con pretensado CFRP externo	El incremento de la tensión del tendón pretensado externo muestra un desarrollo de tres etapas a medida que aumenta la carga externa. El valor de pretensado inicial tiene la mayor influencia en el incremento de pretensado CFRP, seguido por el módulo elástico y la sección transversal

Tabla 1.2.1 Campañas relacionadas con el FRP según artículos y estados del conocimiento

Gracias a estos estudios y ensayos, y a muchos más, se ha ido avanzando para llegar a proyectar las estructuras actuales. Con todos los documentos se pudieron obtener conclusiones sobre el comportamiento a flexión y cortante, durabilidad, tipos de cargas bajo la cuales sufren más, etc.

A modo resumen, tras hacer esta investigación bibliográfica, se pueden sacar conclusiones muy relevantes referentes a los polímeros reforzados con fibras como por ejemplo que las fibras de no se debilitan por los agentes alcalinos, incluso con la penetración de fluidos en las grietas de la matriz de resina. Lo cual corrobora su buen funcionamiento en ambientes agresivos. Luego haciendo más caso al apartado de CFRP tenemos varias conclusiones que nos llevan a lo siguiente. El comportamiento de vigas CFRP pretensadas en comparación con el acero convencional varía un poco en función de la geometría del elemento y la tipología de cargas aplicadas pues varios ensayos y campañas concluyen en que el comportamiento es similar, y otras comentan que este entorno al 15 o 20% por debajo. Habiendo semejanza entre los cables de fibra de carbono y los de acero encontramos que en cuanto a pérdidas instantáneas se encuentran en un mismo rango entre el 1.5 y 10% aproximadamente pero estos primeros requieren de una longitud de anclaje mucho menor que en el caso de acero ya que la tensión transmitida por adherencia es muy superior. Aproximadamente tres veces más.

Alguno más que va muy relacionado con la tipología de estructura proyectada en esta tesis es el uso de polímeros reforzados con fibras de vidrio para el caso de losas. En nuestro caso tenemos una armadura pasiva, tanto en losa como en viga, de GFRP y en principio vamos a obtener una mayor rigidez de la estructura que si utilizáramos la misma ratio de armadura pero en vez de GFRP fuera de acero.

2.3. Guía de diseño

Como ya se comentó anteriormente Estados Unidos, Canadá, Japón y Europa con el EUROCONCRETE son los que más han investigado y desarrollado, por lo cual han sido los primeros en publicar normativa o recomendaciones de diseño.

-Estados Unidos

En el año 1991 fundan el Comité de trabajo ACI 440 y de este grupo de trabajo salen publicaciones como:

- ACI Committee 440, ACI 440R-07 Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2007

- ACI Committee 440, ACI 440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, 2004 (Reaprobado en 2001)

- ACI Committee 440, ACI 440R-96. State-of-the art. Reoport on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1996 (Reaprobado en 2022)

En Estados Unidos también hay la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) que estableció el standard committee dirigido hacia productores de polímeros reforzados con fibras.

Canadá

La sociedad canadiense para la ingeniería Civil (CSCE) se estableció como comité técnico del FRP y en el 87 salieron varias publicaciones como:

Manuales de uso para pretensado interior y exterior

La CSA (Canadian Standard Association) con la CAN/CSA S6-00 para puentes y la CAN/CSA S806-06 para edificios.

Japón

En el año 1987 la Sociedad Japonesa de la Ingeniería Civil (JSCE) crea un comité sobre la investigación de materiales reforzados con fibras. De allí se publicaron los siguientes artículos y recomendaciones:

JSCE Research Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, State of the art report on continuous Fiber reingorcng materials, 1996

La primera guía de FRP

Europa

En el 1993 se inicia el EUROCONCRETE que posteriormente impulsó la creación el FIB TG 9.3 (ahora 5.1) Reinforcement for concrete structures.

Este ha desarrollado los boletines número 10, 14 y 40 referentes al anclaje de refuerzos no metálicos, anclaje externo de refuerzos FRP en estructuras de hormigón armado y refuerzos de FRP en estructuras de hormigón armado respectivamente

2.4. Ejemplos de estructuras con FRP

Gracias a todos estos pasos previos se han podido proyectar estructuras en el mundo de la ingeniería, especialmente puentes como algunos de los siguientes y en donde no siempre se usó este nuevo material compuesto para pretensar. (Ver figuras 2.4.1, 2.4.2, 2.4. y 2.4.4).

Este primer ejemplo de estructura utilizando materiales FRP (Ver Figura 2.4.1) no se relaciona con el uso de cables ni armaduras, sino que la estructura entera está compuesta por fibra de vidrio. Fue una construcción que se finalizó el 1992 en Escocia para conectar las dos mitades de un campo de golf travesado por el río Tay. Su diseño inicial solo contemplaba el uso peatonal, pero más tarde se reforzó con cables CFCC para permitir el uso de vehículos ligeros.



Figura 2.4.1 Aberfeldy Footbridge

Otro ejemplo del uso de materiales FRP en el mundo de la construcción nos lleva a Japón (Ver Figura 2.4.2) con el uso de cables CFCC en una composición de $1 \times 7 \text{Ø}12.5 \text{mm}$ se utilizó para pretensar un puente que estaba en rehabilitación, en 1988, por culpa de la corrosión de los cloruros salinos del mar.



Figure 2.4.2 Shinmiya Bridge

Siguiendo en el país nipón donde se han proyectado gran cantidad de estructuras con armaduras de polímeros esta vez pretensaron una pasarela para unir una instalación marina con un rompeolas (Ver Figura 2.4.3). Para ello utilizaron armadura activa y pasiva de polímeros reforzados con fibra de carbono.



Figure 2.4.3 Haramachi Thermal Power Plant Outfall Bridge

En el caso del Birdie Bridge, en Estados Unidos (Figura 2.4.3) se utilizaron cables CFCC para el tesado de la losa en una composición de $1 \times 7 \varnothing 5 \text{mm}$.

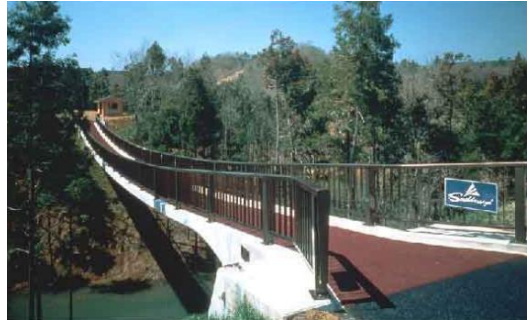


Figure 2.4.3 Birdie Bridge, Souther Yard

2.5. Descripción de los polímeros reforzados con fibras (FRP)

Los polímeros reforzados con fibras son materiales que están formados por un polímero como puede ser poliéster, la poliamida o resina epoxi que forman una matriz donde se colocan fibras de materiales como pueden ser el vidrio (GFRP), el carbono (CFRP), el basalto (BFRP) o la aramida (AFRP) las cuales refuerzan y mejoran las propiedades mecánicas del polímero.

Esta gamma de materiales tiene gran variedad de utilizations prácticas, pues se pueden utilizar en la industria automotriz, la aeronáutica, naval o energética entre otros.

Una de las principales ventajas de estos polímeros reforzados, FRP, es la alta resistencia y su capacidad de soportar con un peso ligeramente bajo cargas muy pesadas. Además tienen la propiedad de poder resistir impactos y vibraciones sin grandes complicaciones.

Resumiendo, estos compuestos de alta resistencia ofrecen una combinación única de propiedades mecánicas ideales para poder solventar gran variedad de problemas que se dan en el mundo de la ingeniería.

Los polímeros reforzados con fibras se clasifican en tres grandes grupos como ya se ha visto en la gran cantidad de artículos que se relacionan en esta tesis y los cuales han permitido el desarrollo de multitud de tesis analíticas y experimentales.

El primer grupo sería el referente a los polímeros reforzados con fibras de vidrio. Estos son resistentes, duraderos y tienen una muy buena resistencia a tracción.

El segundo son los reforzados con fibras de carbono los cuales se van a desarrollar de manera más amplia en otro apartado pero tiene una muy alta resistencia y rigidez algo superior al caso de los reforzados con fibra de vidrio.

El tercer grupo está formado por los polímeros reforzados con aramida el cual es un material resistente a la abrasión y al impacto por lo que la utilización de este es algo diferente a la de los otros dos grupos. Eso no significa que no se puedan usar para un mismo caso sino que el comportamiento ideal o la utilización más adecuada para cada uno de ellos es diferente.

Fuera de estos grupos, que son los tres más comúnmente utilizados existen otros polímeros reforzados con fibras como pueden ser de boro para el caso de aplicaciones aeroespaciales o con fibras de cerámica para mejores comportamientos bajo altas temperaturas.

Seguidamente se muestra una tabla con las propiedades básicas de cada uno de los compuestos. Cabe remarcar que dentro de cada grupo existen multitud de “gammas” como puede ser en el caso de AFRP que hay el Kevlar 29, el 49 o el 149, o en el caso de GFRP que hay el E-Glass o el S-Glass. Seguidamente se muestran algunas de las características de los diferentes polímeros reforzados con fibras (Ver Tabla 2.5.1).

	E (GPa)	Deformación (%)	Peso específico (kg/m ³)
GFRP	70 - 90	≈3	2500
CFRP	200-600	≈1	1950
AFRP	60 - 180	≈3	1440
Acero	200	5-20	7850

Tabla 2.5.1 Comparativa de propiedades de los materiales FRP y el acero

Los cables de fibra de carbono para el pretensado se fabrican mediante un proceso de pultrusión en el que se utilizan varios pasos. A continuación, se describen los pasos principales:

Preparación del filamento: El primer paso en la fabricación de cables de fibra de carbono es la preparación del filamento. El filamento es una fibra larga y delgada de material compuesto de fibra de carbono que se utiliza para construir el cable. El filamento se fabrica a partir de fibras de carbono cortadas y unidas mediante un proceso de hilado o tejido.

Recubrimiento del filamento: Después de la preparación del filamento, se aplica una capa de resina alrededor del filamento. La resina se utiliza para unir los filamentos y proporcionar una capa protectora alrededor del cable terminado.

Trenzado del cable: Una vez que se ha recubierto el filamento, se utiliza un proceso de trenzado para crear el cable de fibra de carbono. El trenzado implica entrelazar los filamentos recubiertos para crear un cable fuerte y resistente.

Curado: Después de trenzar el cable, se somete a un proceso de curado para endurecer la resina y crear un material compuesto rígido y resistente. El proceso de curado implica la exposición del cable a altas temperaturas y presiones para activar la reacción química que endurece la resina.

Corte y terminación: Una vez que se ha curado el cable, se corta en longitudes específicas y se prepara para su uso en el pretensado. Se agregan terminales al cable para facilitar su instalación y anclaje en la estructura.

En las siguientes figuras 2.5.1 y 2.5.2 se muestra el esquema interno y la forma final de las armaduras FRP.

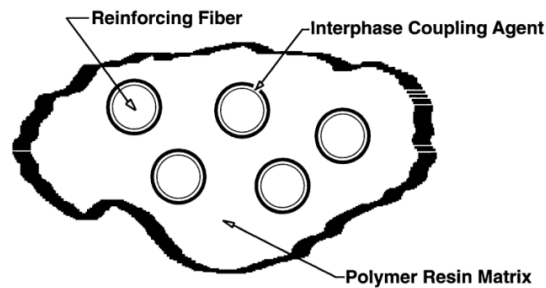


Figura 2.5.1 Esquema interno para la formación de las armaduras FRP

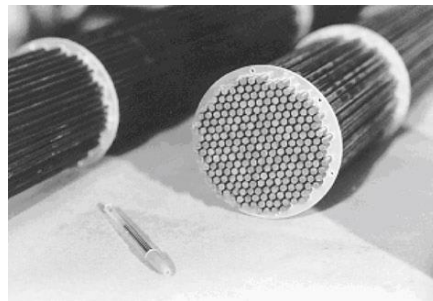


Figura 2.5.2 Cables FRP

En resumen, los cables de fibra de carbono para el pretensado se fabrican utilizando una combinación de procesos de hilado, recubrimiento, trenzado, curado y terminación. El resultado final es un material compuesto resistente y duradero que se utiliza para fortalecer y estabilizar las estructuras de concreto.

2.5.1. Pretensado con cables de fibra de carbono

El pretensado con cables de fibra de carbono es una técnica de refuerzo estructural que ha sido objeto de numerosos análisis y ensayos en las últimas décadas. Ha habido de múltiples tipos como por ejemplo de capacidad resistente, de durabilidad o de fatiga.

-Análisis de fatiga: Las estructuras reforzadas con cables de fibra de carbono están sujetas a ciclos de carga repetidos que pueden causar fatiga y eventual falla. Por lo tanto, es importante realizar análisis de fatiga para determinar la vida útil de las estructuras reforzadas y establecer estrategias de mantenimiento.

·Pablo Zuluaga Ramírez, *Fatiga en CFRP, Caracterización y método óptico para la estimación del daño*, 2015

-Estudios de durabilidad: Los cables de fibra de carbono son muy resistentes y duraderos, pero es importante evaluar su comportamiento a largo plazo en diferentes condiciones ambientales. Los estudios de durabilidad se centran en la evaluación del desempeño de los materiales en diferentes ambientes, como la exposición a la humedad, el calor, la corrosión, entre otros.

·Francesco Micelli y Antonio Nanni, *Durabilidad de las varillas FRP en estructuras de hormigón*, 2004

-Análisis de la capacidad (comportamiento a flexión, cortante o deformabilidad): Se han realizado numerosos estudios para determinar la capacidad de carga de las estructuras reforzadas con cables de fibra de carbono. Estos estudios incluyen la evaluación de la resistencia a la tracción y a la flexión de los cables de fibra de carbono, así como la capacidad de las estructuras reforzadas para soportar cargas adicionales.

·Amir Z. Fam, *Pretensado con CFRP y armadura a cortante para puentes de carretera*, 1995

· Mirpayam Nabipaylashgari, *Resistencia a cortante de vigas pretensadas con CFRP*, 2012

· A.Belarabi, M.Redha, P.Poudel, H.Tahsiri, M. Dawood y B. Gencturk, *Aplicaciones del pretensado con CFRP*, 2018

-Estudios de campo: Se han realizado ensayos de campo en diferentes tipos de estructuras, como puentes, edificios y torres, para evaluar la eficacia del refuerzo con cables de fibra de carbono en la mejora de su capacidad de carga y resistencia.

-Estudios de comportamiento sísmico: Las estructuras reforzadas con cables de fibra de carbono pueden mejorar su resistencia y comportamiento sísmico. Los estudios se centran en la evaluación del comportamiento dinámico y la capacidad de absorción de energía de las estructuras reforzadas con cables de fibra de carbono durante un evento sísmico.

·R. Cuzzilla, M. Di Ludovico, A. Prota y G. Manfredi, *Seismic Rehabilitation of RC Bridges by Using FRP and SRP*, 2010

En general, los estudios y ensayos realizados han demostrado que el refuerzo con cables de fibra de carbono es una técnica efectiva y confiable para mejorar la capacidad de carga y resistencia de las estructuras. Sin embargo, es importante realizar un análisis detallado de cada caso en particular y seguir las pautas de diseño y construcción adecuadas para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras reforzadas.

Seguidamente se podrá observar una tabla con los proyectos que se han desarrollado con este tipo de cables ya sean para tesar o para otros usos (Ver Tabla 2.5.1.1) y algunos ejemplos de aplicación de estos (Figura 2.5.1.1)

Proyectos con cables CFRP	
1988 – Puente de Shinmiya	Pretensado CFRP en las vigas del puente
1990 - Birdie Bridge,	Se utilizó CFCC para el encofrado de la losa
1993 – Puente en Hisho	Primera aplicación de cables CFRP
1999 – Puente Hanshin Expressway (Japan)	
2001 – Bridge Street Bridge (Michigan)	Se construyeron dos puentes iguales, uno con cables CFRP y otro con acero de pretensar
2007 – Penobscot Narrow Bridge (Maine)	Primer puente atirantado con cables CFRP
2011 – Pembroke Bridge (Detroit)	Primer puente con postensado transversal de CFRP y con viga cajón

2012 – M-50 Bridge (Jackson)	El segundo usando postensado con cables CFRP
2012 – Little Pond Bridge (Fryeburg)	Primer pretensado transversal CFRP en placas alveolares
2013 – Puente de la M102 sobre Plum Creek (Michigan)	Uso de cables CFRP en la losa de un puente
2014 – Puente en la ruta estatal 234 (Maine)	Primer puente prefabricado pretensado con CFRP (pretensado longitudinal)
2014 – I-94 Bridges (Pont Huron)	Primer uso de postensado con cables CFRP en una carretera interestatal
2014 – Nimmo Parkway bridge (Virginia)	Uso de tendones CFRP para pretensar las columnas de un puente
2014 – I-10 New Orleans East Griders Repair	Primera reparación de un puente de hormigón.
2014 – Puente sobre la ruta 49 (Virginia)	Primer puente con CFRP del departamento de transporte de Virginia.
2014 – Puente sobre la KY70 (Kentucky)	Reparación de un puente con vigas I “híbridas” (Acero y CFRP)
2015 – Puente en la Universidad de Miami	Puente peatonal con CFRP (proyectado para una vida útil de 75 años)

Tabla 2.5.1.1 Algunos proyectos realizados con cables CFRP



Figura 2.5.1.1 Penobscot Narrow Bridge / Pembroke Bridge / Paso de cables CFRP en el puente de la M-50

Todos estos proyectos descritos previamente son fruto de años de investigación y experimentos de laboratorio con cables, vigas, armaduras, análisis de durabilidad y muchas horas de estudios y modelos numéricos. Todos ellos han aportado información que a base de ser recopilada ha permitido a proyectistas y calculistas poder tomar la decisión de diseñar una estructura pretensada o postensada con cables con fibras de polímeros.

2.5.1.1. *Ventajas del pretensado con CFRP*

El postensado con cables de fibra de carbono tiene varias ventajas, algunas de las cuales se detallan a continuación:

-Durabilidad: Los cables de fibra de carbono son resistentes a la corrosión, lo que los hace adecuados para su uso en ambientes agresivos, como en estructuras en contacto con el agua o en zonas de alta humedad.

-Alta resistencia: Los cables de fibra de carbono tienen una alta resistencia específica, lo que significa que pueden soportar cargas más altas en relación con su peso en comparación con otros materiales de refuerzo. Además se ha podido observar que su comportamiento a fatiga es muy bueno, mejor que el del acero.

-Propiedades magnéticas inexistentes: Al no ser un material ferrítico sus propiedades magnéticas son nulas lo que nos ayuda a evitar interferencias electromagnéticas por si nos encontramos cerca de equipos de alta precisión.

-Similitud al acero en cuanto a propiedades: Los cables de fibra de carbono tras números ensayos y análisis se ha podido determinar que sus propiedades mecánicas son muy parecidas a las de los aceros convencionales de pretensar, lo cual nos permite hacer aproximaciones en cuanto a diseño.

-Baja expansión térmica: La fibra de carbono tiene una baja expansión térmica debido a su estructura molecular y a las propiedades químicas del carbono. En la estructura de la fibra de carbono, los átomos de carbono están unidos mediante enlaces covalentes muy fuertes, formando largas cadenas moleculares. Estas cadenas se organizan en una disposición de capas planas, llamadas grafenos, que se apilan unas encima de otras formando un material laminar. Esta estructura laminar es muy regular y simétrica, lo que permite que la fibra de carbono tenga una expansión térmica muy baja.

-Mejora de la capacidad de carga: El postensado con cables de fibra de carbono puede mejorar significativamente la capacidad de carga de una estructura existente sin requerir una gran modificación de la estructura original.

-Mejora de la estética: Los cables de fibra de carbono son delgados y discretos, lo que significa que no se requieren grandes modificaciones estructurales o estéticas para su instalación.

-Bajo impacto ambiental: La producción de los cables de fibra de carbono genera una huella de carbono menor en comparación con otros materiales de refuerzo.

En resumen, el postensado con cables de fibra de carbono ofrece una serie de ventajas, como alta resistencia, durabilidad, fácil instalación y mejora de la capacidad de carga, lo que lo hace una opción atractiva para la reparación, rehabilitación y mejora de estructuras existentes y esto hace que sea una de las tecnologías más prometedoras de la actualidad.

2.5.1.2. Desventajas del pretensado con CFRP

A pesar de sus ventajas, el uso de cables de fibra de carbono para el postensado también presenta algunas desventajas potenciales:

-Sensibilidad a los rayos UV: La exposición prolongada a la luz solar puede degradar los materiales compuestos de fibra de carbono, lo que puede disminuir su resistencia y durabilidad. Esto puede limitar su uso en aplicaciones exteriores a largo plazo.

-Costo: Los cables de fibra de carbono pueden ser significativamente más costosos que los materiales de postensado tradicionales, como el acero. Esto puede aumentar el costo total del proyecto de construcción o de reparación.

-Requerimientos de instalación: La instalación de cables de fibra de carbono para el postensado puede requerir técnicas de instalación y herramientas especializadas, lo que puede aumentar los costos y la complejidad del proyecto.

-Problemas de adherencia: Los cables de fibra de carbono pueden tener dificultades para adherirse a ciertos materiales, como el concreto, lo que puede afectar la efectividad del postensado.

-Problemas de compatibilidad: Los materiales compuestos de fibra de carbono pueden no ser compatibles con algunos adhesivos, selladores y recubrimientos, lo que puede afectar la durabilidad y la resistencia del sistema de postensado.

En resumen, aunque el postensado con cables de fibra de carbono tiene muchas ventajas, también hay desventajas potenciales a considerar, como el costo, la sensibilidad a los rayos UV, los requisitos de instalación, los problemas de adherencia y los problemas de compatibilidad. Estas desventajas pueden limitar el uso de los cables de fibra de carbono en ciertas aplicaciones de postensado.

2.6. Conclusiones del estado del conocimiento

Tras la investigación de información referente a los polímeros reforzados con fibras ha habido una enorme sorpresa al ver la cantidad de campañas y fases experimentales que se han dedicado a evaluar el comportamiento de dichos materiales bajo la multiplicidad de estados, cargas o entornos. Esto demuestra que el futuro depara grandes éxitos para esta tipología de sistema y que su implantación bajo una normativa y con unas adecuadas guías de diseño puede revolucionar el mundo de la construcción tanto en el uso de estos como armadura activa como pasiva.

Queda mucho por recorrer y hay que continuar investigando sobre elementos con FRP porque hay muy poca experimentación y sin estudios previos que avalen el comportamiento no es posible desarrollar normativas y guías de diseño que puedan ser utilizadas por ingenieros y proyectistas de estructuras.

3. Campaña experimental

En el contexto del pretensado con FRP (Fiber Reinforced Polymer, o polímero reforzado con fibras), una campaña experimental se refiere a un conjunto de pruebas y ensayos llevados a cabo para evaluar la eficacia y el comportamiento de los materiales y técnicas de pretensado con FRP.

Antes de implementar el pretensado con FRP en una estructura real, es común realizar estudios que avalen la técnica, en particular campañas experimentales. Durante la campaña, se llevan a cabo una serie de pruebas en muestras o elementos estructurales a escala reducida o real para evaluar la eficacia del FRP y optimizar el diseño de la tecnología que acompaña al avance.

Estas pruebas pueden incluir la aplicación de cargas estáticas y cíclicas para evaluar la resistencia, la deformación y el comportamiento del FRP. También se pueden realizar pruebas de durabilidad para evaluar la resistencia del material frente a condiciones ambientales, como la exposición a la humedad o a agentes químicos.

La campaña experimental proporciona datos y resultados que permiten determinar la viabilidad y el rendimiento del pretensado con FRP en la estructura en consideración. Además, ayuda a definir parámetros de diseño, como las características del tendón de FRP, la cantidad de pretensado requerida y la distribución de las fuerzas de pretensado.

3.1. Objeto de estudio

El objeto de estudio de este trabajo se basa en un tablero de puente continuo de dos vanos construido en dos fases.

En la primera fase, realizada en la planta de prefabricados Alvipre, se fabrican y pretensan las vigas doble T con armadura pretensa formada por cables de fibra de carbono (CFCC suministrados por TokyoRope) y con armadura pasiva de fibra de vidrio (GFRP), salvo la zona de anclaje y de macizado, donde la armadura es de acero. En la segunda fase, se realiza el postensado para asegurar la continuidad de la estructura y el hormigonado de la losa superior con su correspondiente armadura GFRP. Esta segunda fase se realiza en la ubicación definitiva de los elementos que van a ser ensayados, en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales (LATEM) de la Universitat Politècnica de Catalunya. Una vez colocadas las vigas en la posición definitiva y hormigonada la losa de compresión se realizarán dos ensayos hasta rotura, uno a flexión y otro a cortante.

3.2. Geometría

La geometría propuesta para este estudio es el de un tablero continuo de dos vanos, cada uno de ellos formado por dos vigas de sección doble T de 0.30 m de canto y con una losa superior de 0.10 m de espesor.

La luz de ambos vanos está fijada en 6.20 m. La zona guardando un espacio en el apoyo central de 2m para el hormigonado de un diafragma el cual albergará unas vainas para un futuro postensado con cables de acero para asegurar la continuidad en la pasarela. (Ver Figuras 3.2.1 y 3.2.2)

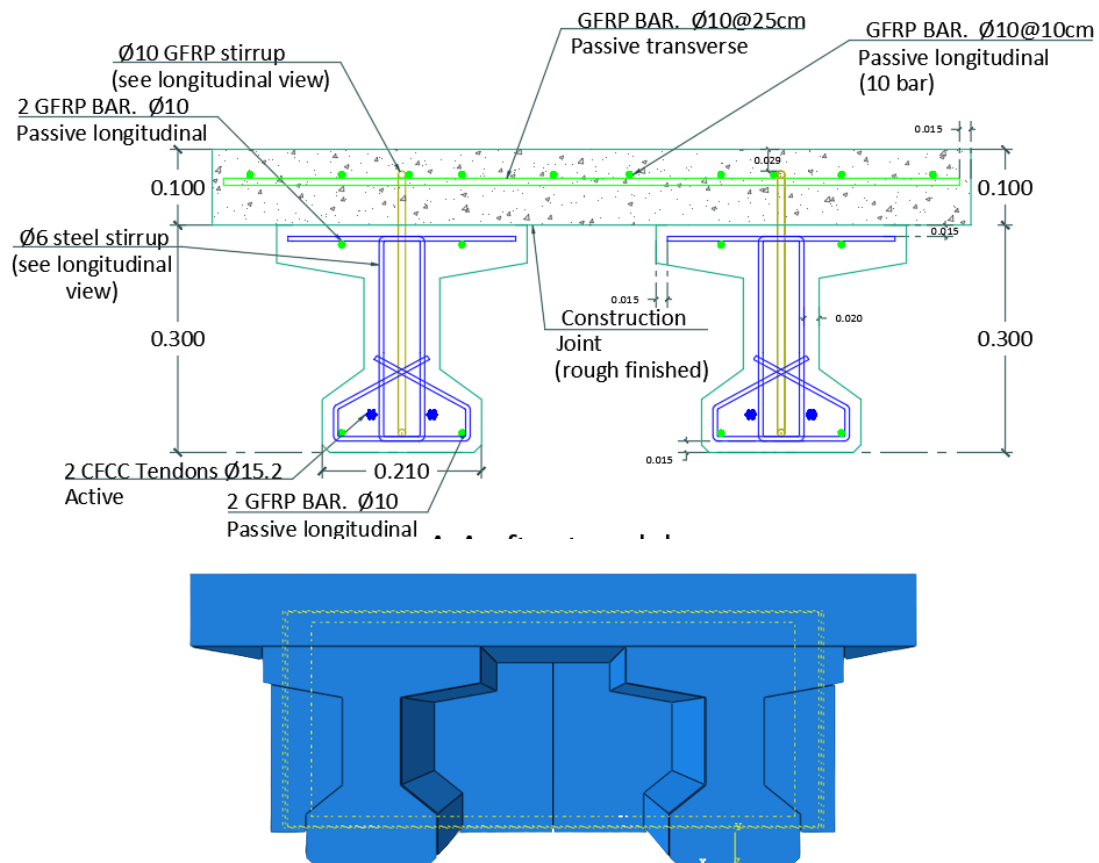


Figura 3.2.1 Geometría transversal de las vigas doble T y la losa propuesta

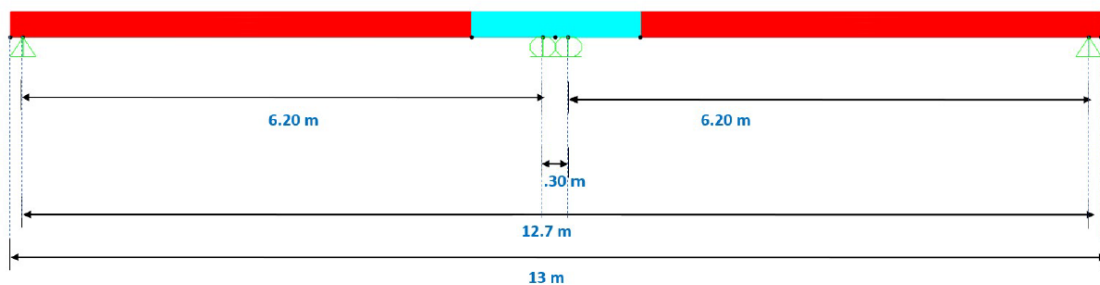


Figura 3.2.2 Esquema longitudinal de la pasarela continua

3.3. Materiales

3.3.1. Hormigón

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo de la construcción debido a su durabilidad y resistencia principalmente bajo esfuerzos de compresión. Este se compone por una mezcla de cemento, grava, arena y agua, que se endurece y se convierte en un material sólido.

La calidad del hormigón utilizado para la fabricación de vigas es crucial para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura por lo que es importante que los materiales sean de la calidad adecuada y este compuesto se dimensiona bajo unas capacidades adecuadas a la tipología de hormigón a utilizar.

3.3.1.1. Características principales

Las características principales del hormigón son la resistencia a compresión, en cambio a tracción es un material que no se comporta bien por lo que hay que reforzar esas zonas con armaduras, la durabilidad, es otro de sus puntos fuertes lo que lo hace ideal para construcciones tanto interiores como exteriores, su bajo coste en comparación a otros materiales de construcción y su facilidad de uso lo hacen un material muy competitivo y además el hormigón tiene una alta capacidad de aislamiento.

Para la campaña experimental que se va a modelar en este trabajo, las vigas se han diseñado con un hormigón de resistencia a compresión característica de 60MPa, la losa de compresión se ejecutará con hormigón de resistencia característica 50 MPa. La resistencia de las vigas se ha fijado así para absorber las compresiones generadas por las fuerzas generadas por el sistema de pretensado y postensado de continuidad. En relación a la losa, se quiere alcanzar una resistencia a compresión a los pocos días para cumplir con el plan de tesado.

Seguidamente se especifican las características del hormigón utilizado para la ejecución de las vigas doble T y la losa superior de la pasarela. Estas se obtienen siguiendo la formulación del Eurocodigo 2 (EC2) que en este caso son idénticas a las del nuevo Código Estructural (CodE).

$$f_{ck} = 60MPa$$

$$f_{ck_2} = 35MPa \text{ (resistencia al momento de transmitir el pretensado)}$$

$$f_{cm} = 68MPa = f_{ck} + 8MPa$$

$$f_{ct} = 4.539MPa = 2.21 \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{f_{ctm}}{10} \right) \right)$$

$$E_c = 39099.87MPa = 22 \cdot \left[\left(\frac{f_{ctm}}{10} \right) \right]^{0.3}$$

Durante la fabricación de las vigas en las instalaciones de Alvipre, se ejecutaron 12 probetas por viga para realizar los ensayos a los 28 días y el día del ensayo. Los resultados de los ensayos a compresión de tres probetas por viga a los 28 días dieron los resultados. (Ver Table 3.3.1.1.1).

Viga C	1	56.329MPa
	2	65.945MPa
	3	67.05MPa
Viga D	1	59.590MPa
	2	65.98MPa
	3	66.89MPa

Tabla 3.3.1.1.1 Tabla de resistencias del hormigón de las vigas en base a las probetas según Alvipre

3.3.2. Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono, que también puede incluir otros elementos como el manganeso, cromo y níquel dependiendo de las propiedades y aplicaciones requeridas.

El acero es un material duradero y muy resistente que se utiliza en muchas aplicaciones como la construcción de puentes, edificios y automóviles hasta la fabricación de elementos para el uso personal como herramientas de cocina.

En este caso utilizaremos acero de dos tipos distintos, un acero en forma de corrugado B500 para ciertas armaduras pasivas y un acero de pretensar el cual utilizaremos para dotar de continuidad a la pasarela con un postensado no adherente en la zona del apoyo central de nuestra pasarela.

3.3.2.1. Características principales del acero

El acero utilizado para armaduras en la construcción, conocido como acero de refuerzo o acero de armadura, tiene varias características principales que lo hacen adecuado para este propósito. Estas características incluyen la alta resistencia, pues es un material que a tracción se comporta mucho mejor que otros materiales de construcción, la ductilidad, lo que lo permite que la estructura absorba y redistribuya la energía bajo cargas de sismo por ejemplo, la adherencia, lo que permite que el acero y el hormigón formen una conexión efectiva que permita la transferencia de esfuerzos.

3.3.2.2. Acero de armaduras pasivas

La intención inicial era utilizar solamente armaduras FRP pero por dificultades geométricas, sobre todo en el doblado de barras no se ha podido llevar a la fase de construcción lo inicialmente proyectado. En la zona de anclaje del preensado también se ha optado por usar este tipo de armadura tradicional y no complicar más el ensayo con armaduras de polímeros ya que esta no es una tesis para estudiar el comportamiento de la zona de anclaje concretamente sino del comportamiento a flexión de un tablero continuo. La Figura 3.3.2.2.1 y 3.3.2.2.2 muestran el detalle de armado del diafragma donde se puede observar la armadura de acero. Las armaduras que no se indica que son de acero son de GFRP, son barras Glassprees suministradas por Sireg, de las cuales se exponen sus características en el siguiente subapartado.

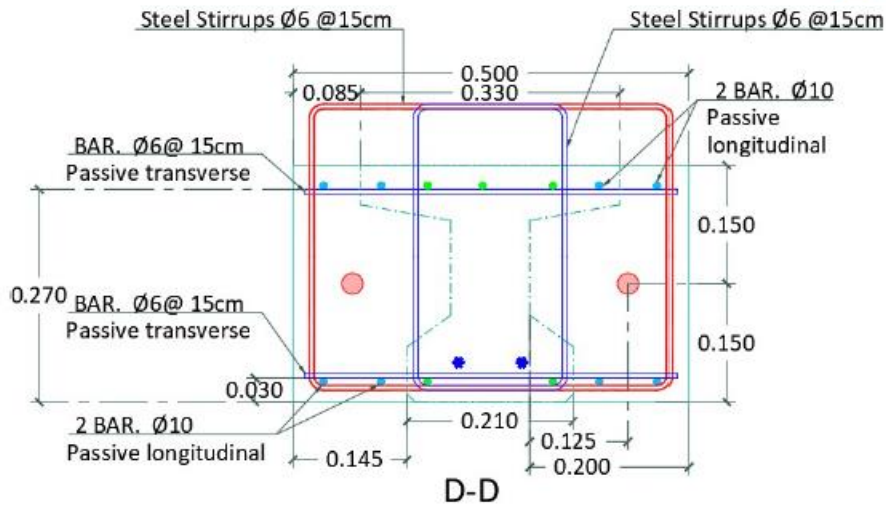


Figura 3.3.2.2.1 Armadura del diafragma

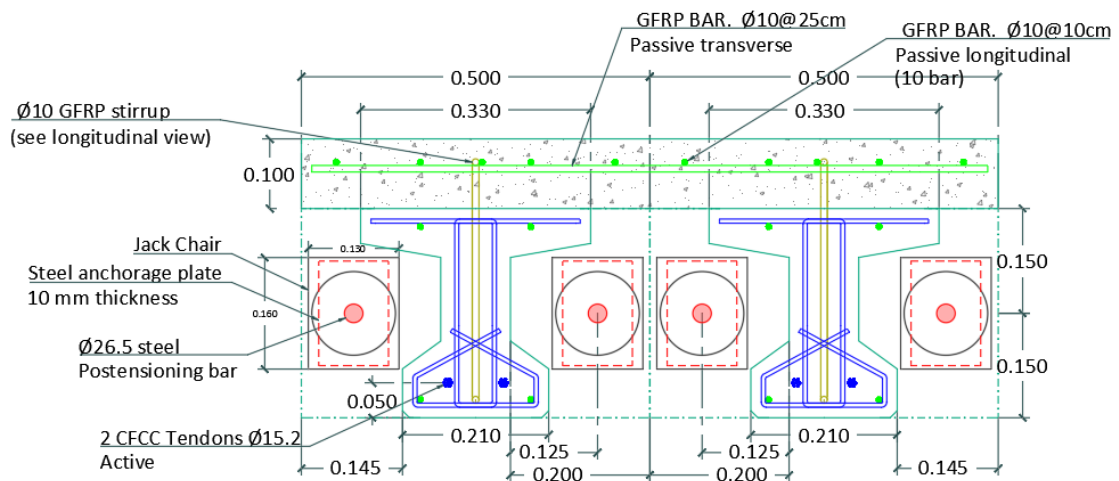


Figura 3.3.2.2.2 Sección y armadura de la sección compuesta

En este caso para las armaduras transversales del diafragma y aquellas con una geometría más compleja de la pasarela se usarán barras corrugadas B500SD con las siguientes características mecánicas mínimas. (Ver Figura 3.3.2.2.3).

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS MÍNIMAS DE BARRAS CORRUGADAS				
Tipo de acero	Acero soldable		Acero soldable con características especiales de ductilidad	
	Designación	B 400 S	B 500 S	B 400 SD
Límite elástico, f_y (N/mm ²) (1)	≥ 400	≥ 500	≥ 400	≥ 500
Carga unitaria de rotura, f_s (N/mm ²) (1)	≥ 440	≥ 550	≥ 480	≥ 575
Alargamiento de rotura, $\epsilon_{u,5}$ (%)	≥ 14	≥ 12	≥ 20	≥ 16
Alargamiento total bajo carga máxima, ϵ máx (%)	≥ 5,0	≥ 5,0	≥ 7,5	≥ 7,5
Relación f_s/f_y (2)	≥ 1,05	≥ 1,05	$1,20 \leq f_s/f_y \leq 1,35$	$1,15 \leq f_s/f_y \leq 1,35$
Relación f_y real / f_y nominal	---	---	≤ 1,20	≤ 1,25

Figura 3.3.2.2.3 Características de las barras de acero

3.3.2.3. Acero para postensado

En esta campaña se ha proyectado un postensado con acero en la zona del apoyo central para dotar de continuidad la pasarela (Ver Figura 3.3.2.3.1). Como no es una parte importante para el estudio, sino que la importante es el comportamiento a flexión de los vanos se decidió realizar con un material seguro cuyo conocimiento fuera suficiente como para no poner en riesgo el experimento y cumplir con creces los valores calculados con anterioridad.

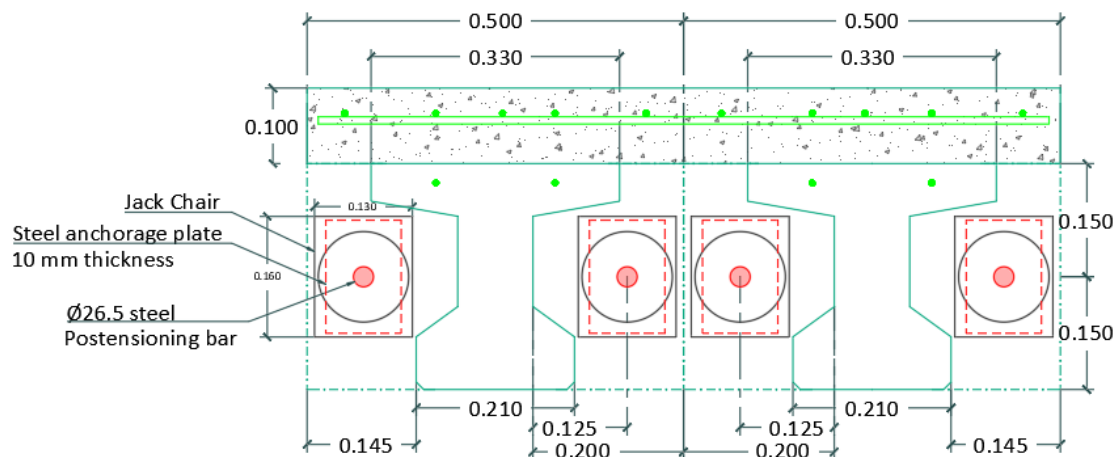


Figura 3.3.2.3.1 Detalle del postensado de continuidad

Datos del fabricante

Seguidamente se muestran los datos proporcionados por el fabricante de los tendones de acero para el postensado de continuidad en la figura 3.3.2.3.2

Referencia	D.Nominal (mm)	D.Máximo (mm)	Sección (mm ²)	Peso (kg/m)	Paso de rosca (mm)	Carga Rot. kN	Carga Elást. 0,1% kN	Gato de tesado
MKY1050H26	26,5	31	551	4,48	13	580	525	MH-77

Figura 3.3.2.3.2 Características de los tendones para el postensado

$$\varnothing = 26.5mm$$

$$a = 551.546mm^2$$

$$E = 200000MPa$$

$$P_u = 580kN$$

$$f_u = 1051,6MPa = \frac{P_u}{a}$$

$$\rho = 8122kg/m^3$$

3.3.3. Fibra de vidrio

Las armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) están compuestas de fibras de vidrio embebidas en una resina sintética para crear una matriz sólida y resistente.

La fibra de vidrio utilizada en estas armaduras es un material compuesto, que combina la resistencia y rigidez del vidrio con la flexibilidad y la capacidad de absorción de impactos de las resinas. Las fibras de vidrio se presentan en forma de hilos o tejidos y se disponen en capas superpuestas para proporcionar una estructura resistente.

La resina utilizada en las armaduras de fibra de vidrio es típicamente una resina termo endurecible o termoestable, como la resina de poliéster o la resina de epoxi. Estas resinas se aplican sobre las fibras de vidrio y luego se endurecen mediante un proceso de curado, en el cual se somete a la armadura a calor o se utiliza un endurecedor químico.

Las armaduras de fibra de vidrio son conocidas por su alta resistencia, rigidez y durabilidad, así como por su peso ligero en comparación con otros materiales utilizados en la construcción de estructuras similares, como el acero. Además, las armaduras de fibra de vidrio son resistentes a la corrosión y pueden ser moldeadas en diferentes formas y tamaños, lo que las hace versátiles y adecuadas para una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción de embarcaciones hasta la fabricación de componentes para la industria automotriz y aeroespacial.

Para esta campaña se ha utilizado la armadura con fibras de vidrio (GFRP) como armadura pasiva. El hecho de proponer su uso provocó tener que investigar un poco sobre su comportamiento y el modo de uso para este tipo de casos. Gracias a esto se detectó que las armaduras de fibra de vidrio no se pueden doblar del mismo modelo que las de acero convencional y esto produjo un cambio en la disposición de las armaduras de cortante. Más adelante se pueden ver las disposiciones de dicha armadura el tipo de plegado que se debe utilizar para no debilitar y/o llegar a romper dicha armadura.

El suministro de este tipo de armadura en forma de barras rectas, pero también se pueden doblar si se realiza el doblado durante el proceso de curado de la resina. Debido a la cristalización de la resina una vez endurecida, no se puede realizar el doblado. Además, el radio de giro o de

doblado de estas barras ha de ser mayor al del acero convencional, del orden de 7 veces el diámetro de la armadura.

El primer modelo de esta campaña era con una viga cajón y la intención inicial era realizar un cerco que cerrara la sección pero debido a los radios de doblado no se pudo hacer de este modo (Ver Figura 3.3.3.1 y 3.3.3.2). Así pues se pensó en utilizar la misma tipología geométrica, cercos, pero disponiéndolos en las almas de la sección para así cumplir con el refuerzo a cortante. Luego por las alas inferiores y superiores se pasarían barras en sentido longitudinal y transversal para cumplir con el refuerzo.

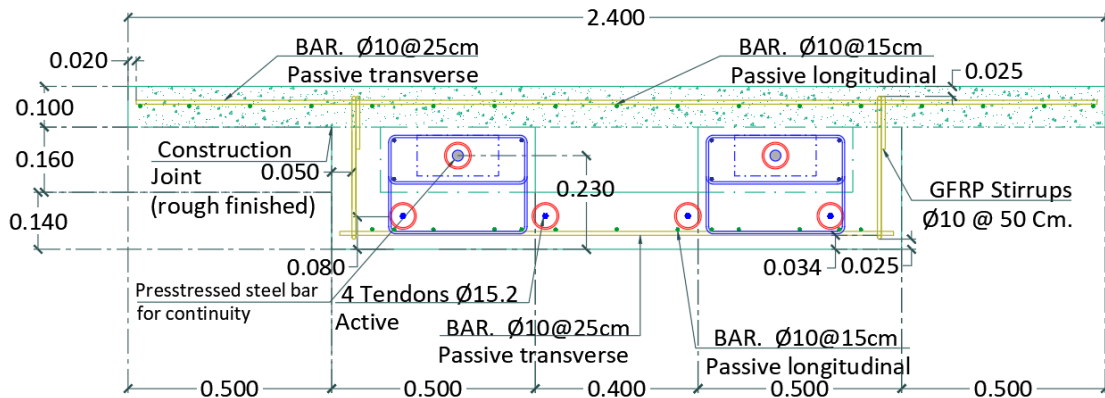


Figura 3.3.3.1 Sección transversal de la primera geometría proyectada

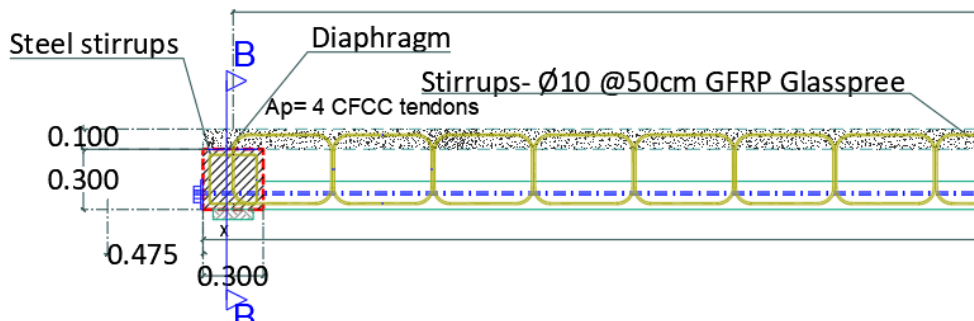


Figura 3.3.3.2 Sección longitudinal de la primera geometría proyectada

Más adelante por problemas técnicos se descartó esta tipología de puente. Se pasó a dos vigas sección doble T en cada vano pero se mantuvo la tipología de armadura GFRP. (Ver Figura 3.3.3.3)

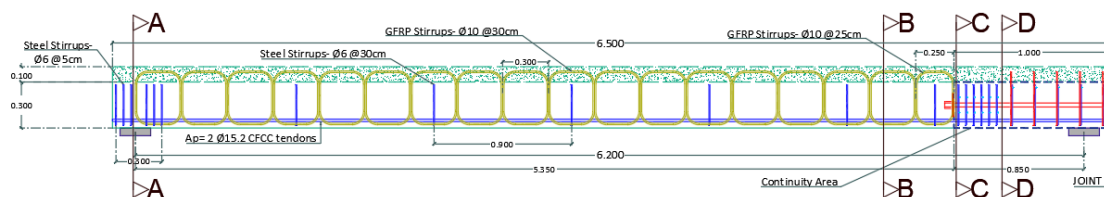


Figura 3.3.3.3 Sección longitudinal de la geometría final

El proveedor de estas barras de fibra de vidrio es SIREG GEOTECH S.r.l., una empresa italiana especializada en los campos de al geotécnica y la ingeniería civil. Esta proporcionó las propiedades mecánicas nominales de sus armaduras.

3.3.3.1. Datos técnicos del fabricante

Barras de fibra de vidrio obtenidas por proceso de pultrusión impregnado con resina viniléster, para ser utilizada como armadura pasiva o activa en hormigón. Con las siguientes características mostradas en la Figura 3.3.3.1.1.

Round Straight Bars	Bar designation	Nominal Bar Diameter	Nominal Bar Area	f_{tu} – Guaranteed Tensile Strength = f_{tk} – Characteristic Tensile Strength	E_t – Tensile Elastic Modulus	Ultimate Strain	Minimum Guaranteed Ultimate Tensile Force	Linear Weight *
Glasspree 6 mm	M6 - #2	6.3 mm	32 mm ²	900 MPa	46 GPa	1.9%	> 27 kN	50 g/m
Glasspree 8 mm	M8	8.0 mm	50 mm ²	900 MPa	46 GPa	1.9%	> 45 kN	100 g/m
Glasspree 10 mm	M10 - #3	9.5 mm	71 mm ²	900 MPa	46 GPa	1.8%	> 59 kN	150 g/m
Glasspree 13 mm	M13 - #4	12.7 mm	129 mm ²	850 MPa	46 GPa	1.6%	> 96 kN	260 g/m
Glasspree 16 mm	M16 - #5	15.9 mm	199 mm ²	800 MPa	46 GPa	1.6%	> 130 kN	390 g/m
Glasspree 20 mm	M19 - #6	19.1 mm	284 mm ²	780 MPa	46 GPa	1.5%	> 182 kN	610 g/m
Glasspree 22 mm	M22 - #7	22.2 mm	387 mm ²	750 MPa	46 GPa	1.4%	> 241 kN	740 g/m
Glasspree 25 mm	M25 - #8	25.4 mm	510 mm ²	750 MPa	46 GPa	1.3%	> 297 kN	950 g/m
Glasspree 30 mm	M29 - #9	28.7 mm	645 mm ²	600 MPa	46 GPa	1.3%	> 365 kN	1370 g/m
Glasspree 32 mm	M32 - #10	32.3 mm	819 mm ²	580 MPa	46 GPa	1.2%	> 437 kN	1560 g/m
Glasspree 35 mm	M35 - #11	34.9 mm	957 mm ²	580 MPa	46 GPa	1.2%	> 517 kN	1980 g/m
Glasspree 38 mm	M38 - #12	38.1 mm	1139 mm ²	580 MPa	46 GPa	1.2%	> 622 kN	2210 g/m
Glasspree 40 mm	M40 - #13	40.0 mm	1256 mm ²	580 MPa	46 GPa	1.2%	> 687 kN	2440 g/m

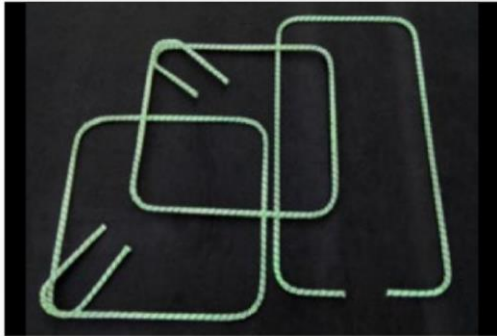
Figura 3.3.3.1.1 Características de las barras GFRP proporcionada por el fabricante

En la Figura 3.3.3.1.1 se puede observar que este tipo de armadura tiene un límite de rotura superior al del acero B500 SD y un módulo de elasticidad del orden de una cuarta parte. Esto teniendo un peso específico de solo 1950kg/m³. Este material es elástico línea y no es tan rígido como el acero pero que falla por rotura a una carga más elevada.

Como se ha comentado anteriormente el problema con el radio de doblado es el propio fabricante quien especifica cuales deben ser los óptimos para no poner en riesgo las propiedades de las barras de fibra de vidrio. (Ver Figura 3.3.3.1.2). Aconsejas seguir tales recomendaciones para que la resistencia en a la zona de doblado es bastante menor si el radio es pequeño, por eso hay que controlar este parámetro ya que pueden llegar a romper las fibras en esa zona.

Bent Bars and Stirrups	Bar designation	Inside Bend Radius	Nominal Bar Diameter	Nominal Bar Area	Ultimate Tensile Force of Bent Portion of Bar	Elastic Modulus
Glasspree FL 13 mm	M13 - #4	> 75 mm	12.7 mm	129 mm ²	59 kN	46 GPa
Glasspree FL 16 mm	M16 - #5	> 75 mm	15.9 mm	199 mm ²	71 kN	46 GPa
Glasspree FL 20 mm	M19 - #6	> 110 mm	19.1 mm	284 mm ²	89 kN	46 GPa
Glasspree FL 25 mm	M25 - #8	> 125 mm	25.4 mm	510 mm ²	111 kN	46 GPa

Other types on request



Bent Bars and Stirrups

Figura 3.3.3.1.2 Consideraciones del plegado de barras proporcionadas por el fabricante

3.3.4. Armadura activa de polímeros reforzados con fibra de carbono (Tendones CFCC)

Los tendones CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) son cordones o varillas fabricadas con polímeros reforzados con fibra de carbono. Estos tendones están diseñados para proporcionar refuerzo estructural en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia y rigidez, ya que como armadura activa se pretensan para comprimir a la sección.

La fibra de carbono utilizada en los tendones CFRP consiste en filamentos de carbono extremadamente delgados y fuertes que forman una estructura sólida. Estos filamentos de carbono se impregnan con una resina polimérica, como la resina epoxi, que actúa como matriz para mantener las fibras de carbono unidas y distribuir las cargas a lo largo de la longitud del tendón.

Los tendones CFRP son conocidos por su alta relación resistencia-peso, lo que significa que son mucho más livianos que los materiales tradicionales utilizados para el refuerzo estructural, como el acero. Sin embargo, a pesar de su peso ligero, los tendones CFRP son excepcionalmente fuertes y rígidos, lo que los hace ideales para aplicaciones donde se requiere una alta resistencia a la tracción, como en la construcción de puentes, edificios, estructuras marítimas y aeroespaciales.

Además de su resistencia, los tendones CFRP también ofrecen otras ventajas, como su resistencia a la corrosión y su capacidad para resistir cargas cíclicas y fatiga. Estas características hacen que los tendones CFRP sean una opción popular para mejorar y reforzar la capacidad estructural de las infraestructuras existentes o para construir nuevas estructuras más livianas y eficientes.

El propósito final de esta campaña es aportar datos relacionados con el comportamiento de los tendones CFRP. Para esta se han propuesto unos trazados rectos de 6.50m metros de longitud, media pasarela, que se pretensaran una vez el hormigón de las vigas haya logrado la resistencia necesaria.

En una campaña experimental previa se intentó pretensar barras de CFRP pero debido a problemas en el anclaje únicamente se pudo pretensar al 23% de su resistencia última cuando teóricamente se habría podido llegar al 65% de su tensión. Para poder alcanzar una fuerza de pretensado mayor se ha optado en esta campaña experimental por utilizar tendones de siete cordones fabricados por la empresa TokyoRope. Dado que existen más aplicaciones de este tipo de tendones en estructura pretesa que en postesa, se ha decidido emplearlos como armadura pretesa de trazado recto (ver Figura 13). Cada una de las vigas tiene dos tendones de 15.2 mm de diámetro situados a 50 mm de la fibra inferior.

La disposición de los tendones en el modelo para la campaña experimental se muestra en la Figura 3.3.4.1.

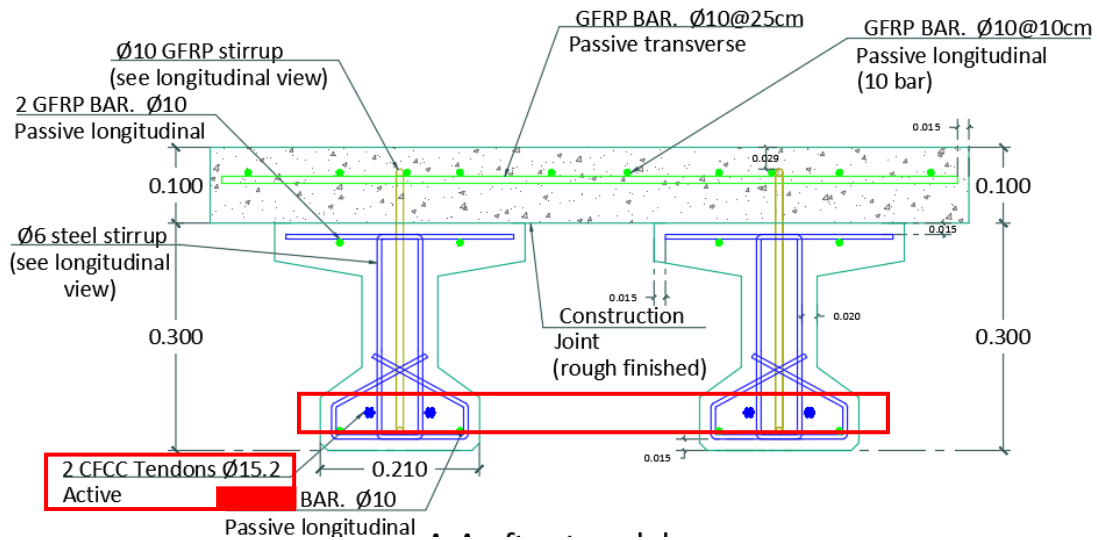


Figura 3.3.4.1 Disposición de la armadura activa de CFRP en las vigas

3.3.4.1. Datos del fabricante TokyoRope

Con los datos proporcionados por el fabricante, lo primero que observamos es que el módulo elástico varía en función de la composición geométrica de los tendones. (Ver Figura 3.3.4.1.1)




Shape of cross section	Standard specification of CFCC (Spec. B Regular tow)										
	Designation		Diameter	Cross sectional area		Guaranteed capacity		Nominal mass density		Tensile elastic modulus	
			inch	mm ²	in ²	kN	kip	g/m	lb/ft	kN/mm ²	ksi
○	CFCC U	5.0 φ	0.20	15.9	0.025	40.4	9.1	30	0.020	167	24,221
	CFCC 1×7	7.9 φ	0.31	31.1	0.048	79.3	17.8	60	0.040	155	22,481
	CFCC 1×7	10.8 φ	0.43	57.8	0.090	147.2	33.1	112	0.075	155	22,481
	CFCC 1×7	12.5 φ	0.49	75.6	0.117	192.5	43.3	146	0.098	155	22,481
	CFCC 1×7	15.2 φ	0.60	115.6	0.179	294.4	66.2	223	0.150	155	22,481
	CFCC 1×7	17.2 φ	0.68	151.1	0.234	385.0	86.6	292	0.196	155	22,481
	CFCC 1×7	19.3 φ	0.76	186.7	0.289	475.6	106.9	360	0.242	155	22,481
	CFCC 1×7	26.2 φ	1.03	339.2	0.526	864.1	194.3	655	0.440	155	22,481
	CFCC 1×19	20.6 φ	0.81	205.1	0.318	485.6	109.2	396	0.266	145	21,030
	CFCC 1×19	25.5 φ	1.00	313.7	0.486	742.6	166.9	606	0.407	145	21,030
	CFCC 1×19	29.2 φ	1.15	410.2	0.636	971.2	218.3	792	0.532	145	21,030
	CFCC 1×19	34.3 φ	1.35	567.0	0.879	1342.0	301.7	1,095	0.736	145	21,030
	CFCC 1×37	35.7 φ	1.41	610.8	0.947	1350.0	303.5	1,180	0.793	145	21,030
	CFCC 1×37	40.9 φ	1.61	798.7	1.238	1765.0	396.8	1,544	1.038	145	21,030

Figura 3.3.4.1.1 Características de las barras CFRP proporcionadas por el fabricante

Para esta campaña se usarán dos tendones de 15.2mm de diámetro por viga. Estos tendones tienen una configuración de 7 de diámetro 4.6mm.

$$E = 155.000MPa$$

$$A_f = 115.6mm^2$$

$$P_u = 294.4kN$$

$$f_u = 2546.7MPa = \frac{P_u}{A_f}$$

$$\rho = 1.929kg/m^3$$

En los datos fabricados por el fabricante no aparecía el coeficiente de Poisson ni la deformación última de tensión por lo que se hizo una búsqueda y se extrajeron los valores del FIB. Task Group 9.3, FRP Reinforcement in RC Structures, 2007.

$$\varepsilon = 0.5$$

$$\nu = 0.2$$

3.4. Montaje para el tesado CFRP

La zona de anclaje de los tendones CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer, polímero reforzado con fibra de carbono) se refiere a la sección de la estructura donde los tendones de CFRP están anclados o sujetos para transmitir las fuerzas de pretensado. Esta zona es crítica para garantizar la transferencia eficiente de las fuerzas de pretensado entre el tendón y la estructura circundante. Este es otro de los puntos de interés de esta campaña puesto que no se puede utilizar el mismo dispositivo que para acero activo convencional puesto que se dañarían las fibras de carbono.

3.4.1. Procedimiento de tesado

Seguidamente se describirá paso por paso como se realizará el tesado de los cables en cuestión.

Esta descripción es en base al manual y a las imágenes y vídeos proporcionados por la empresa Tokio Rope (*Manual for setting the CFCC anchorage devices (New Buffer material: Single body Buffer)*)

Primeramente una vez montado el molde para hormigonar se van a proteger los extremos de los cables, ya pasados a través del molde de la viga, con un material que hace la función de amortiguar la fuerza de cierre que se usara luego para tirar y poder tesar los cables. (Ver Figura 3.4.1.1)



Figura 3.4.1.1 Material de amortiguación para el tesado y su montaje

Seguidamente, con lubricante de molibdeno en espay se va a impregnar la parte interior del manguito de CFRP para que el roce con las paredes, si es que lo hay, se el menor posible e introducir el cable en su interior (Ver Figura 3.4.1.2).

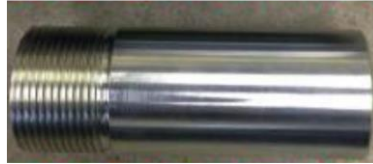


Figura 3.4.1.2 Manguito de conexión y su montaje

A continuación se hará el montaje de las cuñas y la introducción de estas en el manguito de pretensar (Ver Figura 3.4.1.3).

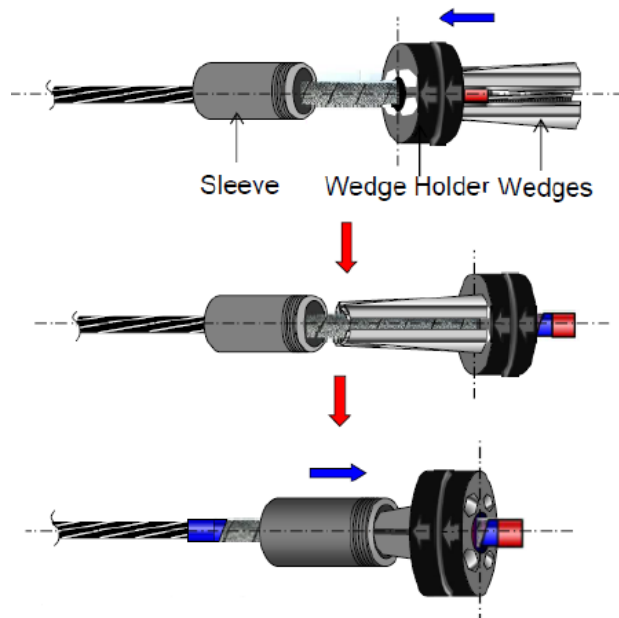


Figura 3.4.1.3 Colocación de las cuñas

Una vez montado se colocará en el dispositivo de presión donde se van a clavar las cuñas en el manguito. (Ver Figura 3.4.1.4).



Figura 3.4.1.4 Montaje en el dispositivo de presión

Una particularidad que tienen estos tipos de cables es que se tesan mediante un cable de acero al cual se conectan. Es por eso por lo que hay que hacer una conexión intermedia entre el cable CFRP y el de acero.

El material para usar para esta conexión es el siguiente (Ver Figura 3.4.1.5). Un acoplador, un manguito, cuñas y un conector.



Figura 3.4.1.5 Material usado para la conexión de los cables CFRP con los tendones de acero

Primero se hace un montaje previo con el conector, las cuñas y el manguito del cable de acero, impregnado con lubricante de molibdeno. Luego se conecta mediante la rosca que tiene en ambos extremos el acoplador. Quedando un montaje tal que así. (Ver Figura 3.4.1.6).



Figura 3.4.1.6 Montaje previo a la conexión

Finalmente solo hay que insertar el tendón de acero en su manguito. Para esto se hace una entrada de unos 10cm de cable en el manguito y este queda fijado en el interior gracias a las cuñas y al acoplador. (Ver Figura 3.4.1.7).

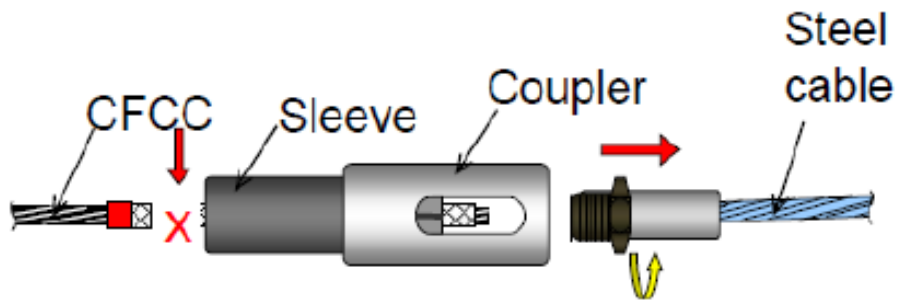


Figura 3.4.1.7 Esquema de montaje para realizar la conexión

Finalmente para tesar se usan unos gatos adecuados a la fuerza requerida en cada caso.

El fabricante recomienda que la zona de acoplamiento entre cables quede tapada y para nada expuesta ni al hormigón ni a una temperatura superior a los 50º. Por esto recomiendan cubrir con un tablón esta zona. (Ver Figura 3.4.1.8).

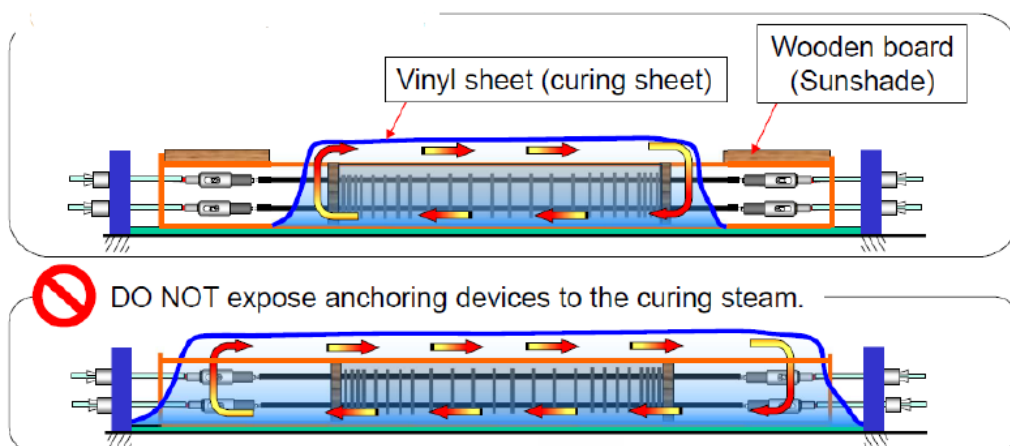


Figura 3.4.1.8 Recomendación de protección de los sistemas durante el tesado

3.4.2. Resumen de las fases de ejecución para el tesado

Resumiendo en pasos breves lo descrito anteriormente quedaría de la siguiente forma.

- Proteger los extremos del cable
- Pasarlos a través del manguito
- Colocar las cuñas e introducirlo dentro del manguito
- Colocarlo en el dispositivo de presión
- Montar el sistema acoplador
- Conectar el cable de acero
- Colocar los gatos y tesar
- Proteger el sistema de tesado de los rayos UV para que no se superen los 50^a

3.5. Predimensionamiento y verificación del tablero de puente continuo

Alexis Ramírez, doctorando del Programa de Ingeniería de la Construcción de la UPC ha realizado el predimensionamiento del puente continuo de dos vanos en el marco de su tesis doctoral.

Una vez definida la forma final de las vigas se empezó con la comprobación de estas. Para ello hay que obtener todas las características de la sección. El proceso se realizó con la herramienta de propiedades físicas de SAP2000 la cual en base a una región calcula áreas, centros de peso propio, inercias, etc. (Ver Figura 3.5.1 y 3.5.2)

3.5.1. Revisión de las vigas aisladas

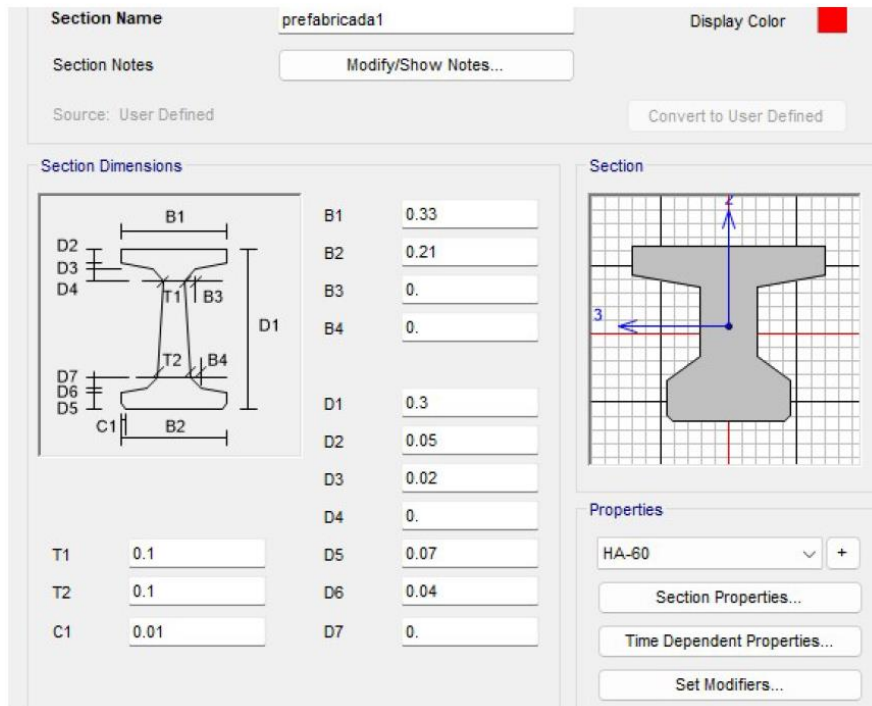


Figura 3.5.1 Creación de la viga prefabricada en SAP2000 (m)

Section Name		prefabricada1	
Properties			
Cross-section (axial) area	536.	Section modulus about 3 axis	3289.9824
Moment of Inertia about 3 axis	53245.34	Section modulus about 2 axis	1503.0581
Moment of Inertia about 2 axis	24800.458	Plastic modulus about 3 axis	4879.6667
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	2926.3333
Shear area in 2 direction	308.8029	Radius of Gyration about 3 axis	9.9669
Shear area in 3 direction	513.0147	Radius of Gyration about 2 axis	6.8022
Torsional constant	15938.63	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Figura 3.5.2 Propiedades de la sección obtenidas en SAP2000 (kg-cm)

$$A = 0.0536m^2$$

$$I = 53245.34cm^4$$

$$h_t = 0.30m$$

$$cdg = 16.18cm$$

$$v' = cdg = 16.18cm$$

$$v = h_t - v' = 13.82cm$$

Poniendo 5cm de recubrimiento al centro del pretensado tenemos lo siguiente:

$$r = 5cm$$

$$d = h_t - r = 0.25m$$

$$e = cdg - r = 11.18cm$$

3.5.1.1. Características del hormigón a usar:

Como ya se ha comentado el hormigón con el que se fabricaran tanto la viga como la losa superior tiene una resistencia de 60MPa con la que usando la formulación recogida en la normativa obtenemos los siguientes valores.

$$f_{ck} = 60MPa$$

$$f_{ck2} = 35MPa \text{ resistencia a las 36horas}$$

$$f_{ct} = 2.21 \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{f_{ctm}}{10} \right) \right) = 3.32MPa$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 68MPa$$

$$E_C = 22 \cdot \left[\left(\frac{f_{ctm}}{10} \right) \right]^{0.3} = 39099.87MPa$$

Con estos datos podemos comprobar si habrá fisuración en la parte superior de la viga como consecuencia del pretensado que se proyecta.

3.5.1.2. Revisión de fisuración en la parte superior de la viga en la zona de apoyo.

Revisión de la zona en apoyo, para dimensionar el máximo pretensado antes de la fisuración, esta tensión se considera en el borde $x=0$, donde no hay momento de peso propio, en las secciones posteriores, la contra flecha del pretensado activa el peso propio y este contrarresta la fisuración en lecho superior

$$\sigma_{sup} = -\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e \cdot v}{I} = f_{ct}$$

Siendo f_{ct} la resistencia a tracción del hormigón, por lo que si desarrollamos la expresión y forzamos que la tensión no puede ser superior a la resistencia a tracción obtendremos el valor de la fuerza de pretensado.

$$P = \frac{f_{ct}}{\frac{e \cdot v}{I} - \frac{1}{A}} = 309.802kN$$

Partiendo de que los tendones los vamos a tasar como máximo a un 75% de su resistencia última tenemos lo siguiente con los datos de tensión última y sección de los tendones.

$$f_{pucfcc} = \frac{P_{ucfcc}}{A_{cfcc}} = 2546.713MPa$$

Siendo:

$$A_{cfcc} = 115.6mm^2$$

$$P_{ufcc} = 294.4kN$$

Comprobamos que la fuerza máxima de los tendones no supere la proyectada.

$$\sigma_{po} = 0.75 \cdot f_{pu} = 1910.035MPa$$

$$P = \sigma_{po} \cdot A_{cfcc} = 220.8kN$$

Los 220.8kN es la carga máxima a la que se puede tesar un tendón.

$$A_{pc} = \frac{P}{\sigma_{po}} = 162.197mm^2$$

$$n^{\circ} \text{ cables} = \frac{A_{pc}}{A_c} = 1.403 \text{ lo que son 2 tendones de } 15.2$$

Recalculamos para el número exacto de tendones.

$$A_p = n^{\circ} \text{ cables} \cdot 115.6 = 231.2mm^2$$

$$F_{pret} = A_p \cdot \sigma_{po} = 441.6kN$$

La fuerza de tesado total podría ser de hasta 441.6kN pero lo dejaremos en 300kN porque si aplicamos la F_{pret} de 441kN provocaríamos fisuración en el lecho superior de la viga en la zona de apoyos.

Lo que nos deja unas tensiones en los cables de:

$$\sigma_{real} = \frac{P}{A_p} = 1297.578MPa$$

Este valor se encuentra por debajo de la tensión rotura y del 75% de esta. Concretamente nos encontramos en el 51% de f_{pu} . No se ha decidido aumentar las dimensiones de la sección para utilizar las mismas dimensiones con ligeras modificaciones en el espesor del alma en relación con una campaña experimental de vigas isostáticas que se ha acaba de finalizar.

Se verifica si hay fisuración en la parte superior de la viga en vacío. El convenio de signos utilizado para estos cálculos es utilizar los valores de cotas (e , v y v') en positivo y dar un valor negativo si el esfuerzo produce compresión en la sección o lecho estudiado y positivo si genera tracción.

$$\sigma_{sup} = -\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e \cdot v}{I} = 3.108MPa - \text{Sección en tracción}$$

$$En x = 0 ; M_{pr} = P \cdot e = 33.54kNm$$

Como:

$$3.108MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 3.32MPa$$

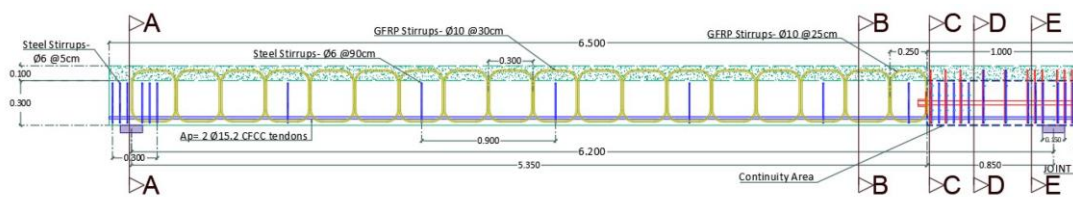
No hay fisuración

3.5.1.3. Revisión de fisuración en la parte inferior de la viga en el traslado.

Revisamos la zona central del vano ya que se considera que en $x=3.4\text{m}$ es donde se da el mayor momento flector debido al peso propio en el caso de una viga simplemente apoyada. Se puede ver la sección y la vista de la viga a estudiar en la Figura 3.5.1.3.1.

Se tendrá en cuenta un factor de 1.5 por efectos dinámicos.

El momento flector debido al peso propio se ha obtenido con el cálculo de flexión de una viga de hormigón como la que se va a ensayar gracias al programa SAP2000 y al ejecutable ftool.exe (Ver Figura 3.5.1.3.2, 3.5.1.3.3, 3.5.1.3.4, 3.5.1.3.5, 3.5.1.3.6 y 3.5.1.3.7) ya que son capaces de dar las leyes de esfuerzos y la posición en x donde se dan los valores máximos.



Apoyos: Neoprenos zunchados de 15x20x4cm con la longitud de 15 cm en el sentido de la viga:

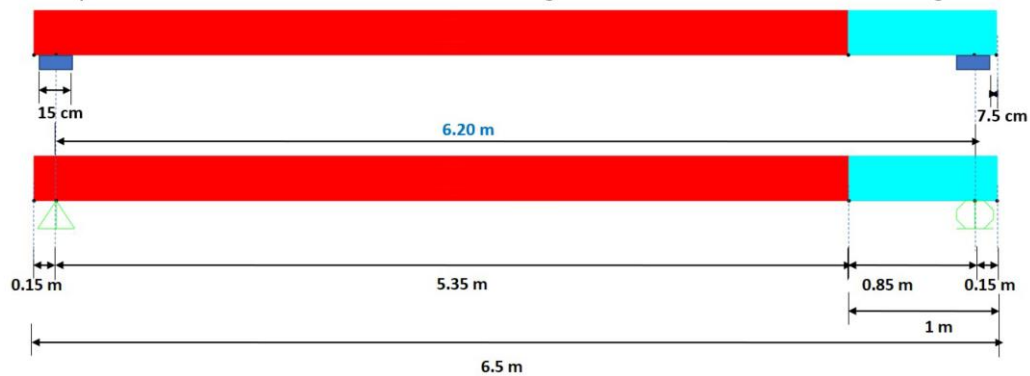


Figura 3.5.1.3.1 Geometría y sección longitudinal de una viga aislada

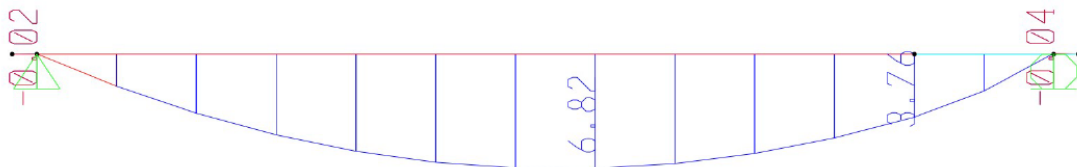


Figura 3.5.1.3.2 Ley de momentos de peso propio (kN·m) según ftool

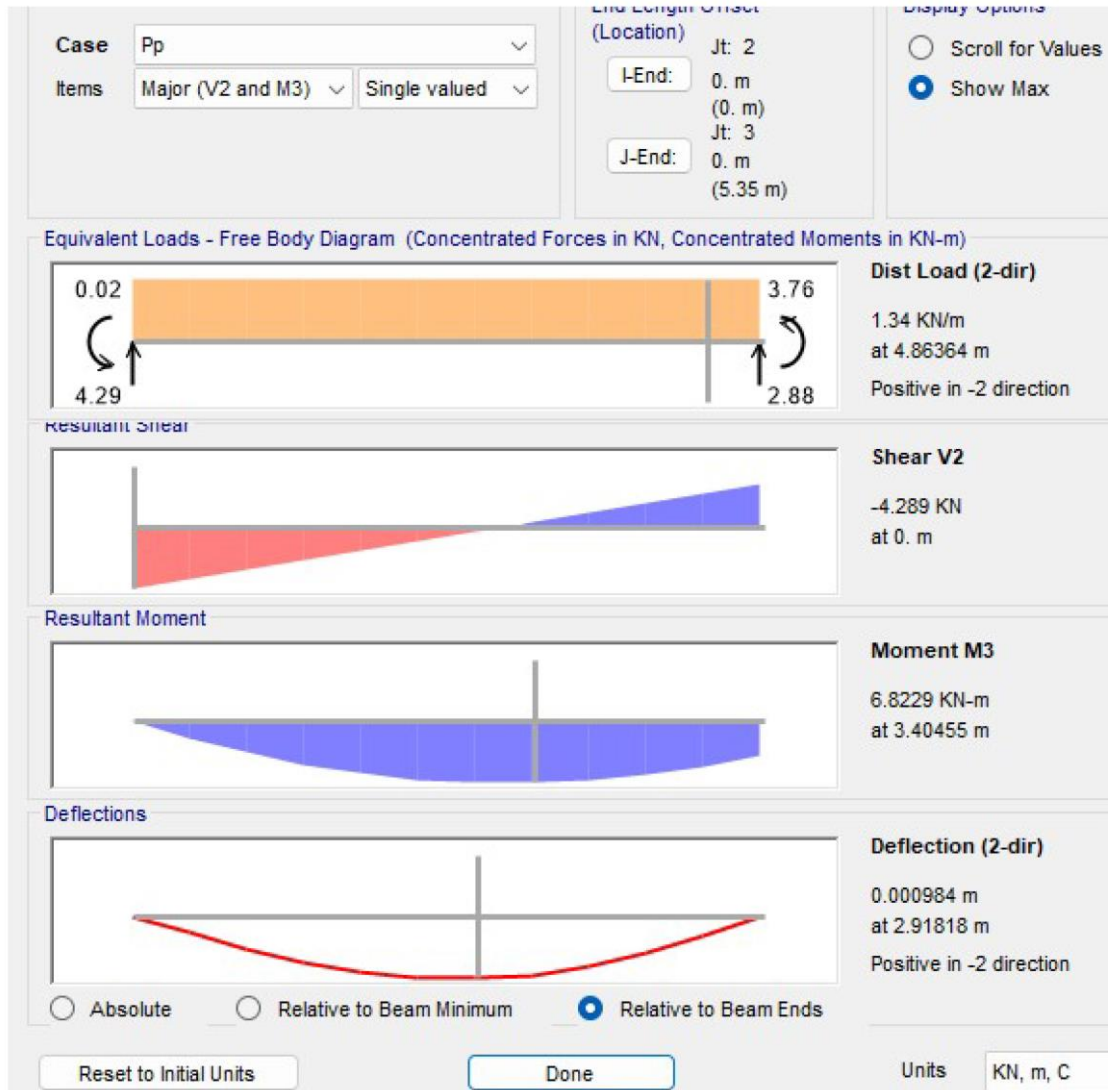


Figura 3.5.1.3.3 Leyes de esfuerzos y deformación según SAP2000

$$M_{pp} = 6.8229 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} - \frac{P \cdot e \cdot v'}{I} + \frac{1.5 \cdot M_{pp} \cdot v'}{I} = -12.679 \text{ MPa} - \text{Sección en compresión}$$

$$12.679 \text{ MPa} = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck2} = 21 \text{ MPa}$$

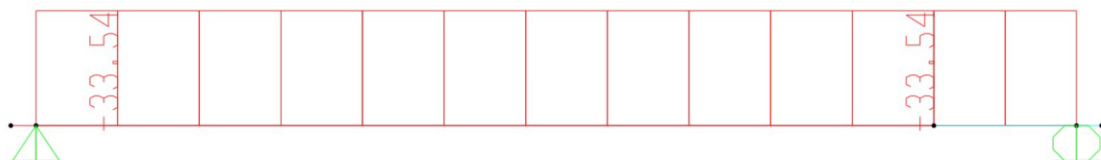


Figura 3.5.1.3.4 Ley de momentos del pretensado (kN·m) según ftool

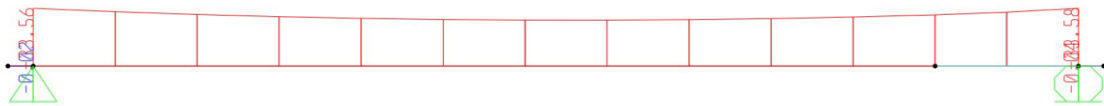


Figura 3.5.1.3.5 Ley de momentos del pretensado y el peso propio combinados (kN-m) según ftool

Deformación de peso propio más pretensado



Figura 3.5.1.3.6 Deformación del pretensado y el peso propio combinados según ftool

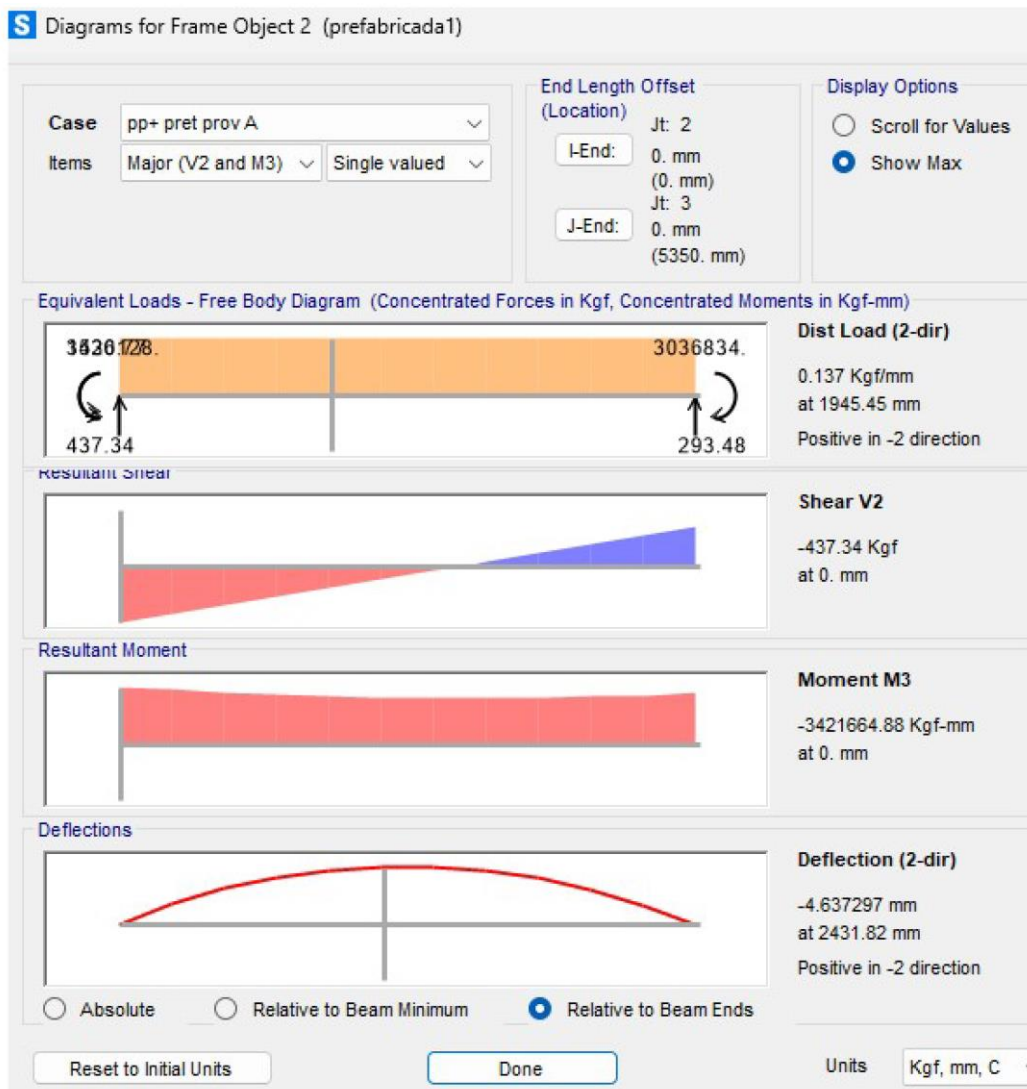


Figura 3.5.1.3.7 Leyes de esfuerzos y deformación del pretensado y el peso propio combinados según SAP2000

Se obtuvo una contra flecha de **4.637mm**

3.5.2. Revisión de las vigas tras el postensado de continuidad

Una vez revisada la viga sin cargas adicionales (solo peso propio y fuerza de pretensado longitudinal) hay que comprobar el pretensado de continuidad que se realizará en el laboratorio de la UPC. La disposición de los cables de acero es la que se muestra en la Figura 3.5.2.1.

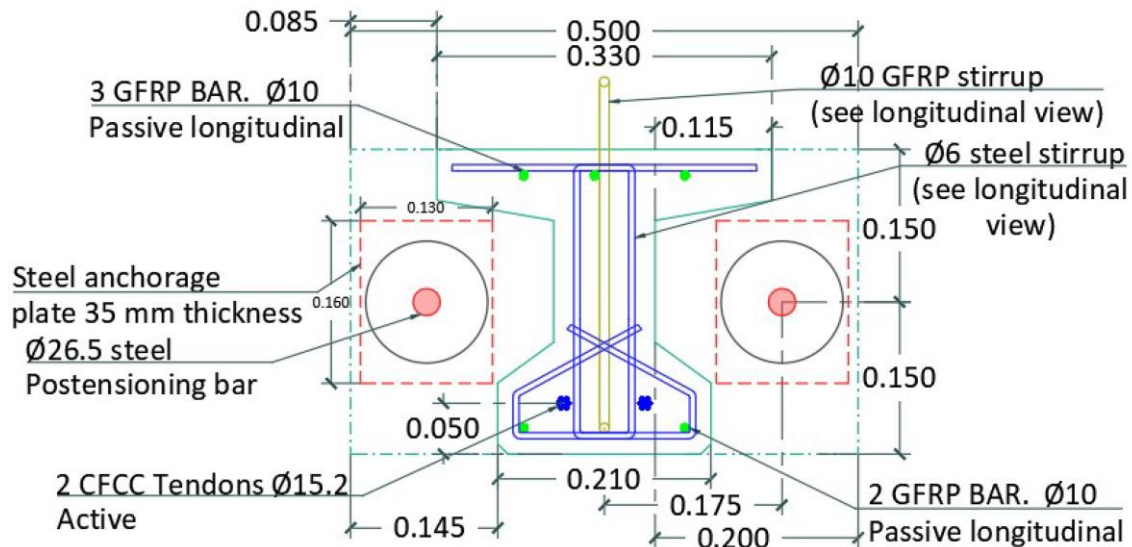


Figura 3.5.2.1 Detalle de la sección para el postensado de continuidad (unidades en metros)

En este caso tenemos el centro de peso propio del pretensado de continuidad a 15cm (la mitad de la altura de la sección del diafragma).

$$cdg = 15cm$$

$$r = 5cm \text{ recubrimiento del pretensado}$$

$$I = \frac{50cm \cdot (30cm)^3}{12} = 112500cm^4$$

$$A = 0.5 \cdot 0.3 = 0.15m^2$$

$$h_t = 0.3m$$

$$v' = cdg = 15cm$$

$$v = h - v' = 15cm$$

$$d = h - r = 25cm$$

$$f_{ct} = 22 \cdot \left[\left(\frac{f_{ctm}}{10} \right) \right]^{0.3} = 4.539MPa$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 68MPa$$

Siendo:

$$f_{ck} = 60MPa$$

En esta parte de la viga el pretensado longitudinal genera una flexión pero no es de la misma magnitud que en la sección de la viga. Por lo hay que tener en cuenta una nueva excentricidad tendón-centro de peso propio de la sección.

$$e_c = cdg - r = 10\text{cm}$$

$$M_{pr2} = P \cdot e = 30\text{kNm}$$

Las barras de postensado de continuidad serán MK4 de alta resistencia con una fuerza de tesado máxima del 70% de la tensión máxima. Teniendo una fuerza máxima en el gato para tesar de 150kN.

$$\varnothing = 26.5\text{mm}$$

$$f_{pu} = 1050\text{MPa}$$

$$f_y = 1050 \cdot 0.7 = 735\text{MPa}$$

$$f_g = 150\text{kN fuerza máxima de tesado de los gatos}$$

$$a = \pi \cdot \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 = 551.546\text{mm}^2$$

$$F = 2 \cdot f_g = 300\text{kN}$$

$$ec = 15\text{cm} - cgd = 0\text{cm}$$

$$M_{post} = F \cdot e_c = 0\text{kN} \cdot \text{m}$$

Al tener el postensado aplicar en el centro de peso propio de la sección este no nos genera flexión. Seguidamente se muestra la vista lateral del conjunto a evaluar. Ver Figura 3.5.2.2.

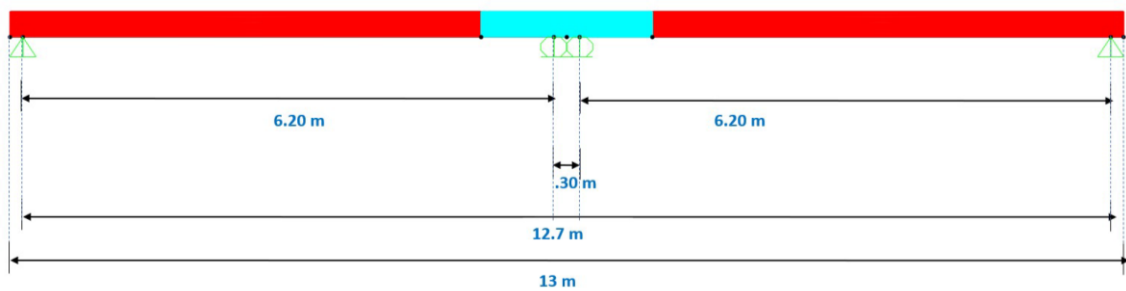


Figura 3.5.2.2 Características de las barras para el postensado y geometría longitudinal de la pasarela sin la losa superior

Con el ejecutable Ftool.exe se obtiene la ley de esfuerzos de la viga continua aproximada. (Ver Figura 2.5.2.3).

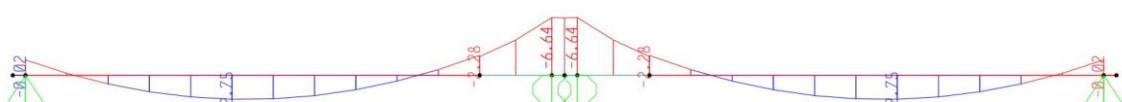


Figura 3.5.2.3 Ley de momentos post postensado de continuidad (kN-m) según ftool

3.5.2.1. Revisión de la sección rectangular (considerando peso propio)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.2.1.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la parte del diafragma con momentos negativos máximos.

Momento de pretensado en el diafragma (M_{pr2})	30kNm
Momento debido al postensado (M_{post})	0kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	6.64kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.15m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.001m ⁴
v	0.15m
v'	0.15m
Zona de comprobación	x=6.2m (momentos negativos)

Tabla 3.5.2.1.1 Datos I

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{-F}{A} + \frac{M_{pr2} \cdot v}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v}{I} = 0.885MPa - \text{sección en tracción}$$

$$0.885MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 4.532MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-F}{A} + \frac{-M_{pr2} \cdot v'}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v'}{I} = -8.885MPa - \text{sección en compresión}$$

$$8.885MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.2.2. Revisión de la sección doble T (Momentos negativos de peso propio)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.2.2.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la parte de la viga doble T con momentos negativos máximos en esa sección.

Momento de pretensado en la viga (M_{pr})	33.54kNm
Momento debido al postensado (M_{post})	3.76kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	2.28kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.0536m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.53245.34cm ⁴
v	13.82cm
v'	16.18cm
Zona de comprobación	x=5.35m (zona de continuidad (M'))

Tabla 3.5.2.2.1 Datos II

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{M_{pr} \cdot v}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v}{I} + \frac{-M_{post} \cdot v}{I} = 2.724MPa$$

$$2.724MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 4.532MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-M_{pr} \cdot v'}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v'}{I} + \frac{M_{post} \cdot v'}{I} = -15.339MPa$$

$$15.339MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.2.3. Revisión de la sección doble T (Momentos positivos de peso propio)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.2.3.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la parte de la viga doble T con momentos positivos de peso propio máximos.

Momento de pretensado en la viga (M_{pr})	33.54kNm
Momento debido al postensado (M_{post})	6.4511kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	2.75kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.0536m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.53245.34cm ⁴
v	13.82cm
v'	16.18cm
Zona de comprobación	x=2.45m (centro de vano)

Tabla 3.5.2.3.1 Datos III

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{M_{pr} \cdot v}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v}{I} + \frac{-M_{post} \cdot v}{I} = 0.72MPa - \text{sección en tracción}$$

$$0.72MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 4.532MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-M_{pr} \cdot v'}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v'}{I} - \frac{M_{post} \cdot v'}{I} = -12.993MPa - \text{sección en compresión}$$

Al ser una tensión negativa nos indica que nos encontramos en compresión.

$$12.993MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.3. Consideración del tiempo de aplicación de hormigonado de la losa superior en el laboratorio.

La sección compuesta a estudiar está formada por las vigas prefabricadas y la losa superior que se hormigonará en las instalaciones de la UPC y tendrá la siguiente geometría. Ver Figura 3.5.3.1.

$$t = 10\text{cm}$$

$$b_{sup} = 0.5\text{m}$$

$$\gamma_c = \frac{25\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$P_{p2} = t \cdot b_{sup} \cdot \gamma_c = 1.25\text{kN/m}$$

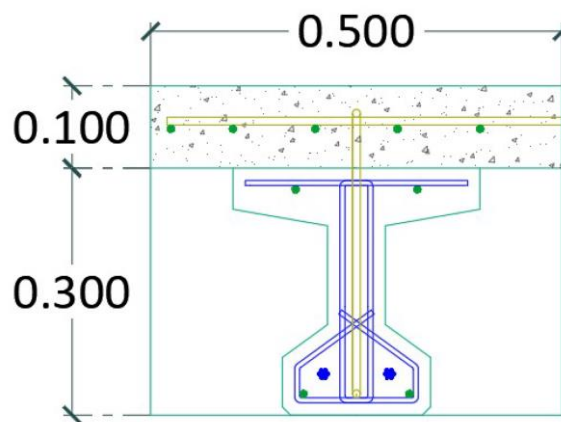


Figura 3.5.3.1 Detalle de la sección compuesta sobre una viga

Las leyes de peso propio debidos a la carga del hormigón de la losa, en fase de construcción, son los siguientes e interaccionando con los de peso propio de las vigas y pretensado y postensado con el siguiente resultado. Ver Figuras 3.5.3.2, 3.5.3.3 y 3.5.3.4.

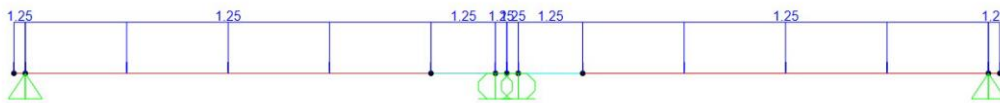


Figura 3.5.3.2 Aplicación del peso de la losa superior

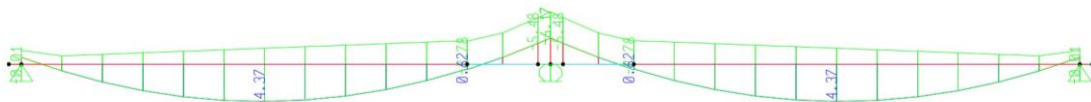


Figura 3.5.3.3 Ley de momentos provocada por el peso de la losa superior (kN·m)

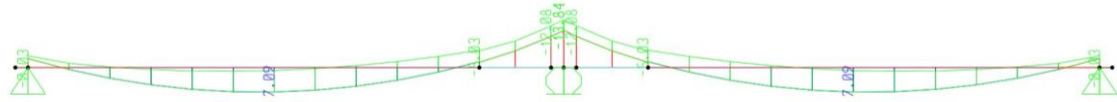


Figura 3.5.3.4 Ley de momentos provocada por el peso propio de la losa superior y el peso de las vigas con su armadura activa y pasiva (kN·m)

3.5.3.1. Revisión de la sección rectangular (considerando el peso del hormigón fresco)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.3.1.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la parte del diafragma con momentos negativos máximos.

Momento de pretensado en el diafragma (M_{pr2})	30.00kNm
Momento debido al postensado (M_{post})	0kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	13.84kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.15m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.001m ⁴
v	15cm
v'	15cm
Zona de comprobación	x=6.2m (sobre apoyo central)

Tabla 3.5.3.1.1 Datos IV

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{-F}{A} + \frac{M_{pr2} \cdot v}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v}{I} = 2.576MPa - \text{sección en tracción}$$

Al ser una tensión positiva no encontramos en tracción, pero no hay fisuración porque:

$$2.576MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 4.532MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-F}{A} + \frac{-M_{pr2} \cdot v'}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v'}{I} = -10.576MPa - \text{sección en compresión}$$

$$10.576MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.3.2. Revisión de la sección doble T (Momentos negativos de peso propio y hormigón fresco)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.3.2.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la viga doble T con momentos negativos máximos.

Momento de pretensado en la viga (M_{pr})	33.54kNm
Momento debido al postensado (M_{Post})	3.76kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	5.03kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.0536m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.53245.34cm ⁴
v	13.82cm
v'	16.18cm
Zona de comprobación	x=5.35m (zona de continuidad)

Tabla 3.5.3.2.1 Datos V

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{M_{pr} \cdot v}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v}{I} + \frac{-M_{post} \cdot v}{I} = 3.438MPa - \text{sección en tracción}$$

$$3.438MPa = \sigma_{sup} < f_{ct} = 4.532MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-M_{pr} \cdot v'}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v'}{I} + \frac{M_{post} \cdot v}{I} = -16.175MPa - \text{sección en compresión}$$

$$16.175MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.3.3. Revisión de la sección doble T (Momentos positivos de peso propio y hormigón fresco)

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.3.3.1) podemos ver la recopilación de datos necesarios para hacer unas verificaciones simples del estado de las vigas. En este caso para la comprobación de la viga doble T con momentos positivos máximos.

Momento de pretensado en la viga (M_{pr})	41.112kNm
Momento debido al postensado (M_{Post})	6.4511kNm
Momento de peso propio (M_{pp})	7.01kNm
Fuerza de pretensado (P)	300kN
Fuerza de postesado (F)	300kN
Área de la sección rectangular (A)	0.0536m ²
Inercia de la sección rectangular (I)	0.53245.34cm ⁴
v	13.82cm
v'	16.18cm
Zona de comprobación	x=2.9m (centro de vano)

Tabla 3.5.3.3.1 Datos VI

$$\sigma_{sup} = \frac{-P}{A} + \frac{M_{pr} \cdot v}{I} + \frac{-M_{pp} \cdot v}{I} + \frac{-M_{post} \cdot v}{I} = -0.385MPa - \text{sección en compresión}$$

$$0.385MPa = \sigma_{sup} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

En la parte inferior tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{inf} = \frac{-P}{A} + \frac{-M_{pr} \cdot v'}{I} + \frac{M_{pp} \cdot v'}{I} + \frac{M_{post} \cdot v}{I} = -11.699MPa - \text{sección en compresión}$$

$$11.699MPa = \sigma_{inf} < 0.6 \cdot f_{ck} = 36MPa$$

3.5.4. Revisión de la sección compuesta

Las características geométricas de la sección compuesta (Ver Figuras 3.5.4.1, 3.5.4.2 y 3.5.4.3) y las fuerzas aplicadas son las siguientes.

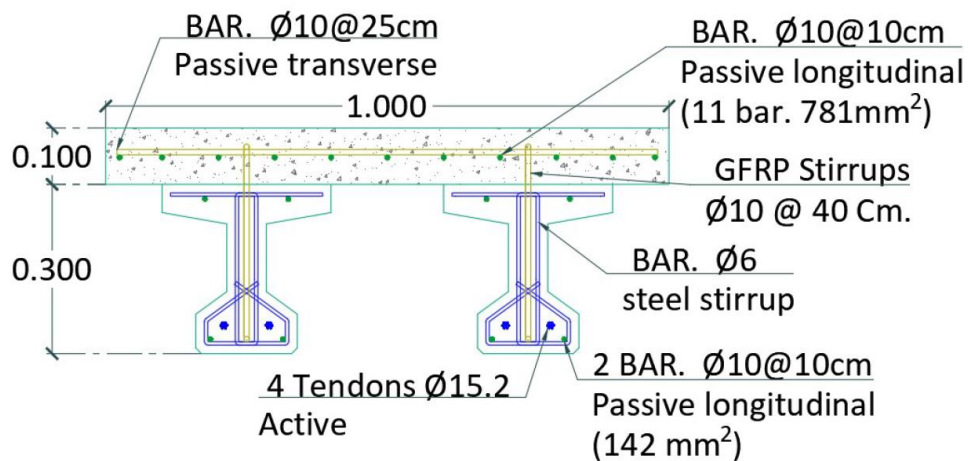


Figura 3.5.4.1 Detalle de la sección compuesta

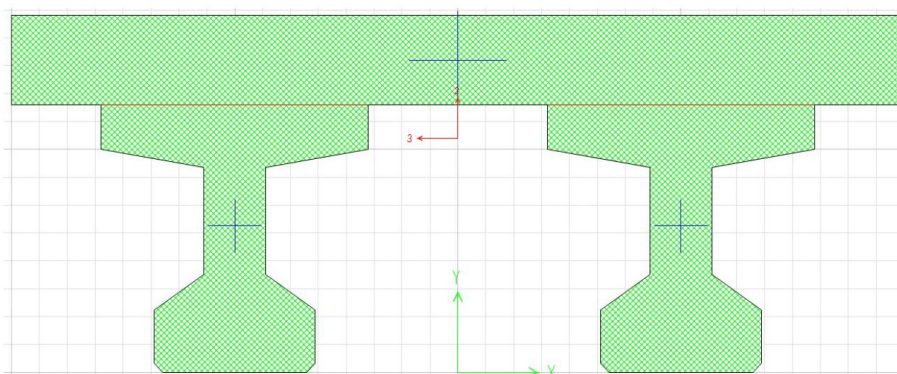


Figura 3.5.4.2 Colocación de los centros de peso propio por separado en el conjunto de la sección compuesta

S Property Data

Section Name: sección compuesta

Properties

Cross-section (axial) area	1892.	Section modulus about 3 axis	10049.765
Moment of Inertia about 3 axis	263723.12	Section modulus about 2 axis	28503.065
Moment of Inertia about 2 axis	1425153.2	Plastic modulus about 3 axis	17081.507
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	47300.
Shear area in 2 direction	812.1968	Radius of Gyration about 3 axis	11.8063
Shear area in 3 direction	1094.002	Radius of Gyration about 2 axis	27.4454
Torsional constant	100204.77	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Figura 3.5.4.2 Características de la sección compuesta

En este momento las vigas y las losas trabajan como una única pieza, lo que comporta es que, ahora ya sí, la losa aporta resistencia a la sección.

Aplicando una carga puntual de 190kN en el centro de vano de la viga izquierda se da la carga de rotura teórica según los cálculos teóricos y con CONS.

3.6. Apoyos

Para este caso los apoyos que se van a utilizar son de neopreno zunchado (Ver Figura 3.6.1) como los de la siguiente imagen, para los apoyos donde no se produce levantamiento.

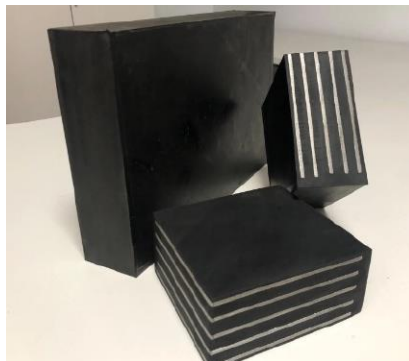


Figura 3.6.1 Apoyos de neopreno zunchado

Para los otros apoyos se han definido unos tipos POT (Ver Figura 3.6.2) en base a las reacciones obtenidos con el modelo en Abaqus. Aún están pendientes de dimensionar.

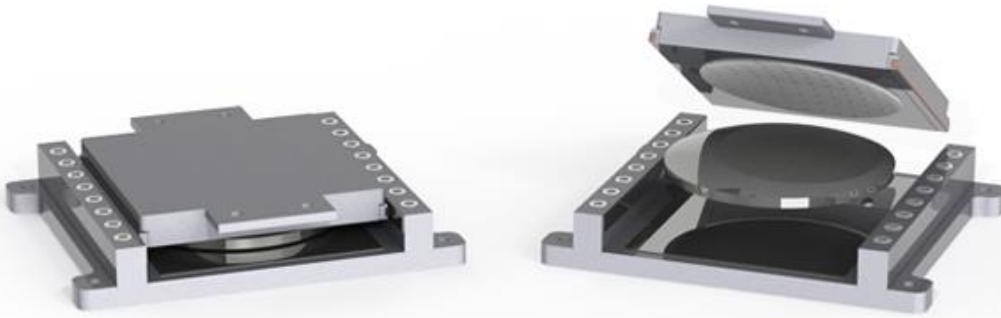


Figura 3.6.2 Apoyos tipo POT

3.7. Estado actual

La fabricación de las vigas se realizó en las instalaciones de Alvipré bajo la supervisión del doctorando Alexis Ramírez. Allí se realizó el montaje según plano las armaduras de GFRP y de acero convencional para la zona de los diafragmas y zonas de pretensado. (Ver Figuras 3.7.1).



Figure 3.7.1 Ensamblaje de las armaduras antes de colocarlas en el molde

Seguidamente se colocaron en el molde equipado con el sistema de pretensado, se pasaron los cables a través de la ferralla y se montaron los dispositivos de tesado. También de dejaron las vainas colocadas para poder ejecutar le postensado de continuidad con cables de acero en las instalaciones de la UPC. (Ver Figuras 3.7.2 y 3.7.3). En este proceso de montaje se colocaron también las galgas que se van a utilizar para hacer las mediciones. La ubicación exacta de estos elementos esta especificada en el apartado de Anejos – Planos de experimentación.



Figure 3.7.2 Colocación de las armaduras activas y pasivas y las vinas para el postensado de continuidad

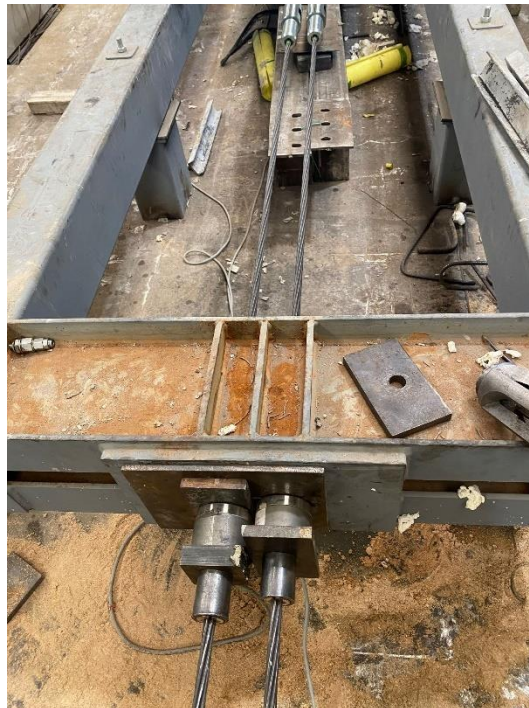


Figure 3.7.3 Montaje de os dispositivos para el tesado de los cables CFCC

Seguidamente se tesaron los cables a la fuerza requerida, es esto caso se aplicó una fuerza de 150kN a cada uno de los tendones (Ver Figura 3.7.4) y una vez el hormigón había alcanzado la resistencia característica según proyecto se relajaron los gatos y las cargas se transmitieron a las vigas y se cortó el sobrante de los tendones (Ver Figura 3.7.5).

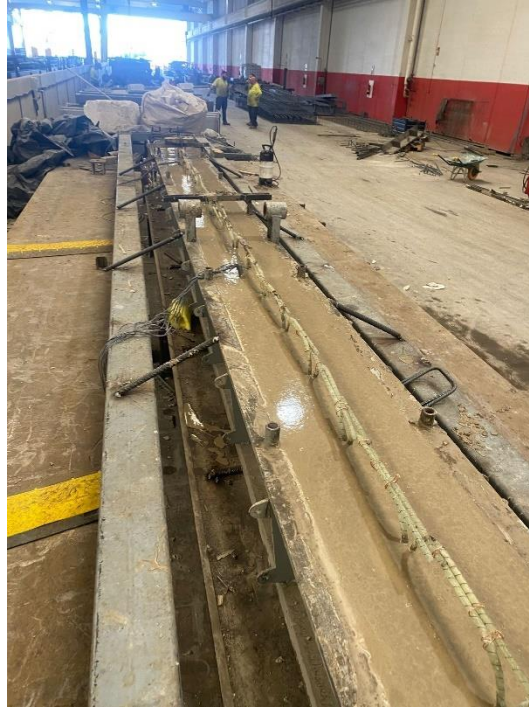


Figura 3.7.4 Hormigón secando hasta alcanzar los 35MPa (aproximadamente) para poder relajar los gatos



Figura 3.7.5 Imagen después de relajar los gatos y cortando el sobrante de los cables CFCC

A día de redacción de esta tesis la fabricación de las vigas pretensadas se ha realizado y han sido transportadas al laboratorio de la UPC. (Ver Figura 3.7.6).



Figura 3.7.6 Vigas pretensadas con CFCC en las instalaciones de la universidad

En los anejos de esta tesis se encuentran los cálculos realizados para el pretensado de continuidad con cables de acero, los planos de fabricación de las vigas y la losa y los planos de la disposición de los apoyos en la situación de ensayo además de los ya nombrados con las posiciones de las diferentes galgas en las vigas.

4. Modelo con Abaqus

Para la modelización numérica para predecir los resultados de la campaña experimental del puente continuo de dos vanos pretensados con tendones CFCC, en esta tesis se han utilizado dos programas. Primeramente se usó CONS, un software de análisis no lineal de barras y discretización seccional en fibras, para la verificación teórica del modelo experimental y luego se ha usado Abaqus para la comparación con el primer modelo y los resultados del experimento.

En este apartado se describe el modelo realizado con Abaqus y los pasos que se han seguido hasta la obtención de resultados. Seguidamente, se incluye un subapartado de resultados y de análisis de estos.

4.1. ¿Qué es Abaqus?

Abaqus es un software de simulación por elementos finitos de la casa Dassault Systems. Este se utiliza para el análisis y simulaciones numéricas en el mundo de la ingeniería. El programa permite modelar y encontrar solución a problemas cuyos serían imposibles de resolver de manera manual.

Abaqus está formado por cinco módulos pero en esta tesis solo se ha utilizado el CAE (Complete Abaqus Environment)

El CAE es una interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizada para interactuar con el software de simulación de elementos finitos Abaqus, desarrollado por Dassault Systems. Abaqus es una suite de software de análisis estructural utilizado en diversos campos de la ingeniería, como la mecánica estructural, la dinámica, la transferencia de calor y el electromagnetismo.

El CAE proporciona un entorno de trabajo interactivo para la creación de modelos, la definición de propiedades y condiciones de carga, la generación de mallas, la visualización de resultados y el análisis de datos en Abaqus. Permite a los ingenieros y analistas utilizar una interfaz gráfica intuitiva para construir y configurar modelos complejos, en lugar de depender exclusivamente de comandos de texto.

Al utilizar el CAE de Abaqus, los usuarios pueden crear geometrías, aplicar restricciones y cargas, definir materiales y propiedades, generar mallas, ejecutar simulaciones y analizar los resultados obtenidos. La interfaz gráfica del CAE facilita la visualización de los modelos en 2D y 3D, lo que ayuda a comprender mejor el comportamiento de las estructuras y a tomar decisiones informadas.

En resumen, el CAE (Complete Abaqus Environment) es la interfaz gráfica de usuario de Abaqus que proporciona herramientas para la creación, configuración y análisis de modelos de simulación de elementos finitos. Es una parte integral del software Abaqus y facilita el proceso de simulación y análisis estructural.

Este software viene organizado por módulos por lo que es bastante sencillo seguir un orden para la creación de los modelos. Cabe remarcar que a base de utilizarlo, con la experiencia se asumen conocimientos que te permiten crear algún tipo de ayudas desde el inicio del modelo como

pueden ser el hecho de crear particiones o conjuntos de superficies para que luego la asignación de cargas y/o restricciones sea más sencilla.

Los módulos que se deben utilizar para generar el modelo son los siguientes:

4.1.1. Geometría

En este se crean las formas que compondrán el modelo a analizar. Vigas, cable, armaduras o losas. Este es uno de los modelos que permite hacer croquis y particiones para que luego se pueda hacer una malla de mayor calidad

4.1.2. Propiedades

Es donde se definen los materiales que van a componer nuestro modelo y estas se asignan a cada elemento.

Abaqus no usa un sistema de unidades específico sino que usa un sistema llamado coherente, es decir que todas las unidades se obtienen basándose en las mismas unidades. (Ver Figura 4.1.2.1).

	Sistema Internacional	Micromecánica	Mesomecánica 1	Mesomecánica 2	Mesomecánica 3	Macromecánica
Magnitudes fundamentales						
Longitud	<i>m</i>	μm	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>
Masa	<i>kg</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>ton</i>	<i>kg</i>	<i>kton</i>
Tiempo	<i>s</i>	<i>ms</i>	<i>ms</i>	<i>s</i>	<i>ms</i>	<i>s</i>
Magnitudes derivadas						
Fuerza	<i>N</i>	<i>mN</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>	<i>MN</i>
Tensión	<i>Pa</i>	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>
Energía	<i>J</i>	<i>nJ</i>	<i>mJ</i>	<i>mJ</i>	<i>J</i>	<i>MJ</i>
Densidad	kg/m^3	$10^{15} kg/m^3$	$10^6 kg/m^3$	$10^{12} kg/m^3$	$10^9 kg/m^3$	$10^6 kg/m^3$
Densidad del agua	10^3	10^{-12}	10^{-3}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}

Figura 4.1.2.1 Sistemas de unidades coherentes para usar en Abaqus

A base de realizar pruebas con modelos más simple y la ayuda de compañeros que hacían un modelado con Abaqus también se encontró una tabla con las unidades a utilizar para que los modelos sacaran los valores correctos.

Esta tabla nos indica las unidades a utilizar y con las cuales hay que trabajar. En nuestro caso seguimos la fila que diera los valores en unidades más comunes. Tensiones en MPa, desplazamientos en mm. Para esto podíamos elegir trabajar en tonelada o en gramos. Poniendo sentido común en nuestro modelo y siendo de unas elevadas dimensiones de prefirió usar toneladas como unidad de masa. Por lo tanto usamos el sistema de unidades “Mesomecánica 2” según escuelatecnodigital.com que es la web donde se encontró dicha tabla y explicación de cómo funciona Abaqus con las unidades.

4.1.3. Ensamblaje

Una vez creadas las partes vamos a poder crear un conjunto y colocar cada una en su lugar correcto para componer el modelo final. Aquí solo se mueven los componentes.

4.1.4. Casos de cargas o pasos “steps”

Cuando analizamos estructuras que están sometidas a una secuencia de cargas, como es el caso del pretensado) debemos crear de forma ordenada los pasos que hay que seguir para llegar a la fase de cargas en servicio.

4.1.5. Interacciones

Con el modelo creado, con todas las partes necesaria, hay que empezar a establecer restricciones entre ellas para que el modelo se asimile lo más posible a la realidad. Nuestro caso será establecer las interacciones entre las vigas y la losa y la adherencia del pretensado CFRP con las vigas sección doble T.

4.1.6. Cargas

Aquí se establecen las condiciones de apoyo y las cargas a aplicar, además de la posibilidad de aplicar pre-esfuerzos como puede ser una tensión o un cambio de temperatura.

4.1.7. Mallado

Todo programa de elementos finitos necesita la creación de una malla en los elementos a analizar. En este apartado es donde se define la malla de los elementos. Tipología, “sedes”, forzar la geometría, etc

4.1.8. Optimización

Este es un módulo que para este análisis no sea usado.

4.1.9. Trabajos

Cada modelo que realizamos lo podemos calcular y guardar las modificaciones que vamos realizando sin necesidad de crear otro modelo o una copia de este. Para esto podemos ir creando trabajos diferentes que nos van a guardar todos los cambios que vayamos haciendo para en un futuro poder hacer comparaciones de forma más ágil.

4.1.10. Visualización

Una vez realizado el análisis en esta pestaña podremos observar los resultados que nos ofrece Abaqus. Estos resultados se basarán en lo que nosotros le hemos pedido al “fichero de salida”.

4.2. Creación del modelo del tablero de puente continuo objeto de estudio de la campaña experimental

Seguidamente se van a describir los pasos seguidos para la creación del modelo en Abaqus y su posterior análisis de resultados.

A partir los planos proporcionados (Ver Figura 4.2.1) por el doctorando Alexis Ramírez, se ha definido la geometría para empezar la creación del modelo.

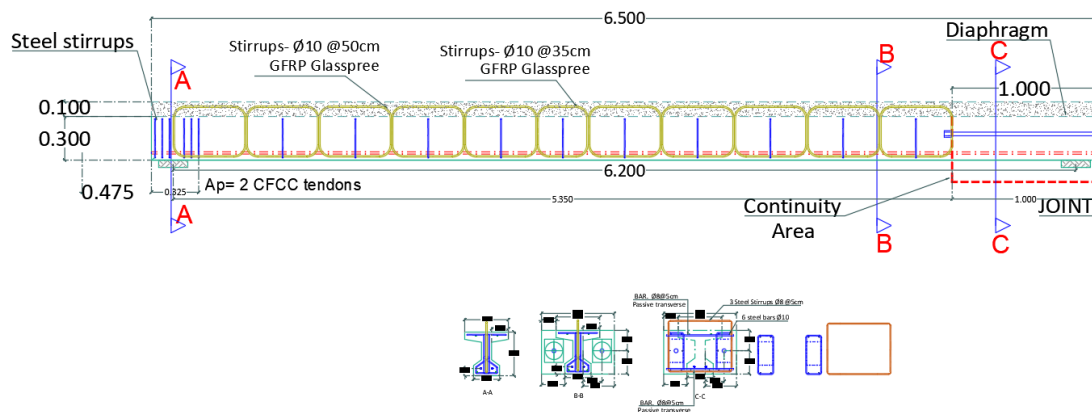


Figura 4.2.1 Esquemas del modelo propuesto para la campaña experimental

4.2.1. Creación de las partes

Se empezó con la creación de las partes que compondrían el modelo.

Los elementos que se tenían de crear son los siguientes (Ver Figuras 4.2.1.1, 4.2.1.2 y 4.2.1.3)

- Vigas (con una parte maciza en un extremo para poder anclar el pretensado de continuidad)
- Losa
- Tendones de CFCC (para la armadura pretesa longitudinal)
- Tendones de acero en forma de barra (para el postensado de continuidad en el apoyo central)

Para nombrar los pasos seguidos para la creación de las partes y la elaboración del modelo final a evaluar se ha creído oportuno describir en orden secuencial las casillas, celdas, geometría o botones utilizados para cada una de las acciones realizadas con el programa de cálculo.

Empezamos en el módulo de partes donde se crearan todas y cada una de las necesarias para la consecución de un modelo final adecuado.

-Create part > Ponemos nombre a la pieza > Continuar > Hacemos un sketch con la geometría indicada > Le damos valor a la profundidad del elemento

Seguidamente para crear otras formas extruidas a partir de una cara haremos lo siguiente:

-Shape > Solid > Extrude > Seleccionamos la cara donde extruir

-Shape > Cut > Extrude > Seleccionamos la cara donde hacer los cortes

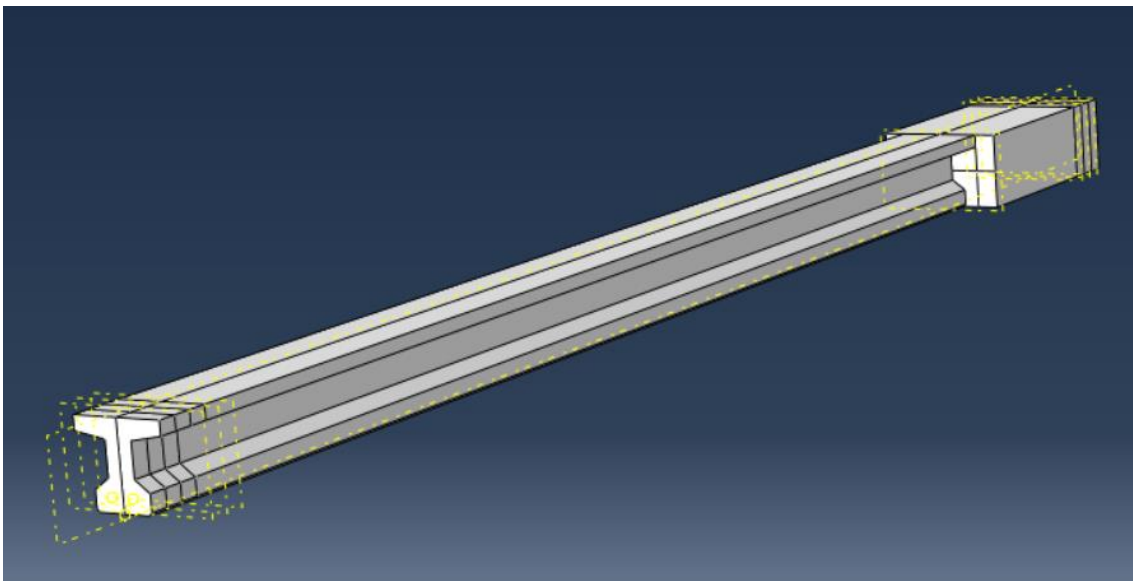


Figura 4.2.1.1 Viga creada con Abaqus con puntos, planos de referencia y particiones

En esta parte, basándonos en la experiencia de haber realizado otros modelos auxiliares, ya se ha creado particiones, puntos de referencia, planos auxiliares, y esbozos para forzar la geometría del mallado. El criterio seguido se basó en simplificar la creación de estos elementos auxiliares para no tener que ir saltando entre los distintos módulos de Abaqus. Como por ejemplo, se tenía muy clara la situación de los apoyos y sus dimensiones así pues, durante la creación de la viga ya se crearon las particiones pertinentes para el correcto emplazamiento de estos.

-Create Datum Plane: Offset From Plane > Seleccionamos la cara respecto la cual queremos hacer un plano paralelo

-Create Datum Point: Enter coordinates > Ponemos las coordenadas donde queremos el punto de referencia

-Partition Cell: Use Datum Plane > Seleccionamos la parte que quedemos dividir con un plano existente > Seleccionamos el plano que queremos usar como corte

-Partition Face: Sketch > Seleccionamos la cara donde queremos hacer un esbozo > Dibujamos el esbozo deseado

Los primeros modelos realizados con Abaqus se hicieron pensando en una aplicación de la carga de pretensado como una carga de compresión aplicada en los extremos de los cables. Para ello había que conseguir forzar la geometría de las distintas caras para tener un buen mallado y una buena conexión entre elementos.

Es por esto por lo que la creación de varios “sketchs” en la cara de la viga fue una parte que ocupó mucho tiempo junto con la creación del mallado.

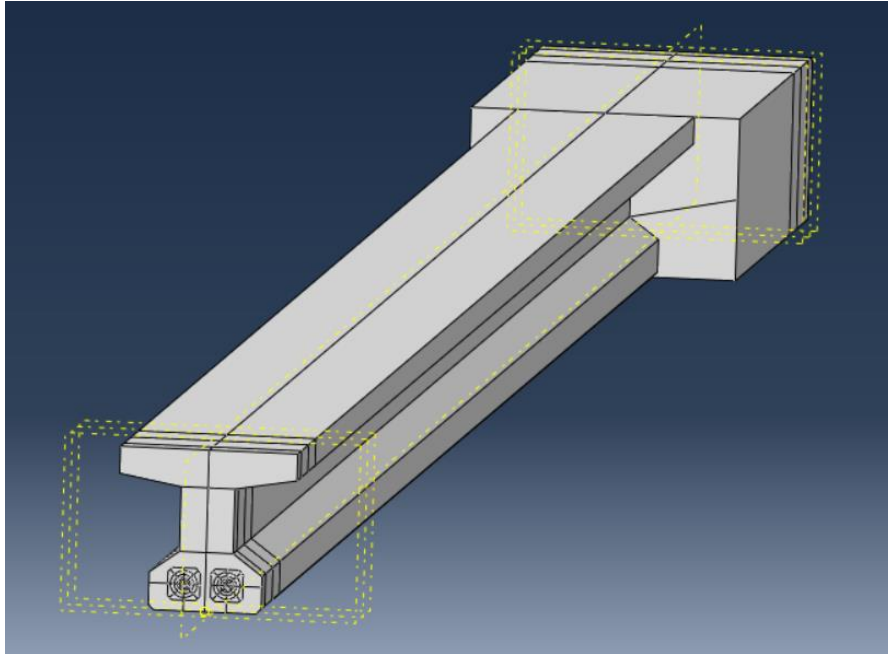


Figura 4.2.1.2 Representación de los “sketchs” creados para forzar la geometría del mallado

La viga sección doble T con el diafragma es un ejemplo de todo lo citado anteriormente. Particiones para situar bien los apoyos, esbozos para forzar el mallado, extrusiones al final de la viga para hacer el diafragma y cortes para hacer el hueco para incluir el pretensado de CFRP.

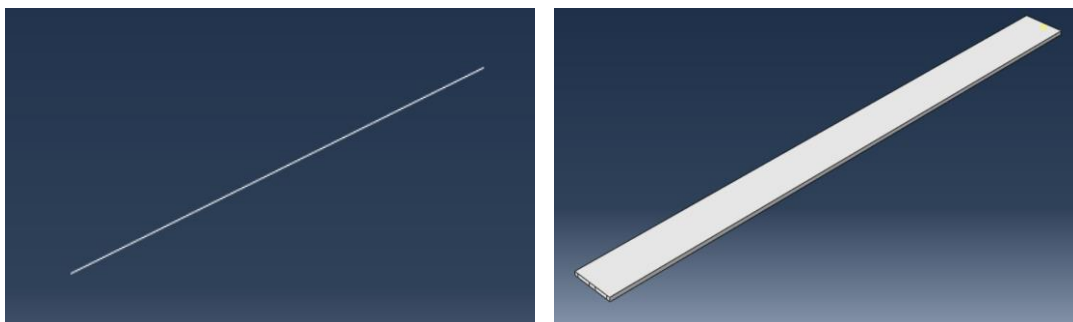


Figura 4.2.1.3 Partes tendón CFRP, tendón de acero y losa creados con Abaqus

En el desplegable de la izquierda al principio de todo podemos crear “sets” y “surfaces” que nos facilitarán la creación del modelo final.

-Desplegable de la izquierda > Click derecho en “surfaces” > Creat > Asignamos nombre a la superficie > Seleccionamos las caras que queremos que formen parte de esta superficie

-Desplegable de la izquierda > Click derecho en “sets” > Create > Asignamos nombre al conjunto > Seleccionamos las caras, puntos, aristas que formen parte del “set”

En el modelo inicial se había modelado la geometría de la armadura pasiva pero más adelante viendo que no era de especial interés, ya que la armadura dispuesta es de monaje, y que lo realmente interesante era el pretensado de CFCC se decidió hacer el modelo sin la armadura pasiva, y asumir que podría haber una pequeña variación respecto a la realidad.

4.2.2. Definición de las propiedades de los materiales y las secciones

Seguidamente definimos las propiedades de los materiales. En este caso teníamos:

-Hormigón

-Cables de fibra de carbono

-Cables de acero

Dentro de cada una se definieron las propiedades másicas, elásticas y plásticas a partir de los datos proporcionados por los fabricantes de cada uno de los materiales. (Ver Figuras 4.2.2.1.1, 4.2.2.1.2, 4.2.2.2.1 y 4.2.2.3.1)

-Create Material > Introducimos las propiedades de los materiales

4.2.2.1. Hormigón

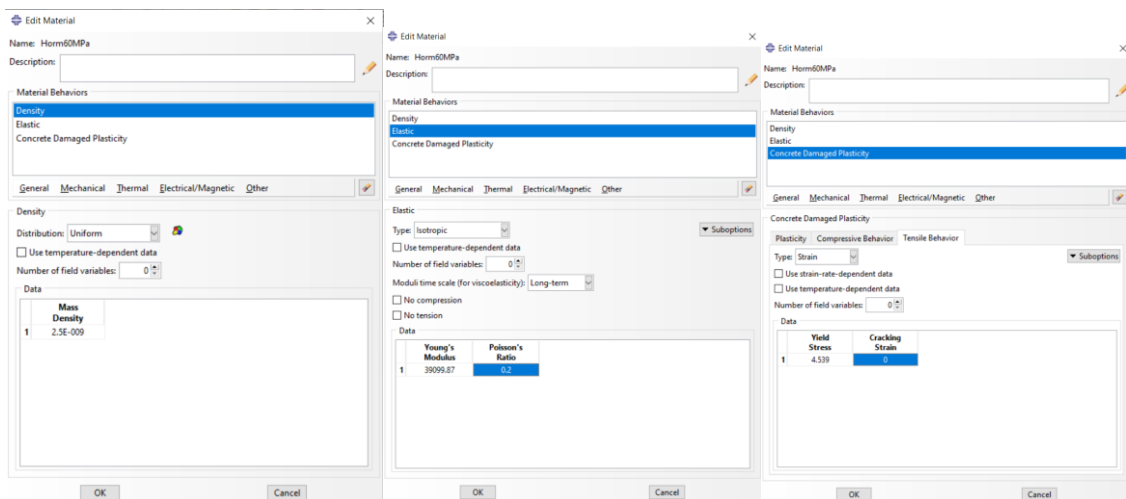


Figura 4.2.2.1 Introducción de las propiedades del hormigón I

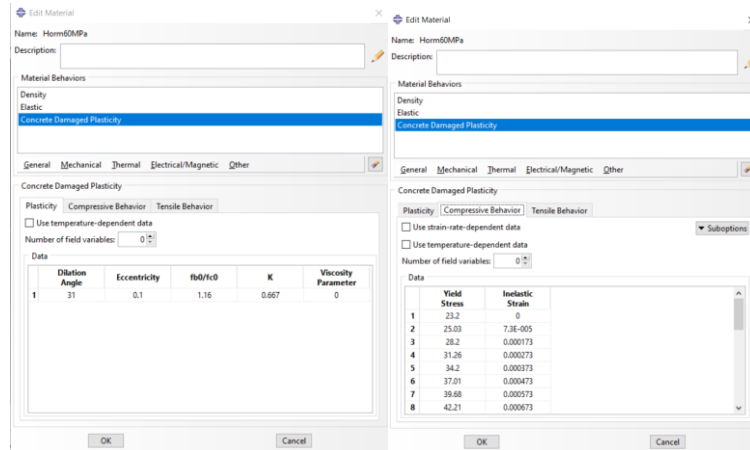


Figura 4.2.2.1.2 Introducción de las propiedades del hormigón II

4.2.2.2. CFCC

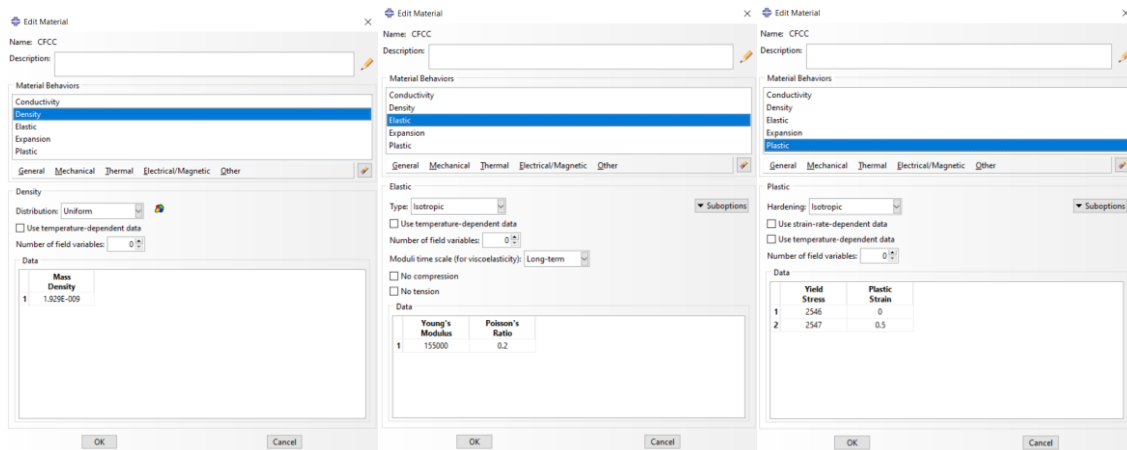


Figura 4.2.2.2.1 Introducción de las propiedades de los cables CFRP

Todos los datos introducidos en el programa son los proporcionados por Tokyo Rope.

4.2.2.3. Acero de pretensar

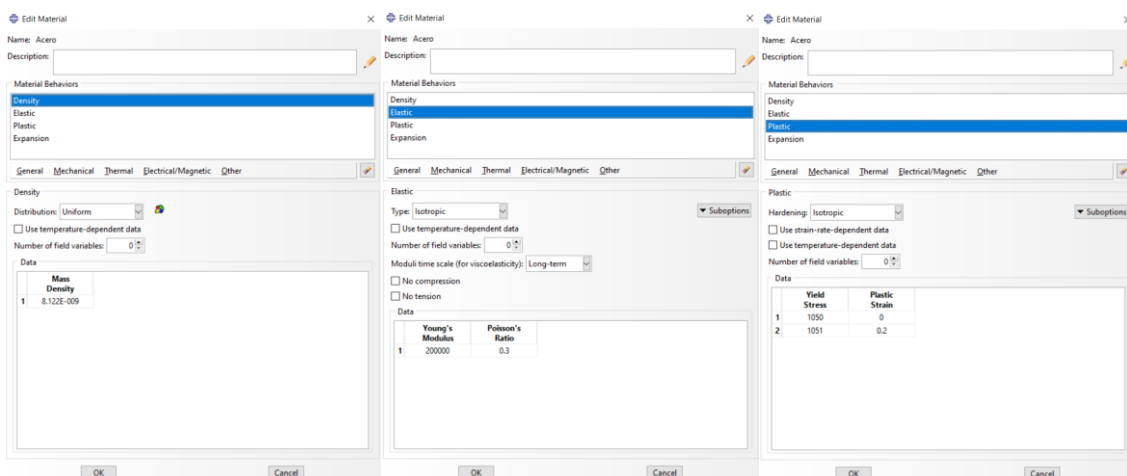


Figura 4.2.2.3.1 Introducción de las propiedades del acero de pretensar

4.2.3. Definición de las secciones y asignación de estas a cada parte

Con las propiedades ya definidas había que asignar los materiales a cada una de las partes.

-Create Section > Ponemos nombre a la sección > Seleccionamos el material en el desplegable

A continuación hay que asignar las secciones a cada parte.

-Assign Section > Seleccionamos la pieza que queremos > En el desplegable elegimos la sección que queremos asignar a la pieza

Para crear las secciones se ha hecho la diferenciación entre secciones tipo sólido y tipo biga. En este caso para los cables se han creado las secciones tipo “truss” y para la viga y la losa una sección tipo homogénea.

4.2.4. Creación de los ensamblajes a analizar

Seguidamente pasamos a la creación del conjunto o ensamblaje. En este apartado la idea es crear varios elementos y diferentes modelos para evaluar los diferentes estados y comportamientos.

1-Primeramente un modelo con una única viga biapoyada con la aplicación de las cargas de peso propio y del pretensado longitudinal CFRP. (Modelo inicial para hacer las primeras comprobaciones) (Ver Figura 4.2.4.1)

2-Un segundo modelo con dos vigas ambas con pretensado longitudinal y aplicando las cargas del postensado de continuidad, y seguidamente la carga de peso propio de la losa superior. (Ver Figura 4.2.4.2)

3-Un tercer modelo con las 2 vigas anteriores y la adición de media losa superior (en vez de ser ancho de un metro será de 50cm, solo la parte correspondiente a la mitad de las vigas) y la aplicación de la carga última de la pasarela compuesta. (Ver Figura 4.2.4.3)

4-Un modelo final, si la capacidad del ordenador lo permite con 4 vigas y la losa completa aún que al ser una pasarela simétrica no habrá diferencia en el comportamiento a flexión.

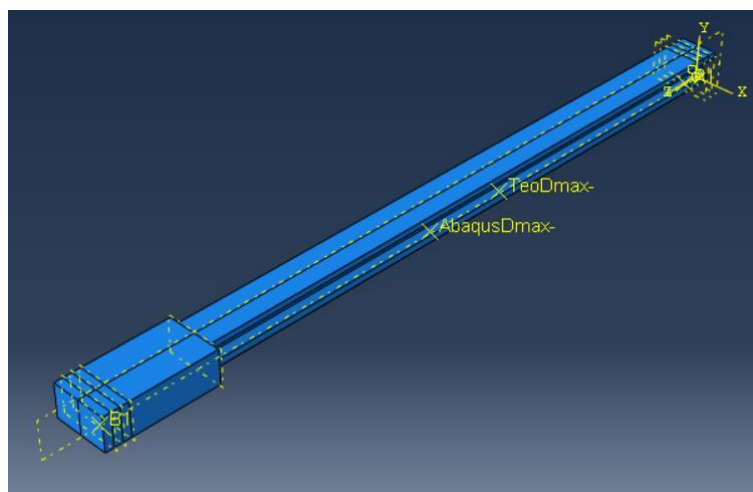


Figura 4.2.4.1 Modelo nº 1

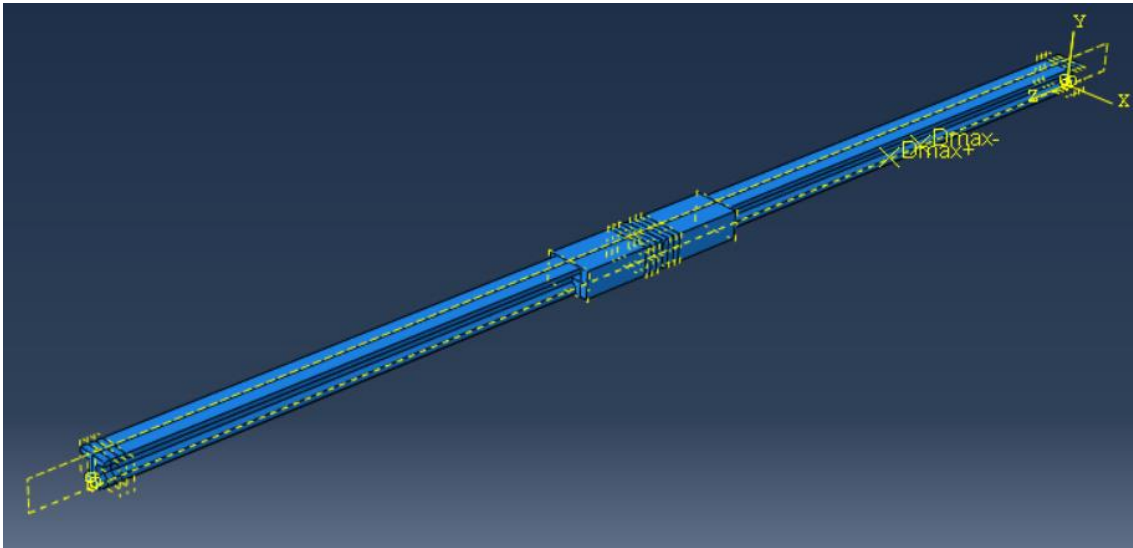


Figura 4.2.4.2 Modelo n°2

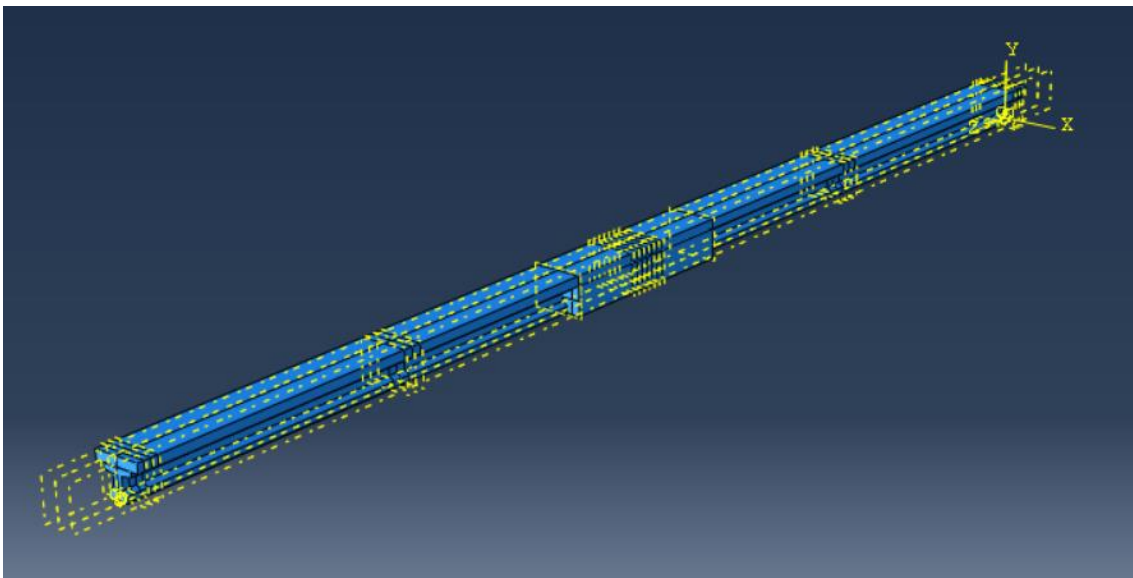


Figura 4.2.4.3 Modelo n°3

Los ensamblajes se forman del mismo modo independientemente del número de piezas o parte a utilizar pero cada uno esta creado en un archivo distinto al anterior ya que Abaqus no permite añadir nuevas partes después de haber realizado un cálculo.

Para insertar componentes, se tiene que realizar la siguiente secuencia de operaciones:

-Create Instance > Seleccionamos la pieza en la lista > Marcamos la casilla auto-offset para que no se amontonen los componentes en el mismo lugar.

Cuando insertamos un componente podemos seleccionar si lo quedemos “Dependent” o Independent” este nos marcará si el mallado lo tendremos que hacer parte a parte o dentro del ensamblaje final poder modificarlo allí. No es una opción muy relevante ya que más adelante se pueden modificar esta selección sin que comporte ninguna problemática.

Para desplazar una pieza seguiremos la siguiente secuencia de ordenes:

-Translate Instance > Seleccionamos la pieza > Punto de origen > Punto final

Para rotar una pieza:

-Rotate Instance > Seleccionamos la pieza > Seleccionamos dos puntos que formen un eje respecto el cual rotar > Introducimos los grados que queremos rotar

4.2.5. Creación de los “steps” o casos de cargas

En el apartado de “step” creamos los pasos que se creyeron más oportunos para que el modelo se asemejara lo mejor posible a la realidad.

-Create step > Ponemos nombre al caso de carga > En “Incrementation” ponemos los valores de iteración deseados

Todos los “steps” se crearon usando los mismos parámetros que se muestran a continuación. (Ver Figura 4.2.5.1)

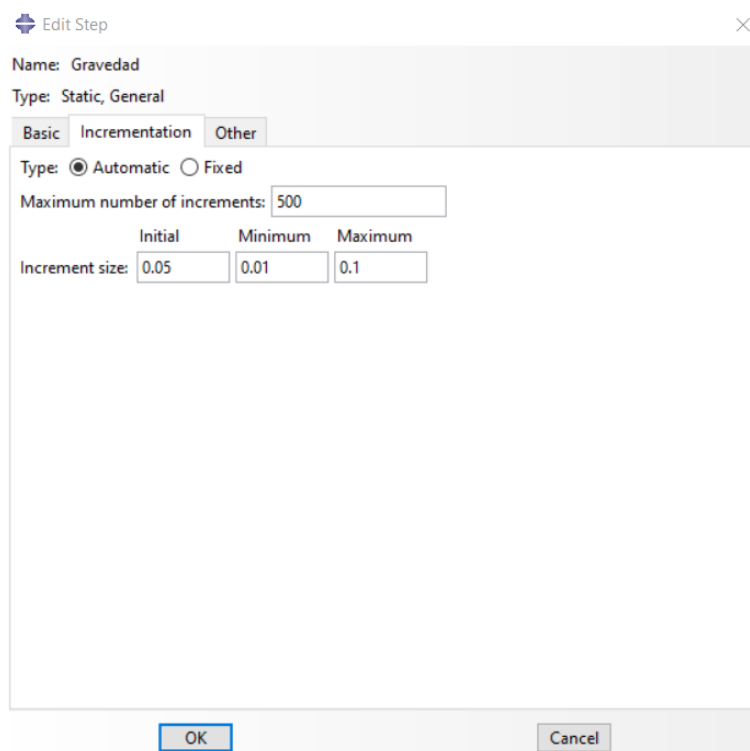


Figura 4.2.5.1 Ejemplo de los parámetros de incremento usados en los “steps”

Las cargas que se aplicaran en los distintos modelos y con las cuales se van a tener que obtener los resultados finales son:

Modelo nº1-

Step 1 - Carga de peso propio (no se va a dar nunca en la realidad pero nos servirá para hacer una primera comparación con los cálculos del predimensionamiento)

Step 2 - Carga de peso propio + Pretensado CFCC

Modelo nº2-

Step 1 - Carga de peso propio (no se va a dar nunca en la realidad)

Step 2 - Carga de peso propio + Pretensado CFCC

Step 3 - Carga de peso propio + Pretensado CFCC + Postensado Acero

Step 4 - Carga de peso propio + Pretensado CFCC + Postensado Acero + Peso propio losa superior

Modelo nº3-

Step 1 - Carga de peso propio + Pretensados + Postensados

Step 2 - Todas las cargas anteriores + Carga última de la pasarela

4.2.6. Designación de las interacciones i restricciones

Seguidamente en las interacciones o restricciones las hemos diferenciado en dos grupos. Las que se refieren a rigidizar partes del elemento referidas a un punto (para el caso de los apoyos) y el caso de la interacción de los elementos del modelo (cables-viga o losa-viga)

Para el caso de los apoyos (relacionar toda una superficie a un punto para que la obtención de resultados sea mucho más sencilla) se crearon unas interacciones de tipo “Coupling” donde se seleccionaron los puntos centrales de las particiones realizadas en las vigas a un conjunto de superficies de su alrededor. (Ver Figura 4.2.6.1)

-Create Constraint > Coupling > Seleccionamos el punto donde irá el apoyo > Seleccionamos las caras del apoyo real > Dejamos marcados todas las reacciones para hacer una interacción “rígida”

Estas interacciones se usan para obtener las restricciones referidas a un único punto y así poder hacer comprobaciones de aplicación de carga de manera más sencilla.

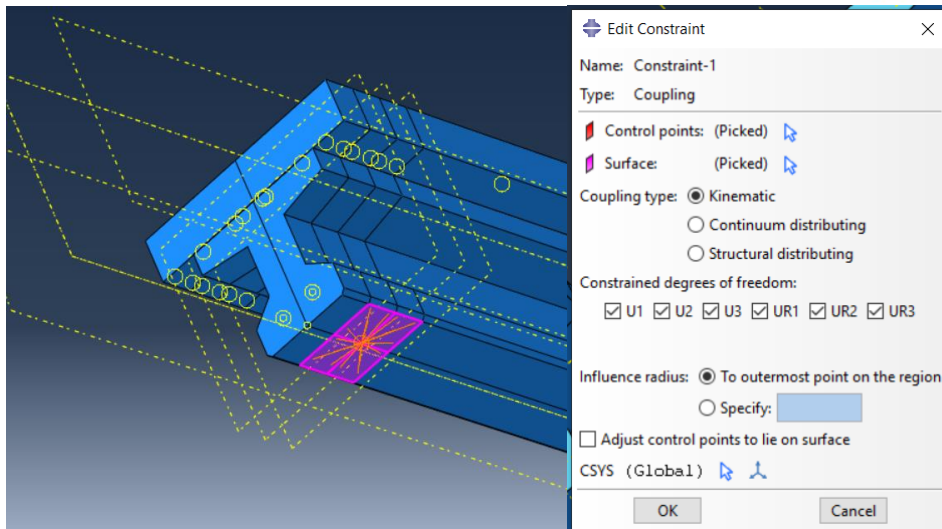


Figura 4.2.6.1 Representación de las interacciones tipo "Coupling" para los apoyos (relacionar toda una superficie a un solo punto)

Este tipo de interacción se ha aplicado también en la zona de la losa donde se aplicará la carga puntual para que no haya tensiones ni deformaciones que puedan inducir a error. (Ver Figura 4.2.6.2)

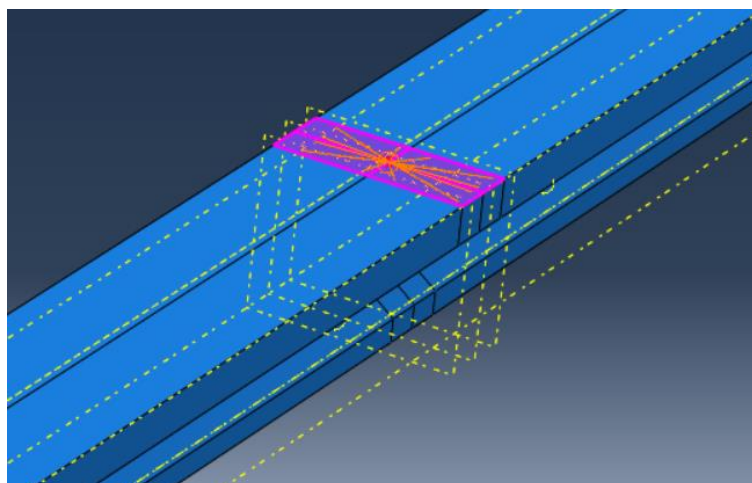


Figura 4.2.6.2 Zona de aplicación de la carga última

Para la interacción tanto de los cables de pretensado como para los del postensado de continuidad se ha aplicado una tipo "embed region" siendo la región las dos vigas del modelo.

-Create Constraint > Embed Region > Embed Region > Seleccionamos los cables > Host Region > Seleccionamos las vigas > OK

Para la unión viga-viga se usó una interacción tipo contacto para relacionar los extremos de los diafragmas. (Ver Figura 4.2.6.3).

En el caso de la interacción viga-losa la sección "master" son la cara superior de las vigas.

-Create Interaction Property > Ponemos los valores siguientes

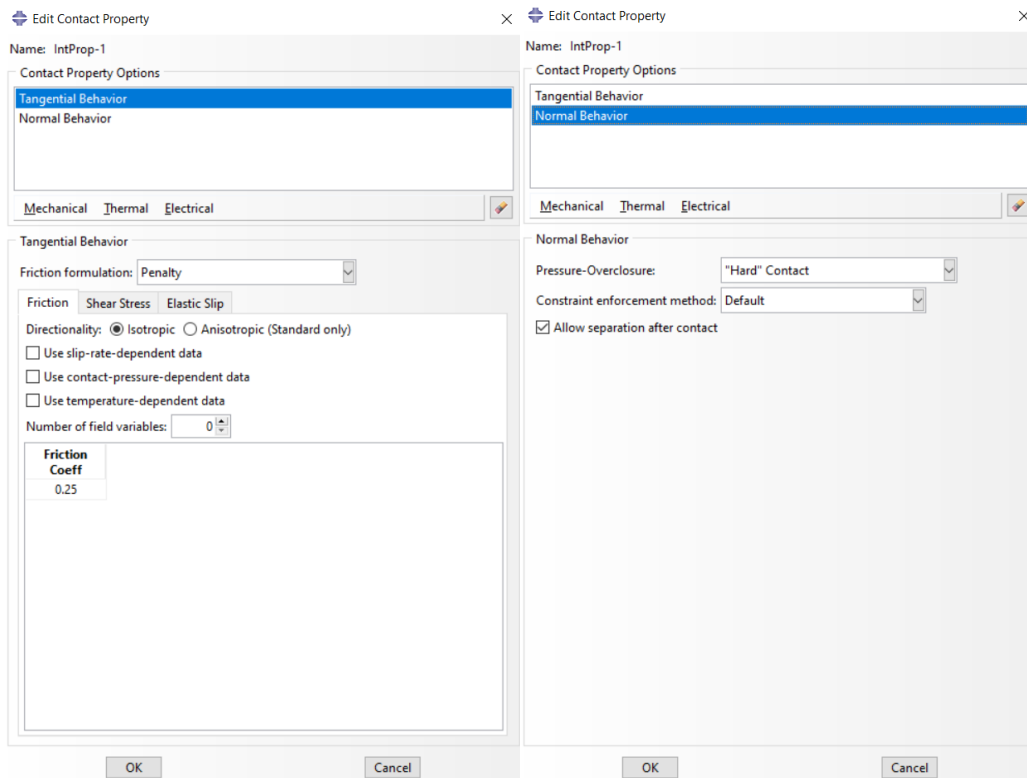


Figura 4.2.6.3 Creación de la interacción de contacto entre los tendones CFRP y el hormigón

Luego se crearía una interacción tipo “Surface to Surface” como superficies “master” y “slave” las caras de los diafragmas aplicando como tipo de interacción de contacto la anteriormente creada y seleccionando la opción “Small sliding”

Para la interacción de la losa con las vigas se ha utilizado una tipo “Tie”

-Create Constrain > Tie > Seleccionamos la superficie “master” la que transmitirá la carga > Seleccionamos la superficie “slave” la que recibirá la carga

4.2.7. Asignación de los apoyos y aplicación de las cargas

Los apoyos utilizados en este modelo de Abaqus son los propuestos por la dirección de este experimento. (Ver Figura 4.2.7.1 y 4.2.7.2)

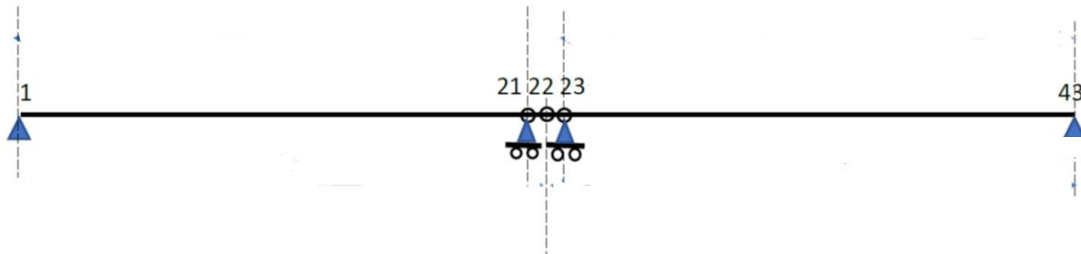


Figura 4.2.7.1 Disposición de los apoyos y su tipo

Un apoyo fijo en los extremos, y un doble rodillo en el centro de la pasarela.

-Create Boudary Condition > Ponemos nombre al apoyo > Seleccionamos el “step” en el que queremos que se aplique este apoyo (se pueden copiar a todos los casos de carga) > Displacement/Rotation > Seleccionamos los puntos/caras/aristas que queremos > Marcamos las casillas de las restricciones que queremos en el apoyo en cuestión.

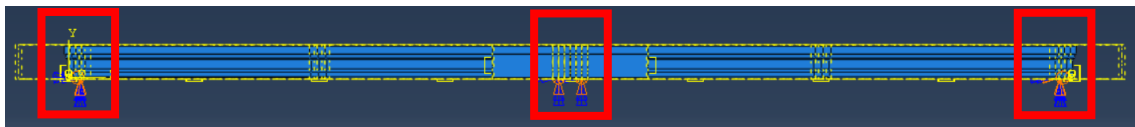


Figura 4.2.7.2 Representaciones de los apoyos en el modelo de Abaqus

Estos apoyos, tal como se ha especificado antes han ido referidos a un punto, por lo que la reacción se dará en zonas localizadas y no en toda una superficie.

Para aplicar las cargas las vamos a desglosar en tantos como “steps” y distintos modelos que hemos creado, y para cada una de ellas describiremos el tipo, donde se ha aplicado y la magnitud de esta.

-Peso propio (9.81m/s^2)

-Pretensado longitudinal (en fabrica) 300kN de carga de pretensado por viga

-Pretensado de continuidad (en laboratorio) 300kN de carga de postensado por diafragma (por unión)

-Aplicación de carga en un vano (en laboratorio)

*En la aplicación de las cargas de pretensado y postensado sea decidido tener en cuenta las perdidas por lo que solo se aplicará un 90% de la carga total en el cao del pretensado CFCC y un 85% en el caso del postensado de continuidad con cables de acero. (Estos es una estimación pues las pérdidas en pretensado CFCC son inferiores que en el caso del acero)

-Create Load > Ponemos nombre a la carga > Seleccionamos el “step” en el que queremos que se aplique este apoyo (se pueden copiar a todos los casos de carga) > Seleccionamos en el

desplegable el tipo de carga que queremos usar (Gravity y Concentrated force son los que se han usado en este modelo) > Ponemos la magnitud de la carga (con signo o seleccionando un vector con coordenadas en el modelo)

En el caso de los pretensados y postesados, después de realizar varios modelos se decidió aplicar este tipo de esfuerzos como una variación de temperatura.

Se probó con aplicación de cargas puntuales en el modelo, aplicación de carga en un área tributaria del tamaño de los tendones, anclar unos elementos 3D en forma de cable y aplicar las cargas en sus extremos, aplicar un campo predefinido de variación tensiones y aplicar un campo predefinido de variación de temperatura.

Finalmente este último fue el que mejor resultados y menos errores dio y su aplicación era la más sencilla con de propagar en diferentes “steps”.

Para la aplicación de esta carga crearemos un campo predefinido:

-Create Predefined Field > Le damos nombre > Seleccionamos el “step” inicial en el desplegable > Marcamos la casilla “otros” > En tipo seleccionamos temperatura > Seleccionamos en este caso solo los cables de pretensado (son los únicos a los cuales vamos a aplicar cambios de temperatura) > Done > En magnitud ponemos 0

Este 0 es la referencia respecto la cual vamos a crear o dilataciones o contracciones.

Para aplicar la carga en el “step” correspondiente:

-Predefined Field Manager > Nos situamos sobre el “step” donde queremos aplicar el cambio de temperatura > Editar > En Statuts le damos al desplegables y seleccionamos Modified > Y en magnitud colocamos un valor positivo si queremos aumentar la temperatura o uno negativo si la queremos disminuir.

En el caso del pretensado se introdujo una variación de temperatura de -7534 la cual se obtuvo igualando las siguientes ecuaciones y representa el 90% de la carga de pretensado

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$$

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

De estos valores desconocemos el coeficiente de dilatación térmica y la variación de temperatura, con lo que forzando uno vamos a obtener el otro.

Se estimo un coeficiente de dilatación α (este coeficiente puede ser cualquier valor pues este lo modificamos la variación de temperatura será otra pero el resultado será la misma tensión)

$$\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Y sabiendo que la tensión en los cables será de:

$$\sigma_{real} = \frac{P}{A_p} = 1297.578MPa$$

Tenemos lo siguiente:

$$1297.578 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot 155.000$$

$$\Delta T \approx 8371 ; \Delta T_{90\%} = 7534$$

Sabiendo que la tensión debe ser de compresión, por convenio de signos la variación en la magnitud de temperatura debe ser de -7534.

Para el caso del postensado de continuidad se utilizó el mismo método pero variando los datos en función de la carga de postensado y la sección de los cables de acero.

$$\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$$

$$\sigma_{real} = \frac{P}{551} = 227.23MPa$$

$$227.23 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot 200.000$$

$$\Delta T \approx 1360 ; \Delta T_{85\%} = 1156$$

Sabiendo que la tensión debe ser de compresión, por convenio de signos la variación en la magnitud de temperatura debe ser de -1156.

4.2.8. Generación del mallado

La parte del mallado es la más compleja del modelo pero se puede solucionar fácilmente aceptando pequeños avisos como puede ser el caso de alguna distorsión. Para este modelo se han usado elementos cuadrados para el mallado y el error ha sido muy pequeño. En la mayoría de los modelos el error era de 0%. (Ver Figura 4.2.8.1 y 4.2.8.2).

Los pasos que se han seguido son los siguientes:

-Assign Mesh Controls > Seleccionamos Hex-Dominated y el tipo Sweep

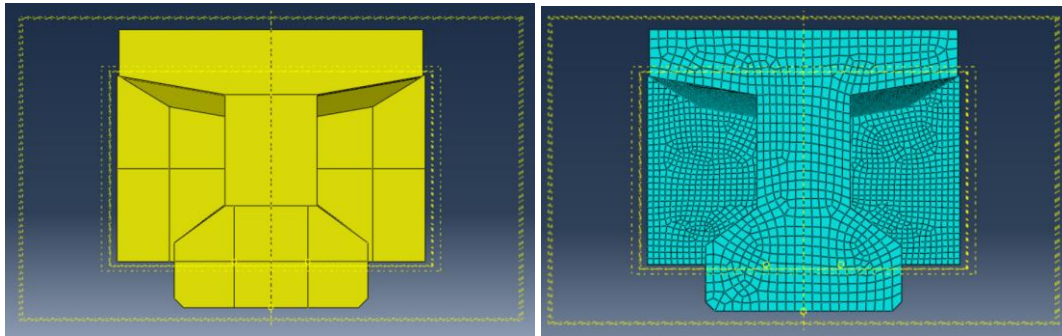


Figura 4.2.8.1 Particiones creadas para forzar la geometría de la malla utilizada con (57.000 elementos)

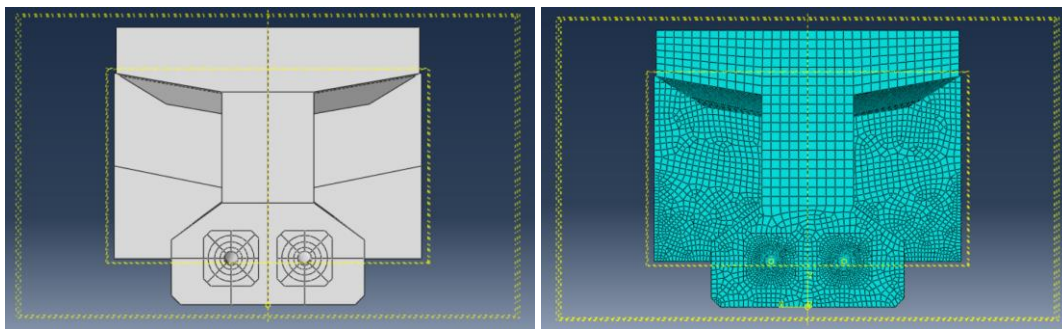


Figura 4.2.8.2 Generación de esbozos para la creación de los primeros modelos (670.000 elementos)

En estos esbozos más complejos se llegaron a calcular modelos con más de 2 millones de elementos y un tiempo aproximado para calcular el peso propio y el pretensado de entorno a las 12 horas.

Después de hacer varios modelos e ir variando el tamaño de los elementos de observó que los cambios no eran de gran importancia y se decidió utilizar elementos mucho más grandes hasta obtener un modelo valido y final con el cual se trabajaría más en profundidad. El modelo final utilizado como base de los resultados estaba compuesto por unos 180.000 elementos. (Ver Figura 4.2.8.3).

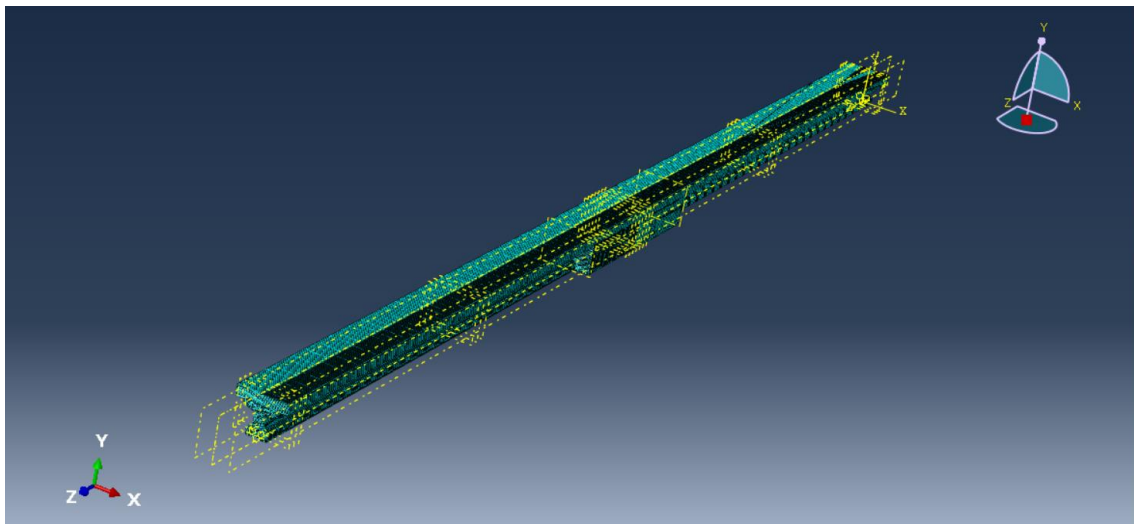


Figure 4.2.8.3 Mallado del modelo final

Con el “sketch” definido (este ya se hizo en la parte de “Part” porque se tenía una idea de cómo podría ser) se aplica la restricción de medida de los elementos usados en cada geometría.

-Seed Edges > Seleccionamos las cartas > Ponemos la medida de los elementos

Gracias a la utilización de elementos barra para el pretensado se ha conseguido un error del 0% en el modelo en general. (Ver Figura 4.2.8.4).

Part instance: Viga-1 Number of elements : 56925. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-4-1 Number of elements : 20. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-4-2 Number of elements : 20. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Losa-1 Number of elements : 69680. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-3-1 Number of elements : 65. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Viga-2 Number of elements : 56925. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-3-3 Number of elements : 65. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-3-2 Number of elements : 65. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)
Part instance: Part-3-4 Number of elements : 65. Analysis errors: 0 (0%). Analysis warnings: 0 (0%)

Figura 4.2.8.4 Ejemplo de errores del Modelo n^º3

4.2.9. Creación de los trabajos para hacer los cálculos

En esta parte es donde se crean los ficheros de salida que quedemos para cada cálculo realizado.

-Create Job > Ponemos sobre al trabajo > Seleccionamos el modelo que analizar en la lista > En la pestaña de general seleccionamos el directorio donde realizar el cálculo (sino por defecto lo guarda en la unidad principal del PC (:C\))

4.2.10. Visualización de los resultados

Una vez el programa había realizado el análisis con elementos finitos se procedió a la visualización de los resultados.



Figura 4.2.10.1 Panel de selección para la visualización de los distintos resultados

En la parte superior podemos seleccionar que queremos ver y en la columna izquierda del modelo el “como lo queremos ver”. (Ver Figura 4.2.10.1), como por ejemplo el modelo deformado, el modelo en mapa de colores (que se puede restringir los valores para buscar valores concretos) o los valores deseados con la herramienta “Query”

Tools > Query... > Probe values > En “probe” seleccionamos nodos > podemos ver en cada nodo el valor de la tensión, deformación o reacción (en función de la visualización que estemos pidiendo en el desplegable de la imagen anterior.

4.3. Resultados

4.3.1. Resultados del Modelo nº1- (viga aislada)

-Carga de peso propio

Este primer cálculo se realizó para hacer una comparación con los valores de deformación post aplicación de la gravedad sobre la viga. En la siguiente imagen (Ver Figura 4.3.1.1) podemos observar la deformación de la viga con mapa de colores.

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 21:52:17 Hora de verano romance 2023

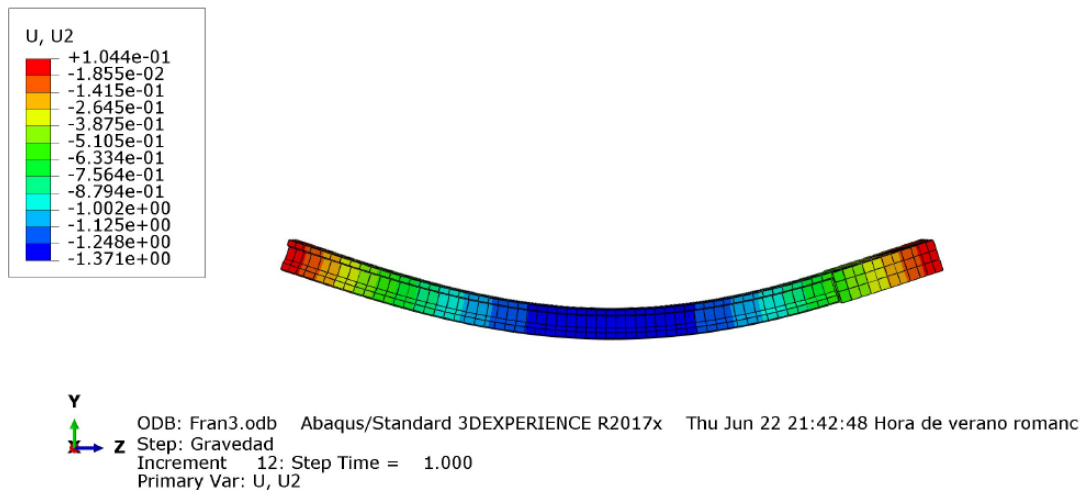


Figura 4.3.1.1 Geometría deformada modelo nº1 Step 1

$$f_{PP} = 1.3713\text{mm} \quad ; \quad x_{f_{max}} = 3.31\text{m}$$

Estos son los valores donde se encuentra la máxima deflexión respecto a los 0.98mm situados a 2.91m del extremo fijo de la viga. Esta no es una gran diferencia pero ya no indica que puy probablemente los cálculos realizados con Abaqus proporcionan una mejor aproximación a la realidad pues si nos fijamos en que la rigidez del diafragma es superior, la deformación real debería estar situada a algo más de la mitad de la viga.

-Pretensado CFCC + Carga de peso propio (Situación de transporte)

Seguidamente podemos observar el estado deformado de la viga tras aplicar las fuerzas de pretensado (Ver Figura 4.3.1.2).

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 21:52:30 Hora de verano romance 2023

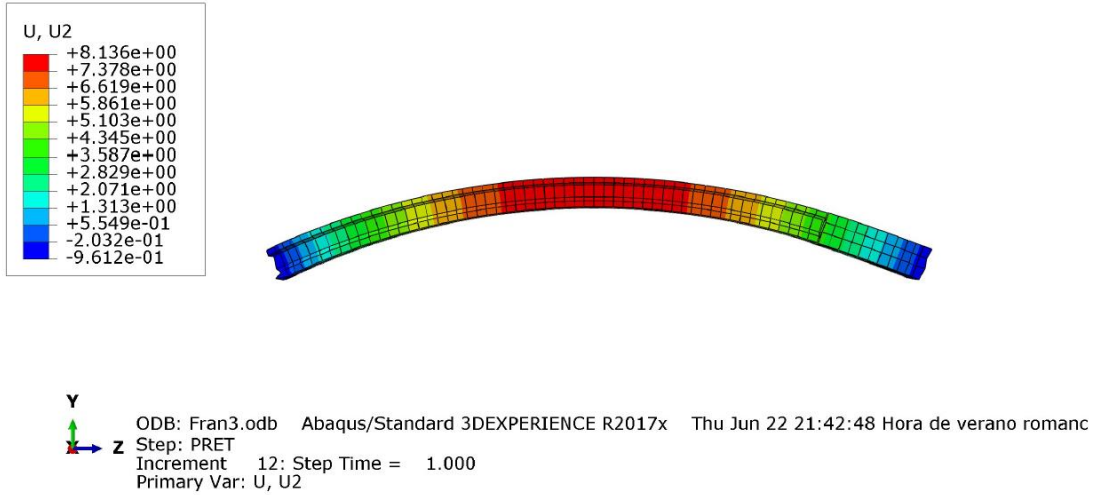


Figura 4.3.1.2 Geometría deformada modelo n°1 Step 2

$$f_{PP+Pret} = -8.136mm \quad ; \quad x_{f_{max}} = 3.21m$$

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 21:56:45 Hora de verano romance 2023

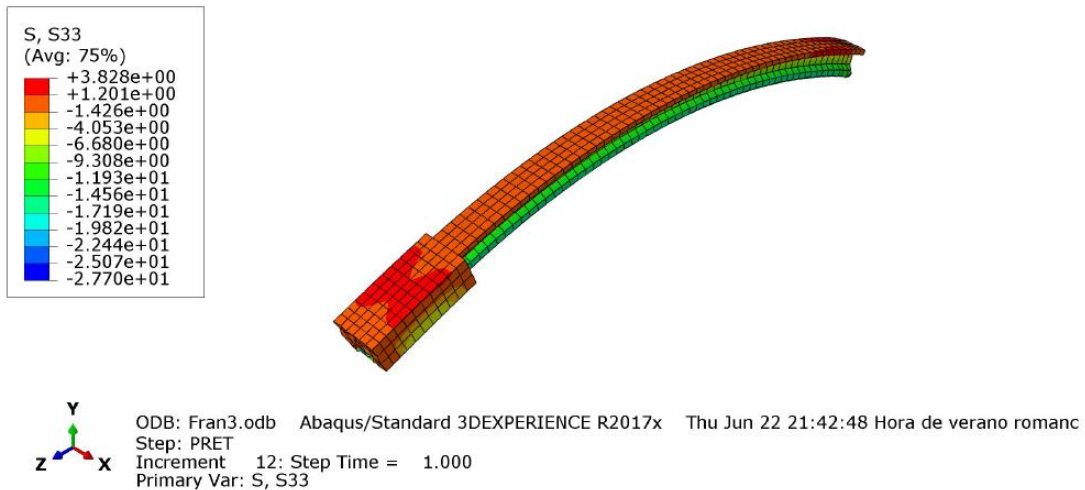


Figura 4.3.1.3 Tensiones del modelo n°1 en situación de transporte

A nivel de tensiones la Figura 4.3.1.3 muestra la tensión S33

$$\sigma_{TR} = 3.828MPa \quad ; \quad \sigma_{COMP} = 27.70MPa$$

El valor de tracción sobrepasa a tracción del hormigón a los dos días siendo 3.42MPa el valor teórico. Esto nos indica que en la zona con mayores tensiones de producirá una leve aparición de fisuras. Así pues, en las vigas prefabricadas ya aparecieron algunas en las zonas de anclaje.

La principal duda que había después de la aplicación del pretensado longitudinal era la situación de transporte. Había que verificar que no hubiera fisuración en la cara inferior de la viga. Esto en pretensado no suele pasar porque ya se calcula el grado para evitar dicho problema.

Revisando el modelo de Abaqus encontramos que las tensiones en la cara inferior se encuentran entre 14 y 15MPa y en compresión, por lo que no habrá fisuración en la situación de transporte.

La tensión máxima de tracción se encuentre encima del diafragma y tiene un valor de 1.56MPa.

4.3.2. Resultados del Modelo nº2- (2 vigas conectadas)

-Peso propio + Pretensado CFCC + Postensado de continuidad

Seguidamente, en la Figura 4.3.2.1 podemos observar la deformada tras aplicar el postensado de continuidad con su mapa de colores correspondiente a los valores de la imagen.

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:29:32 Hora de verano romance 2023

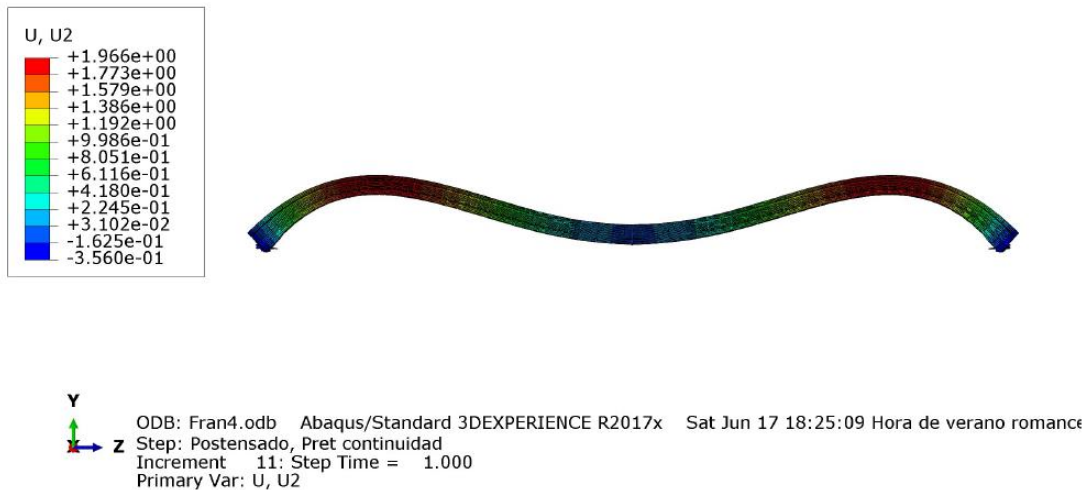


Figura 4.3.2.1 Geometría deformada modelo nº2 Step 1

Una vez realizado el postensado de continuidad con cables de acero la contraflecha de la estructura se reduce en un 80% aproximadamente.

A nivel tensional (Ver Figura 4.3.2.2) se obtuvieron los siguientes resultados:

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:29:18 Hora de verano romance 2023



Figura 4.3.2.2 Tensiones modelo nº2 Step1

Los valores máximos y mínimos de las tensiones se deben al anclaje de los cables de pretensado y postensado pues se calcula como la transmisión de carga en un punto así pues estimamos según las tensiones obtenidas con la herramienta de análisis de los nodos por separado.

$$\sigma_{TR} = 1.80MPa ; \sigma_{COMP} = 18.45MPa$$

Estas tensiones las encontramos en la cara superior del apoyo de la sección doble T y en la cara inferior donde la contraflecha sigue siendo la más elevada respectivamente.

Seguidamente compararemos los valores de tensiones, en MPa, respecto a lo obtenido con el cálculo mediante fórmulas realizado en el predimensionamiento. Ver Tabla 4.3.2.1.

Caso	Cara	Predimensionamiento	Abaqus	Error
Momentos negativos en el diafragma	Superior	0.885MPa	-7.96 MPa	Cambio de esfuerzo (TR a COMP)
	Inferior	-8.885MPa	-2.46 MPa	80%
Momentos negativos en cambio de sección	Superior	2.74 MPa	-7.71 MPa	Cambio de esfuerzo (TR a COMP)
	Inferior	-15.339 MPa	-3.77 MPa	75%
Momentos positivos en la sección doble T	Superior	0.74 MPa	-4.12 MPa	Cambio de esfuerzo (TR a COMP)
	Inferior	-12.993 MPa	-7.05 MPa	45%

Tabla 4.3.2.1 Comparación de los valores obtenidos con formulación respecto a los de Abaqus I

Como podemos ver los valores obtenidos por formulación tienden a ser una aproximación que no se asemeja a la realidad pues no tiene en cuenta condiciones como las interacciones de los elementos, la deformación o la redistribución de esfuerzos.

-Peso propio + Pretensado CFCC + Postensado de continuidad + Peso propio de la losa

En el siguiente “step” se aplicó el peso propio de la losa superior y la deformada fue la siguiente (Ver Figura 4.3.2.3).

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:33:32 Hora de verano romance 2023

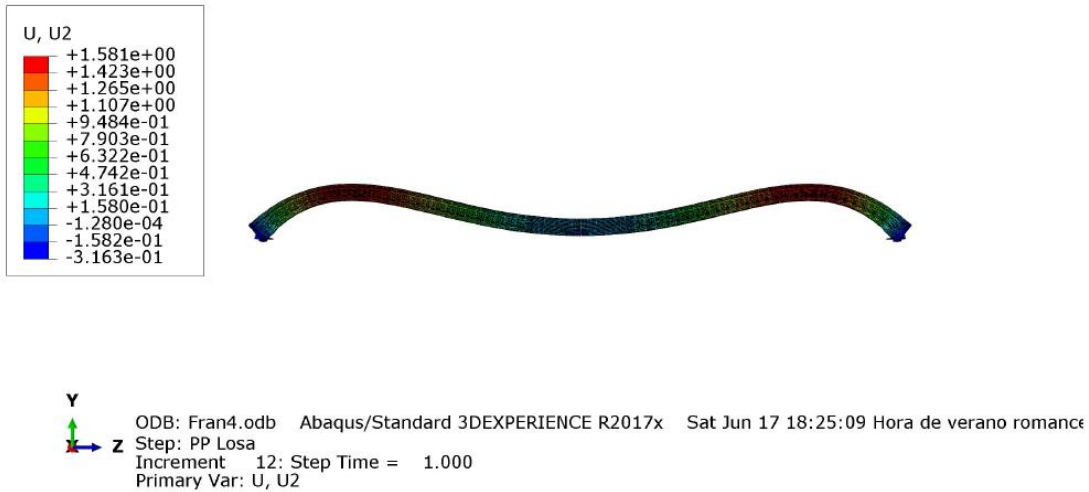


Figura 4.3.2.3 Geometría deformada modelo nº2 Step 2

La contraflecha después de aplicar el hormigón de la losa superior se reduce en un 20% (0.4mm aproximadamente).

Del mismo modo que en los otros estados se verificaron las tensiones (Ver Figura 4.3.2.4).

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:33:45 Hora de verano romance 2023



Figura 4.3.2.4 Tensiones modelo nº2 Step2

A nivel de tensión es, igual que en el caso de la deformada, no se experimenta considerables variaciones en cuanto a tensiones pues el peso de la losa superior no es muy elevado.

Otra vez, las tensiones máximas tanto de tracción como de compresión las encontramos en la cara superior del apoyo de la sección doble T y en la cara inferior donde la contraflecha sigue siendo la más elevada respectivamente.

$$\sigma_{TR} = 1.78MPa ; \sigma_{COMP} = 18.32MPa$$

Seguidamente compararemos los valores de tensiones, en MPa, respecto a lo obtenido con el cálculo por formulación. Ver Tabla 4.3.2.2.

Caso	Cara	Predimensionamiento	Abaqus	Error
Momentos negativos en el diafragma	Superior	0.185 MPa	-7.15 MPa	Cambio de esfuerzo (TR a COMP)
	Inferior	-24.516 MPa	-3.25 MPa	85%
Momentos negativos en cambio de sección	Superior	3.438 MPa	-7.09 MPa	Cambio de esfuerzo (TR a COMP)
	Inferior	-16.175 MPa	-4.45 MPa	70%
Momentos positivos en la sección doble T	Superior	-0.385 MPa	-5.37 MPa	95%
	Inferior	-11.699 MPa	-6.74 MPa	50%

Tabla 4.3.2.2 Comparación de los valores obtenidos con formulación respecto a los de Abaqus II

Otra vez coincidimos en que los valores obtenidos por formulación solo sirven para hacer un previo dimensionamiento, pero cuanto hay muchas interacciones es mejor utilizar programas de cálculo como Abaqus.

4.3.3. Resultados del Modelo nº3- (2 vigas conectadas + Losa superior)

-Peso propio + Pretensado CFCC + Postensado de continuidad

En el tercer modelo se creó un step con todas las cargas previas calculando la pasarela trabajando como una sección compuesta donde la losa aporta rigidez.

Seguidamente podemos observar el modo y los valores de deformación del tablero final (Ver Figura 4.3.3.1).

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:44:57 Hora de verano romance 2023

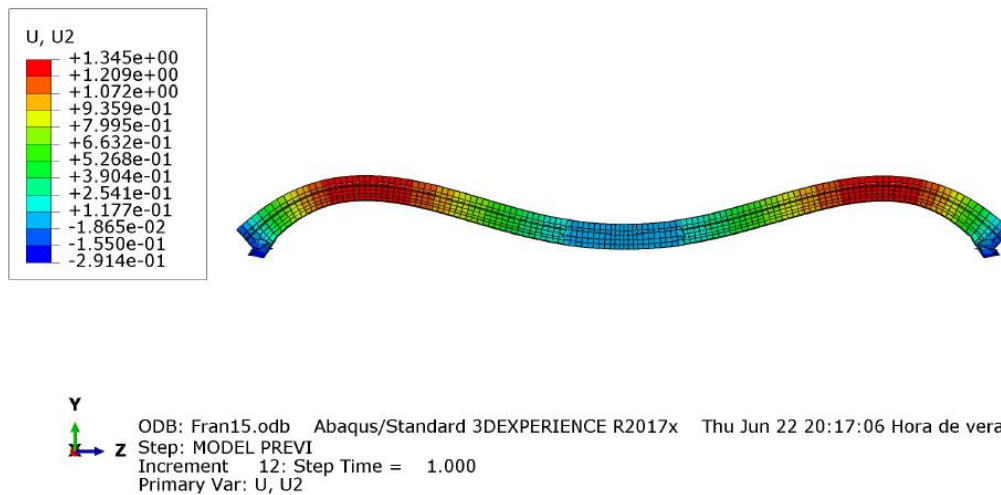


Figura 4.3.3.1 Geometría deformada modelo nº3 Step1

Hay una variación entre la deformada del modelo 2 y 3 de unos 0.1mm y se debe a que no se pudieron aplicar las cargas de pretensado y postensado sin que haya la interacción entre la losa y las vigas. Al ser una variación tan pequeña se considera correcto el modelado.

Del mismo modo que en los otros estados se verificaron las tensiones (Ver Figura 4.3.3.2).

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:44:43 Hora de verano romance 2023



Figura 4.3.3.2 Tensiones modelo nº3 Step1

-Peso propio + Pretensado CFCC + Postensado de continuidad + Carga última

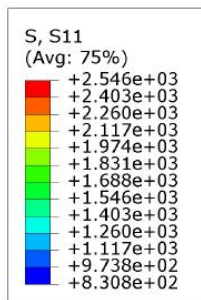
En este caso de carga se aplicó una carga puntual de 250kN en el centro de un vano y el propio programa fue haciendo iteraciones hasta que el modelo agotara. En este caso el programa abortó los calculo al 92.07%, lo que significa que la carga aplicada fue de 237kN aproximadamente lo cual nos indica que esta carga agotará el modelo y podemos considerarla como carga última aplicada en este punto. En este caso de carga o “step” el modelo aborta el cálculo porque detecta el fallo de alguno de los elementos del ensablaje.

$$F_{uL/2} = 230.35kN$$

El modo de fallo de para este tipo de carga es el agotamiento de los cables CFCC pues en el 92.14% de la carga que hemos definido en el modelo, estos llegan a tensiones superiores a las plásticas.

Seguidamente podemos observar en al Figura 4.3.3.3 el modo deformado de los cables CFCC con las tensiones alcanzadas por estos en el modelo final.

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Jun 22 22:49:56 Hora de verano romance 2023



Y

 ODB: Fran15.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Thu Jun 22 20:17:06 Hora de verano roman
 Step: Carga última
 Increment 32: Step Time = 0.9214
 Primary Var: S, S11

Figura 4.3.3.3 Tensiones en los tendones bajo la carga última

A nivel total de la estructura las deformaciones fueron las mostradas en la Figura 4.3.3.4

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Jun 23 16:04:40 Hora de verano romance 2023



Figura 4.3.3.4 Geometría deformada modelo nº3 Step2

$$f_{F_u} = 64.9957mm \quad ; \quad x_{f_{F_u}} = 3.25m$$

Este diagrama (Ver Figura 4.3.3.5) muestra la evolución del desplazamiento del punto de aplicación de la carga conforme esta aumenta. Dentro de los valores de carga se encuentran también el peso propio de la pasarela. (Hay que tener en cuenta que el modelo analizado con Abaqus representa media pasarela por lo que la carga de fallo de la pasarela que se va a ensayar en el laboratorio de la UPC debería ser el doble de la obtenida por cálculo).

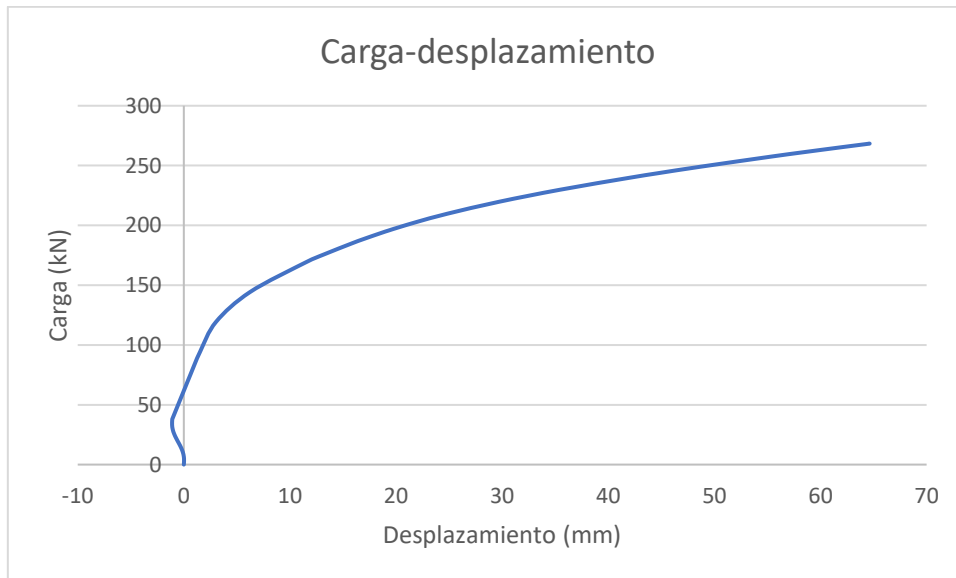


Figura 4.3.3.5 Gráfica carga-desplazamiento en el modelo de fallo

A nivel de tensiones principales en el hormigón se obtuvieron los valores mostrados en la Figura 4.3.3.6.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Jun 23 16:14:07 Hora de verano romance 2023



Figura 4.3.3.6 Tensiones del modelo nº3 Step2

Para este modelo se intentaron introducir diferentes interacciones para evitar el movimiento relativo entre las caras en contacto de las vigas pues las losa en principio es la encargada de rigidizar la unión y de evitar dichos desplazamientos. Tras varios intentos no se obtuvieron resultados aceptables pues los distintos modos de fijar los diafragmas variaban el funcionamiento de la pasarela compuesta.

Este modelo final serviría para el dimensionamiento y verificación de los aparatos de apoyo pues ya se sabía que inicialmente en el extremo opuesto del vano no cargado se produciría el levantamiento pero también se encontró que uno de los apoyos del diafragma mostraba el mismo problema. (Ver Figura 4.3.3.7)

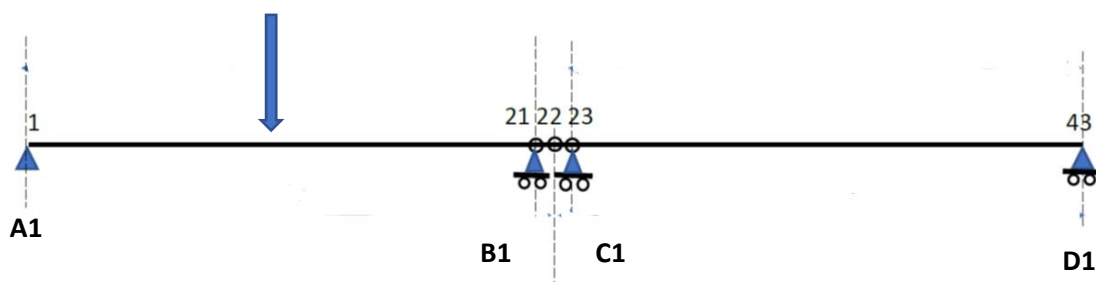


Figura 4.3.3.7 Aplicación de la carga última y reacciones en los apoyos

$$A1 = 99.069kN ; B1 = 247.735kN ; C1 = -67.073kN ; D1 = -11.385kN$$

El levantamiento en más de un apoyo es un comportamiento que de inicio no se había contemplado pero se va a estudiar más en profundidad para las pruebas de la fase experimental de este proyecto.

Para aportar más datos hacia la campaña experimental que se realizará a finales de Julio, se decidió simular esta misma tipología de pasarela simulando un único apoyo central para ver la afectación en cuanto a deformada, carga última y reacciones en los apoyos.

4.3.4. Modelo alternativo con un solo apoyo central

Una vez realizado el modelo final se ha seguido trabajando para hacer modificaciones y ver como se comportaría la pasarela bajo otras condiciones.

La primera fue sustituir los dos apoyos centrales por uno en la unión de ambos diafragmas. Ver Figura 4.3.4.1.

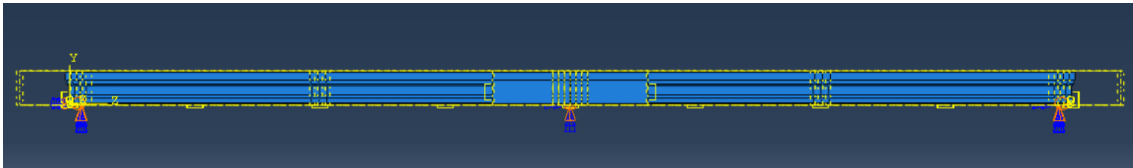


Figura 4.3.4.1 Vista lateral del modelo alternativo con un solo apoyo central

Lo primera diferencia que nos aparece al ejecutar el modelo es que este aborta el cálculo al 91.51% de la carga aplicada, un 1% aproximadamente, antes que el modelo de 2 apoyos. Esto nos indica que la estructura sufre más con menos carga aplicada.

$$F_{uL/2} = 228.775kN$$

Referente al modo de fallo vemos que es el mismo, rotura de los tendones por alcanzar su máxima tensión. Ver Figura 4.3.4.2.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Jun 23 15:59:40 Hora de verano romance 2023

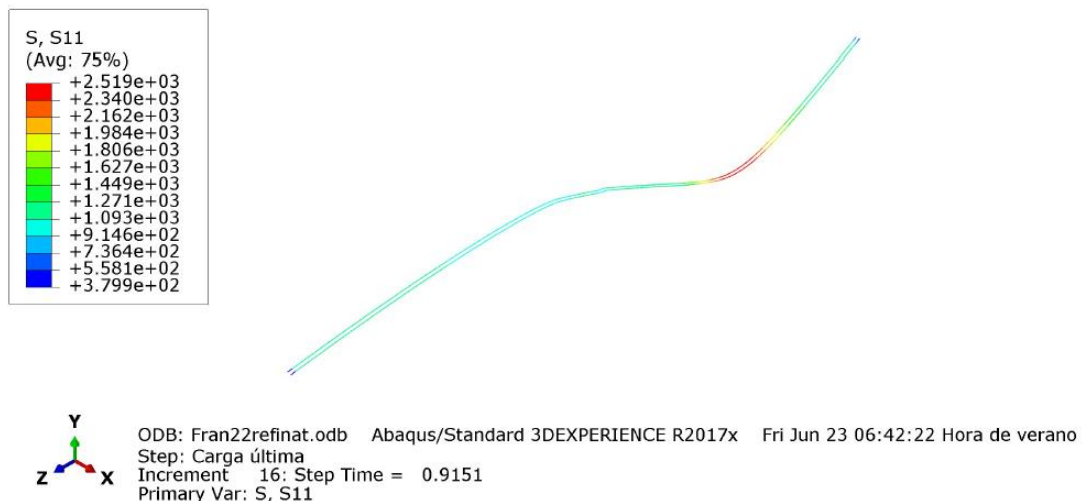
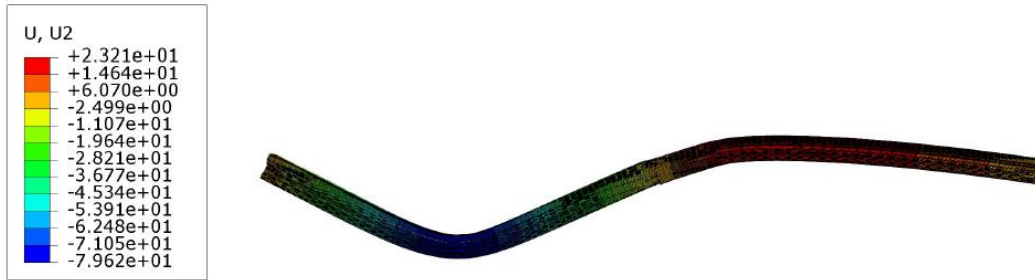


Figura 4.4.4.2 Tensiones en los tendones bajo la carga última en el modelo de un apoyo central

En cuanto a deformada que esta aumenta un poco (Ver Figura 4.3.4.3), 0.1mm, respecto al caso de dos apoyos centrales lo cual representa un 22.5% más de deformación para un 0.63% menos de carga.



Y
Z
ODB: Fran22refinat.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Fri Jun 23 06:42:22 Hora de verano
Step: Carga última
Increment 16: Step Time = 0.9151
Primary Var: U, U2

Figura 4.3.4.3 Deformada en el modelo de un apoyo central

$$f_{Fu} = 79.62\text{mm} \quad ; \quad x_{f_{Fu}} = 3.25\text{m}$$

Como podemos ver en el diagrama carga-desplazamiento (Ver Figura 4.4.4.4) la deformación sigue la misma forma que el caso anterior, eso sí, no llega a la misma carga de rotura sino que falla antes.

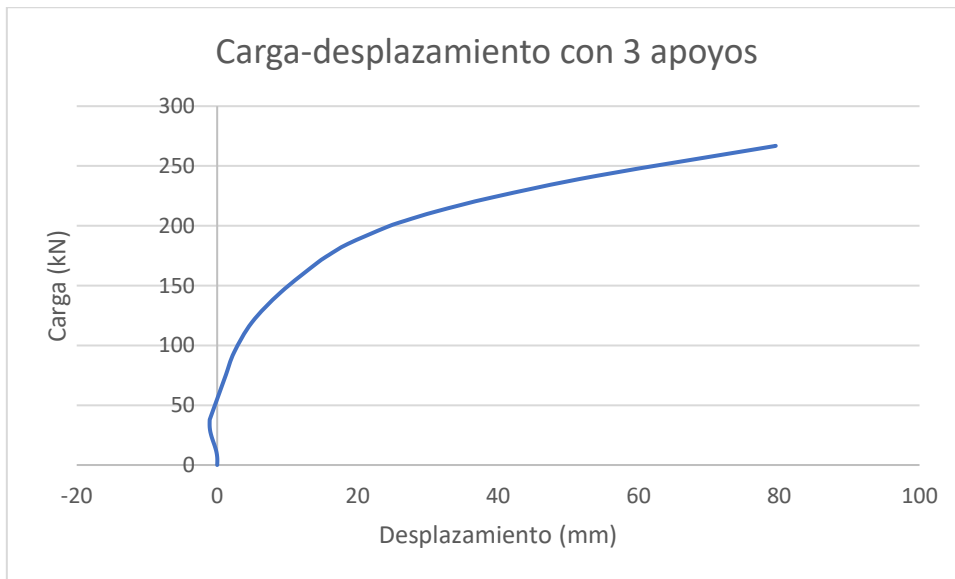


Figura 4.3.4.4 Gráfica carga desplazamiento del modelo con un apoyo central

En cuanto a reacciones en los apoyos los valores son muy similares.

$$A1 = 103.868\text{kN} \quad ; \quad B1 = 176.272\text{kN} \quad ; \quad D1 = -13.269\text{kN}$$

En cuanto a apoyos, esta configuración nos daría unos valores similares y nos ayudaría a evitar el levantamiento en uno de los apoyos centrales.



Conclusiones del modelo alternativo:

- Solo hay levantamiento en un apoyo
- La deformada es un 22.5% superior al caso con dos apoyos centrales
- La carga es un 0.63% inferior al caso con dos apoyos centrales

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

5.1. Conclusiones

El objetivo general era realizar un estudio numérico para predecir los resultados de una campaña experimental de un tablero de puente continuo a escala 1/3 pretensado con cables CFCC (de fibra de carbono) que por motivos ajenos a la universidad se ha retrasado su inicio hasta el punto de no poderse realizar dentro del término de presentación de este documento. Actualmente, las vigas del tablero ya están fabricadas y en las instalaciones de la universidad, en una semana se realizará el postensado de continuidad y seguidamente se hormigonará la capa de compresión. Está previsto que los ensayos a flexión y cortante se realicen a finales de julio. A posteriori, se realizará una comparación de los resultados numéricos obtenidos en este trabajo con los resultados de la campaña experimental.

Para la modelización numérica se ha empleado el software de elementos finitos Abaqus. Tras unos modelos iniciales se realizó la creación de los tres conjuntos necesarios para poder evaluar de manera correcta las diferentes etapas por las que pasaran los distintos elementos de la pasarela compuesta, des de la fase de hormigonado de las vigas hasta la aplicación de la carga de rotura.

-Para entender el comportamiento de la estructura y poder tener un caso muy parecido a la realidad hay que aplicar los esfuerzos correctamente. Inicialmente, el primer modelo a evaluar era el de la viga simple sobre la cual solo actuaban dos cargas. La gravedad y el pretensado longitudinal con cables CFRP. Para ello se hizo un modelo donde tanto la viga como los cables eran elementos 3D y la carga se aplicaba a los extremos de los tendones para simular la compresión que se transmitía tras la relajación de los gatos. Este modelo no funcionaba a nivel tensional, pues al aplicar los esfuerzos, el cable nunca llegaba a la tensión deseada. Entonces se pensó en cambiar de sistema y crear un modelo que mezclara elementos 3D y elementos barra, para posteriormente aplicar un "Predefined Field", ya fuera de temperatura o de tensión, sobre sobre las barras. De este modo con una variación de magnitud de temperatura o tensión se conseguía llevar los cables CFRP a las tensiones de tesado, lo cual era un indicador del buen funcionamiento del modelo. En conclusión, este es el mejor modo de aplicar las cargas de pretensado.

-A nivel de condiciones de contorno, para simplificar la extracción de resultados se prefirió utilizar apoyos puntuales para obtener un solo valor por emplazamiento en vez de crearlos como apoyos superficiales. Al ejecutar los primeros modelos se observó un aumento de tensión considerable alrededor de las zonas de apoyos, pues se creaba una concentración de tensiones que no era real. Entonces se decidió utilizar restricciones de tipo "Coupling" (relacionar el comportamiento de una superficie a un punto) en este caso, referenciar un área correspondiente a los apoyos proyectados, al punto central del apoyo. De este modo las concentraciones de tensiones desaparecieron y los valores de deformada se redujeron. Este aspecto también es muy bueno para eliminar las concentraciones de tensiones provocadas por cargas puntuales.

-Tras realizar varios modelos con gran cantidad de elementos se observó que llegando al nivel de 100.000 elementos por modelo no había diferencias considerables, esta conclusión se realizó después de crear un mallado con más de 2 millones de elementos y 16 horas de cálculo. Por lo tanto para este caso en concreto un tamaño de elemento de 20 era ya muy bueno para la

obtención de resultados realistas, pues con más elementos que estos los valores variaban menos de un 0.1%.

-Referente a las unidades de trabajo Abaqus no tiene un sistema de unidades como tal sino que usa uno llamado coherente donde para su fácil comprensión hay que seguir los valores de una tabla. Esto fue un hecho que se desconocía y motivo por el cual en los modelos iniciales se obtenían valores que no tenían sentido. Este sistema una vez se entiende es bastante simple pues solo hay que ir combinando las unidades de las magnitudes fundamentales para obtener las derivadas. Pero para hacer modelos simples donde solo se trabaja con fuerzas, presiones, y longitudes las propias tablas ya recogen las unidades de todas estas magnitudes con lo cual no hay que ir derivando unidades. Es un aspecto que hay que cuidar si se quieren obtener unos resultados precisos y correctos.

-En cuanto al análisis de elementos finitos se observó que los valores del programa diferían bastante del cálculo por formulación, sobre todo a nivel de tensiones donde estábamos incluso en errores de tipo de esfuerzo. Pasábamos de una tensión analítica de compresión a una en Abaqus de tracción. En otros casos donde el tipo de esfuerzo era de signo correcto se llegaron a observar errores entorno a un 85% de lo previsto. Esto se debe a que la formulación sirve para elementos muy simples pero cuando las geometrías se complican los programas de cálculo son los que proporcionan los mejores resultados ya que trabaja con la no linealidad geométrica y la no linealidad del material. Además, el programa tiene un mejor conocimiento de la geometría de la sección la cual permite calcular mucho mejor los esfuerzos. La formulación solo nos da una aproximación y es algo más certera en geometrías sencillas como pueden ser los perfiles rectangulares, circulares o tubulares. Esta no es una conclusión única de esta tesis sino que en otra situación ajena a los estudios se comprobó que el cálculo de un perfil comercial tipo HEB fallaba bajo cargas diferentes dependiendo de si el cálculo de flexión se realizaba por formulación o por programa de elementos finitos. A nivel de ingeniería las herramientas de elementos finitos son la mayor aproximación que podemos tener de la realidad y si no hay ningún tipo de ensayo físico a priori o posteriori sus resultados han de ser los que se tomaran en valor.

-Analizando los valores en detalle, la tracción en la cara superior de la viga tras el pretensado CFCC produciría el fallo del hormigón por tracción ya que la obtenida con el modelo en Abaqus superaba en 0.42MPa la prevista. Esto dejó de ser un problema pues este cálculo se obtuvo después de pretensar las vigas con lo cual se estima que la resistencia a tracción del hormigón a los 2 días era superior a la prevista aunque en los elementos prefabricados aparecieron pequeñas fisuras en la zona de anclaje de los tendones.

-Con el análisis de elementos finitos de la pasarela completa se detectó que uno de los dos apoyos centrales, el que pertenecía al vano no cargado, sufría un leve levantamiento, pues inicialmente se habían diseñado con solo un apoyo central y solo se producía levantamiento en el extremo del vano no cargado. Esto se detectó y se comunicó a los coordinadores del diseño del ensayo para que lo tuvieran en cuenta y recalcularan de manera simple las reacciones en los apoyos. Pues el modelo en Abaqus apoyos de neopreno zunchado en dos de ellos y dos POT en los cuales se produce levantamiento. Después de detectar tal problema se realizó un modelo alternativo para reproducir el comportamiento de esta pasarela pero con el uso de 3 apoyos. La

diferencia entre ambos modelos fue un 22.5% más de desplazamiento en el punto de aplicación de la carga última, 65mm para el caso de 4 apoyos respecto los 79mm para el caso de 3 apoyos. En ambos la carga última fue muy parecida, solo diferían en un 0.63%. En cuanto a reacciones los valores variaban un 4% y 16.5% en los apoyos extremos de cada uno de los vanos.

-A nivel estructural se ha obtenido el fallo de la pasarela con una carga de 460.7kN (230.35kN fue el resultado de modelo con Abaqus, pues se analizó solo media pasarela) sobre el vano cargado y el fallo se produce por la supuesta rotura de los tendones. Este dato se conoce porque las tensiones principales en los tendones CFCC superan sus valores plásticos y el modelo aborta el cálculo por falta de continuidad en las iteraciones. Esta carga es algo superior a la prevista analíticamente de 380kN y produce una flecha de entorno a los 6.5cm, un desplazamiento muy importante.

5.2. Futuras líneas de investigación

Esta tesis se ha basado en una campaña experimental que se va a llevar a cabo a finales de julio y en la cual se van a obtener los datos necesarios para hacer una comparación con los modelos de elementos finitos y sus cálculos generados con Abaqus.

A nivel computacional un aspecto que me gustaría comprobar es el porcentaje de variación de los resultados cuando en el modelo 3D tenemos en cuenta las barras de armadura pasiva, tanto de GFRP como de acero convencional.

Esta al ser la primera campaña experimental que se va a llevar a cabo para evaluar el pretensado CFRP en una estructura continua no aportará los datos suficientes como para poder estandarizar o crear una guía de diseño para este tipo de elementos. Entonces futuras campañas podrían ir relacionada con la misma tipología pero variando algunos aspectos como podría ser la evaluación del pretensado parcial o el uso de diferentes grados de pretensado.

En esta campaña también se ha utilizado armadura de fibra de vidrio GFRP pero nunca ha sido el foco central de la campaña. En futuras campañas se podrían hacer comparaciones de este tipo de armaduras usadas como pasiva y ver qué diferencias aportan respecto a las convencionales de acero, campañas ya realizadas apuntan que las armaduras de GFRP aportan más rigidez a la estructura.

Referencias

- Task Group 9.3, FRP Reinforcement in RC structures, 2007.
- Antonio Nanni, Masaharu Tanigaki y Koichi Hasuo, Bond anchorage of pretensioned FRP tendon at force release, 1992.
- A. A. Abdelrahman, G. Tadros y S. H. Rizkalla, Test model for the first Canadian smart highway bridge, 1995.
- Amir Z. Fam, Carbon fibre reinforced plastic prestressing and shear reinforcements for concrete highway bridges, 1995.
- Nolan G. Domenico, Bond properties of CFCC prestressing strands in pretensioned concrete beams, 1995.
- Harry G. Harris, Win Somboonsong y Frank K. Ko, New ductile hybrid FRP reinforcing bar for concrete structures, 1998.
- K. A. Soudki, FRP reinforcement for prestressed concrete structures, 1998
- Sang Yeol Park y Antonie E. Naaman, Shear Behavior of concrete beams prestresses with FRP tendons, 1999.
- Zhen Lu, Thomas E. Boothby, Charles E. Bakis y Antonio Nanni, Transfer and development lengths of FRP prestressing tendons, 2000
- Francesco Micelli y Antonio Nanni, Durability of FRP rods for concrete structures, 2004
- Patrick X. W. Zou y Shoiping Shang, Time-dependent behaviour of concrete beams pretensioned by carbon fibre-reinforced polymers (CFRP) tendons, 2006
- Nabil Greace, Tsuyoshi Enomoto, Ahmed Abdel-Mohti, Yahia Tokal y Sreejith Puravankara, Flexural behaviour of precast concrete box beams tensioned with unbonded, carbon-fiber-composite cables, 2008.
- Francis T. K. Au y J.S. Du, Deformability of concrete beams with unbonded FRP tendons, 2008.
- R. Cuzzilla, M. Di Ludovico, A. Prota y G. Manfredi, Seismic Rehabilitation of RC Bridges by Using FRP and SRP, 2010
- Mirpayam Nabipaylashgari, Shear strength of concrete beams prestresses with CFRP cables, 2012.
- Martin Noël y Khaled Soudki, Effect of prestressing on the performance of GFRP-Reinforced concrete slab bridge strips, 2013.
- José Manuel García Polo, Estructuras de hormigón pretensado armadas con FRP, 2013.
- Zhi Fang, Kuangyi Zhang y Bing Tu, Experimental investigation of a bond -type anchorage system for multiple FRP tendons, 2013.
- Payam Babipay y Dagmar Svecova, Shear behavior of CFRP prestressed concrete T-beams, 2014.

- Martin Noël y Khaled Soudki, Shear behaviour of post-tensioned FRP-reinforced concrete slabs under static and fatigue loading, 2014.
- Pablo Zuluaga Ramírez, Fatiga en CFRP, Caracterización y método óptico para la estimación del daño, 2015
- Mantas Atutis, Juozas Valivonis y Edgaras Atutis, Analysis of serviceability limit state of GFRP prestressed concrete beams, 2015.
- Nabil F. Grace, M. ASCE, Soubhagya K. Rout, Kenichi Ushijima y Mena Bebway, Performance of carbon-fiber-reinforced polymer stirrups in prestressed-decked bulb t-beams, 2015.
- Cristian Maluk, Giovanni Pietro Terrasi, Luke Bisby, Alex Stutz y Erich Hugi, Fire resistance test of thin CFRP prestressed concrete slabs, 2015.
- Amir Mirmiran, Xiong Yang, Pedram Zohrevand, Nakin Suksawang y Madasamy Arockisamy, Use of fiber reinforced polymer composite cable for post-tensioning application, 2015.
- Jared C. Bymaster, Canh N. Dang, Royce W. Floyd y W. Micah Hale, Prestress losses in pretensioned concrete beams cast with lightweight self-consolidating concrete, 2015.
- Tiejong Lou, Sergio M.R. Lopes y Adelino V. Lopes, A comparative study of continuous beams prestressed with bonded FRP and steel tendons, 2015.
- Wit Derkowski, Opportunities and risks arising from the properties of FRP materials used for structural strengthening, 2015.
- Hamed Fergani, Matteo Di Benedetti, Maurizio Guadagnini, Cyril Lynsdale y Cristina Mias, Long term performance of GFRP bars under the combined effects of sustained load and severe environments, 2016.
- Edgaras Atutis, Juozas Valivonis y Mantas Atutis, Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers under cyclic load, 2017.
- Tugce Sevil Yaman, Behaviour of precast concrete beams prestressed with CFRP stands, 2016.
- Tiejong Lou, Sergio M. R. Lopes y Adelino V. Lopes, Response of continuous concrete beams internally prestressed with unbonded FRP and steel tendons, 2016.
- Brahim Benmokrane, Ahmed H. Ali, Hamdy M. Mohamed, Adel ELsafty y Allan Manalo, Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy flass-FRP bars for concrete structures, 2017.
- Abdeldjelil Belarabi, Guide specification for the design of concrete bridge beams prestressed with CFRP systems, 2017.
- Keller, M.L.^a, Pahn, M.^a, Kopietz, M.^b y Wetzels, B.^b, Long-term-performance of loaded GFRP bars in alkaline environment, 2017.

- Abdeljelil Belarbi, Mina Dawood y Matthias Bowman, Synthesis of Concrete Bridge Piles Prestressed with CFRP Systems, 2017
- Fei Peng y Weichen Xue, Design approach for flexural capacity of concrete t-beams with bonded prestressed and nonprestressed FRP reinforcements, 2018.
- Saverio Spadea, Marco Rossini y Antonio Nanni, Design analysis and experimental behavior of precast concrete double-tee girders prestressed with carbon-fiber-reinforced polymer strands, 2018.
- T. D'Antino y M.A. Pisani, Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars, 2018.
- A. Belarabi, M. Reda, P. Poudel, H. Tahsiri, M. Dawood y B. Gencturk. Prestressing concrete CFRP composites for sustainability and corrosion-free applications, 2018.
- Tan D. Le, Thong M. Oham, Hong Hao y Yifei Hao, Flexural behaviour of precast segmental concrete beams internally prestressed with unbonded CFRP tendons under four-point loading, 2018.
- H. Mazaheripour, J.A.O. Barros, F. Soltanzadeh y J. Sena-Cruz, Deflection and cracking behaviour of SFRSCC beams reinforced with hybrid prestressed GFRP and steel reinforcements, 2016.
- Yunxing Du, Xinying Zhang Fen Zhou, Deju Zhu, Mengmeng Zhang y Wei Pan, Flexural behaviour of basalt textile-reinforced concrete, 2018.
- Marco Rossini y Antonio Nanni, Composite strands for prestressed concrete: State-of-the-practice and experimental investigation into mild prestressing with CFRP, 2019.
- Katarzyna Zdanowicz, Renata Kotynia y Steffen Marx, Prestressing concrete members with fibre-reinforced polymer reinforcement: State of research, 2019.
- Sophia Kueres, Norbert Will y Josef Hegger, Shear strength of prestressed FRP reinforced concrete beams with shear reinforcement, 2020.
- Fei Peng, Wenyuan Xue, y Weichen Xue, Database Evaluation of Shear Strength of Slender Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Members, 2020.
- Fei Peng, S.M. ASCE y Weichen Xue, Shear Behavior of Post-Tensioned Concrete Beams with Draped FRP Tendons and without Transverse Reinforcement, 2021.
- Philipp Preinstofer, Patrick Huber, Tobias Huber, Benkamin Kromoser y Johan Kollegger, Experimental investigation and analytical modelling of shear strength of thin-walled textile reinforced UHPC beams, 2021.
- Fei Peng y Weichen Xue, Experimental investigation on shear behaviour of FRP post-tensioned concrete beams without stirrups, 2021.
- Fei Peng y Weichen Xue, Experimental Investigation on Shear behavior of FRP Prestressed Concrete Beams with Shear Reinforcements, 2022.
- Ning Duan, Ji-Wen Zhang y Jun Cheng, Simulation research on continuous concrete beams reinforced with experimental prestressed CFRP tendons, 2022.

- Sophia Kueres, Analysis and design of concrete beams with pre-tensioned CFRP reinforcement, 2019.
- Marco Rossini y Antonio Nanni, Mildglass: GFRP strand for resilient mild pre-stressed concrete, 2020.
- Björgvin Smári Jónsson, Prestressed BFRP tendons in concrete structures, 2011.
- Sindri Hlífas Gudmundsson, Capacity of concrete beams prestressed with BFRP tendons, 2012.
- Björgvin Smári Jónsson y Eybór Rafn, Test of prestressed concrete beams with CFRP tendons, 2012.
- Andri Gunnarsson, Bearing capacity, relaxation and finite element simulation for prestressed concrete beams reinforced with CFRP tendons, 2013.
- Andri Gunnarsson, Eybór Rafn y Jónas Þor, Simulation of experimental research of concrete beams prestressed with BFRP tendons, 2016.
- Maximus Pearson y Tel Donchev, Experimental Study of the behaviour of prestressed concrete beams with internal BFRP reinforcement, 2013.
- M. Mirshekari, T. Donchev, D. Petkova y M. Limbachiya, Influence of the degree of prestressing on the behaviour of BFRP reinforced beams, 2015.
- M. Mirshekari, T. Donchev, D. Petkova y M. Limbachiya, Deformability of pretensioned beams with BFRP reinforcement, 2016.
- T. Donchev, Pre-stressing of RC beams with internal BFRP reinforcements, 2017.
- Tokyo Rope USA, Inc., Handling manual for CFCC, 2021.
- Kenichi Ushijima, Tsuyoshi Enomoto, Noriaki Kose y Yoshiaki Yamamoto, Field application of carbon fiber composite cable post-tensioning systems, 2016.
- Kenichi Ushijima, Tsuyoshi Enomoto, Noriaki Kose y Yoshiaki Yamamoto, Field deployment of carbon-fiber-reinforced polymer in bridge applications,
- Federal Highway Administration, Post-tensioning tendon installation and grouting manual, 2013.
- Alexis Johariv Ramírez Pérez, Experimental study of a continuous concrete beam post-tensioned with CFCC tendons, 2023.
- Carlos Rodrigo Moscoso Nuñez, Estudio numérico del comportamiento de elementos pretensados pretesos con barras de polímeros reforzados con fibras bajo solicitaciones de flexión, 2022.
- José Francisco Castillo Méndez, Estudio de la adherencia y el comportamiento a flexión de elementos de hormigón pretensado con armadura FRP, 2018.
- Gonzalo Gandarillas Pérez, Estudio del comportamiento estructural de elementos de hormigón pretensado con armadura FRP, 2019.
- Kathrina Elisabeth Vangen, Experimental Study of the bond performance in fibre reinforced polymer prestressed concrete, 2022.



Ricardo Roldán León, Modelización numérica del ensayo de adherencia de la armadura activa (ECADA) en elementos de hormigón pretensado con FRP, 2022.

Tecla Legasa Malet, Comportamiento en estados límite último de cortante de vigas de hormigón pretensadas con FRP, 2021.

Giovanny Alberto Quiñones Pardo, Estudio de la adherencia de la armadura activa de polímeros reforzados con fibras (FRP) en elementos de hormigón pretensado, 2021.

Mauro Vallejo Bojorque, Comportamiento y resistencia a cortante de vigas isostáticas de hormigón pretensado con armaduras activas de polímeros reforzados con fibras (FRP), 2021.

Jawred Qureshi, A review of fibre reinforced polymer bridges, 2023

Escuela Tecnodigital, Como evitar errores con las unidades de Abaqus. Recuperado de: <http://escuelatecnodigital-com/como-evitar-errores-con-las-unidades-en-abaqus>

Dassault Systems, Abaqus/CAE User's Manual, 2011

Nadia D. Roman , Guia de modelado con el software Abaqus, 2013

[Ahmed Elkadi](1 mayo 2021) ABAQUS Tutorial (*Un total de 40 vídeos*)

[TrendingMechVideos] () Varios vídeos

[CAE Master] (6 mayo 2021) ABAQUS Tutorial (*Un total de 104 vídeos*)

Tokyo Rope International INC. Manual for setting the CFCC anchorage devices (New Buffer material: Single body Buffer)

Las barras consisten en acero pretensado Y 1050 H conforme a prEN 10138-4.

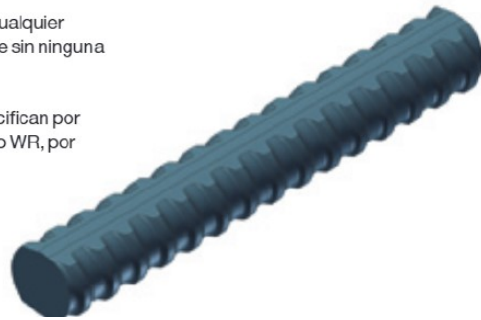
Barras roscadas

Las barras roscadas están disponibles en diámetros de 17.5, 26.5, 32, 36, 40 y 47 mm.

La barra se puede cortar en cualquier punto y es roscable al instante sin ninguna preparación adicional.

Las barras roscadas disponen de costillas continuas laminadas en caliente y le confieren rosca a derechas a lo largo de toda la barra.

Las barras roscadas se especifican por su diámetro nominal y el sufijo WR, por ejemplo 26 WR.



Datos técnicos

Denominación			Barra roscada						Barra lisa	
			18 WR	26 WR	32 WR	36 WR	40 WR	47 WR	32 WS	36 WS
Diámetro nominal	d_s	[mm]	17.5	26.5	32	36	40	47	32	36
Sección nominal	S_n	[mm ²]	241	552	804	1,018	1,257	1,735	804	1,018
Peso nominal ¹	M	[kg/m]	1.96	4.48	6.53	8.27	10.20	14.10	6.31	7.99
Paso de rosca	c	[mm]	8	13	16	18	20	21	3	3
Carga característica de rotura	F_m	[kN]	255	580	845	1,070	1,320	1,820	845	1,070
Carga máxima de pretensado ² $P_{m0,max} = S_n \times 0.8 \times f_{p,k}$		[kN]	204	464	676	856	1,056	1,457	676	856
Carga máxima de sobretesado ³ $P_{0,max} = S_n \times 0.95 \times f_{p0,1k}$		[kN]	219	499	722	912	1,131	1,566	722	912

¹El peso por metro incluye 3,5% del peso de la rosca no resistente.

²Los valores indicados son valores máximos según Eurocode 2, es decir, se aplica $\min(k_1 \times f_{pk}, k_2 \times f_{p0,1k})$. El cumplimiento de los criterios de estado límite último y de los requerimientos referentes al ancho de la fisura en el ensayo de transferencia de carga se ha comprobado para $0,8 \times F_{pk}$.

$$F_{pk} = S_n \times f_{pk}$$

$$F_{p0,1k} = S_n \times f_{p0,1k}$$

³El sobretesado está permitido si la fuerza en el gato de tesado se puede medir con una exactitud de $\pm 5\%$ respecto al valor final de la fuerza de tesado.

Threadbar, WR and E, surface configuration and dimensions

Nominal diameter	Nominal mass per metre ¹⁾	Nom. cross-sectional area	Core diameter		Depth	Width	Pitch	Gradient	Radius
			d_n	d_v	min. a	b	c	β	R
mm	kg/m	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	deg	mm
17.5	1.96	241	17.4	17.2	1.1	4.1	8	82.5	1.8
26.5	4.48	552	26.4	25.9	1.7	6.2	13	81.5	2.6
32	6.53	804	31.9	31.4	1.9	7.6	16	81.5	3.2
36	8.27	1 018	35.9	35.4	2.1	8.7	18	81.5	3.6
40	10.205	1 257	39.7	38.9	2.1	9.6	20	81.5	4.0
47	14.10	1 735	46.7	45.9	2.1	10.7	21	81.5	4.0

¹⁾ The nominal mass per metre includes a portion of 3.5 % non load bearing ribs.
Tolerance to nominal mass $\pm 4.5\%$

Barra 26 WR $f_{pk} := 1050 \text{ MPa}$ $f_{p01k} := 950 \text{ MPa}$ $E := 205000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$d_s := 26.5 \text{ mm}$ $s_n := 552 \text{ mm}^2$ $M := 4.48 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$ $c := 13 \text{ mm}$

$F_m := 580 \text{ kN}$ $P_{m0max} := s_n \cdot 0.8 \cdot f_{pk} = 463.68 \text{ kN}$ $P_{0max} := s_n \cdot 0.95 \cdot f_{p01k} = 498.18 \text{ kN}$

$F_{p0.1}$kNCharacteristic 0.1 % proof force of the prestressing steel bar, i.e. $F_{p0.1} = f_{p0.1} \cdot S_n$, see Annex 41

F_{pk}kNCharacteristic maximum force of the prestressing steel bar, i.e. $F_{pk} = f_{pk} \cdot S_n$, see Annex 41

$f_{p0.1}$kNCharacteristic 0.1 % proof stress of the prestressing steel bar, see Annex 41

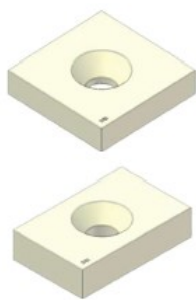
f_{pk}kNCharacteristic tensile strength of the prestressing steel bar, see Annex 41

S_nmm².....Nominal cross-sectional area of the prestressing steel bar, see Annex 40

P_{m0}kNInitial prestressing force immediately after stressing and anchoring

P_{max}kNMaximum prestressing force

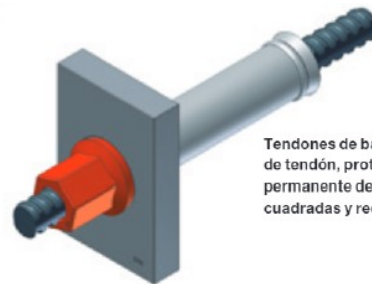
$P_{max, o}$kNMaximum overstressing force



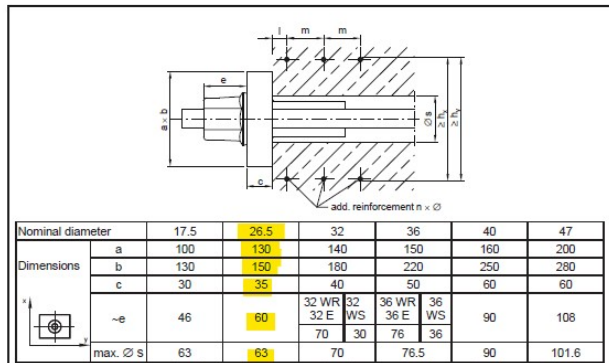
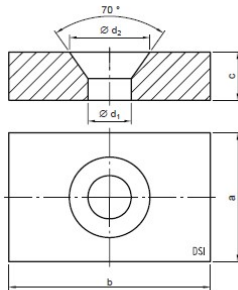
Solid plate, square 2011

Solid plate, rectangular 2012

Solid plate, small rectangular 2076



Tendones de barra con vaina libre de tendón, protección anticorrosiva permanente de vaina termoretráctil, placas cuadradas y rectangulares macizas

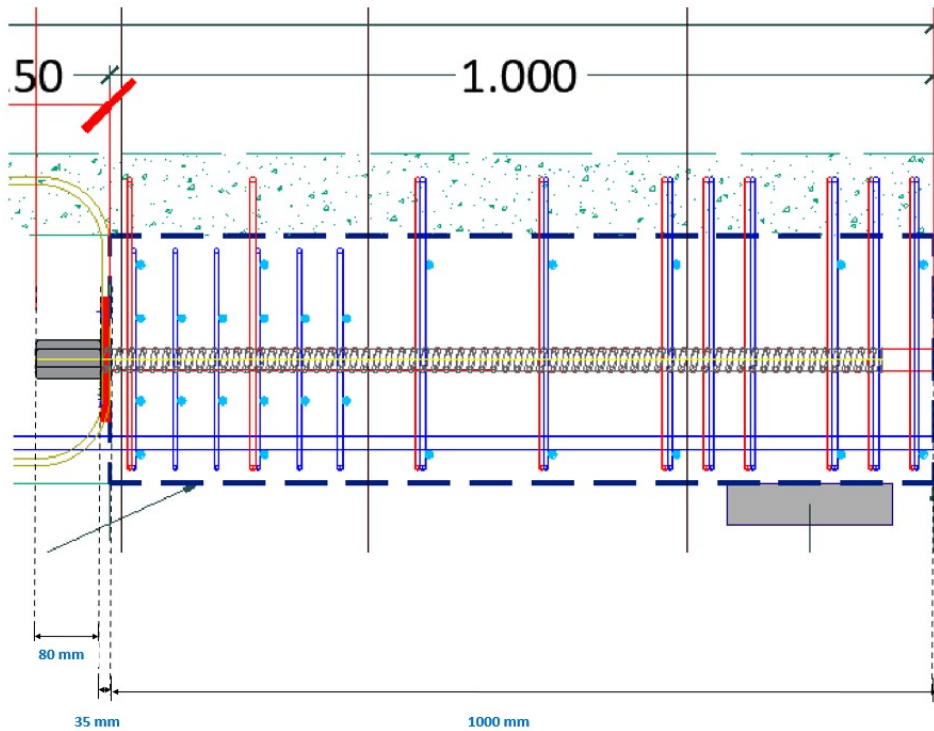


Bar	Nominal diameter	a	b	c	∅ d ₁	∅ d ₂
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Threadbar	∅ 17.5	100	130	30	28	45
	∅ 26.5	130	150	35	39	72
	∅ 32	140	180	40	45	82
	∅ 36	150	220	50	49	92
	∅ 40	160	250	60	54	100
	∅ 47	200	280	60	64	110
Plain bar	∅ 32	140	180	40	45	72
	∅ 36	150	220	50	49	92

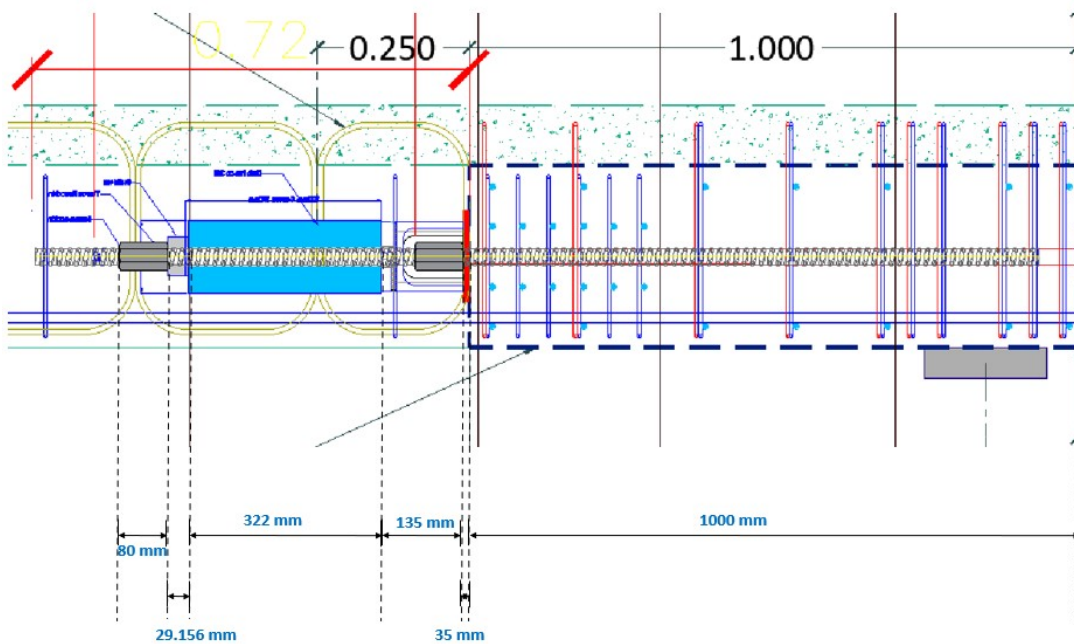
Nominal diameter	17.5	26.5	32	36	40	47
a	100	130	140	150	160	200
b	130	150	180	220	250	280
c	30	35	40	50	60	60
-e	46	60	32 WR	32 E	36 WR	36 E
			WS	WS	WS	WS
max. ∅ s	63	63	70	76.5	90	101.6

Las chapas serán 130x160x35mm

Lado pasivo:



Lado activo:



Longitud de la barra:

nota: no estamos incluyendo la longitud de las tuercas

$$Pl_{pas} := 35 \text{ mm} \quad Pl_{act} := 35 \text{ mm} \quad tuerca := 80 \text{ mm} \quad sufridera := 29.156 \text{ mm}$$

$$distanciador := 135 \text{ mm} \quad junta := 20 \text{ mm} \quad macizo := 1 \text{ m} \quad gato := 322 \text{ mm}$$

$$L_{barra} := 2 \text{ macizo} + junta + Pl_{pas} + Pl_{act} + distanciador + gato + sufridera = 2.576 \text{ m}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad E = \frac{P}{A \cdot \epsilon} \quad \epsilon = \frac{P}{A \cdot E} \quad \delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad P = \frac{\delta \cdot A \cdot E}{L}$$


$$P_{tesado} := 150 \text{ kN} \quad L_{barra} = 2.576 \text{ m} \quad A := s_n \quad E := E = (2.05 \cdot 10^5) \text{ MPa}$$

$$\delta := \frac{P_{tesado} \cdot L_{barra}}{A \cdot E} = 3.415 \text{ mm}$$

Perdidas por deslizamientos: $\Delta := 0.9 \text{ mm}$

Slip at anchorages and couplings					
Designation	Anchor plate	Slip at load transfer from prestressing jack to anchorage	Slip, considered for calculation of elongation		
		Stressing anchor	Stressing anchor	Fixed anchor	Coupling
mm	—	mm	mm	mm	mm
Threadbar					
18 WR	Solid plate, square	1.7 ¹⁾	1.5	3.2	2.0
	Solid plates, rectangular	0.2 ²⁾	1.0	2.7	
	QR-plate				
26 WR 32 WR 36 WR 40 WR 26 E 32 E 36 E 40 E	Solid plate, square	1.7 ¹⁾	1.5	3.2	2.0
	Solid plates, rectangular	0.9 ²⁾	1.0	2.7	
	QR-plate				
47 WR	Solid plate, square	1.7 ¹⁾	1.0	2.7	3.0
	Solid plates, rectangular	0.9 ²⁾			
Plain bar					
32 WS 36 WS	Solid plate, square	0.7 ¹⁾	1.5	2.2	1.0
	Solid plates, rectangular		1.0	1.7	
36 WS	QR-plate				

¹⁾ Slip at transfer of prestressing force from prestressing jack to anchorage
²⁾ Slip at transfer of prestressing force from prestressing jack to anchorage after three stressing-transfer-cycles



DYWIDAG-Systems
International GmbH
www.dywidag-systems.com

DYWIDAG-PT bar tendon
Bonded, unbonded, and external bar tendon
Slip at anchorages and couplings

Annex 43
of European Technical Assessment
ETA-05/0123 of 27.06.2018

$$P_{perdidas} := \frac{\Delta \cdot A \cdot E}{L_{barra}} = 39.533 \text{ kN}$$


$$P := P_{perdidas} + P_{tesado} = 189.533 \text{ kN}$$

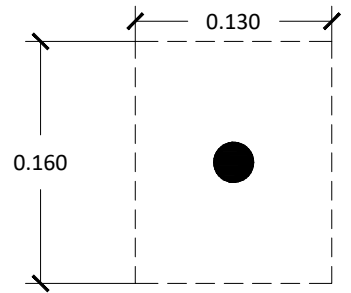
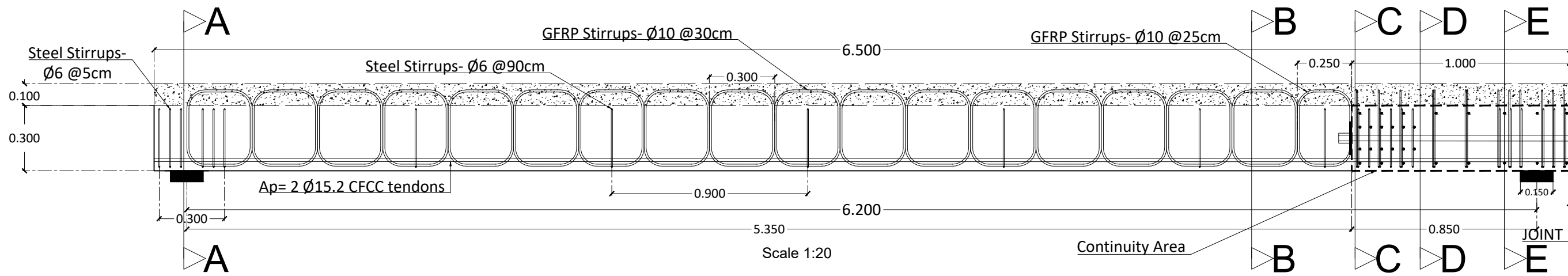
Perdidas del 3% despues de 1000 horas

$$P_{real} := 1.03 \cdot P = 195.219 \text{ kN}$$

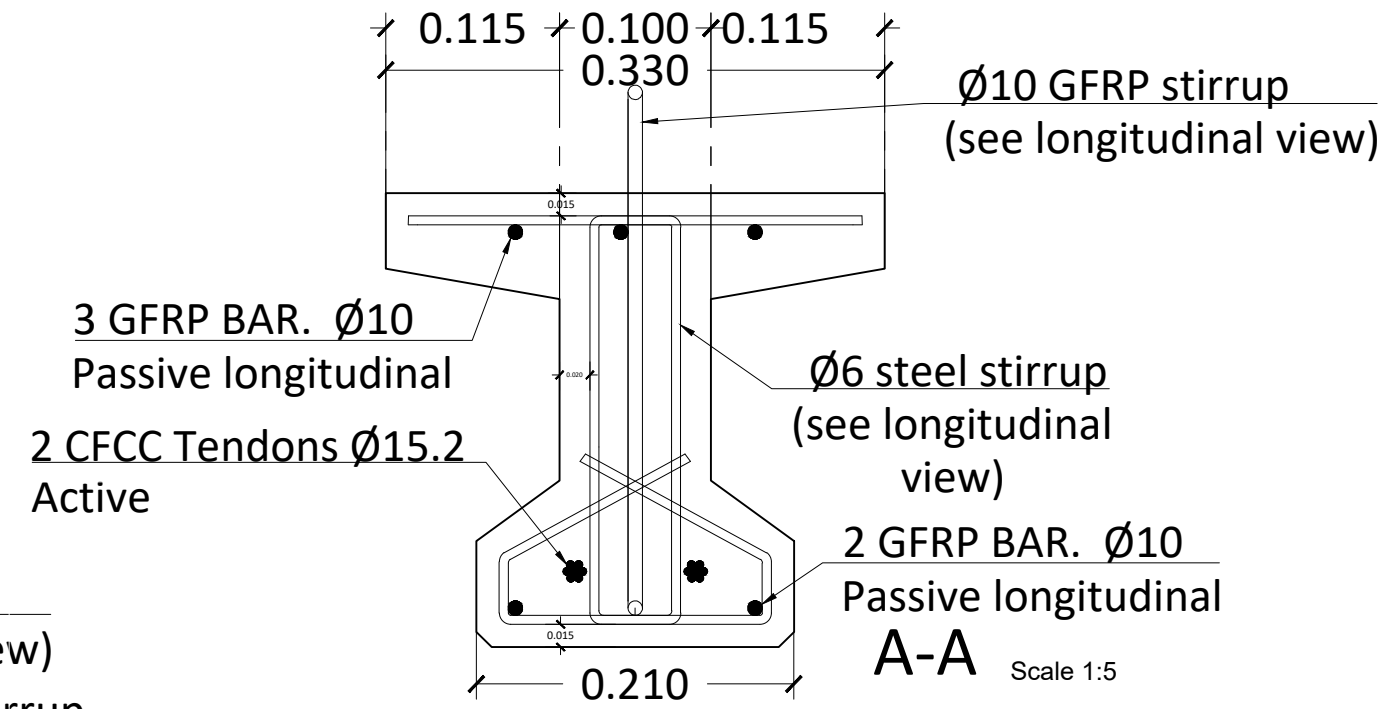
En cuanto al cálculo del alargamiento.

Los valores de slip en el stressing anchors son de asientos tanto en la tuerca de reacción del gato como en la del otro extremo. No significa que debas sumar esos valores, sino que los tienes que tener en cuenta que durante el tesado al alcanzar la fuerza de tesado tendrías 2x1.5mm + 3.45mm de movimiento en el piston. (Si no lo tienes en cuenta podría pensar que estas sobretensando la barra).

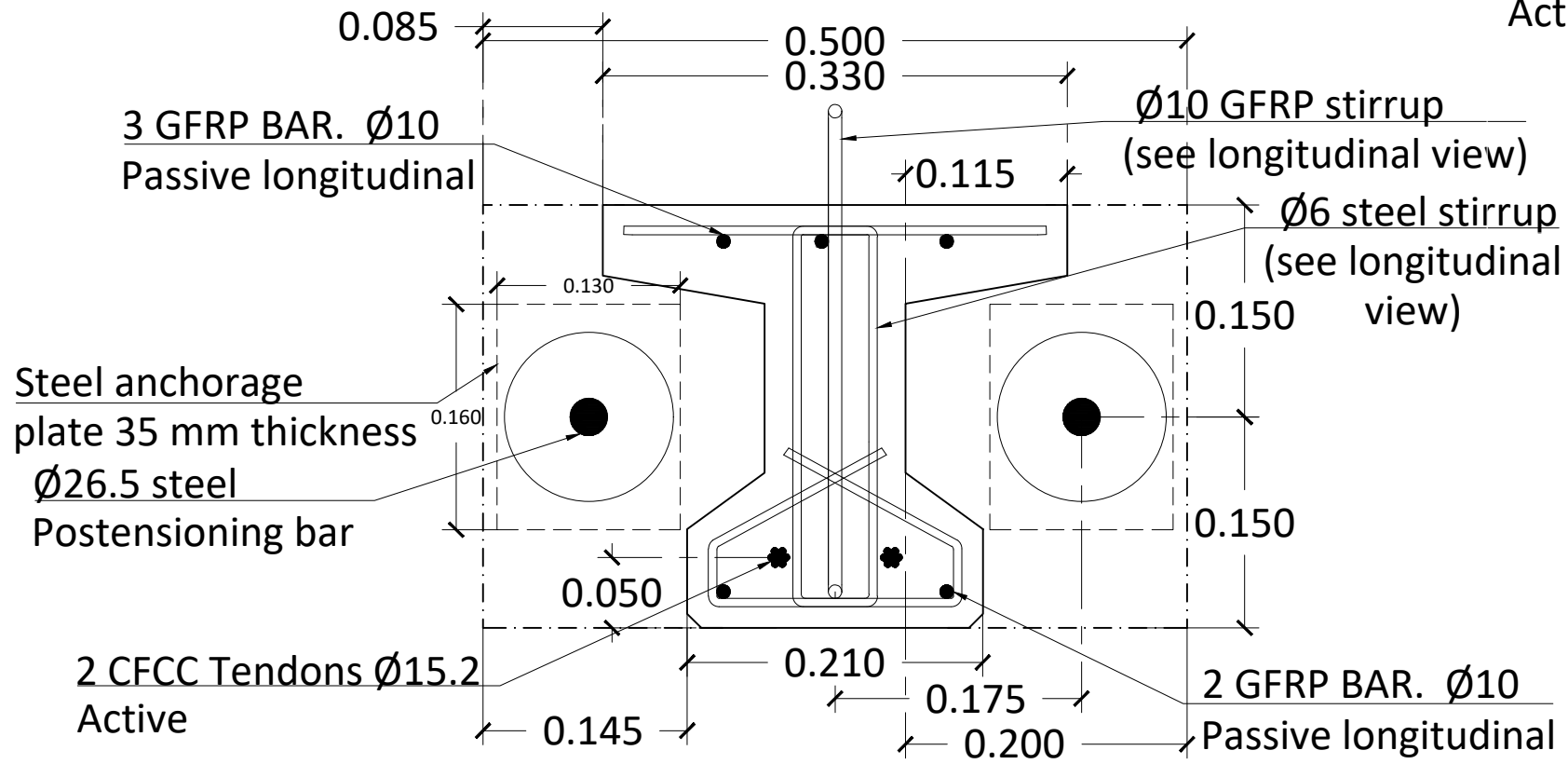
Isothermal stress relaxation	Losses from an initial force of 0.70 · F _{0, s} after 1 000 h ≤ 3 %
¹⁾ Quantile for a statistical probability of W = 1 - α = 0.95 (one sided) ²⁾ E ≈ 205 000 N/mm ² and A _s as plastic extension at maximum force	
 <p>DYWIDAG-Systems International GmbH www.dywidag-systems.com</p>	<p>DYWIDAG-PT bar tendon Bonded, unbonded, and external bar tendon Prestressing steel bars Threadbars and plain bars Specifications</p>
<p>Annex 41 of European Technical Assessment ETA-05/0123 of 27.06.2018</p>	




Steel anchorage plate 35 mm thicknes Scale 1:5

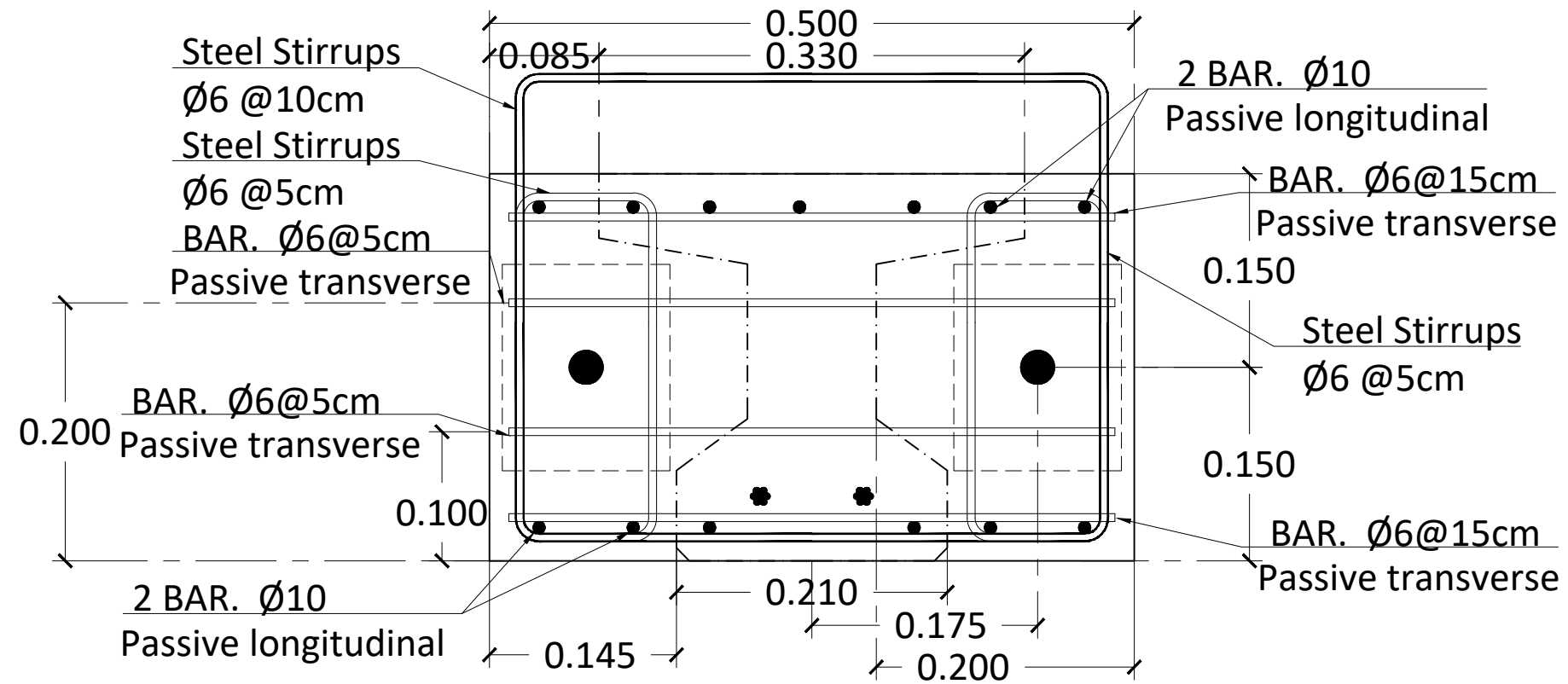


A-A Scale 1:5

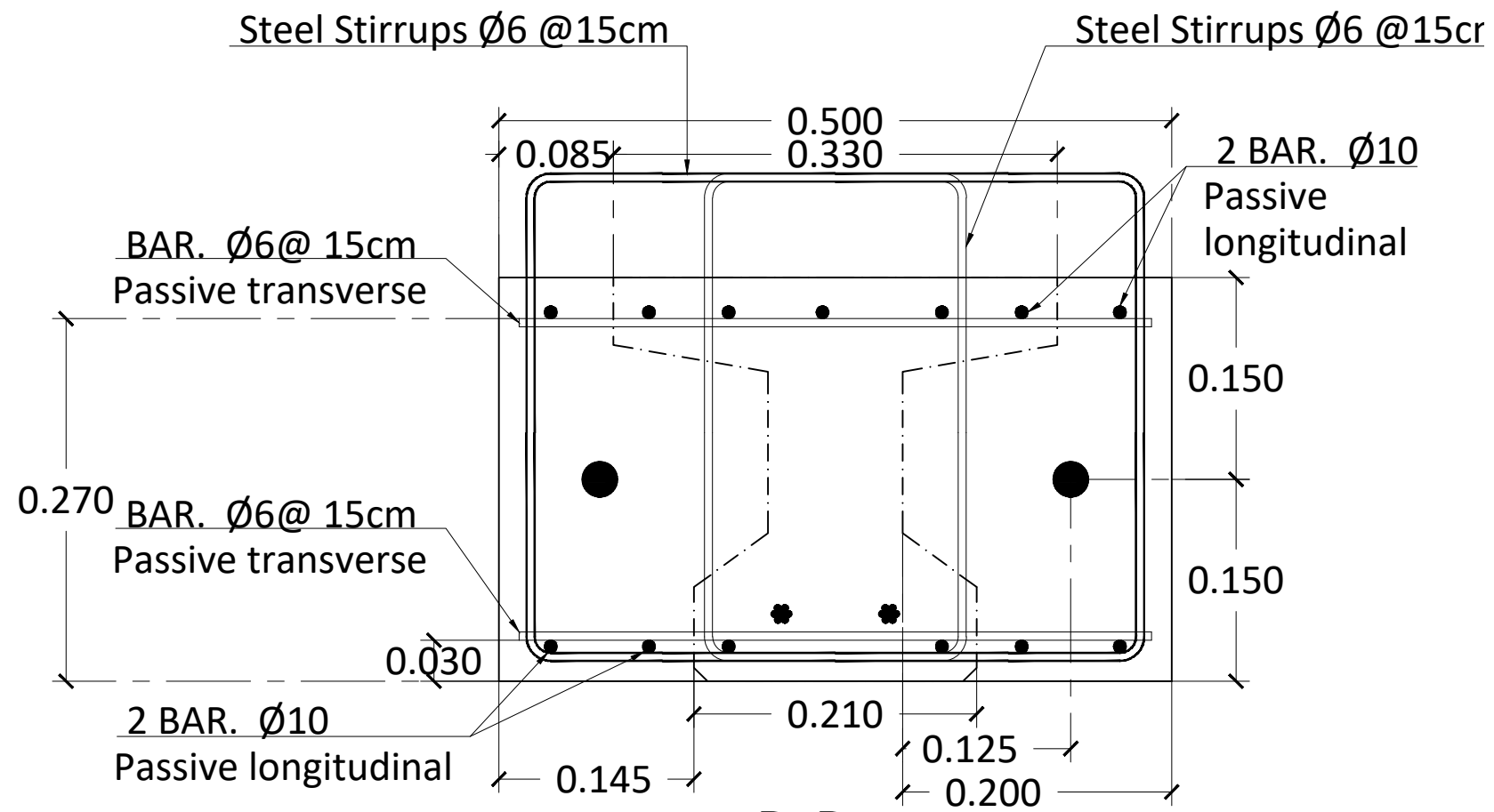


B-B Scale 1:5


 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 1

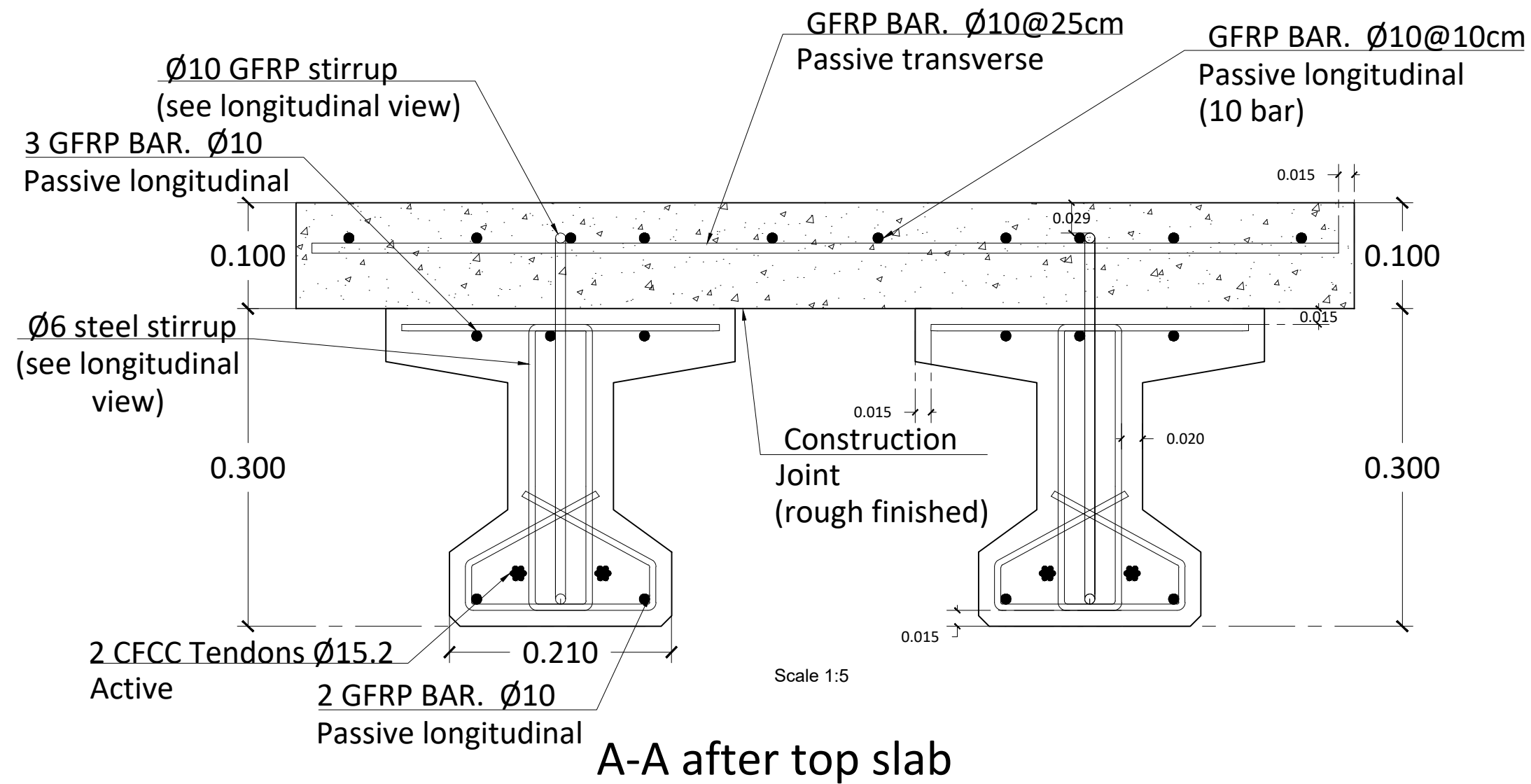



C-C Scale 1:5

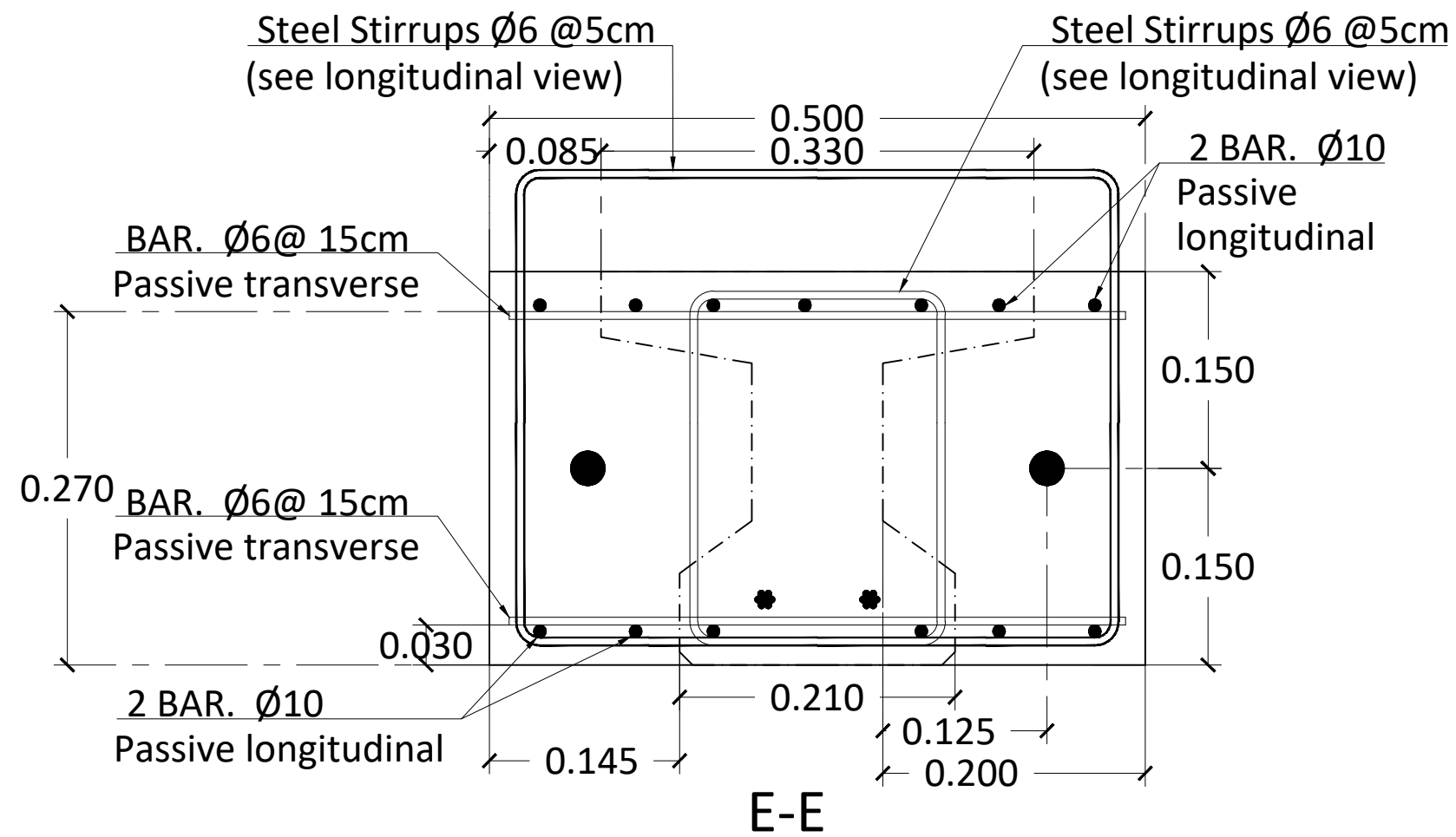


D-D
Scale 1:5


 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 2

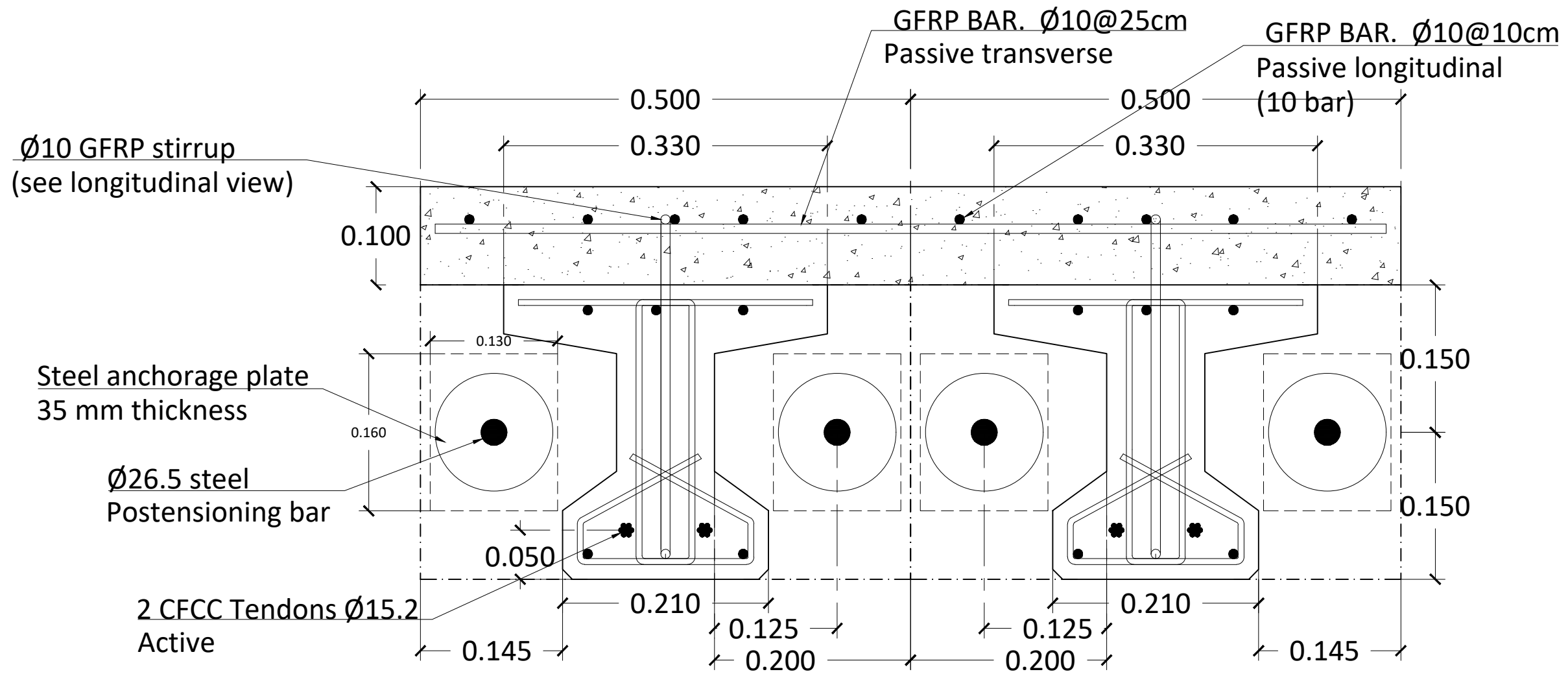


 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 4




Scale 1:5

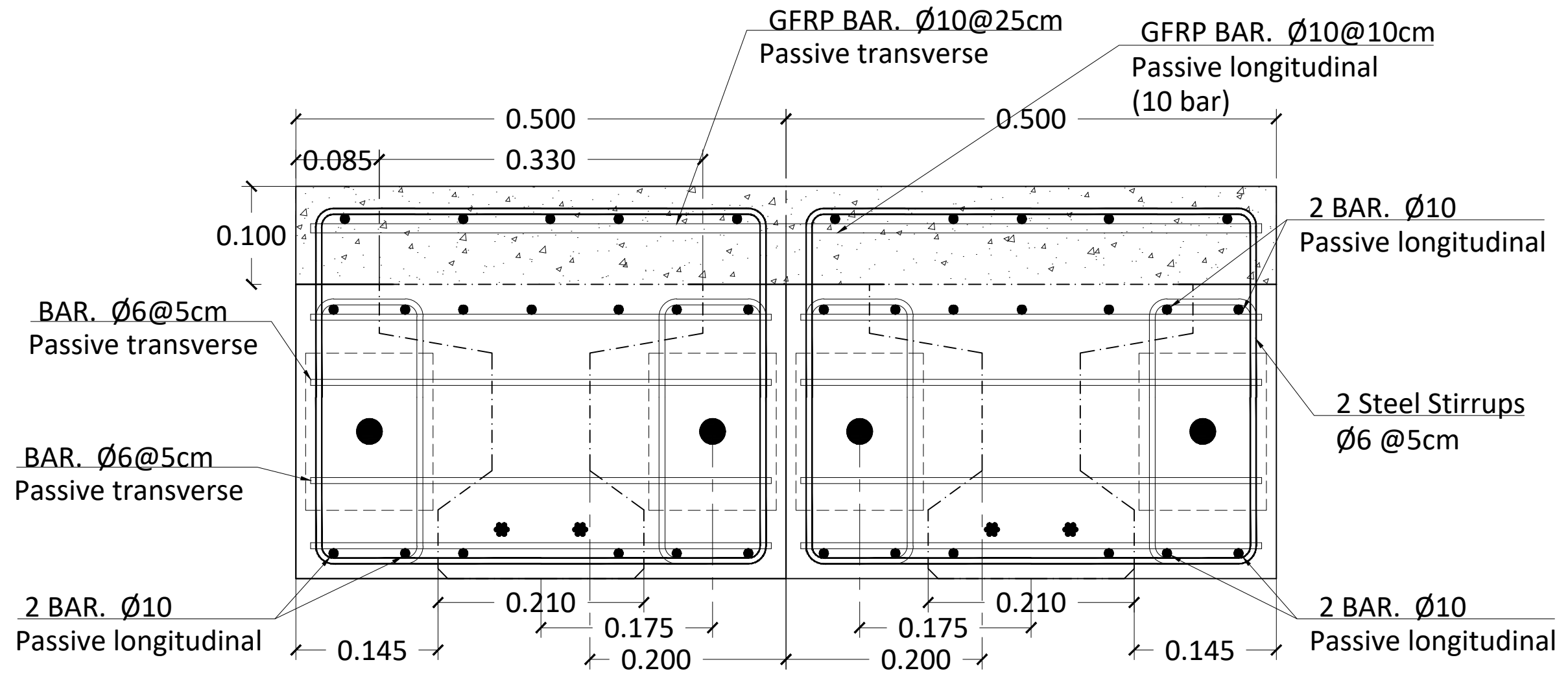
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 3



B-B after top slab


Scale 1:5

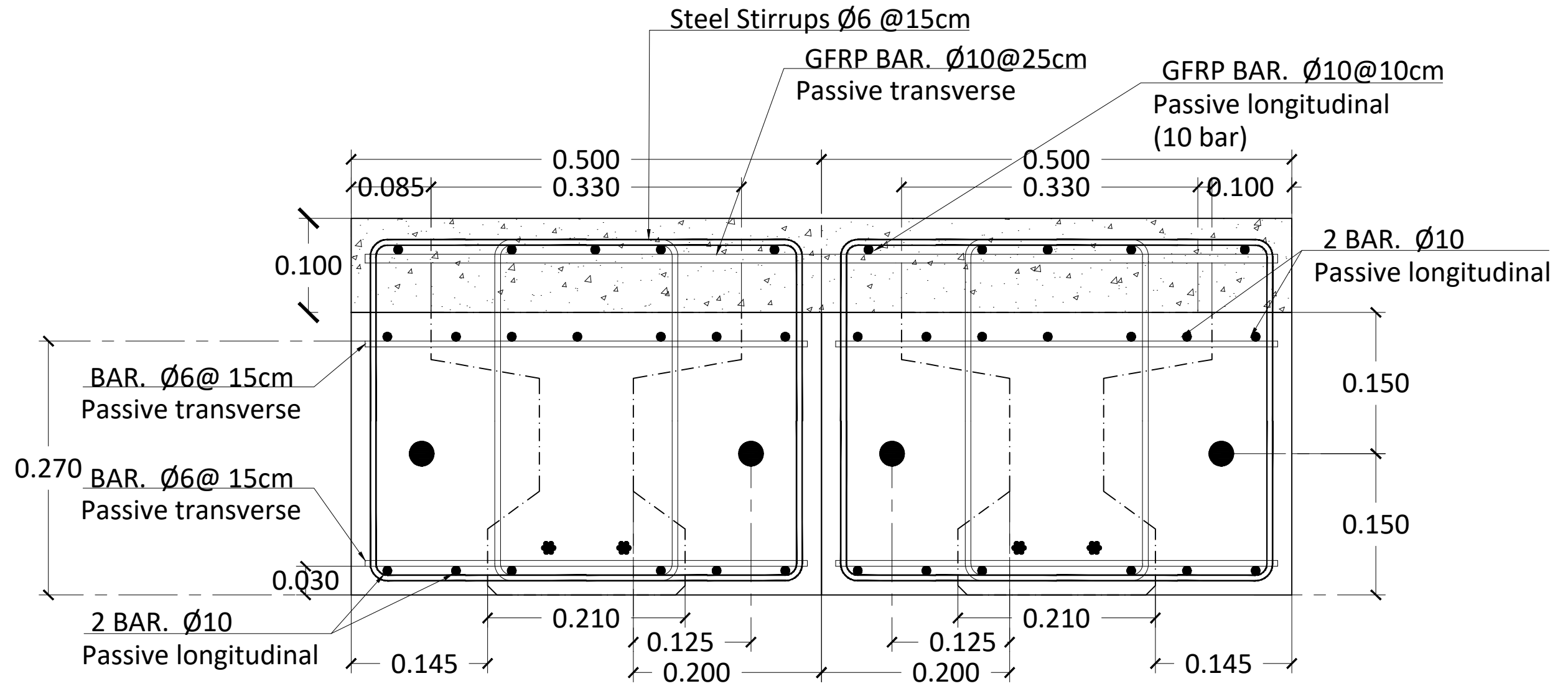
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 5



C-C after top slab


Scale 1:5

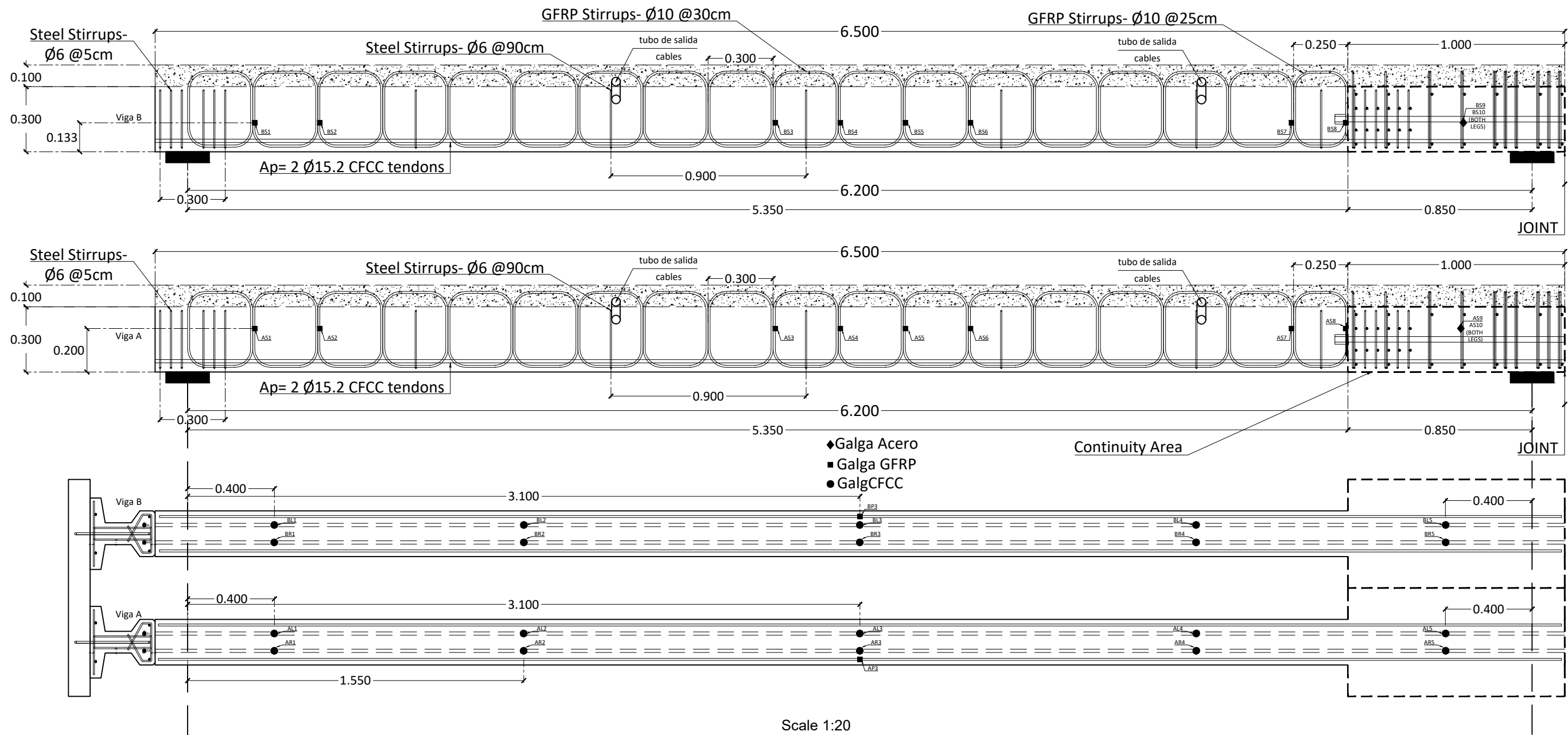
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 6




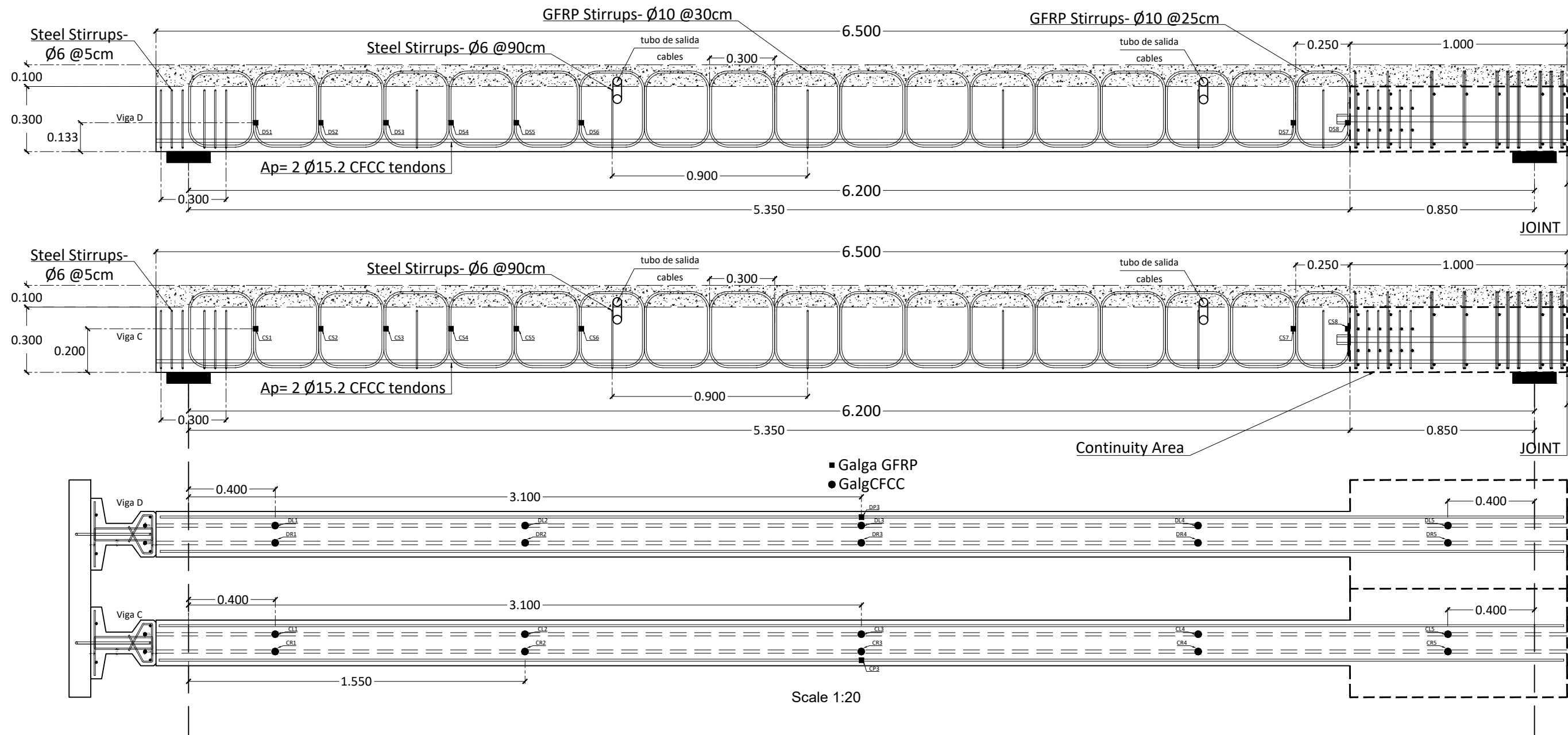
D-D after top slab


Scale 1:5

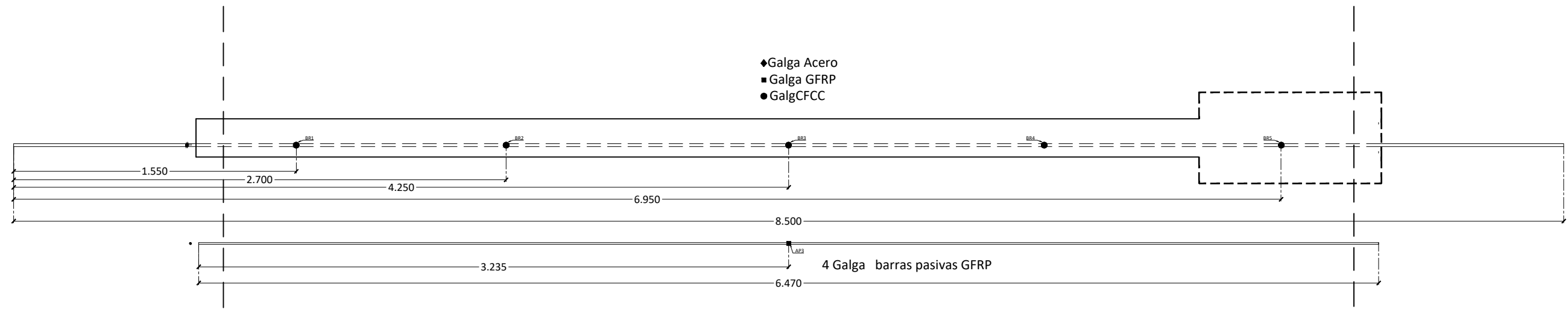
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		No. PLAN: 7



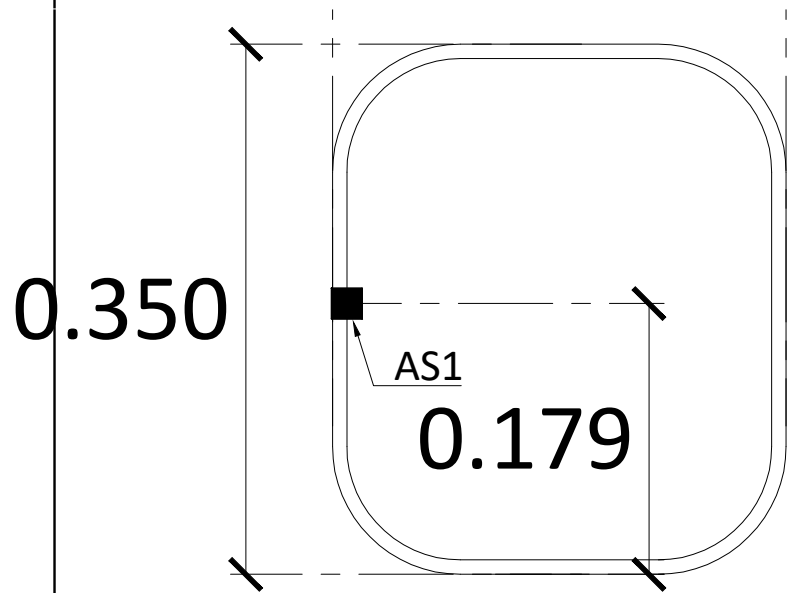
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / Ila
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 1



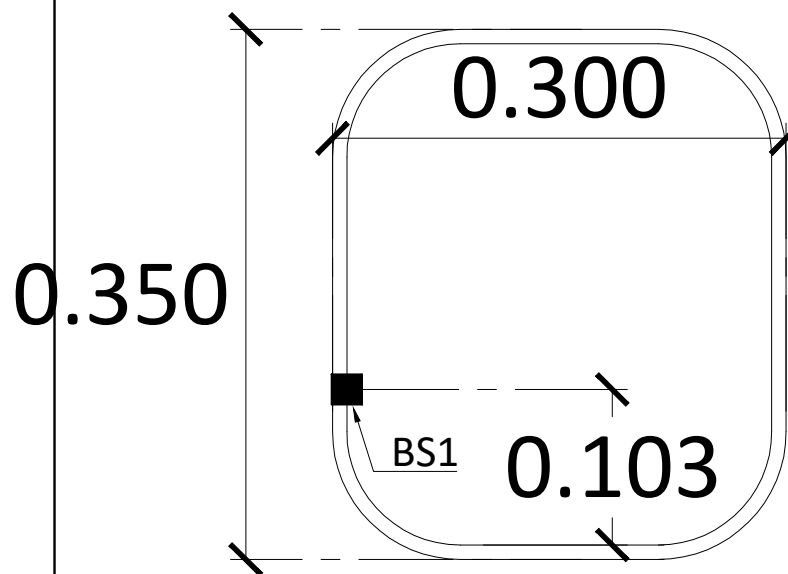
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 2



Scale 1:25

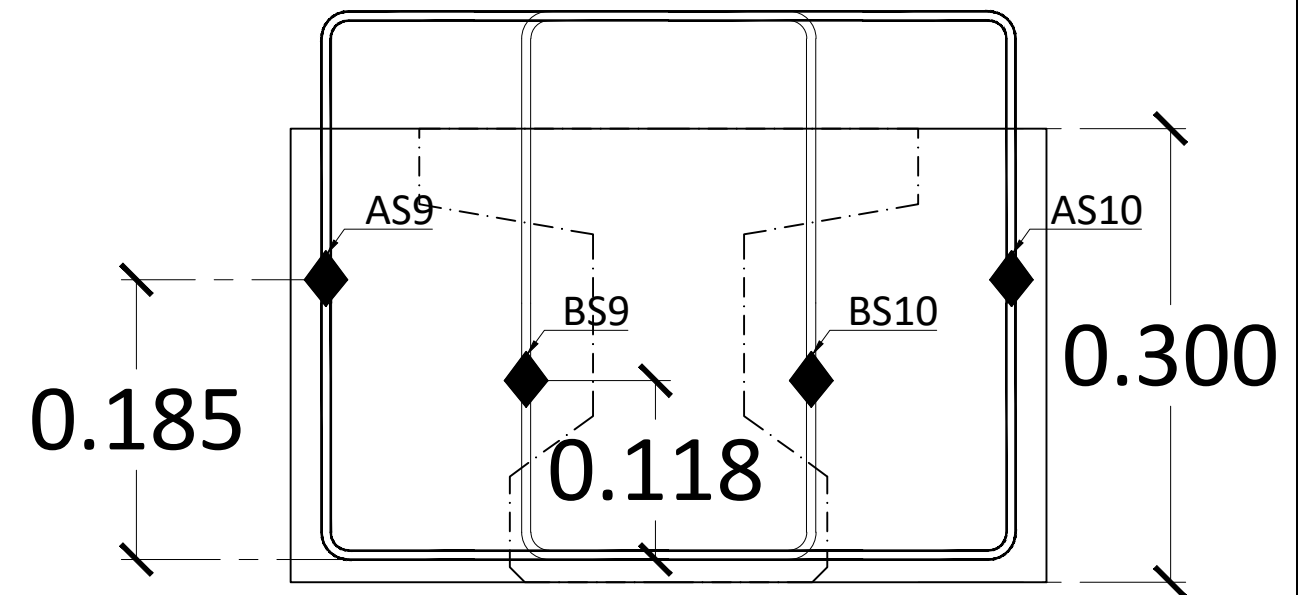


10 Galga GFRP




10 Galga GFRP

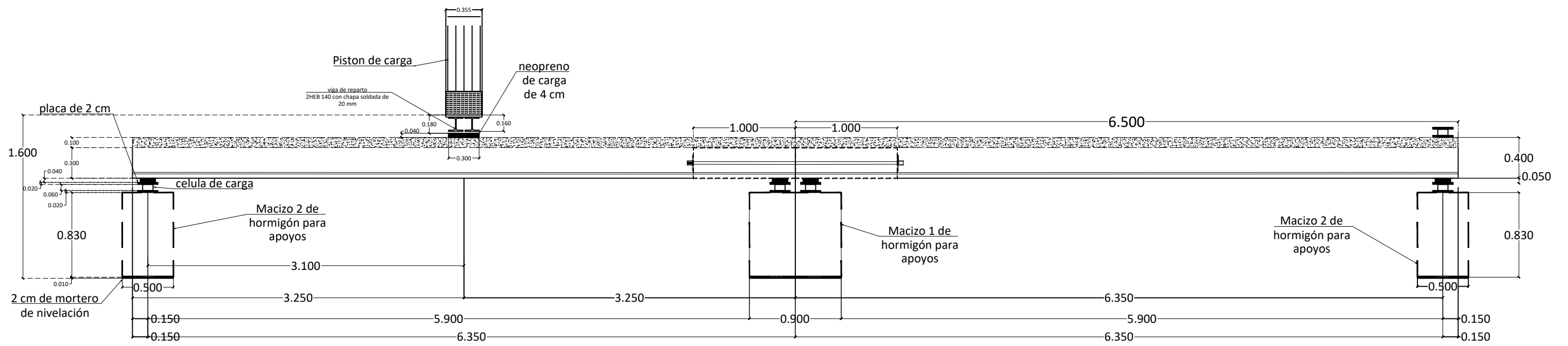
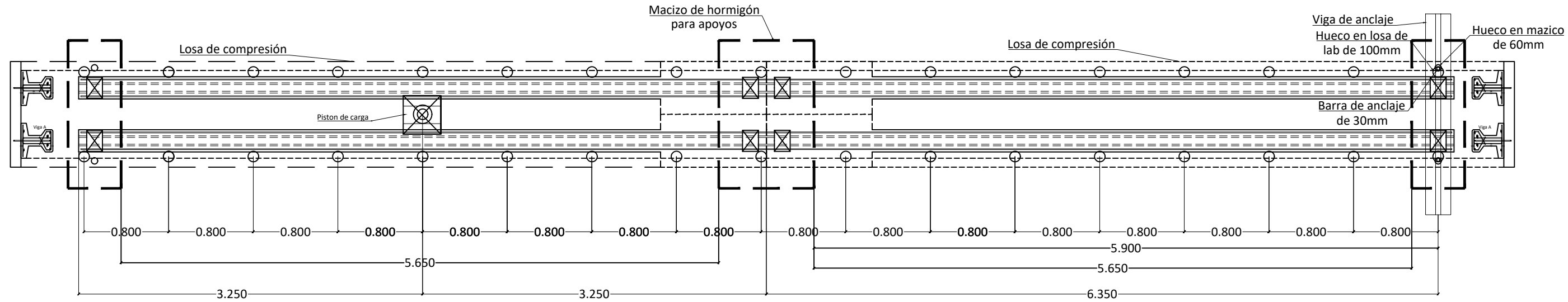
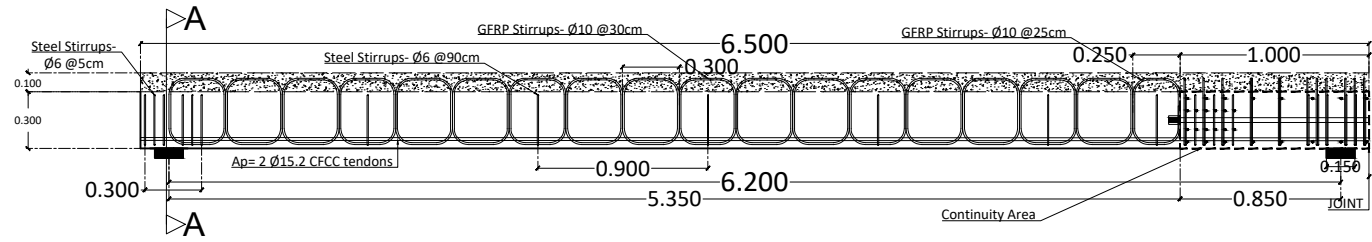
Scale 1:5



4 Galga Acero

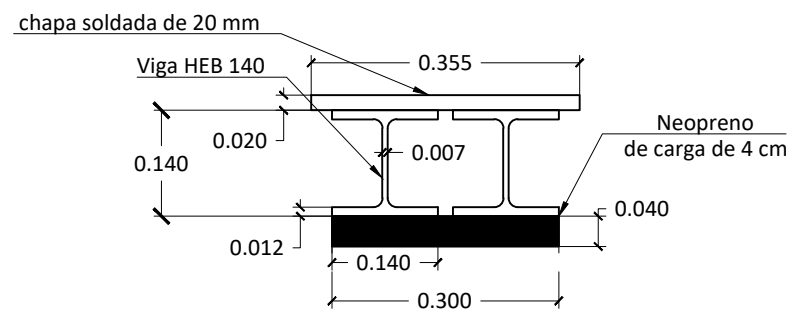
Scale 1:5

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 3




Opción con placa para celula de carga de 2 cm

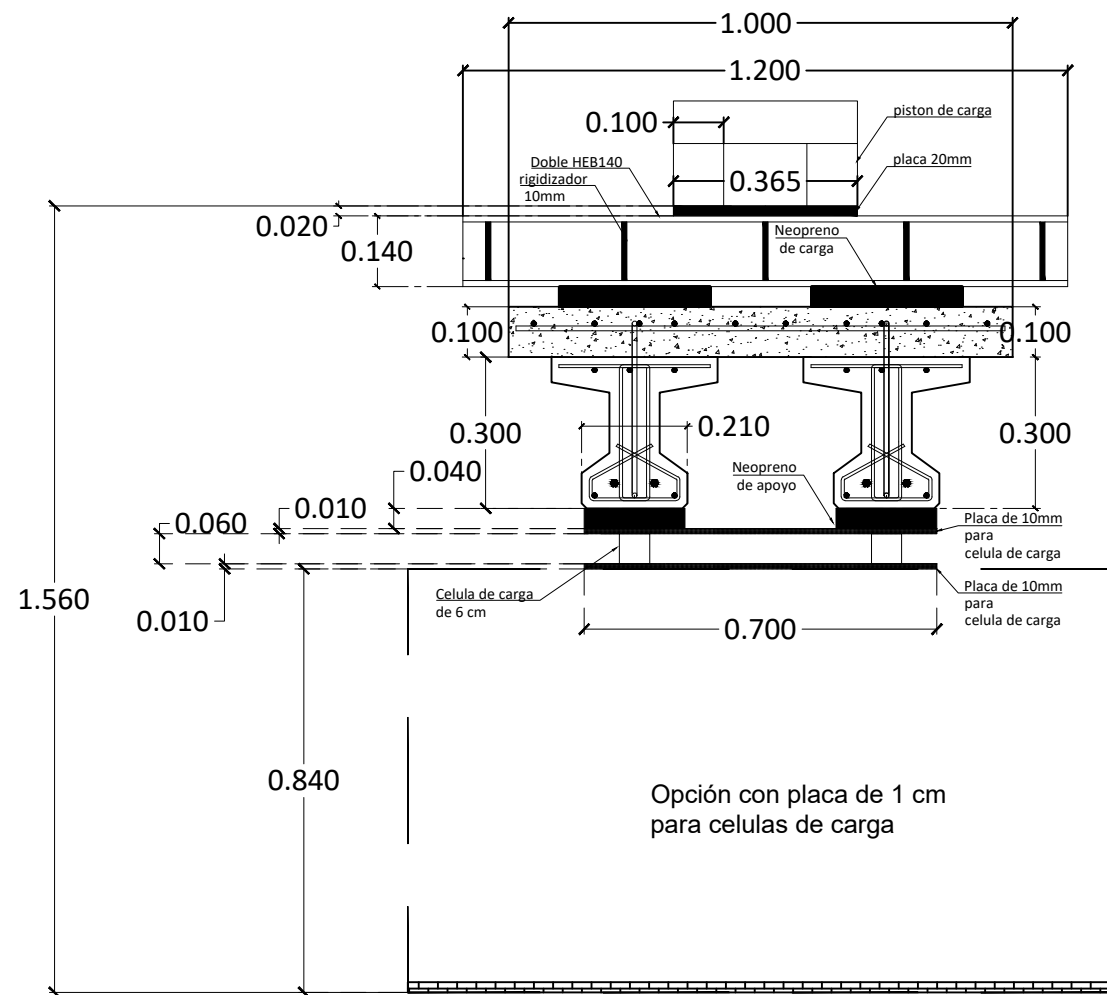
Scale 1:25



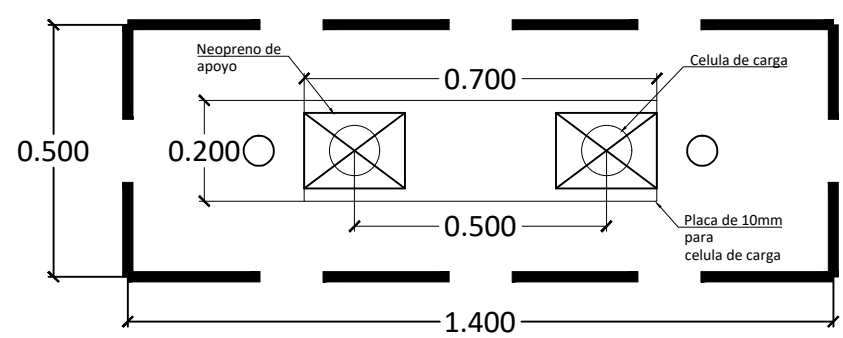
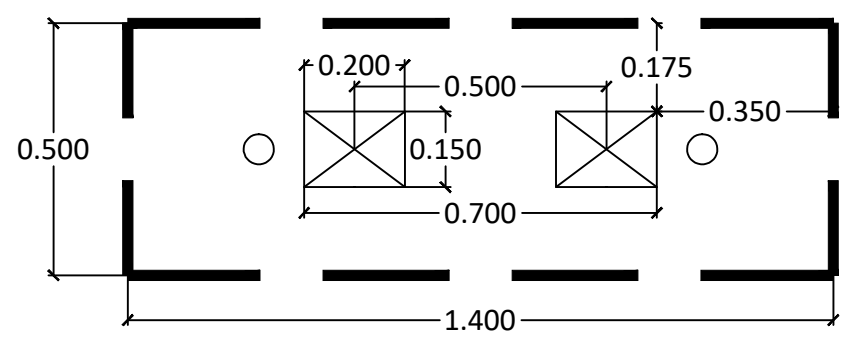
Scale 1:10

viga de reparto de carga

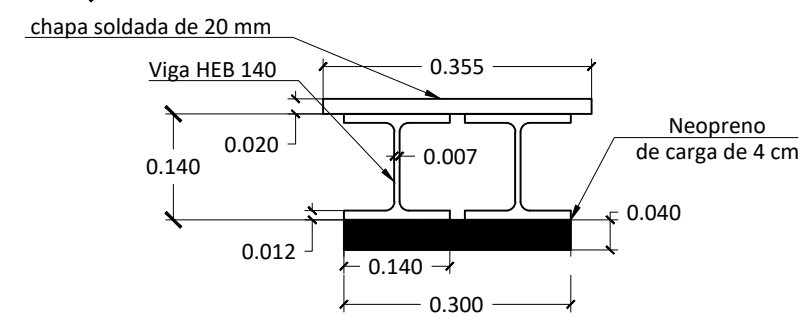
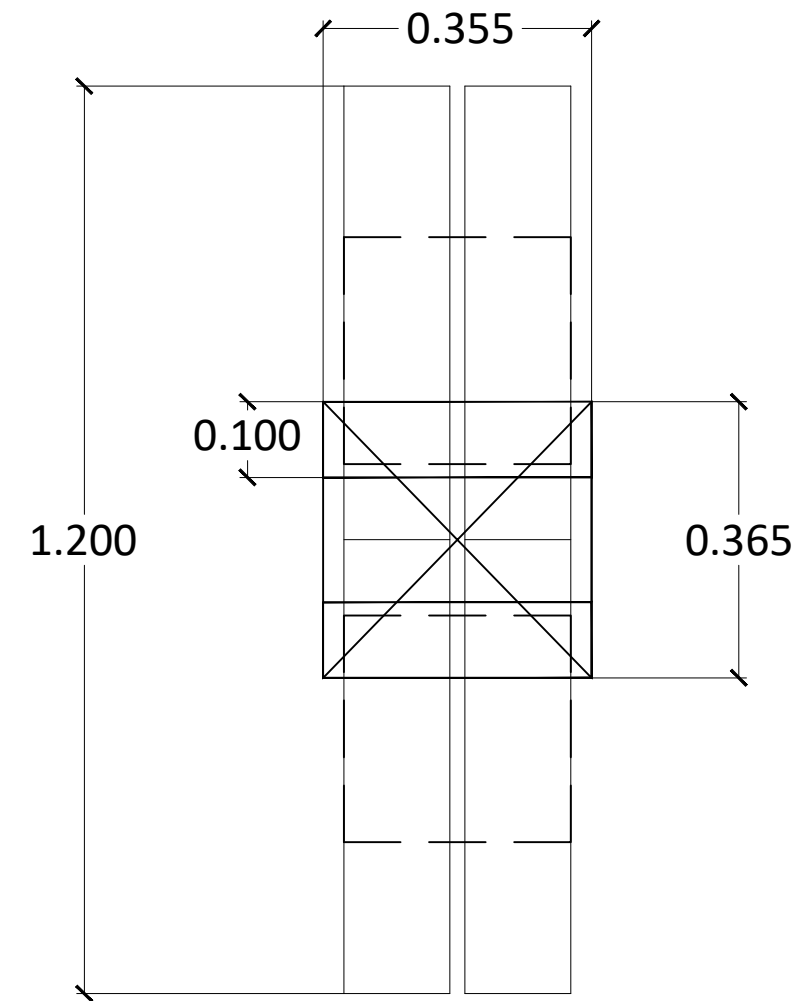
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-60 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCTURAL PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 20/06/2023
		No. PLAN: 1




Opción con placa de 1 cm para celulas de carga

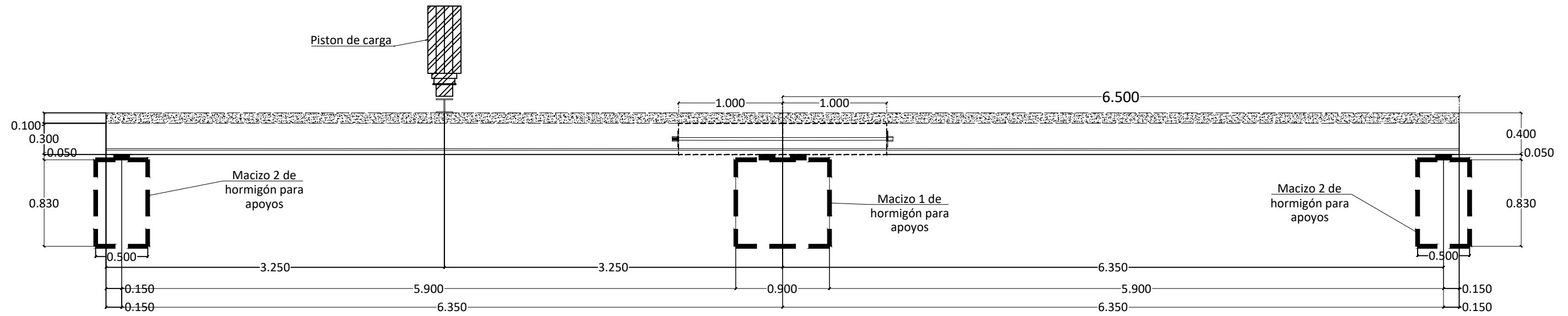
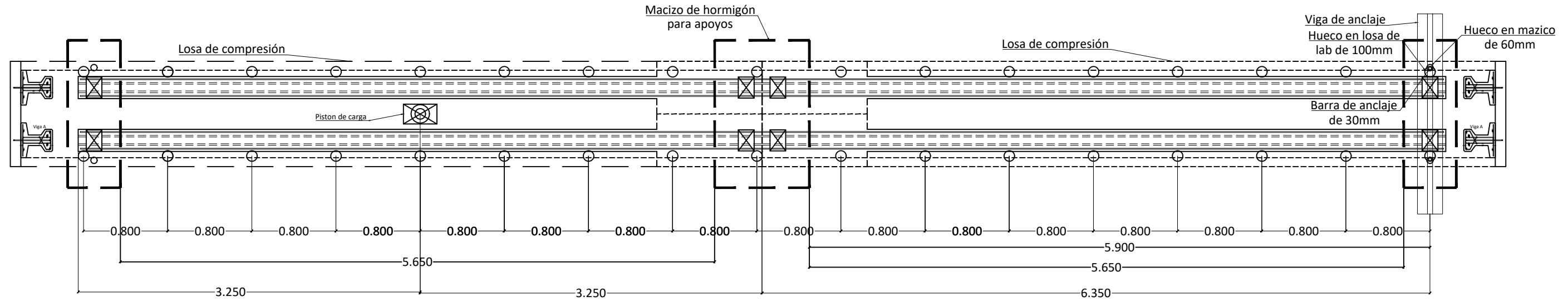
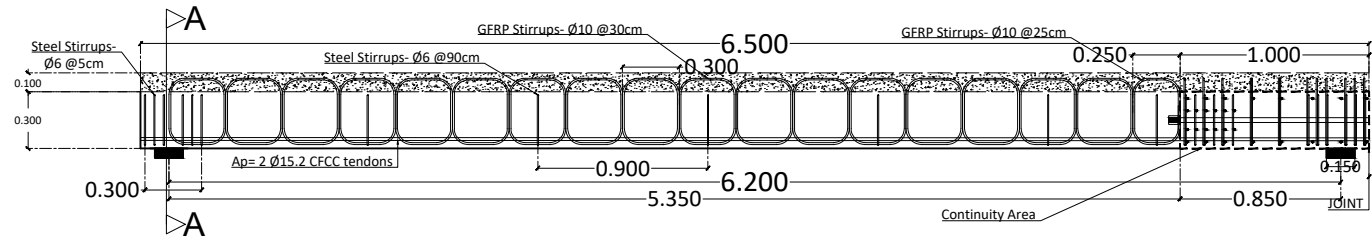


Scale 1:15




Scale 1:10

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 2



Scale 1:25

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH	Concrete	HP-50 / B / 10 / IIa
	Active prestress	CFCC Tendons
	Passive reinforcement	GFRP Bars
	Stirrups	GFRP Bars
'STRADURAVIUS' PROJECT		DESIGN: UPC GROUP
EXPERIMENTAL CAMPAIGN		DESIGNER: ALEXIS RAMIREZ
STRUCUTRLA PLAN - CFCC PRESTRESSED BEAM		SCALE: VARIED
		DATE: 10/05/2023
		No. PLAN: 1