

Aplicación práctica y dimensionado del hormigón armado con nuevos sistemas y materiales

AUTOR:

JOSEP RAMON LLISO FERRANDO

TUTOR ACADÉMICO:

MANUEL VALCUENDE PAYÁ

(CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

ETSAV – ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ARQUITECTURA DE VALÈNCIA

UPV – UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

MOTIVACIÓN

Mi tutor, Manuel Valcuende, ya desde un principio transmitió un gran interés por la asignatura y por la materia impartida. Era el momento de tratar uno de los campos que más importancia tiene posteriormente en el mundo laboral. El hormigón armado se ha convertido en uno de los materiales de construcción más importantes y utilizados.

Tras el análisis del material, y la realización de la práctica del curso, (dimensionado de la estructura de uno de los edificios trabajados en la carrera), mi motivación por el trabajo y la investigación es este campo me llamó mucho más la atención.

Además, junto con el estudio detallado de este material, me di cuenta de lo costoso que puede ser, pero también del presupuesto que puede precisar las reparaciones que el edificio precise. La mayoría de estos problemas se originan interiormente en el acero, en muchas ocasiones, no visibles a simple vista, por tanto, muy problemáticos. La humedad y las sales marinas pueden generar grandes problemas en nuestras estructuras. Por otra parte, teniendo en España un gran frente edificatorio que puede verse afectado por la oxidación, es de gran valor e importancia estudiar soluciones viables para ello.

La sustitución del acero por otras alternativas mucho más duraderas, que puedan dañar menos el medio ambiente, y que a su vez permitan reducir costes en la construcción y posteriores reparaciones puede ser un buen punto de partida. El estar en clase con profesores como Víctor Calvet o Ana Almerich, cuyas Tesis Doctorales estudian estos campos de investigación me ayudó a resolver muchas dudas que me planteaba.

Todo ello, sumado al interés que mostró mi tutor cuando le planteé el tema creó en mí una motivación especial que me ligó de manera muy personal a este trabajo.

OBJETIVO

El objetivo del proyecto es el estudio y comparación de las alternativas actuales en el mercado para poder sustituir las barras de acero del hormigón armado. Entre estas, se encuentran las barras de fibra de vidrio, carbono o basalto.

El estudio se realizará con el edificio sobre el que se ha trabajado durante la práctica del curso para poder comparar las diferentes soluciones obtenidas con el caso de acero.

Una vez obtenidas y estudiadas las propiedades de los diferentes materiales, se compararán todos los resultados obtenidos con un caso de predimensionado de uno de los tramos de la estructura del edificio a tratar.

METODOLOGÍA

Inicialmente conoceremos los problemas del actual sistema de armado. Más adelante, estudiaremos las propiedades y características de cada uno de los materiales que en el siguiente proyecto vamos analizar.

A continuación se plantearán los sistemas de armado y soluciones oportunas para realizar los cálculos. Tomando el ejercicio de curso de la asignatura de CT3 se realizarán los cálculos para modificar el armado del pórtico número 3, como se verá más adelante.

Por último, y a modo de conclusión, se realizará una comparativa de estos sistemas y soluciones tomadas, a través de un cálculo rápido de presupuesto aproximado que consiga detallarnos las ventajas y desventajas de este tipo de sistemas utilizados.

ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

En el **Capítulo 1** se presentan los antecedentes que nos han dado lugar a investigar y utilizar este tipo de materiales FRP, es decir, la corrosión en las armaduras, en especial la corrosión marina, que es la que se ha estudiado principalmente en el siguiente proyecto.

Se estudian los efectos de dicha lesión, y por último las propuestas de materiales para evitar la corrosión en las armaduras, en lo que se hace referencia al material que se está utilizando hoy en día (acero) en el ámbito de la construcción y los materiales con los que se quiere innovar en el dicho ámbito, el basalto, el vidrio y el carbono.

En el **Capítulo 2** se presenta el edificio de estudio que se tomará para realizar la práctica. Será una continuación del ejercicio de curso de la asignatura de CT3. Se mostrarán todas las cargas a las que el pórtico a analizar se encuentra sometido.

En el **Capítulo 3** se presenta una pequeña introducción y antecedentes de los materiales que se estudian, pero ya como barras de FRP. También se desarrolla su proceso de fabricación, propiedades mecánicas, físicas y durabilidad de las barras FRP frente a otros tipos de barras.

En el **Capítulo 4** se recoge un amplio abanico de soluciones tomadas y métodos empleados para el diseño y cálculo con los nuevos materiales de todas las piezas analizadas de la estructura. Se realiza un recorrido por las diferentes normativas que podemos encontrar con el fin de tomar las soluciones óptimas. Además se recogen las diferentes soluciones adoptadas, del abanico posible que se ha encontrado.

Por último se recogen las diferentes normativas, guías, códigos y especificaciones que podemos encontrar y que han sido utilizadas.

En el **Capítulo 5** se desarrolla el análisis del pórtico 3 con las opciones escogidas en los apartados anteriores. Se realiza el cálculo y se adjuntan los planos estructurales definitivos que se han obtenido.

En el **Capítulo 6** se recoge una pequeña comparativa aproximada de los presupuestos que resultarían de escoger cada uno de los diferentes materiales que se han estudiado. Además, como conclusión, se definen las ventajas y desventajas que nos aportarían cada uno de ellos respecto a su precio.

En el **Capítulo 7** se identifican las conclusiones tras la realización del trabajo y las futuras líneas de investigación.

RESUMEN

Debido a los problemas de corrosión que han habido en estructuras de hormigón armadas con acero, y sometidas a ambientes agresivos, se ha realizado el siguiente análisis de el porqué el uso de barras de materiales compuestos FRP en substitución de las barras corrugadas de acero.

En este trabajo se va a estudiar el comportamiento de las barras corrugadas de basalto, vidrio y carbono para construcción, mediante un estudio de las propiedades mecánicas obtenidas a través de los ensayos de laboratorios externos.

Estos ensayos serán extraídos de otros trabajos y tesis, para posteriormente poder realizar estudios y comparativas. Una vez obtenidas sus propiedades se resolverá el montaje de las barras en un mismo elemento estructural, calculando los costes de la puesta en obra. De esta forma se podrá obtener la comparativa de los citados materiales.

Palabras clave: Barras corrugadas de basalto, Barras corrugadas de vidrio, Barras corrugadas de carbono, Oxidación, Hormigón armado.

RESUM

A causa dels problemes de corrosió que hi han hagut en estructures de formigó armades amb acer, i sotmeses a ambients agressius, s'ha realitzat el següent anàlisi del perquè l'ús de barres de materials compostos FRP en substitució de les barres corrugades d'acer.

En aquest treball es va a estudiar el comportament de les barres corrugades de basalt, vidre i carboni per a construcció, per mitjà d'un estudi de les propietats mecàniques obtingudes a través dels assajos de laboratoris externs.

Aquests assajos seran extrets d'altres treballs i tesis, per a posteriorment poder realitzar estudis i comparatives. Una vegada obtingudes les seues propietats es resoldrà el muntatge de les barres en un mateix element estructural, calculant els costos de la posada en obra, en tal de obtindre la comparativa dels esmentats materials.

Paraules clau: Barres corrugades de basalt, Barres corrugades de vidre, Barres corrugades de carboni, oxidació, formigó armat.

ABSTRACT

Due to corrosion problems have occurred in structures that have been armed with steel and exposed to aggressive environments, has been made the following analysis of why the use of composite FRP rods in substitution of steel rebars.

In this work, it has been studied the behavior of rebars basalt, glass and carbon construction, through a study of the mechanical properties obtained through external laboratory tests.

These tests will be taken from other works and thesis, later to conduct studies and comparative. Once obtained its properties mounting bars in the same structural element will be designed by calculating the costs of commissioning work, in order to obtain comparative of said materials.

Keywords: Basalt rebars, rebars glass, carbon rebars, rust, reinforced concrete.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia la continua motivación, apoyo y confianza en mí, al igual que el aporte económico de mis padres a lo largo de toda la carrera, ya que sin ellos no hubiera llegado donde estoy. No hay día que no me hayan motivado a seguir adelante, a conseguir esa meta que desde pequeño quería.

A mis compañeros/as que han sido capaces de soportar mis momentos más extremos de estrés y han hecho que estos 5 años de carrera hayan sido un camino donde he encontrado maravillosas personas.

Sin duda alguna, he extrañado esos tiempos de mi vida en que resolver una duda sobre una palabra, era tan sencillo como abrir el diccionario y buscar solución. Recuerdo la maravillosa sensación que tuve cuando aprendí, en primaria, a usar ese útil libro: sentía que tenía a todo el mundo en la punta de mis dedos. En esa época creía que podía aprender y entender todo simplemente buscándolo en un diccionario o una enciclopedia, y esa sensación me encantaba.

Pero nada más emprender este proyecto vi que todo tenía miles de sentidos y soluciones posibles, y que buscabas en mil sitios y no encontrabas la respuesta tan clara como en un diccionario, y es ahí cuando venía el agobio, y el porqué de todo.

Es por eso que quiero agradecer a todas aquellos familiares, compañeros/as y profesores que han tenido la delicadeza de explicarme palabras, ensayos, cálculos, etc. que no llegaba a entender.

Agradecer también a mi tutor del TFG, D. Manuel Valcuende Payá, por su ayuda. Su experiencia, consejos y contribuciones han hecho posible la realización de este proyecto.

Y para finalizar agradecer también a los profesores Ana Isabel Almerich Chulià y Víctor Calvet Rodríguez, que no siendo mis tutores me han prestado su ayuda, prestándome información en la realización de algunas partes de mi proyecto, al igual que motivación e interés en mi persona y mi proyecto.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.

1.1.- Intenciones.

1.2.- La corrosión.

1.3.- Arco eléctrico.

1.4- Conclusión

Capítulo 2. Edificio de estudio y condicionantes.

2.1.- Memoria constructiva.

Capítulo 3. Nuevos materiales como barras de armado.

3.1.- BFRP. Basalt Fiber reinforced Polymer.

3.2.- CFRP. Carbon Fiber Reinforced Polymer.

3.3- GFRP. Glass Fiber Reinforced Polymer.

Capítulo 4. Diseño y cálculo con los nuevos materiales.

4.1.- Flexión.

4.2.- Deformación y fisuras.

4.3.- Cortante.

4.4.- Adherencia y longitud de anclaje de refuerzo.

4.5.- Guías, códigos y especificaciones.

Capítulo 5. Cálculos.

Capítulo 6. Comparativa económica.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- INTENCIONES.

El acero en el hormigón armado es uno de los elementos que más daños sufre, limitando mucho la vida útil de las piezas. La corrosión es el mayor deterioro que éste puede sufrir. Excluido el deterioro de origen mecánico, la causa más frecuente de patología y posiblemente la de mayor trascendencia económica es la corrosión de las mismas¹.

Se trata de un proceso natural de deterioro de un metal por su tendencia a buscar el equilibrio electroquímico al entrar en contacto con su medio ambiente². Es una de las lesiones más comunes que se dan en la mayoría de las infraestructuras.

De esta manera nos encontramos ante la situación de plantearnos si debemos continuar utilizando este material o puede ser recomendable plantearse alternativas al uso de las barras de acero en el hormigón armado.

Para ello, en este trabajo deberemos plantearnos cuales son los inconvenientes que el acero nos genera y buscar alternativas para compararlas entre ellas y encontrar la más favorable.

1.2.- LA CORROSIÓN.

La corrosión y el arco eléctrico son los principales problemas. En el Anexo 1, aunque se sale de la intención del proyecto, se ha detallado una síntesis del origen de la corrosión según el tipo de ambiente. En el marco funcional, cabe destacar que el acero cuando se oxida pierde muchas de sus propiedades y características típicas de este, como por ejemplo la resistencia a tracción, a compresión, al igual que la adherencia de este con el hormigón. Además, al humedecerse, aumenta su volumen inicial por lo que provoca roturas y desperfectos en muchos casos irreparables en el hormigón que lo envuelve³.

En cuanto a la seguridad y las pérdidas económicas, en casi todos los casos se llega a tiempo para darse cuenta del peligro y repararlas, pero de vez en cuando se producen accidentes, incluso mortales.

¹ Apuntes Construcción 3. Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Manuel Valcuende. Tema 7. Página 16.

² Libro "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado", ECU editorial club universitario, AAVV: Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

³ Libro informativo de la empresa Galvanizadora Valenciana "Galesa" y de su página web:
<http://www.galesa.com/v14/>

También estamos acostumbrados a ver rehabilitación y reparación de balcones y fachadas de edificios porque las armaduras férreas internas se han oxidado y provocan desprendimientos peligrosos.

Durante varios años hubo un auge importante de la construcción, una forma de construir sin frenos, antes de terminar de construir una edificación esta ya estaba vendida, y los precios de las viviendas llegaban a un espectacular porcentaje casi equivalente a siete veces el crecimiento de los salarios⁴.

Pero hoy en día, aparte de estar en crisis dicho sector, después de tantos años de construcción, han aparecido grandes lesiones en las estructuras, y mayormente, por deficiencia de los materiales utilizados en la edificación o por su pésima forma de ejecución, en gran parte, a causa del gran "boom inmobiliario".

Las estructuras de hormigón armado forman una parte importante de nuestra infraestructura. La combinación de la alta resistencia a compresión del hormigón y las elevadas propiedades a tracción de la armadura de acero, da un material compuesto ideal que ofrece, comparando con otros materiales, un extenso abanico de aplicaciones en la ingeniería de estructuras.

En el proceso de diseño de estructuras, los ingenieros civiles y los arquitectos están igualmente implicados y frecuentemente se hace una distinción entre las circunstancias que afectan a la seguridad del edificio y aquellas que no crean un riesgo inmediato, pero sí que pueden hacer que el edificio sea inservible. Este último requisito se refiere al estado límite de servicio de la estructura.

Pero no solo debe considerarse la carga mecánica, ya que toda estructura está expuesta a un ambiente que puede tener una enorme influencia en su durabilidad. Normalmente esta interacción entre el material de la estructura y el ambiente se llama corrosión.

Si estudiamos la historia del hormigón armado se encuentran pocos casos donde una estructura haya fallado debido a cargas mecánicas que no hayan sido consideradas en la fase de diseño. Las normativas técnicas dan bastante información a la hora de ofrecer una guía al técnico para diseñar una estructura apropiada para soportar todas las cargas mecánicas.

El problema, entonces, puede aparecer a causa de la falta de conocimiento y sensibilidad cuando se hace frente a cuestiones como la corrosión. Como se ha dicho anteriormente, pocas veces se encuentran fallos de las estructuras debido a sobrecargas

⁴ Diario online "Expansión20", artículo sobre el "boom" inmobiliario en España, publicado por L. Ramírez, Madrid.

pero se conoce un elevado número de estructuras en las que la corrosión y principalmente la corrosión de la armadura ha conducido a reparaciones costosas y fallos prematuros.

Por ello la corrosión de las armaduras en estructuras es en este momento un aspecto que aparece en el mantenimiento de edificios ya construidos y que ha contribuido a cierto número de colapsos estructurales.

Incluso después de 50 años de experiencia con los problemas de corrosión en estructuras de hormigón armado, puede encontrarse todavía la necesidad para los diseñadores de estructuras, de obtener una mayor comprensión de los factores y parámetros que perjudican a la corrosión de las armaduras y una mejora o desarrollo de las normativas o códigos de práctica para poner más hincapié en la necesidad de diseñar para la durabilidad de las estructuras.

Por supuesto, no solo está el lado técnico del problema. Las intervenciones prácticas se manifiestan principalmente en las pérdidas económicas que pueden dar lugar a la pérdida de utilidad temporal o completa, el coste de las reparaciones y la monitorización, o en el peor de los casos la necesidad precipitada de demolición y sustitución⁵.

Como he dicho anteriormente, en nuestro caso particular, en el sector de la construcción, la corrosión de las armaduras está identificada como uno de los mayores problemas en estructuras de hormigón, convirtiéndose en un asunto que requiere la atención de los profesionales del sector. El fenómeno de oxidación de las barras de acero daña gravemente las características funcionales del hormigón armado como la adherencia, además de inducir la formación de grietas y desprendimientos de trozos de hormigón, lo cual acaba implicando la totalidad estructural.

Valoraciones llevadas a cabo por comités de expertos, en corrosión y protección contra la corrosión, determinan las pérdidas anuales causadas por la corrosión alrededor del 3.5% del producto interior bruto (PIB) de un país. Estas cifras pueden estimarse como excesivamente optimistas, pues, en gran parte de los casos incluyen solo los costes directos de la corrosión provocados por las medidas de mantenimiento ,preventivas, o por sustitución de las partes corroídas, de tal manera que una valoración más real debería incluir las divisiones primarias, como pérdidas de producción, costes de las plantas durante el paro, coeficientes de seguridad en el diseño para prevenir los desgastes producidos por la corrosión, o disminución de la calidad en la producción a consecuencia de la impurificación con los productos de corrosión, entre otras.

⁵ Libro "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado", ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

1.3.- ARCO ELÉCTRICO

Otro de los problemas que se genera debido a la utilización del acero en armaduras es el arco eléctrico. Éste se trata de una descarga continuada entre dos conductores separados ligeramente, por donde pasa la corriente, al hacerse conductor el aire o gas comprendido entre los mismos. Se manifiesta con gran desprendimiento de luz y calor⁶. Este hecho depende de las propiedades del gas conductor. Para que el arco se dé, hay que conseguir la separación de sus átomos en iones y electrones; este proceso se denomina ionización. La ionización se consigue por el choque de los electrones que salen de uno de los electrodos con el gas. Un gas ionizado o parcialmente ionizado se denomina plasma.

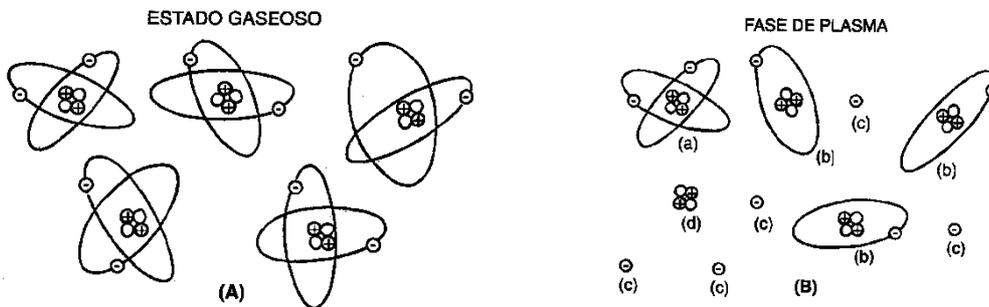


Imagen 1.1 Protones, neutrones y electrones.

Imagen 1.2 b) y d) son iones positivos.

En la figura (A) se puede observar los átomos de un gas. Cada átomo tiene igual número de protones que de electrones, sin embargo, a una temperatura elevada se puede conseguir que el gas se ionice, es decir que todos o alguno de los electrones de cada átomo se separe dejando un ión positivo. El plasma de la figura (B) está formado por un átomo (a) que no está en absoluto ionizado, es decir que no tiene ningún electrón separado de su núcleo; átomos parcialmente ionizados en los que uno de los electrones (c) se ha separado del núcleo se ha separado del núcleo y han dejado un ión positivo (b) (tiene más protones que electrones) y otro átomo totalmente ionizado ya que los dos electrones (c) se han separado del núcleo (d).

Los electrodos pueden ser de igual o de distinta naturaleza, por ejemplo, una varilla metálica (electrodo propiamente dicho) y una pieza metálica (parte a soldar o metal base) del mismo modo o de otro metal, pero en cualquier caso, para arrancar los electrones del electrodo para que bombardeen el gas y conseguir su ionización, es necesario comunicarles la energía suficiente.

⁶ Tema 4. Apuntes IES Machado FP-.

El procedimiento más simple para aportar la energía necesaria es calentar el electrodo a una temperatura muy elevada. Por ello el método corriente para cebar un arco (iniciar un arco) es establecer un cortocircuito entre pieza y electrodo, ya que se produce un calentamiento muy fuerte en la punta del electrodo negativo (llamado cátodo) al pasar una corriente elevada, separando ahora el electrodo bastan unos pocos voltios para que se establezca el arco. Una vez iniciado éste, los electrones que salen del cátodo ionizan el gas al chocar con sus átomos.

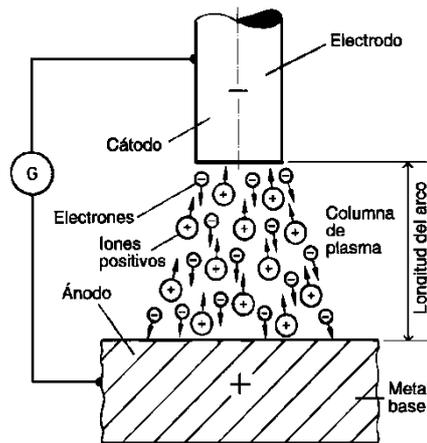


Imagen 1.3 Descripción del arco eléctrico.

Los electrones siguen su camino hacia el ánodo (terminal positivo) y los iones del plasma se dirigen hacia el cátodo, al que ceden su energía cinética (de movimiento) que se transforma en calor, manteniendo así la temperatura del cátodo que sigue emitiendo electrones.

Como hemos visto este fenómeno es muy normal que se dé en casos de soldaduras, aunque en el caso de armaduras, sería poco común que se diera. Este problema se hace bastante probable en el caso de pasar armaduras y cableado eléctrico bastante cerca y genere el par. En algunos casos, ya se ha tenido en cuenta este fenómeno, como en el ejemplo presentado a continuación. Se trata de uno de los tramos de ampliación del tranvía de Granada. En uno de los tramos se recurrió a eliminar las catenarias de cableado por su impacto visual en el entorno. Por tanto, se optó por llevar tanto el cableado del sistema como las luces y señales por la losa de cimentación que tenía el carril. En este caso se sustituyó el acero de las armaduras por fibra de vidrio, como se aprecia en la figura 1.4.



Imagen 1.4 Imagen de la construcción del tranvía de Granada. Tramo enterrado.

En esta ocasión, se evitó generar el arco eléctrico antes comentado. Como ventaja, como veremos más adelante, no se tuvo que doblar ninguna barra. Se consiguió conformar toda la losa con barras en recto y solo como piezas especiales los separadores. Posiblemente fue este hecho el que permitió reducir considerablemente los costes de utilización de este nuevo material y el hecho de que se optara por esta solución.

1.4.- CONCLUSIÓN

Como hemos visto, el uso del acero en las barras del hormigón presenta 2 grandes problemas, la corrosión y el arco eléctrico. El primero de ellos es el más problemático y más costes terminan generando en reparaciones y rehabilitaciones. Son muchas las soluciones por las que se podría optar, de manera que se consiguiera reducir este efecto en las piezas.

Durante la fase de proyecto se puede optar por mejorar la calidad de hormigón de manera que se cumplan los mínimos recomendados de calidad. Una correcta dosificación de la mezcla puede alargar la vida útil de las piezas y además tener en cuenta los recubrimientos mínimos según los ambientes en los que nos encontremos pueden ayudarnos a mantener a raya la entrada de agentes que nos generen la corrosión.

Otro detalle a tener en cuenta en fase de diseño es tener en cuenta el Estado Límite de Fisuración. Una mayor fisura puede acabar generando una entrada más fácil de agentes y en el diseño se deberá tener en cuenta no facilitar en gran medida las vías de acceso para los mismos. El diseño posterior de las piezas también posee gran importancia. Permitir el acceso de manera correcta del vibrador, evitar que discurran las

aguas por las piezas y se queden almacenadas allí o evitar salpicaduras nos permitirán dotar los elementos de una mayor vida útil⁷.

Por último, a tener en cuenta, se pueden optar por protecciones especiales como pinturas o revestimientos, pero esto puede generar pérdidas de adherencia de gran importancia a tener en cuenta⁸.

En este caso, en este trabajo, se ha optado por obviar este tipo de consideraciones y aproximarnos a la solución óptima a estos problemas, mediante la sustitución del acero por otros materiales, en parte, todavía en desarrollo. A continuación se muestra un estudio de las características, propiedades y cálculos de una pieza con armaduras conformadas por barras de fibra de vidrio, carbono y basalto.

⁷ Apuntes CT3, Tema 7. Durabilidad. Manuel Valcuende. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. ETSAV. UPV.

⁸ Tesis "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de Fibra de Carbono en su comportamiento Adherente con el Hormigón", Dr. Víctor Calvet Rodríguez. Directores, Dr. Javier Benlloch Marco y Dr. Manuel Valcuende Payá. Valencia, Febrero 2014.

2.- EDIFICIO DE ESTUDIO Y CONDICIONANTES

Para este trabajo, se ha continuado con el mismo edificio empleado durante la práctica de curso de CT3. Uno de los condicionantes de la práctica era que fuera uno de los edificios diseñados en las asignaturas de Proyectos cursadas durante la carrera. En contraposición, éste no está proyectado en talleres, sino trabajado durante la estancia Erasmus. El edificio es un bloque utilizado como almacén en las inmediaciones del puerto de Trondheim (Noruega). Sobre este edificio se propuso sustituir su actual uso por un centro de danza y música, modificando su distribución interior. Lo único que permaneció intacto fue la estructura, aunque se practicaron nuevas aberturas.

El edificio se encuentra en una zona desarrollada por el ejército alemán durante la segunda guerra mundial. En el entorno, a no menos de 200 metros podemos encontrar bunkers para la reparación de submarinos y más almacenes. Por tanto, es de suponer que la mayoría de estos edificios fueron proyectados y construidos con muchos de sus elementos sobredimensionados, a fin de ser capaces de soportar bombardeos. A pesar que algunos de los edificios cercanos fueron bombardeados por las fuerzas aéreas soviéticas, el que a nosotros nos ocupa no sufrió ningún daño grave.

Por tanto, y como conclusión de la introducción de este histórico edificio de la ciudad que ha sufrido muchas intervenciones con el paso del tiempo, se plantea el objetivo de calcular la estructura para el nuevo uso y observar qué grado alcanza este sobredimensionamiento al proceder según los criterios de la actual normativa.

Además, con este Trabajo Final de Grado, tras dimensionar con hormigón armado el edificio y comprobar que está sobredimensionado, podremos apreciar si podemos o no reducir en mayor o menor medida las dimensiones de su estructura.

Las plantas, alzados y secciones del edificio se encuentran en el Anexo Gráfico 2. Además, en este mismo anexo se presenta una síntesis de la memoria constructiva para poder entender las cargas que se han estudiado en el edificio, y así, posteriormente pasarlo a cálculo por ordenador.



Imagen 2.1 Vistas interior y exterior del edificio estudiado.

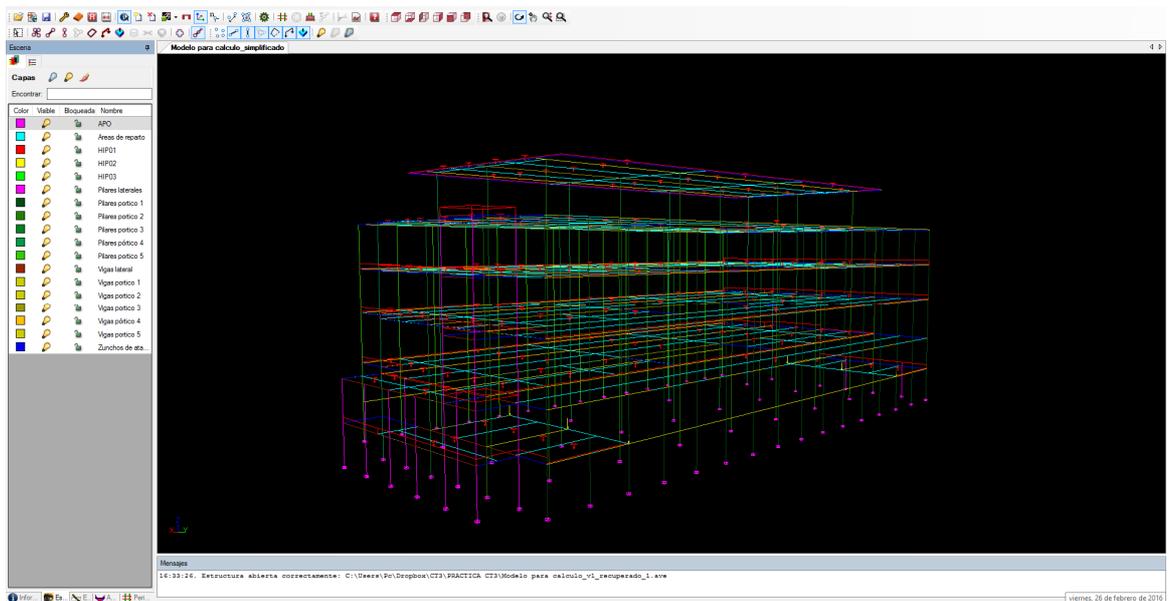
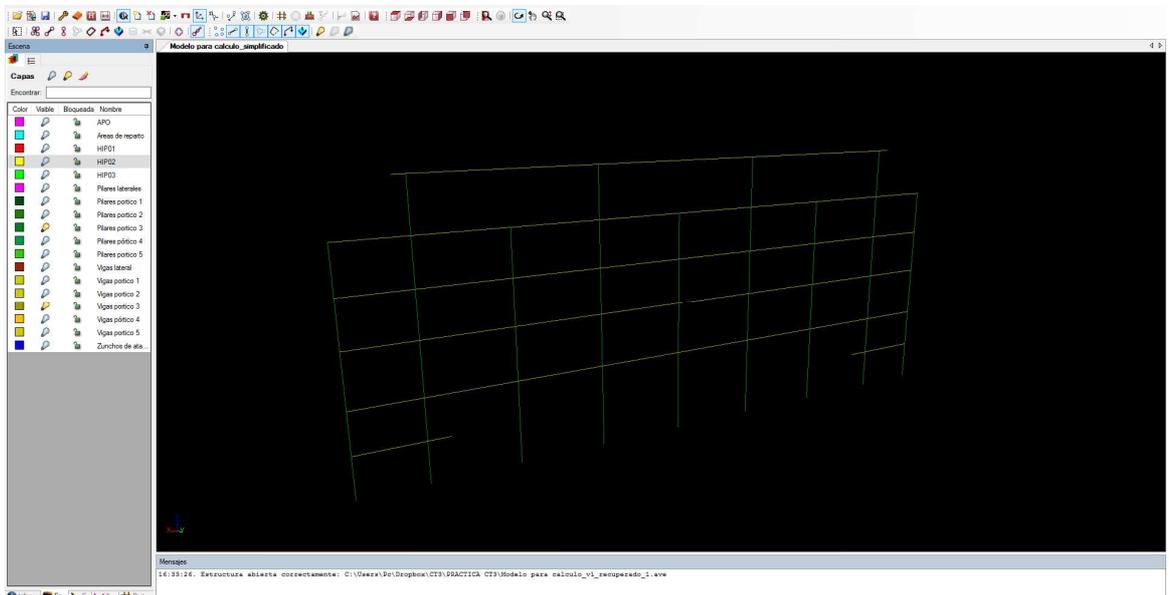
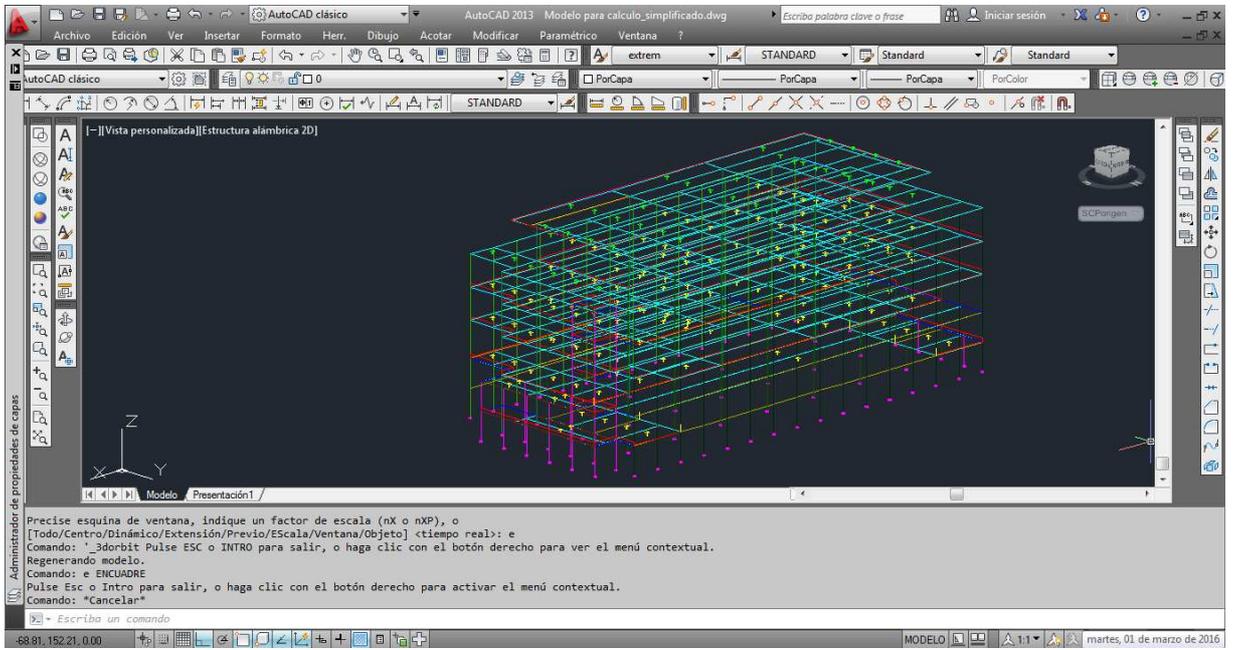


Imagen 2.2-2.3-2.4 Capturas de pantalla del software y diseño empleados.

Cálculo de los elementos por ordenador (caso de hormigón armado).

En lo concerniente a la introducción de datos en el Software AutoCAD, se ha procedido a modelar la estructura completa (en cuanto a barras se refiere) del edificio en tres dimensiones, a fin de obtener unos valores de solicitaciones y deformaciones más precisos y cercanos a la realidad, si bien luego se ha dimensionado únicamente las vigas y pilares del pórtico denominado como "pórtico 3".

Las cargas lineales correspondientes a muros, cerramientos y tabiquería, así como las sobrecargas puntuales en extremo de voladizo, se han modelado como tal aplicadas a barras; mientras que las cargas y sobrecargas superficiales se han modelizado aplicadas sobre áreas de reparto, a fin de no complicar excesivamente el modelo de cálculo, si bien este método resulta ser ligeramente más impreciso.

A continuación, se presenta una serie de imágenes del proceso seguido hasta su cálculo en Architrave, además de los esquemas de plantas utilizados para repartir las cargas a través de los forjados. Tras este proceso, el modelo se exporta al programa Architrave, donde cómo se observa, se trabaja con toda la estructura.

En cuanto a las hipótesis planteadas para el cálculo se toman las siguientes:

01-ELU-Resistencia,persistente, Uso : $1.35 * \text{PesoPropio} + 1.50 * \text{Uso} + 0.75 * \text{Nieve}$.

02-ELU-Resistencia persistente Nieve: $1.35 * \text{Peso Propio} + 1.05 * \text{Uso} + 1.50 * \text{Nieve}$.

01-ELS-Característica, Uso: $1.00 * \text{PesoPropio} + 1.00 * \text{Uso} + 0.50 * \text{Nieve}$.

02-ELS-Característica, Nieve: $1.00 * \text{PesoPropio} + 0.70 * \text{Uso} + 1.00 * \text{Nieve}$.

03-ELS-Frecuente, Uso: $1.00 * \text{PesoPropio} + 0.50 * \text{Uso}$.

04-ELS-Frecuente, Nieve: $1.00 * \text{PesoPropio} + 0.30 * \text{Uso} + 0.20 * \text{Nieve}$.

05-ELS-CasiPermanente: $1.00 * \text{PesoPropio} + 0.30 * \text{Uso}$.

Con estos datos se calcula el pórtico número 3 con los parámetros mencionados en la memoria primera, como utilización de HA-35, y unas dimensiones aproximadas y más tarde ajustadas para obtener un armado óptimo.

A continuación se han podido extraer las solicitaciones obtenidas para la envolvente de las combinaciones de estados límites últimos. Con estas solicitaciones y a través de este software se ha podido obtener el plano de estructuras para este pórtico, con hormigón HA-35 y armaduras de acero B-500-SD.

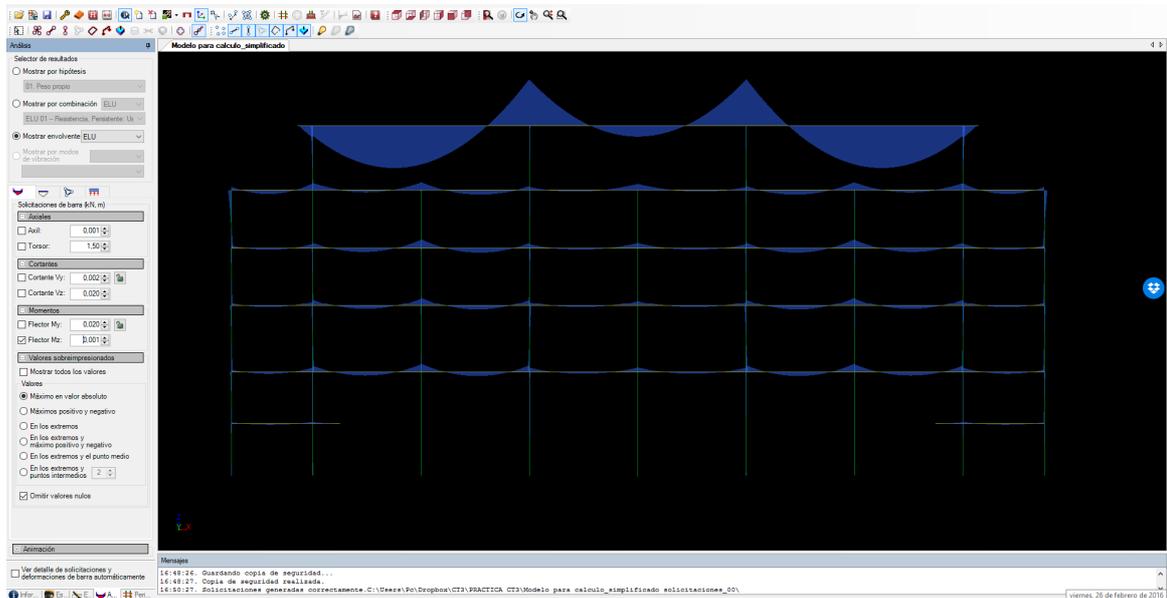
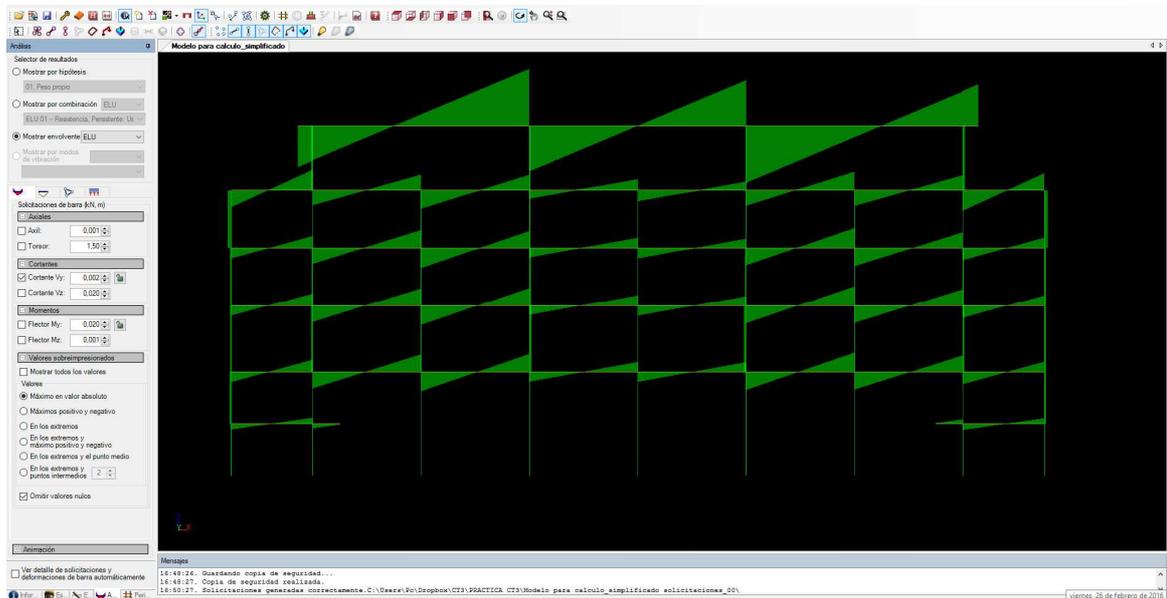
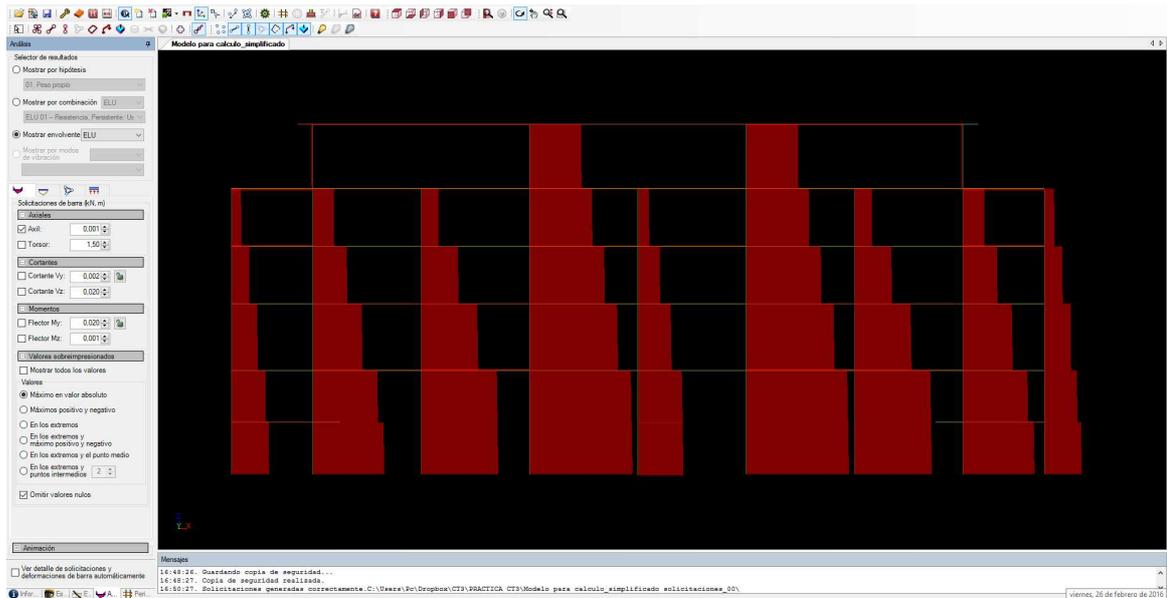


Imagen 2.5-2.6-2.7 Capturas de pantalla del software y solicitaciones obtenidas.

En el Anexo Gráfico 3 se muestran tanto estas solicitaciones detalladas como el resultado del armado obtenido.

Cabe destacar que en los cálculos, tanto realizados para la práctica de curso como para este trabajo solo se ha realizado sobre el Pórtico 3. Además, es de señalar que el tramo de la última planta, que corresponde a las zonas de auditorios, no se consideran que se realizan con hormigón armado. En el propio proyecto se detalla que estructuralmente, están conformadas por pilares metálicos y barras armadas, pero para realizar estas pruebas se consideraron también de hormigón. Claramente se trata de vigas de 20 metros cuyo canto sale desproporcionado, pero ya que es un modelo teórico, se continuó para poder ver qué resultados se podían obtener.

Una vez realizados estos cálculos en la práctica y obtenidos en los planos, cabe destacar que se ha podido reducir considerablemente la estructura. Un ejemplo muy claro son los pilares de la planta baja que son circulares, cuyo diámetro original era de 110 cm y en este estudio llegan a 80 cm. Ahora mismo estamos en disposición de afirmar que el coeficiente empleado como seguridad frente a posibles bombardeos era bastante alto. Ahora, con esta carta de presentación, realizaremos un pequeño análisis de las tres tipologías de barras a emplear y las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de ellas. Con los cálculos obtendremos unas dimensiones que compararemos entre ellas para ver que nos permiten realizar.

3.- NUEVOS MATERIALES COMO BARRAS DE ARMADO

Antes de comenzar, debemos rebuscar un poco en la base del origen del hormigón armado. Los materiales compuestos de matriz cementante son materiales frágiles pero con una gran resistencia a compresión. En este caso, el hormigón es el material estructural por excelencia empleado en construcción. Tiene como característica principal su resistencia a esfuerzos de compresión, pero no tiene un buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos, como tracción o flexión.

El hormigón armado fue concebido posteriormente para mejorar las propiedades del material. Se trataba de embeber barras de acero en el hormigón en masa. Las barras de acero le daban resistencia a tracción y por tanto ductilidad al material. Sin embargo, los problemas de corrosión en las armaduras debidas a los ataques químicos del ambiente obligaban a disponer de capas de recubrimiento de varios centímetros de espesor obteniendo elementos con muy buenas propiedades mecánicas aunque con un peso muy elevado.

Los rápidos avances en la tecnología de los materiales de construcción han permitido a los ingenieros civiles posteriormente, obtener impresionantes ventajas en la seguridad, la economía y la funcionalidad de las estructuras construidas para servir a las necesidades de la sociedad, mejorando el nivel de vida de las personas. Además, estos avances se han visto propiciados por los problemas que los materiales actuales han generado. Dentro de estos materiales innovadores, cabe destacar uno de ellos que ha estado en uso desde la década de los 40, pero que recientemente ha ganado la atención de los ingenieros involucrados en la construcción de estructuras civiles: los compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP).

El uso de los redondos de polímeros reforzados con fibra (FRP) para mejorar el comportamiento frente a la corrosión de las estructuras de hormigón armado convencional, aparece como una de las muchas técnicas presentadas. En particular, ofrecen un gran potencial para ser usados como armadura en condiciones en las que hormigón armado con acero aporta unas condiciones de servicio inaceptables.

Los materiales compuestos bien aplicados en el campo de las obras civiles ofrecen unos beneficios significativos si se relaciona el coste y la durabilidad. Otras ventajas que presentan son la alta resistencia a tracción y rigidez en relación al peso, su capacidad de resistir la corrosión y el ataque químico, una expansión térmica controlable y unas condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayores a la de otros materiales. Estas características pueden aportar una mayor seguridad y ciclo de vida, así como proporcionar un ahorro en los costes de fabricación y mantenimiento de las mismas.

Los FRP están formados generalmente por fibras de alta resistencia embebidas en una matriz de resina. Los FRP más utilizados en aplicaciones de ingeniería civil son el de carbono (CFRP), el de aramida (AFRP) y el de vidrio (GFRP), aunque últimamente aparece el de basalto (BFRP). En la práctica, trabajan como refuerzo interno en elementos de hormigón armado y pretensado, anclajes del terreno y en la reparación o refuerzo de las estructuras existentes de hormigón. Sin embargo, su uso en el Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra FRP en elementos estructurales, ha sido muy limitado debido principalmente a la falta de datos, especificaciones de diseño, normas o códigos para proyecto.

La utilización de los redondos de FRP como armado de elementos de hormigón ha estado en desarrollo desde principios de la década de 1960 en los Estados Unidos, Europa y Japón. Todo ello ha generado que el nivel global de la investigación, demostración y comercialización haya aumentado notablemente desde la década de 1980, utilizando el armado de FRP principalmente en estructuras de hormigón que requieren una alta resistencia a la corrosión o absoluta transparencia electromagnética⁹.

Son ya varios los ejemplos que podemos encontrar que comienzan a utilizar algunos de estos materiales en el diseño y construcción empleados. Un ejemplo es el tramo de losa en la ampliación del tranvía de Granada, comentado anteriormente, (Imagen 1.12.). Otro claro ejemplo podría ser el puente sobre el ferrocarril de Lleida, del año 2007, que incorporaba todo un abanico de avances tecnológicos, entre ellos, barras de fibra de vidrio. Cabe destacar que las propias triangulaciones estructurales también son perfiles de fibra de vidrio. El puente cubría una luz de 38 metros.

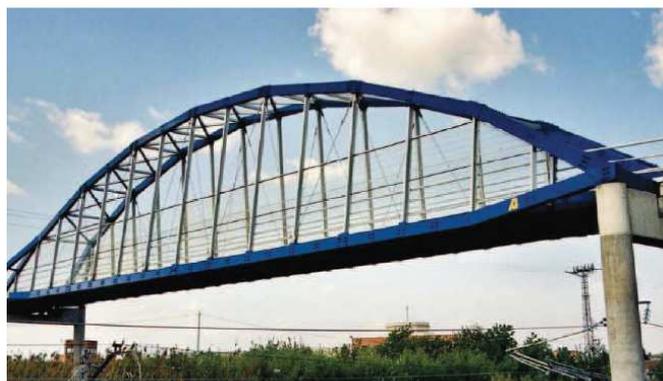


Imagen 3.1. Puente sobre el tren. Lleida.

⁹ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con redondos de fibra de Vidrio GFRP", Ana Isabel Almerich Chuliá, Departamento Mecánica de los Suelos y los Medios Continuos, ETSAV, UPV, Valencia, 2010.

En el Anexo Gráfico 4 se adjunta toda la información del origen de cada uno de los materiales que se estudian y sus propiedades detalladas. En este apartado únicamente se realizará una síntesis de las tablas principales que nos ayudarán en los cálculos.

3.1.- BFRP. Basalt Fiber Reinforced Polymer.

Como principales propiedades de este material, destacaremos:

Peso

El peso específico del redondo de BFRP es aproximadamente la cuarta parte del redondo de acero (7.85 kg/dm^3), dependiendo del porcentaje de fibra y de carga que contenga, variando entre el 2.7 y 3.00 kg/dm^3 , facilitando su transporte y puesta en obra¹⁰.

Conductividad y dilatación térmica

Las temperaturas de aplicación de FRP están limitadas por la temperatura de transición vítrea de la matriz, que es menor a la temperatura de aplicación de las fibras.

De hecho la matriz de refuerzo que une la fibra de carbono al elemento a reforzar siempre está compuesta por morteros epóxicos (mezcla de resinas epoxicas de tres componentes, que da lugar a un mortero autonivelante de alta resistencia) que tienen baja resistencia a altas temperaturas, con el uso de fibras de basalto introducido en mortero cementicio, la matriz de refuerzo puede llegar a resistir temperaturas mucho más elevadas.

El redondo de BFRP es un no conductor -no magnético, es decir, no conduce la electricidad, lo que impide la electrólisis, particularmente en estructuras hidráulicas o aplicaciones marinas. También es no magnético, por lo que se puede utilizar en salas de resonancia magnética y alrededor RFID lectores.

Su coeficiente de dilatación térmica es mejor que el coeficiente del acero, siendo su comportamiento en estructuras de hormigón mejor que el propio acero en las estructuras de hormigón armado convencional.

El coeficiente de expansión térmica longitudinal depende de las propiedades de la fibra, mientras que el transversal está dominado por las de la resina. Los valores típicos de dicho coeficiente en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, de las barras de FRP, con un contenido de fibras entre el 50% y 70%, se presentan en la tabla siguiente¹¹.

¹⁰ Página de Ingeniería Civil y medio ambiente " Miliarium"
(http://www.miliarium.com/prontuario/tablas/normasmv/tabla_2-1.asp)

¹¹ Trabajo Final de Máster sobre "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación" la autora: Paula Vallés Pla; y la tutora académica: Montse Haro Rodríguez; publicada en Valencia, 12 de septiembre de 2004.

Tipo de fibra	Peso específico	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo elasticidad	Deformación unitaria (mm/mm)
Basalto	2.7	400-695 (2800-4800)	12.5-13 (86-90)	0.0315

Imagen 3.2. Propiedades mecánicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales.

Módulo de elasticidad

El redondo BFRP presenta un comportamiento linealmente elástico hasta su rotura. Su módulo de elasticidad es mucho menor que el del acero, ya que el del basalto es de 12500-13000 N/mm² y el acero 200 000 N/mm².

A continuación, como síntesis, muestro las propiedades tanto, físicas, químicas como térmicas de las fibras de basalto¹².

Diámetro	Wt para 40° (lbs)	Resistencia a la cizalladura	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de tracción (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)
8 mm	3.7	201	1200	57	2.24
10 mm	4.85	208	1160	56	1.95
12 mm	9.47	219	1155	55	1.88
16 mm	18.37	225	1120	52	1.31

Imagen 3.3. Propiedades físicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales.

Módulo de tracción

El basalto es fuerte tanto en tracción como en compresión, eso hace que no pueda ser doblado o deformado con la misma facilidad que el acero. Este material, el basalto, proporciona una resistencia más de dos veces la del acero. El basalto en barras de refuerzo tiene el mismo coeficiente de expansión térmica que el hormigón.

Resistencia a la corrosión

El basalto no se oxida ni absorbe agua, por lo que la profundidad de recubrimiento de hormigón se puede reducir. Esto permite secciones más estrechas y una mayor flexibilidad en el diseño.

Flexión

El comportamiento a flexión¹³ del hormigón armado con FRP es lo más ensayado y estudiado, con principios básicos aplicados independientemente de la configuración

¹² Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

¹³ Tesis Doctoral sobre "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP" autora: Almerich Chulia, Ana Isabel del año 2010.

del elemento, de la geometría del refuerzo o del tipo de material (carbón, vidrio, basalto o aramida).

Existen dos modos de fallo a flexión posibles en un elemento de hormigón armado con FRP. Las secciones con cantidades pequeñas de armado fallan por la ruptura a tracción del redondo de FRP, mientras que las que tienen grandes cantidades, colapsan antes por el aplastamiento de la cabeza de compresión del hormigón, sin que la armadura a tracción haya alcanzado su tensión de rotura.

Deformaciones y fisuras

Ante una misma capacidad resistente de la armadura utilizada en una viga, ya sea de basalto o de acero, las deformaciones y los anchos de las fisuras son normalmente más grandes en vigas y losas de hormigón armado con FRP, que en elementos con armadura convencional, debido al menor módulo de elasticidad de dichos FRP.

De tal forma que los límites de las deformaciones o del ancho de fisura son los que con frecuencia controlan el diseño y suelen ser satisfechos utilizando secciones sobredimensionadas.

Adherencia

Para el apartado de la adherencia entre las barras formadas con polímeros y hormigón, debido a su complejidad, se le dedicará un apartado especial más adelante. Como síntesis de todo lo comentado anteriormente, para facilidad del proceso de cálculo, se ha creado una tabla Excel con la resistencia de las barras de fibra de basalto. Esta tabla es similar a las aportadas en los apuntes de clase de CT3¹⁴, pero con los valores anteriormente comentados.

Capacidad mecánica BARRAS DE FIBRA DE BASALTO a TRACCIÓN		Número de barras									
Diámetro	Resistencia (Mpa) Vmedio.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1200	60,3	121	181	241,2	302	361,8	422,1	482	543	603
10	1160	91,1	182	273	364,4	456	546,6	637,7	729	820	911
12	1155	130,6	261	392	522,4	653	783,6	914,2	1045	1175	1306
16	1120	225,2	450	676	900,8	1126	1351	1576,4	1802	2027	2252

Imagen 3.4. Tabla empleada de capacidad mecánica a tracción de las BFRP bars.

Estos valores se han extraído de ensayos realizados previamente, en este caso de las tablas del Trabajo Final de Máster de Paula Vallés Pla¹⁵.

¹⁴ Apuntes Construcción 3. Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Manuel Valcuende. Tema 10. Página 16 y 17.

¹⁵ Trabajo Final de Máster sobre “Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación” la autora: Paula Vallés Pla; y la tutora académica: Montse Haro Rodríguez; publicada en Valencia, 12 de septiembre de 2004.

3.2.- CFRP. Carbon Fiber Reinforced Polymer.

La fibra de carbono es un compuesto no metálico de tipo polimérico, integrado por una fase dispersante que da forma a la pieza que se quiere fabricar, normalmente alguna resina, y una fase dispersa, un refuerzo hecho de fibras, en este caso, de carbono y cuya materia prima normalmente es el poliacrilonitrilo. A pesar de ser un material muy caro, sus propiedades mecánicas son elevadas y es ligero.

3.2.1.- Características y propiedades.

La fibra de carbono es un material muy caro, de propiedades mecánicas elevadas y ligero.

Las altas características mecánicas de las fibras de carbono son debidas al alto grado de orientación de los cristales a lo largo de los ejes de las fibras. Dependiendo del proceso de fabricación se obtienen fibras de bajo módulo, alta resistencia y alargamiento a la rotura o fibras de alto módulo de gran aplicación en el campo aeroespacial. A continuación se detallan los dos tipos de fibras:

- Fibras de bajo módulo de elasticidad: con un módulo en el entorno de $2'3 \times 105 \text{ N/mm}^2$ y un alargamiento en rotura aproximado de un 1'5%.
- Fibras de alto módulo de elasticidad: con un módulo de elasticidad que va entre $4'4$ y $6'4 \times 105 \text{ N/mm}^2$ y un alargamiento en rotura de entre un 4 y un 0'6%.

Las razones del elevado precio de los materiales realizados en fibra de carbono se deben a varios factores:

- El refuerzo, fibra, es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a altas temperaturas en atmósfera de hidrógeno durante semanas o incluso meses dependiendo de la calidad que se desee obtener, ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez se ha obtenido la fibra.

- El uso de materiales termoestables dificulta el proceso de creación de la pieza final, ya que se requiere de un complejo utillaje especializado, como el horno autoclave.

·Laminado de la fibra de carbono:

El material compuesto viene en forma de laminados en los que ya van las fibras como elemento resistente y una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor entre 1,2 y 1,4 mm y una anchura entre 5 y 20 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 100 y 500 m que luego se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Como adhesivo para pegar los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Normalmente debe ser un adhesivo de dos componentes de consistencia pastosa y alta

tixotropía, para poderlo colocar en paredes o techos sin problemas de descuelgue o despegue del soporte.

Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buenas resistencias, principalmente a tracción y cizallamiento.
- Temperatura de transmisión vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados.

El laminado prefabricado se produce mediante el proceso de pultrusión que alberga las fases de polimerización, hilado, oxidación, carbonización y tratamiento superficial.

En cuanto a la impregnación de la resina, existen diferentes procesos para su producción; industrialmente se utiliza la transferencia, inyección e infusión, pero también hay quienes hacen el trabajo de forma manual, con brochas, espátulas o pistola.

- Método por transferencia de resina. RTM: se genera vacío en un molde cerrado y precalentado, con el tejido de carbono seco en su interior, para, a continuación transferir la resina a presión hasta llenar el molde.

- Método por inyección: se hace de manera similar al anterior, con la variante que puede utilizarse tanto en moldes cerrados como abiertos y con bolsa de vacío.

- Infusión. RTI: la resina en forma de película semidura, se coloca en el molde al mismo tiempo que el tejido seco. Al aplicar calor y presión la resina se difunde por la fibra, hasta impregnarla completamente. Este proceso puede realizarse en un horno autoclave, o simplemente con calor y vacío. La polimerización final, dependiendo de las especificaciones de la resina, se puede hacer a temperatura ambiente, en estufa con molde abierto o bolsa de vacío, por lo general las compañías fabricantes utilizan hornos autoclave para el curado. Las características generales de este tipo de material son¹⁶:

Propiedades	Bajo módulo	Alto módulo
Módulo de Elasticidad (N/mm ²)	230.000	440.000
Resistencia a Tracción (N/mm ²)	3.400	2.400
Deformación de Rotura (‰)	15	5.5
Espesor (mm)	0.11-0.16	0.16
Peso (g/m ²)	200-300	300

Imagen 3.5. Propiedades de los laminados en función del tipo de fibra empleada.

¹⁶ Trabajo Final de Máster sobre “Características físicas y mecánicas de Hormigones reforzados con Fibras de: Vidrio, carbono y aramida”, la autora: Victoria Águila Higuero; y el tutor: Ildelfonso Lucea Martínez, publicado en Madrid, junio de 2010.

-Tejido de las fibras de carbono:

Los tejidos a base de fibra de carbono son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Suelen tener entre el 95 y el 98% de las fibras en dirección longitudinal y entre el 2% y el 5% en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales.

Los tejidos suelen tener un espesor de entre 0'13 y 0'30 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se suelen presentar con anchos de entre 30 y 60 cm, en rollos de entre 40 y 100 m de longitud, que posteriormente se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Es importante destacar que dependiendo de la orientación del tejido, la tela de carbono puede ser más fuerte en una dirección determinada o igualmente fuerte en todas las direcciones. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando se entretejen en la dirección de las tensiones, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior.

Por esta razón, una pequeña pieza puede soportar el impacto de muchas toneladas y deformarse mínimamente, ya que las fuerzas del choque se distribuyen y son amortiguadas por la malla.

De ahí la importancia en la elección del número y orientación de las fibras que forman el tejido para obtener una rigidez y resistencia que cumpla con los requisitos deseados en la aplicación.

Los siguientes son los tejidos más comunes:

- Tejido plano o plain: un tejido plano es aquel en el que cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo. Esta construcción proporciona una tela reforzada que es ampliamente usada en aplicaciones generales y garantiza laminados de buen espesor. Este tipo de tela es muy estable, por lo que difícilmente se distorsiona.

- Tejido cruzado o twill: en un tejido cruzado el número de hilados longitudinales que pueden pasar sobre los transversales (y recíprocamente) pueden variarse, dando distintas construcciones de tejidos cruzados. Estos se marcan más fácilmente que los tejidos planos y son fácilmente humedecidos para que se adhieran a la resina.

- Tejido satinado o satín: en las telas del tejido satinado el entrelazado es similar al del cruzado, aunque el número de hilados longitudinales y transversales que pasan recíprocamente por encima y por debajo, antes del entrelazado, es mayor. Por lo tanto, un lado del tejido se construye principalmente con fibras longitudinales, y el otro lado, con transversales. Tiene un excelente acabado superficial, similar al satín, de ahí su nombre.

Para adherir los tejidos al soporte de hormigón se suelen utilizar resinas epoxi fluidas. Esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.

Las características generales de este tipo de material son las que a continuación se detallan¹⁷:

Propiedades	Valor
Módulo de Elasticidad (N/mm ²)	165.000
Resistencia a Tracción (N/mm ²)	2.800
Deformación de Rotura (‰)	17
Espesor (mm)	<68

Imagen 3.6. Propiedades de los tejidos.

·Formulaciones epoxídicas.

No existe un adhesivo universal que permita efectuar cualquier encolado. La elección del adhesivo es un aspecto muy importante en la realización de un encolado estructural. Está condicionado por los materiales a encolar, el estado de las superficies, cargas que lleva el adhesivo, modos de aplicación, y la cualificación del operador.

El uso de formulaciones epoxídicas en la ejecución de refuerzos mediante pegado de armadura adicional, viene justificado por la alta adherencia sobre soportes de hormigón y materiales de adherencia, estabilidad dimensional, endurecimiento rápido e irreversible, resistencia a ataques químicos, y elevadas resistencias mecánicas.

Las formulaciones epoxídicas son un conjunto resultante de la combinación de dos componentes principales, una base epoxídica y un endurecedor. Las bases epoxídicas, llamadas también resinas epoxi, provienen de la reacción de la epidoridrina sobre el bisfenol, son productos de condensación que contienen grupos epoxi funcionales.

Los endurecedores son aminas, amidas, tiokoles y, raramente isocianatos. Son moléculas orgánicas con elevado número de grupos reactivos, que provocan un endurecimiento del conjunto. Cabe notar que las propiedades finales de la formulación, dependen fundamentalmente del tipo de endurecedor elegido.

Pueden añadirse cargas a las formulaciones para modificar propiedades de viscosidad, tixotropía, características mecánicas, solubilidad en agua y reactividad. Las cargas están constituidas por polvo o granulados, en general insolubles, y minerales.

Una coloración con pigmentos inorgánicos para cada uno de los componentes, evita errores de manipulación y permite una homogeneización correcta.

¹⁷ Trabajo Final de Máster sobre "Características físicas y mecánicas de Hormigones reforzados con Fibras de: Vidrio, carbono y aramida", la autora: Victoria Águila Higuero; y el tutor: Ildelfonso Lucea Martínez, publicado en Madrid, junio de 2010.

Dada la gran versatilidad de estos productos, las propiedades físicas pueden variar dentro un importante rango, dependiendo de la utilización prevista del adhesivo.

La exposición de las propiedades generales de las formulaciones epoxídicas, ponen de manifiesto el carácter versátil de estos materiales. La gran variedad de productos hace posible la determinación de adhesivos adaptados a cada aplicación, por tanto, no existen adhesivos universales.

Las características exigibles a los adhesivos, empleados en refuerzos, son:

- Tiempo de endurecimiento máximo 7 días
- Adhesividad, parámetro importante que obliga a determinar la resistencia a rotura de la unión soporte adhesivo y adhesivo refuerzo. Las tensiones de rotura tienen que superar los 2'5 N/mm²
- Resistencia a la compresión superior a 80 N/mm²
- Resistencia a la tracción superior a 30 N/mm²
- Resistencia a la flexión superior a 40 N/mm²
- Resistencia a cizallamiento superior a 7'5 N/mm²

La rigidez del adhesivo tiene que ser suficiente como para transmitir por adherencia los esfuerzos entre el material de refuerzo y soporte de hormigón a lo largo de la vida útil de la viga. El módulo de elasticidad tangente tiene que ser el más próximo posible al de los materiales de la unión.

En relación a las sollicitaciones térmicas, tiene que asegurarse un trabajo solidario del adhesivo con el hormigón y los materiales de refuerzo, para una magnitud de temperaturas comprendidas entre - 20° C y 60° C, dependiendo, además, de las condiciones efectivas de servicio normal o excepcional, independientemente de la cinética de las variaciones térmicas, como el caso de un choque térmico.

El adhesivo debe ser resistente al ataque químico de los componentes del ambiente en el que se desarrolla el refuerzo, tiene que ser inerte respecto a los soportes del refuerzo y el hormigón. La evaluación de las posibles degradaciones por acciones químicas puede ser relacionada con su capacidad de absorción de agua.

El inconveniente que tiene este sistema de adhesión es la rotura frágil. Se produce la fractura repentinamente, con poca deformación plástica y se propaga espontánea y rápidamente sin un incremento en las tensiones aplicadas.

Una vez entendido el proceso de obtención de las barras, hemos podido conseguir los valores de la resistencia de las barras a través de las tablas que tenemos disponibles en la tesis de Víctor Calvet ¹⁸ y de las tablas ACI ¹⁹.

¹⁸ Tesis Doctoral sobre " Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

La tabla de la ACI se ha adaptado al sistema utilizado en los apuntes de clase para mayor facilidad en el proceso de cálculo.

Capacidad mecánica BARRAS DE FIBRA DE CARBONO a TRACCIÓN		Número de barras									
Diámetro	Resistencia (Mpa) Vmedio.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	1450	72,9	146	219	291,6	365	437,4	510,3	583	656	729
10	1310	102,9	206	309	411,6	515	617,4	720,3	823	926	1029
12	1170	132,3	265	397	529,2	662	793,8	926,1	1058	1191	1323
16	1100	221,2	442	664	884,8	1106	1327	1548,4	1770	1991	2212
20	1100	345,6	691	1037	1382	1728	2074	2419,2	2765	3110	3456

Imagen 3.7. Tabla adaptada de la capacidad mecánica de las Barras de Fibra de Carbono.

3.3.- GFRP. Glass Fiber Reinforced Polymer.

Las propiedades mecánicas de los GFRP varían considerablemente de un producto a otro, ya que factores tales como el volumen, el tipo de fibra, el tipo de resina, la orientación de las fibras, el control de calidad durante el proceso de fabricación, etc., desempeñan un papel importante en las características del producto. Las propiedades mecánicas de los GFRP se ven afectadas por el tipo de la carga aplicada y su duración, la temperatura y la humedad. Dependiendo de estos factores se consigue un redondo con una fluencia mayor o menor y control de la misma, respecto al tipo de carga que se desea. Se detallan a continuación las principales propiedades de los redondos de GFRP, tanto físicas como mecánicas.

Peso

El peso específico del redondo de GFRP es aproximadamente la cuarta parte del redondo de acero, dependiendo del porcentaje de fibra y de carga que contenga, variando entre el 1.65 y 2.1 kg/dm³, facilitando su transporte y puesta en obra.

Conductividad y dilatación térmica

El redondo de GFRP tiene excelentes propiedades aislantes del campo eléctrico y permeables del campo magnético, por lo que se puede utilizar en aplicaciones de ingeniería u obra civil donde se requiera de cierto nivel de aislamiento eléctrico o transparencia magnética. Su coeficiente de dilatación térmica es muy similar al coeficiente del acero, siendo su comportamiento en estructuras de hormigón parecido al de las estructuras de hormigón armado convencional. El coeficiente de expansión térmica longitudinal depende de las propiedades de la fibra, mientras que el transversal está dominado por las de la resina. Los valores típicos de dicho coeficiente en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, de las barras de FRP, con un contenido de fibras entre el 50% y 70%, se presentan en la Tabla 4 (CNR-DT 203-2006)²⁰.

¹⁹ ACI 440.6M-08. "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement". ACI Standard. Reported by ACI Committee 440. Tabla 8.1.

²⁰ Consiglio Nazionale delle Ricerche

Barra	$\alpha_{\text{longitudinal}} (10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	$A_{\text{transversal}} (10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$
AFRP	-6.0/-2.0	60.0/80.0
CFRP	-2.0/0.0	23.0/32.0
GFRP	6.0/10.0	21.0/23.0

Imagen 3.8. Coeficientes de Expansión Térmica, longitudinal y Transversal.

Resistencia a tracción

El redondo de GFRP es un material anisotrópico, presentando una mayor resistencia según el eje longitudinal del mismo. Generalmente, los refuerzos de GFRP tiene una mayor resistencia a tracción que el acero, siendo ésta función del diámetro del redondo, habiéndose obtenido que la resistencia a tracción disminuye conforme aumenta el diámetro, ya que las fibras situadas cerca del centro de la sección transversal no están sometidas a tanta tensión como las fibras que están cerca de la superficie externa, aunque ello depende del tipo de la matriz empleada. Este fenómeno provoca reducciones en la resistencia y rendimiento de los redondos de mayor diámetro.

La resistencia a la tracción típica de un redondo GFRP oscila entre 500 y 1600 MPa con un alargamiento del 1,3% al 2,3% en la ruptura. Las fibras de vidrio son relativamente insensibles a las altas o bajas temperaturas, sin embargo, la resistencia a la tracción del redondo de GFRP se ve afectada por las temperaturas elevadas. Resultados de investigaciones llevadas a cabo demuestran que la pérdida de resistencia a la tracción es aproximadamente del 30%, 45%, 60% y 70% del valor de referencia a tracción para temperaturas de 100, 200, 300 y 400°C, respectivamente.

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del redondo de GFRP, por lo general, es mucho menor que su resistencia a la tracción, siendo aproximadamente del 40% a 60% de ésta última. Al ser mucho más débil a compresión que a tracción, la resistencia a compresión del redondo GFRP no es una preocupación en la mayoría de las aplicaciones, descartando su aportación al elemento estructural y restringiendo su uso como refuerzo a compresión.

Modulo de elasticidad

El redondo GFRP presenta un comportamiento linealmente elástico hasta su rotura. Su módulo de elasticidad es mucho menor que el del acero, aproximadamente es el 20%. El rango de valores del módulo de elasticidad del redondo de GFRP a tracción oscila de 35 a 55 GPa, mientras que el de compresión es inferior al de tracción, aproximadamente entre el 83% y 89% de este último.

Creep (Fluencia)

Las fibras de vidrio tienen una excelente resistencia a la fluencia, sin embargo, esto no es cierto para las resinas, por ello, el volumen y la orientación de las fibras tienen una gran influencia en el comportamiento a fluencia del redondo GFRP. Según datos experimentales para un determinado tipo de redondo de GFRP, se obtuvo que la

deformación adicional causada por la fluencia fuera aproximadamente el 3% de la deformación elástica inicial, debido al empleo de fibras cortadas y no continuas. En la actualidad, adoptando como proceso de fabricación la pultrusión y como refuerzo mechas de fibra continua, la fluencia no existe prácticamente.

Resistencia a Fatiga

Existen pocos estudios que definan el comportamiento a fatiga de los redondos de GFRP, aunque entrando con las cargas que eviten el *creep* o fatiga estática, podemos considerar que la fatiga dinámica es similar, cuando el esfuerzo aplicado no es mayor del 50% de su resistencia a rotura (Pleiman, 1990), y se encuentra actuando en el mismo sentido que la matriz, el comportamiento bajo carga dinámica es óptimo.

De la combinación de todos estos parámetros resulta un material no homogéneo y marcadamente anisótropo, cuyas propiedades se caracterizan experimentalmente mediante ensayos normalizados. Los redondos FRP utilizados como armado del hormigón ofrecen las ventajas y desventajas siguientes comparadas con las del acero (Tabla 1.1 ACI 440.1R-06)²¹.

Ventajas del refuerzo de FRP	Desventajas del refuerzo de FRP
Alta resistencia a la tracción longitudinal (varía según signo y dirección de la carga en relación con la dirección de las fibras).	No plastifica antes de la rotura frágil.
Resistente a la corrosión (independiente del recubrimiento).	Baja resistencia transversal (según signo y dirección de la carga en relación con la dirección de las fibras).
No magnético	Bajo módulo de elasticidad (según tipo de fibra).
Alta resistencia a fatiga	Posible daño de las resinas poliméricas y las fibras bajo exposición a la radiación ultravioleta.
Ligero (1/5-1/4 de la densidad del acero).	Baja durabilidad de las fibras de vidrio en ambientes húmedos.
Baja conductividad térmica y eléctrica.	Baja durabilidad de algunas fibras de vidrio y aramida en medios alcalinos.
	Alto coeficiente de expansión térmica perpendicular de las fibras, en relación con el hormigón.
	Susceptible al fuego, dependiendo del tipo de matriz y del espesor del recubrimiento del hormigón.

Imagen 3.9. Ventajas y desventajas de los refuerzos de FRP.

²¹ ACI 440.1R-06, tabla 1.1.

Por último, solo cabe adjuntar las tablas de resistencia empleadas, en este caso para el caso de barras GFRP. Éstas han sido extraídas de la Tesis de Ana Almerich²², ya que en ella se ha ensayado con muchas tipologías diferentes y se ha generado a partir de ahí una síntesis general.

Capacidad mecánica GFRP a TRACCIÓN		Número de barras									
Diámetro	Resistencia (Mpa) Vmedio.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	855,8	43,0	86	129	172	215	258	301	344	387	430
10	779,1	61,2	122	184	244,8	306	367,2	428,4	490	551	612
12	637,9	72,1	144	216	288,4	361	432,6	504,7	577	649	721
16	695,5	139,8	280	419	559,2	699	838,8	978,6	1118	1258	1398
20	723,7	227,4	455	682	909,6	1137	1364	1591,8	1819	2047	2274
25	722,8	354,8	710	1064	1419	1774	2129	2483,6	2838	3193	3548
32	720,1	579,1	1158	1737	2316	2896	3475	4053,7	4633	5212	5791

Imagen 3.10. Tabla capacidades mecánicas barras GFRP a TRACCIÓN.

Capacidad mecánica GFRP a COMPRESIÓN		Número de barras									
Diámetro	Resistencia (Mpa) Vmedio.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	463,5	23,3	46,6	69,9	93,2	117	139,8	163,1	186	210	233
10	449,5	35,3	70,6	106	141,2	177	211,8	247,1	282	318	353
12	469,7	53,1	106	159	212,4	266	318,6	371,7	425	478	531
16	449,1	90,3	181	271	361,2	452	541,8	632,1	722	813	903
20	443,6	139,4	279	418	557,6	697	836,4	975,8	1115	1255	1394
25	371,9	182,6	365	548	730,4	913	1096	1278,2	1461	1643	1826
32	319,2	256,7	513	770	1027	1284	1540	1796,9	2054	2310	2567

Imagen 3.11. Tabla capacidades barras GFRP a COMPRESIÓN.

²² Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr, Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010. (página 87, tabla 36).

4.- DISEÑO Y CÁLCULO CON LOS NUEVOS MATERIALES

En este capítulo se detalla el proceso y explicación de los cálculos empleados para poder determinar el armado en cada una de las tipologías de materiales nuevos anteriormente detallados. El hecho de que sean materiales todavía en fase de diseño y experimentación nos llevan a que debemos de tomar supuestos en muchos casos y adaptar normativas de diferentes países para poder alcanzar conclusiones lógicas.

Aunque el análisis a flexión y cortante del armado de FRP se basa, en muchos de los supuestos utilizados, en el análisis convencional con acero, las significantes diferencias existentes entre las propiedades de los materiales y su comportamiento mecánico exigen un alejamiento de los métodos convencionales del diseño del hormigón.

En particular, la mayoría de los compuestos FRP presentan una relación elástica-lineal entre la tensión y la deformación hasta rotura, lo que implica que los sistemas empleados para diseñar hormigón armado con este tipo de refuerzo deben tener en cuenta la falta de ductilidad que presenta el material, a diferencia del hormigón armado con acero.

Actualmente, el hormigón armado con redondos FRP se diseña utilizando los principios de los Estados Límites Últimos, garantizando una resistencia suficiente (mediante un diseño con coeficientes de seguridad que afectan a la carga y a la resistencia del material), determinando el modo de fallo y verificando una adherencia adecuada entre los materiales.

Así mismo, los Estados Límites de Servicio, como son las deformaciones y las fisuras, la resistencia a la fatiga o a cargas de larga duración, o las pérdidas de relajación (para el hormigón pretensado) también deberían de ser comprobados²³.

4.1.- Flexión

El comportamiento a flexión del hormigón armado con FRP es lo más ensayado y estudiado, con principios básicos aplicados independientemente de la configuración del elemento, de la geometría del refuerzo o del tipo de material (carbón, vidrio o basalto). Existen dos modos de fallo a flexión posibles en un elemento de hormigón armado con FRP. Las secciones con cantidades pequeñas de armado fallan por la ruptura a tracción del redondo de FRP, mientras que las que tienen grandes cantidades, colapsan antes por el aplastamiento de la cabeza de compresión del hormigón, sin que la armadura a tracción haya alcanzado su tensión de rotura²⁴.

²³ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr, Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

²⁴ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr, Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

En nuestro caso de estudio, para el caso de flexión se ha optado por continuar con el mismo sistema que si se tratara de piezas de hormigón armado con barras de acero. Mediante los ábacos de Jiménez Montoya²⁵ explicados en clase se podría deducir el armado necesario tanto para pilares como para vigas, según su trabajo sea a flexión como a flexocompresión.

4.2.- Deformación y fisuras.

Ante una misma capacidad resistente de la armadura utilizada en una viga, ya sea de fibra compuesta por polímeros como de acero, las deformaciones y los anchos de las fisuras son normalmente más grandes en vigas y losas de hormigón armado con FRP, si son de vidrio o aramida, que en elementos con armadura convencional, debido al menor módulo de elasticidad de dichos FRP. De tal forma que los límites de las deformaciones o del ancho de fisura son los que con frecuencia controlan el diseño y suelen ser satisfechos utilizando secciones sobredimensionadas.

Las ecuaciones que definen las deformaciones en el hormigón armado con acero, generalmente desprecian las deformaciones iniciales, aumentando éstas según se acerca el estado de carga último. Para el armado con FRP, este tipo de comportamiento se correlaciona con los patrones de fisuras observados a bajos niveles de carga, siendo similares a los de las secciones armadas con acero, pero conforme se aumenta la carga más allá del punto de servicio, la separación entre fisuras disminuye y aumenta el ancho de las mismas en relación a lo que ocurre con las armadas con acero. En la normativa ACI 440.1R del 2006 se detallan las expresiones para el cálculo de estos valores, pero no han sido empleados en este estudio.

La retracción y el comportamiento a cargas de larga duración son similares al de los elementos armados con acero. Las ecuaciones de las deformaciones a largo plazo que presenta el código de diseño del Instituto del hormigón americano (ACI) para el acero, pueden utilizarse para los elementos armados con FRP, modificándolas para tener en cuenta las diferencias de tensión que existen en la zona comprimida del hormigón y, las características particulares del módulo de elasticidad y adherencia de los redondos de FRP (ACI 440.1R-01), en el cual, la existencia de armadura de FRP en la zona comprimida no reduce las deformaciones a largo plazo.

4.3- Cortante.

La contribución del hormigón a la resistencia a cortante se reduce en vigas con refuerzo longitudinal de FRP debido a que la zona comprimida del hormigón es más pequeña, las fisuras son más anchas y las fuerzas que actúan como pasadores (armado longitudinal) son más pequeñas.

²⁵ Título: Hormigón Armado; Autores: Pedro Jiménez Montoya, Álvaro García Meseguer, Francisco Morán Cabré, Juan Carlos Arroyo Portero, Gustavo Gili, Edición 15ª. Tablas y ábacos.

Tradicionalmente un factor de reducción proporcional a la relación entre los módulos de elasticidad del FRP y el acero, se aplica a las ecuaciones de la contribución del hormigón a cortante en vigas convencionales, a pesar que este enfoque desestima la resistencia a cortante de elementos a flexión con grandes cantidades de armadura longitudinal de FRP.

Las losas armadas con FRP fallan, como es lógico, por las líneas de rotura al igual que las armadas con acero. Deformaciones y anchos de fisura grandes proporcionan una adecuada advertencia del fallo próximo. El factor de reducción dado por la relación entre los módulos de elasticidad del FRP y el acero ha servido para estimar la resistencia a cortante en losas ensayadas, aconsejando tomar un factor de valor 3. Y como en todas las losas, es conveniente determinar el cortante debido al punzonamiento en el caso de apoyos puntuales. En nuestro caso, no hay losas, se trabaja con una estructura porticada.

En vigas con cercos de FRP, el fallo por cortante ocurre o por ruptura del cerco de FRP en los puntos de curvatura de los mismos o por un fallo de combinación de esfuerzos de compresión y cortante en la viga. El fallo por concentración de tensiones en los puntos de doblado de los estribos puede limitar la capacidad efectiva a tan solo el 35% de la resistencia longitudinal de las fibras.

En nuestro estudio, debido a la dificultad de encontrar redondos que se puedan doblar (uno de los puntos negativos de estos nuevos materiales), se ha optado por recurrir a piezas o perfiles en L como armadura en los cercos. Aunque sí que se pueden demandar a varias compañías armaduras dobladas, el coste es muy alto. Se han solicitado presupuestos a empresas como Nioglas, pero todavía no se han podido conseguir. Por tanto, y como recomendación de Victor Calvet Rodríguez, autor de la Tesis sobre adherencia de este tipo de barras²⁶, se ha optado por rastrear el mercado en busca de esta tipología de piezas. Aunque es muy fácil encontrar piezas metálicas que cumplan este requisito de poder funcionar como cercos, se ha optado por tratar de localizar aquellas que permitan continuar utilizando estos materiales novedosos en la armadura.

Tras contactar con varias empresas, la casa comercial Sika nos ha dado a conocer uno de los productos que tiene en su línea de CarboShear. Esta empresa tiene patentado un sistema de perfiles en L angulares a base de fibra de carbono que pueden cumplir la función de cercos que nosotros estamos buscando.

Se trata de angulares de fibra de carbono resistentes a la corrosión y que tienen la función de reforzar estructuras a cortante. En un principio, están diseñados para

²⁶ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

adherirse a las piezas exteriormente, especialmente en el caso de reparaciones, pero nuestras suposiciones lo tomarán como cercos. En el Anexo Gráfico 5 se adjuntan las tablas facilitadas por la empresa.

Una vez entendido el funcionamiento del sistema, a continuación se adjunta la ideación de cómo resultaría esta pieza.



Imagen 4.1. Recreación tridimensional de las piezas empleadas como cercos.

Estas piezas ahora precisarían de conocer su resistencia para el esfuerzo de cortante. En el caso de las barras de acero poseíamos Tablas ya que los redondos utilizados eran entre 6 y 10 mm y por recomendación eran los utilizados. En nuestro caso tomamos una de las piezas y calculamos su resistencia y nos generamos nuestra propia tabla para trabajar de manera más cómoda.

El primer paso será calcular la resistencia de una de las placas del perfil, la que soportaría el esfuerzo a cortante. Partiendo que la pieza tiene el ala de 430 mm de longitud, 40 mm de ancho y un espesor de 2 mm²⁷ podemos calcular la inercia.

$$^{(1)} I = (b \cdot h^3) / 12 = (40 \cdot 2^3) / 12 = 26.67 \text{ mm}^4$$

Si tomamos que la resistencia de las piezas de carbono a tracción medio es de 1350 MPa y el área de la pletina es de $2 \cdot 40 = 80 \text{ mm}^2$, podemos obtener su resistencia como si de una barra de acero se tratara.

$$^{(2)} R = 80 \cdot 1350 \cdot 10^{-3} = 108 \text{ MPa}$$

A partir de aquí ya podemos conocer los valores que emplearemos para la resistencia de las piezas de cercos.

Como ejemplo, si tuviéramos una sección de viga que presenta dos cercos de atado, tendríamos 4 alas de los perfiles soportando el cortante. Su cálculo sería tan sencillo como multiplicar por 4 el valor antes obtenido.

$$^{(3)} 4 \cdot 108 = 432 \text{ MPa.}$$

²⁷ Valores obtenidos de la casa comercial Sika y sus hojas de producto L_CarboShear, adjuntas en el Anexo Gráfico 4

Podemos ver que esta resistencia está bastante por encima de lo que nos podría ofrecer una barra del $\varnothing 6$, que sería de 39.3 MPa. Esto nos da a entender que el cortante, siguiendo las fórmulas empleadas en el aula no nos generará excesivos problemas.

4.4.- Adherencia y longitud de anclaje de refuerzo

Los diferentes acabados superficiales de las armaduras de FRP existentes hacen que las características de adherencia sean bastante variables. La tendencia siempre ha sido a que la tensión de adherencia sea similar a la de las armaduras de acero corrugado, aunque en algunos casos algunos productos presentan una menor fuerza de adherencia. La tensión de adherencia es en gran medida independiente de la resistencia del FRP, siendo distintas para barras lisas con recubrimientos de arena o fibras trenzadas, siempre y cuando exista un recubrimiento adecuado para evitar grietas longitudinales. Las barras con envolturas helicoidales o moldeadas en su superficie, presentan puntos de anclaje, dando lugar a un buen comportamiento a adherencia.

En el trabajo realizado se ha tomado en consideración que se utilizan barras corrugadas (geométricamente similares a las de acero). En la publicación realizada por los profesores del departamento de Construcciones Arquitectónicas (CSA) de la ETSAV²⁸, se hace un recorrido por los diferentes sistemas de acabado para lograr un anclaje correcto. En este trabajo como se sale del alcance de nuestras manos, se ha supuesto directamente un sistema de barras corrugadas.

Los valores que nosotros emplearemos son un supuesto tras la síntesis de varias normativas y como conclusión, tras repasar detenidamente la tesis del profesor Víctor Calvet Rodríguez²⁹.

La normativa existente es bastante limitada y posee grandes diferencias, a continuación se determinará el cálculo a través de tres fórmulas diferentes según las normativas.

La primera en emplearse será la Norma Americana, ACI 440.1R-06³⁰:

$$(4) \quad l_d = \frac{\frac{\alpha \cdot f_{fr}}{0.0083 \sqrt{f_{rc}}} - 340}{13.6 + \frac{c}{db}} \text{ db (SI)}$$

²⁸ Publicación "Influence of moderate temperatures on the bond between carbon fibre reinforced polymer bars (CFRP) and concrete", cuyos autores: V. Calvet, M. Valcuende, J. Benlloch, J. Cánocves, CSA, ETSAV, UPV. Publicado en "Construction and Building Materials", 94(2015) 589-604.

²⁹ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

³⁰ ACI 440.1R-06, Chapter 13, Anexo formulario.

Una vez con esta fórmula, deberemos conocer cada uno de los valores indicados, todos ellos, adjuntos en el Anexo 13 de este mismo capítulo.

$$(5) \quad ffr; ffr = (\sqrt{A + B} - C$$

$$(6) \quad A = (Ef \cdot \varepsilon_{cu})^2 / 4$$

Donde E_f es el módulo de elasticidad y ε_{cu} es 0.003

$$(7) \quad B = \frac{0.85 \cdot \beta_1 \cdot f_c}{\rho_f} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{cu}$$

Donde β_1 es constante y corresponde a 0.85, f_c es la resistencia del hormigón mayorada, (ejemplo: $35/1.5 = 23.33$), y ρ_f es la cuantía de armadura, que corresponde a $\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$

$$(8) \quad C = 0.5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}$$

Con estos valores podremos pasar a calcular las longitudes de anclaje según la normativa americana. Esta ecuación presenta cierta complejidad ya que es bastante larga y tiene varias variables.

Tanto en la normativa japonesa³¹ como en la Tesis del profesor Víctor Calvet³² y en el Trabajo Final de Máster de Paula Vallés³³ se emplea una formulación más sencilla, que es:

$$(9) \quad ld = \alpha \cdot \frac{f_d}{4 f_{bod}} \cdot \varnothing$$

Donde \varnothing es el diámetro de la barra, f_d es la tensión de la barra y f_{bod} se corresponde a:

$$(10) \quad f_{bod} = 0.28 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c}$$

Además, f_{bod} debe ser siempre menor a 3.2 N/mm^2

Además, α_2 corresponde al factor modificador de la tensión, y corresponde a 1

El factor α_1 corresponde al factor modificador que depende de la constante K_c . Su fórmula es:

³¹ JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures for fiber reinforcing materials, chapter 10.5.3.

³² Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

³³ Trabajo Final de Máster sobre "Características físicas y mecánicas de Hormigones reforzados con Fibras de: Vidrio, carbono y aramida", la autora: Victoria Águila Higuero; y el tutor: Ildefonso Lucea Martínez, publicado en Madrid, junio de 2010.

$$^{(11)} Kc = \frac{c}{\varnothing} + \frac{15At}{s\varnothing} \cdot \frac{Et}{E0}$$

De aquí tenemos que c es el recubrimiento, At , el área de armadura transversal, s la separación entre estribos, y las E son los módulos de refuerzo y Young respectivamente. Según el resultado de esta constante K , el factor αl variará según:

Si $Kc < 1$; $\alpha l = 1$

Si $1 < Kc < 1.5$; $\alpha l = 0.9$

Si $1.5 < Kc < 2$; $\alpha l = 0.8$

Si $2 < Kc < 2.5$; $\alpha l = 0.7$

Si $2.5 < Kc$; $\alpha l = 0.6$

Por último cabe reseñar que existe una simplificación en la normativa italiana³⁴:

$$^{(12)} ld = 0.1 \cdot \sigma_f \cdot db$$

Esta simplificación es bastante poco precisa tras haber realizado operaciones de comprobación, por tanto, para los cálculos finales, nos serviremos de la formulación de la normativa japonesa³⁵.

Estos cálculos serán los que emplearemos para calcular longitudes de empalme en centros de vano y encuentros interiores. En el caso de las longitudes de anclaje lo analizaremos en el apartado siguiente.

4.4.1.- Longitud de anclaje.

Como se ha visto en el apartado anterior, las diferentes normativas nos pueden facilitar valores que marquen estas longitudes de anclaje, pero nos enfrentamos a uno de los defectos de este tipo de barras conformadas con resinas poliméricas. El doblado es imposible realizarlo en la propia obra.

Existe la posibilidad de trabajar con barras dobladas que habría que solicitar a la empresa de manera expresa y tener en cuenta todo el ferrallado antes de iniciar el proyecto. La empresa Nioglas, asentada en la provincia de Barcelona, permite que se soliciten este tipo de elementos y piezas. Tras solicitar en repetidas ocasiones un presupuesto, ha sido imposible obtenerlo, pero se reconoce que serán piezas considerablemente más caras que en recto, por tanto esta posibilidad queda excluida debido a que el PEM (proyecto de ejecución material), aumentaría considerablemente.

³⁴ Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Structure di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato, publicado en Roma CNR 18 Giugno 2007.

³⁵ JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures" for fiber reinforcing materials, chapter 10.5.3.

Tras comentarlo con otros profesores de la escuela³⁶, se presenta la posibilidad de utilizar sistemas que fijen y anclen la pieza, tales como barras en posición transversal que conformen un peine o discos de permitan fijar y mantener las barras en la posición, tal y como se muestra en las siguientes figuras:

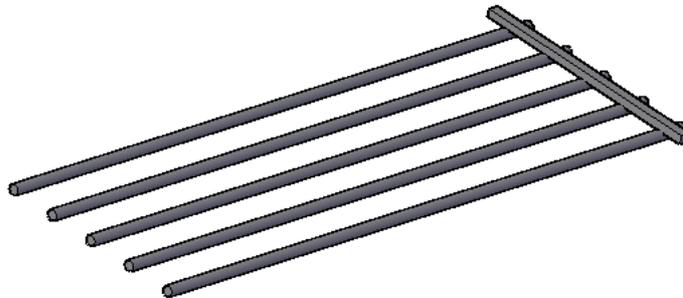


Imagen 4.2. Posibilidad de anclaje 1, perfil transversal.

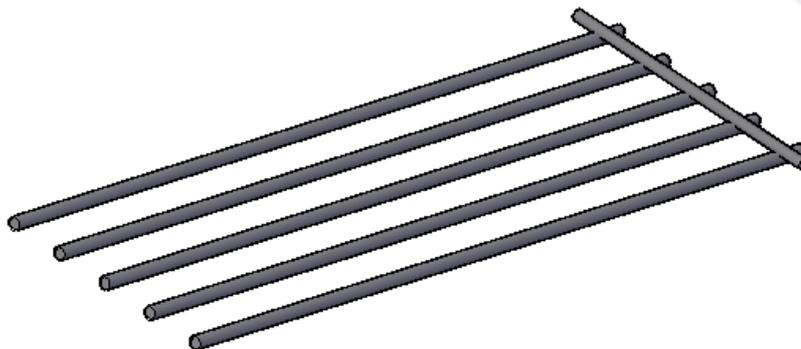


Imagen 4.3. Posibilidad de anclaje 2, barra transversal.

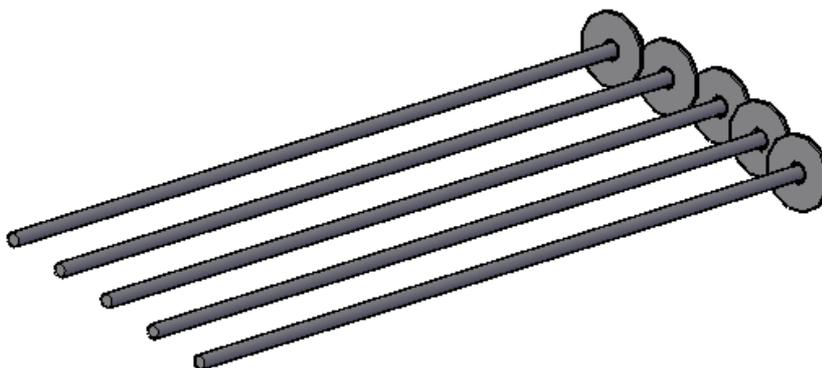


Imagen 4.4. Posibilidad de anclaje 3, discos de anclaje.

Estas tres posibilidades planteadas en tutorías y cuestiones a otros profesores nos llevan a plantearnos que podrían ser, y además, se podrían conformar con materiales como carbono, para mantener esa uniformidad en la materialidad buscada. El inconveniente que estas piezas presentan es la poca efectividad que puede llegar a tener.

³⁶ ETSAV Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia

Se ha comentado que las barras FRP requieren de unas longitudes de anclaje muy superiores a las barras de acero comúnmente usadas. Esto se debe a que la resina, en caso de ligeros aumentos de temperatura puede afectar, y además, frente a tensiones de tracción, que son las que se darían en el caso, la barra se desgarraría con muchísima facilidad. Esto es debido a su composición, ya que sería la resina la que no soportaría tal esfuerzo.

Por tanto, podemos considerar que esta opción no es la más apropiada para hacer frente a los encuentros en las jácenas extremas.

Otro de los sistemas que nos podrían valer es el comentado por el tutor, Manuel Valcuende en una de las tutorías del trabajo. Sería el hecho de emplear el sistema Goujon-Cret.

Este novedoso sistema está basado en los pasadores normales. La hipótesis consistiría en plantear el encuentro de la jácena extrema como una articulación. Normalmente siempre consideramos que los nudos de nuestra estructura son empotramientos perfectos, pero si nos planteáramos la condición de que sean articulaciones, la situación cambiaría.

Este encuentro por tanto, se materializaría como:

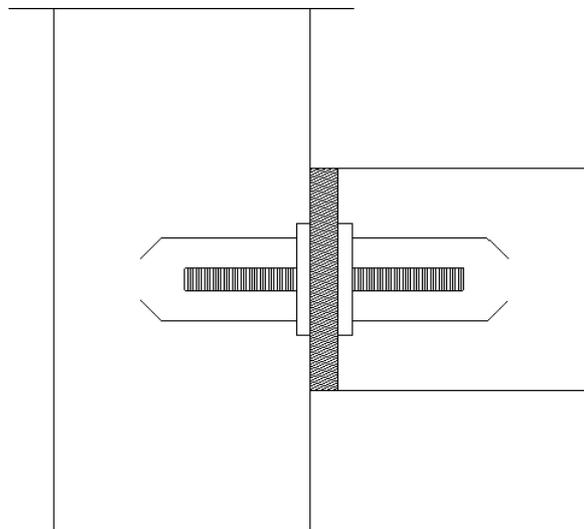


Imagen 4.5. Anclaje del tipo Goujon-cret.

Como vemos, este anclaje³⁷ se compone en el encuentro de viga y pilar por un material elastómero, como podría ser una junta de neopreno, y una barra de anclaje en recto. De este modo evitaríamos doblar barras, pero romperíamos el esquema estructural de nudos empotrados que planteábamos a favor de considerarlo articulación.

³⁷ Encuentro basado en los esquemas de la web de la empresa edingaps : <http://www.edingaps.com/productos/goujon-cret>

Otra de las alternativas sería terminar las piezas extremas en voladizo siempre para de esta forma intentar llegar a tener terminaciones rectas. Esta hipótesis, bastante simplificada podría llegar a ser muy problemática porque podría desencadenar en voladizos muy variables. Además, en cuanto al diseño, como arquitectos nos veríamos muy condicionados. Sería óptima en caso de edificación aislada y en edificios entre medianeras podría generar muchos problemas de diseño. Esta hipótesis la planteábamos como última alternativa, pero se descartó rápidamente.

Una vez teníamos este abanico de posibilidades, encontramos una nueva alternativa que habíamos tenido todo el tiempo delante nuestra.

A través de la web de la empresa Plaka Spain³⁸, asentada en Barcelona, encontramos una posibilidad de atado de las piezas con manguitos y atornillados para conseguir el atado de anclaje en extremos y mantener en consideración el nudo como empotramiento perfecto.

Este sistema basaba su funcionamiento en un anclaje de una pieza especial a la barra por atornillado y un tope para fijación, como se ve en la imagen³⁹:



Imagen 4.6. Anclaje patentado por PlakaSpain.

Se podría considerar que este anclaje es similar al primero que se planteó, y que podría dar los mismos problemas de rasgadura que comentamos anteriormente. Ciertamente podríamos entenderlo así.

En cambio, junto con el tutor se analizó el sistema que se utilizó para ensayar barras en trabajos previamente realizados, como la Tesis del profesor Víctor Calvet⁴⁰ o la publicación antes mencionada del tutor Manuel Valcuende entre otros⁴¹.

³⁸ <https://www.plakagroup.com/es-ES/PLAKA-Spain/Empresa/PLAKA-Spain/>

³⁹ Dossier adjuntado con otra información, facilitado por PlakaSpain. En el Anexo gráfico 5 se adjunta toda la documentación que la empresa facilitó.

⁴⁰ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

⁴¹ Publicación "Influence of moderate temperatures on the bond between carbón fibre reinforced polymer bars (CFRP) and concrete", cuyos autores: V. Calvet, M. Valcuende, J. Benlloch, J. Cánocves, CSA, ETSAV, UPV. Publicado en "Construction and Building Materials", 94(2015) 589-604.

Este sistema que se utilizó fue muy similar a este pero sin el tope, y en vez de anclar mediante atornillado, se procedió a anclar con una resina. Este proceso se realizó para poder hacer los ensayos como el de tracción. De este modo las mordazas de la maquinaria del laboratorio no podrían dañar la barra ya que la fuerza que generaban se repartía en un tramo de barra y no en un único punto.

De este modo, esquemáticamente, para este trabajo se ha considerado una solución mixta de estos dos casos, el tubo con resina metálico y el tope para evitar deslizamientos. El material de esta pieza sería de acero. Rompemos nuestro objetivo de no utilizar acero, pero debido a que solo serán encuentros puntuales en vanos extremos, planteamos como solución que podría ser de acero inoxidable. Pese a ser bastante más caro que el acero normal, evitamos tener luego problemas con la oxidación. El esquema que resultaría sería el siguiente⁴².

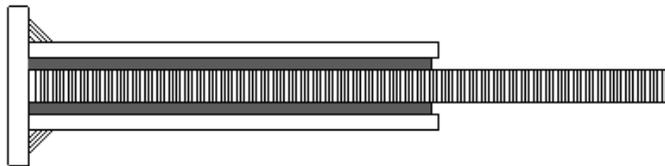


Imagen 4.7. Anclaje tipo con pieza soldada y resina.

Este anclaje consistiría en alargarlo aproximadamente entre 40 y 50 cm desde el extremo para poder tomar en consideración que el anclaje es factible.

A través de este proceso hemos completado un abanico de posibilidades bastante completo. Cabe destacar que ninguno es mejor o peor que el otro, sino que hemos perseguido el plantear varias soluciones a un mismo problema.

En nuestro caso, y a favor de simplificar cálculos, consideraremos esta última opción como la que se utilizará en el proyecto.

Nos habría gustado plantear la posibilidad del doblado de barras también pero la empresa Nioglas no pudo contactar con nosotros por tanto, no consideramos la opción.

4.5.- Guías, códigos y especificaciones de cálculo y diseño publicadas

El uso de estas nuevas barras con materiales todavía en fase de experimentación nos hace plantearnos si haría falta una normativa que recogiera, aglutinara y completara las hipótesis planteadas tanto en este trabajo como en Tesis y trabajos anteriores⁴³.

⁴² Esquema realizado en las tutorías con el tutor, basado en la experiencia y en ensayos y conocimientos previos.

⁴³ Referencias antes mencioandas.

La evolución que ha seguido el desarrollo de esta industria nos ha llevado a generar en diferentes países diferentes normas, las cuales se han intentado respetar en estos cálculos. Entre los que cabe destacar y que se han recogido en la Tesis de la profesora Ana Almerich⁴⁴ son:

EEUU.

·ACI 440R-07 (2007) "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

·ACI 440.1R-06 (2006) "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

·ACI 440.5-08 (2008) "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bar," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

·ACI 440.6-08 (2008) "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

·ACI 440.3R-04 (2004) "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

CANADA.

·CAN/CSA-S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002), 187p.

·CAN/CSA-S6-06 "Canadian Highway Bridge Design Code" Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (December 2006), 800p.

·The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures Design Manual No. 3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers"

·Design Manual No. 4, "FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures"

·Design Manual No. 5, "Prestressing Concrete Structures with FRPs"

·Design Guide, "Specifications for FRP Product Certification"

·Design Guide, "Durability Monograph"

JAPON.

·Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials," Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 325 p.

⁴⁴ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr. Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

ITALIA

·CNR-DT 203/2006 - "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars."

EUROPA

·FIP Task Group 9.3 "FRP Reinforcement for Concrete Structures" (1999)
· Report# TF 22 A 98741 "Eurocrete Modifications to NS3473 When Using FRP Reinforcement", Norway (1998)

Por tanto, con todo este repaso y conocimiento de los materiales que emplearemos, ya estamos en disposición de lanzarnos a calcular uno de los pórticos del edificio que presentamos en el apartado 2. En nuestro caso, igual que en la práctica de curso de CT3, nos basaremos en el análisis del pórtico número 3.

5- CÁLCULOS

Para el cálculo, seguiremos los ejemplos que hemos ido viendo en clase. Comenzaremos con el cálculo de los soportes e iremos avanzando hasta conseguir definir totalmente el pórtico para posteriormente compararlo con el que ya habíamos dimensionado en la práctica de curso con hormigón armado con barras de acero.

A continuación se muestra esquemáticamente y extraído de Architrave, el pórtico a estudiar:

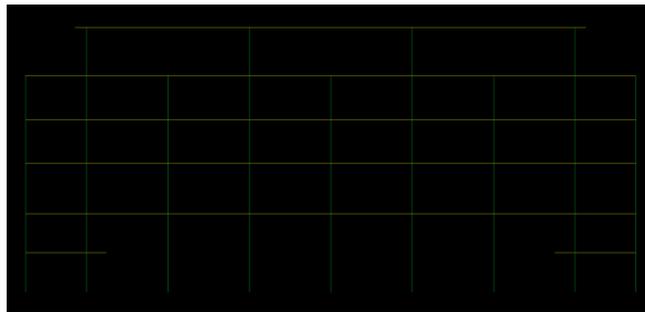


Imagen 5.1. Esquema del pórtico 3 a analizar.

Además, debido a que el pórtico es totalmente simétrico en cargas y geometría, analizaremos la mitad izquierda y luego en el dibujo lo remarcaremos como que para la otra mitad también valdría perfectamente.

5.2.- Soportes

Con las tablas de las capacidades mecánicas que hemos obtenido en el análisis de los materiales previamente realizados, realizaremos el estudio del armado correspondiente.

Para ello, seguiremos el ejemplo realizado en clase. Se trataría del ejercicio de Estados Límites Últimos, el apartado de dimensionamiento a Flexocompresión (ELU de tensiones normales)⁴⁵.

⁴⁵ Apuntes de clase CT3, ejercicios prácticos, autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV.

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	E,cal	v	μ	$\dot{\omega}$,tot	U_s ,tot	U_s ,cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U_s ,cara	Armado(por cara)	Áreas
cabeza	400	823,47	540,62	0,6565145	0,196064	0,2574381	0,38	1596	798	41,1735	2100	240	798	4Ø20	1256,6
Planta cuarta	500														
base	500	859,92	328,53	0,3820518	0,204743	0,1564448	0,17	714	357	42,996	2100	240	798	4Ø20	1256,6
cabeza	400	1611,61	183,9	0,1141095	0,383717	0,0875714	0,05	210	105	80,5805	2100	240	357	2Ø16+2Ø11	628,3
Planta tercera	500														
base	500	1648,1	228,82	0,1388387	0,392405	0,1089619	0,05	210	105	82,405	2100	240	240	4Ø12	452,38
cabeza	400	2393,49	222,77	0,0930729	0,569879	0,1060805	0,05	210	105	119,675	2100	240	240	4Ø12	452,38
Planta segunda	500														
base	500	2435,34	226,99	0,0932083	0,579843	0,1080924	0,05	210	105	121,767	2100	240	240	4Ø12	452,38
cabeza	400	3140,37	215,76	0,068705	0,747707	0,1027424	0,05	210	105	157,019	2100	240	240	4Ø12	452,38
Planta primera	500														
base	500	3172,94	154,46	0,0486788	0,755462	0,07355	0,05	210	105	158,647	2100	240	240	4Ø12	452,38
cabeza	400	3448,5	114,9	0,033318	0,821071	0,0547129	0,05	210	105	172,425	2100	240	240	4Ø12	452,38
Planta baja	500														
base	500	3481,1	75,393	0,25	0,828833	0,0359014	0,05	210	105	174,055	2100	240	240	4Ø12	452,38

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st,min}	Nd	V _d	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu+V_{su}}	OK
					σ_{cd}	K	V _{u1}	(*)	(**)	V _{cu}	V _{su}		
cabeza	400	4L	823,47	160,96	-0,06365	1	1171,8	88,3985	114,874	203,273	602,64	805,912583	OK
Planta cuarta	500												
base	500	432	859,92	160,96	2,1796	1,1037905	1293,42	70,162	119,959	190,121	300	792,76079	OK
cabeza	400		1611,6	75,502	5,93805	1,2827643	1503,14	70,162	224,82	294,982	300	897,621545	OK
Planta tercera	500												
base	500	432	1648,1	75,502	6,7975	1,25	1464,75	62,8848	229,91	292,795	300	895,434769	OK
cabeza	400		2393,5	72,542	10,52445	1,25	1464,75	62,8848	333,892	396,777	300	999,416674	OK
Planta segunda	500												
base	500	432	2435,3	72,542	10,7337	1,25	1464,75	62,8848	339,73	402,615	300	1005,25475	OK
cabeza	400		3140,4	76,73	14,25885	0,8025179	940,39	62,8848	438,082	500,966	300	1103,60643	OK
Planta primera	500												
base	500	432	3172,9	76,73	14,4217	0,783131	917,673	62,8848	442,625	505,51	300	1108,14995	OK
cabeza	400		3448,5	39,4	14,98062	0,7165929	839,704	62,8848	481,066	543,951	300	1146,59057	OK
Planta baja	500												
base	500	432	3481,1	39,4	15,9625	0,5997024	702,731	62,8848	485,613	548,498	300	1151,13827	OK

Imagen 5.2. Cuadro soporte extremo izquierda con GFRP.

En las tablas anteriores se ha podido comprobar el armado de cada uno de los tramos y su comprobación a cortante. A continuación se detalla el proceso en esta ocasión, aunque posteriormente ya no se adjuntarán, por simplificar, se añadirán simplemente las tablas y pequeñas explicaciones en el caso de hacer falta.

En la primera tabla, para el armado a Flexocompresión, se procedió sacando primero las sollicitaciones del programa Architrave, y una vez las teníamos, mediante los ábacos⁴⁶, se sacó tanto el axil relativo como el momento relativo.

En este caso, el ábaco que se utilizó por geometría, fue el ábaco adimensional de $d' = 0.05h$.

De esta forma obteníamos la capacidad mecánica necesaria y como trabajamos con armadura igual en dos caras, simplemente la debíamos dividir entre dos para obtener lo que nos hacía falta.

También calculamos las limitaciones que nos marcaba el código. En cuanto a las cuantías geométricas mínimas, tomando que se trata de pilares, consideramos según la Tabla 5⁴⁷, que el mínimo a colocar será un 4 por mil en total, por tanto, un 0.002 de armadura por cara de la sección total de hormigón. Para las limitaciones mecánicas, tenemos una superior y otra inferior. La inferior, al ser un elemento sometido a compresión, el valor a utilizar será de:

$$^{(13)} 0.05Nd < A_s 1 f_{yc}, d < 0.5Ac_{fd}$$

De esta manera ya estamos en disposición de concluir con el armado por cara que sería necesario. Debemos recordar considerar el mínimo que debe haber anclado, y que por tanto la fila del tramo superior también juega en los cálculos que realizamos.

Para el cálculo de las comprobaciones a cortante, se trata de comprobar que con el estribado, podemos cumplir los esfuerzos a los que está sometida la pieza. Como dijimos en apartados anteriores, trabajaremos con perfiles en L, y además, la estructura sufre mucho axil y por tanto, el cortante en pocas ocasiones nos afectará, aún así lo comprobaremos.

El valor de U_{stmin} corresponde a la resistencia de las pletinas que colocamos. En la mayoría de los casos serán cuatro, condicionado por el estribado. Una vez obtenidas las sollicitaciones que se obtienen por Architrave pasamos a realizar las dos comprobaciones necesarias:

-agotamiento por compresión:

⁴⁶ Ábacos del capítulo de ábacos, del libro "Hormigón Armado, autores: Jiménez Montoya, Pedro; García Meseguer, Álvaro; Morán Cabré, Francisco; Arroyo Portero, Juan Carlos. Ed. Gustavo Gili, 15ª Edición.

⁴⁷ Tabla 5 de los apuntes de Clase de CT3, autor autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV. Tema 10, página 28.

$$\sigma_{cd} = \frac{Nd - A_s \cdot f_{yd}}{A_c}$$

· El valor de K dependerá del anterior⁴⁸:

K = 1 para estructuras sin axil de compresión

K = 1 + σ_{cd}/f_{cd} para $0 < \sigma_{cd} < 0.25f_{cd}$

K = 1.25 para $0.25f_{cd} < \sigma_{cd} < 0.5f_{cd}$

K = 2.5 · (1 - σ_{cd}/f_{cd}) para $0.5f_{cd} < \sigma_{cd} < f_{cd}$

$$\cdot Y_{Vu1} = 0.3 \cdot f_{cd} \cdot 0.9 \cdot b \cdot K \cdot d \cdot 10^{-3}$$

Este último valor deberá ser más alto que el cortante solicitación.

- agotamiento por tracción:

$$\cdot (*) = \frac{0.15}{\gamma_c} \cdot 3 \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{1/3} \cdot d \cdot d \cdot \beta \cdot 10^{-3}$$

$$\cdot (**) = \frac{0.15 \cdot Nd}{A_c} \cdot d \cdot d \cdot \beta \cdot 10^{-3}$$

Al sumar estos dos valores tendremos la resistencia de la cabeza de hormigón, y posteriormente solo nos falta calcular la resistencia del estribo, según la distancia entre estribos con la que hayamos trabajado.

Con estos datos, ya estamos en disposición de conformar nuestras tablas de cálculo, y jugando con los valores de las resistencias de cada tipo de barra, obtener el armado según corresponda. En los siguientes apartados se muestran las tablas, recogidas tras repetir estos procesos.

Además, cabe destacar que frente a la problemática de doblar barras, debemos modificar parte de la estructura en este paso.

A partir del segundo eje de pilares, existen soportes circulares, pero como el cercado no lo podemos hacer circular, modificaremos la geometría de los soportes para hacerlos cuadrangulares y así poder encajar perfectamente nuestro nuevo armado, resultando los valores siguientes:

⁴⁸ Apartado 3 de los apuntes de Clase de CT3, autor autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV. Tema 12, página 20.

Limitaciones (por cara)															
b	h	Nd (kN)	Md (kNm)	e, cal	v	μ	$\dot{\omega}$, tot	U _s , tot	U _s , cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _s , cara	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	400	823,47	540,62	0,6565145	0,196064	0,2574381	0,38	1596	798	41,1735	2100	480	798	4Ø16	804,22
Planta cuarta	500														
base		859,92	328,53	0,3820518	0,204743	0,1564448	0,17	714	357	42,996	2100	480		900,7	
cabeza	500	1611,61	183,9	0,1141095	0,383717	0,0875714	0,05	210	105	80,5805	2100	480	480	4Ø12	452,38
Planta tercera	400														
base		1648,1	228,82	0,1388387	0,392405	0,1089619	0,05	210	105	82,405	2100	480			
cabeza	500	2393,49	222,77	0,0930729	0,569879	0,1060805	0,05	210	105	119,675	2100	480	480	4Ø12	452,38
Planta segunda	400														
base		2435,34	226,99	0,0932083	0,579843	0,1080924	0,05	210	105	121,767	2100	480			
cabeza	500	3140,37	215,76	0,068705	0,747707	0,1027424	0,05	210	105	157,019	2100	480	480	4Ø12	452,38
Planta primera	400														
base		3172,94	154,46	0,0486788	0,755462	0,07355	0,05	210	105	158,647	2100	480			
cabeza	500	3448,5	114,9	0,033318	0,821071	0,0547129	0,05	210	105	172,425	2100	480	480	4Ø12	452,38
Planta baja	400														
base		3481,1	75,393	0,25	0,828833	0,0359014	0,05	210	105	174,055	2100	480	480	4Ø12	452,38

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st} , min	Nd	V _d	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu} +V _{su}	OK
					$\bar{\sigma}_{cd}$	K	V _{u1}	V _{cu}	V _{su}	V _{cu}	V _{su}		
cabeza	400	4L	823,47	160,96	-0,38615	1	1171,8	76,1795	114,874	191,054	602,64	793,693598	OK
Planta cuarta	500												
base		432	859,92	160,96	1,6871	1,0803381	1265,94	62,8848	119,959	182,844	602,64	785,483659	OK
cabeza	500		1611,6	75,502	5,44555	1,2593119	1475,66	62,8848	224,82	287,704	602,64	890,344414	OK
Planta tercera	400	4L											
base		432	1648,1	75,502	5,628	1,25	1464,75	62,8848	229,91	292,795	602,64	895,434769	OK
cabeza	500		2393,5	72,542	9,35495	1,25	1464,75	62,8848	333,892	396,777	602,64	999,416674	OK
Planta segunda	400	4L											
base		432	2435,3	72,542	9,5642	1,25	1464,75	62,8848	339,73	402,615	602,64	1005,25475	OK
cabeza	500		3140,4	76,73	13,43997	0,9000036	1054,62	62,8848	438,082	500,966	602,64	1103,60643	OK
Planta primera	400	4L											
base		432	3172,9	76,73	13,2522	0,9223571	1080,82	62,8848	442,625	505,51	602,64	1108,14995	OK
cabeza	500		3448,5	39,4	14,63	0,7583333	888,615	62,8848	481,066	543,951	602,64	1146,59057	OK
Planta baja	400	4L											
base		432	3481,1	39,4	14,793	0,7389286	865,877	62,8848	485,613	548,498	602,64	1151,13827	OK

Imagen 5.3. Cuadro soporte extremo izquierda con BFRP.

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (kN)	Md (kNm)	E _{cal}	v	μ	ω _{tot}	U _{s,tot}	U _{s,cara}	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _{s,cara}	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	400	823,47	540,62	0,6565145	0,196064	0,2574381	0,38	1596	798	41,1735	2100	520	798	4Ø16	884
Planta cuarta	500														
base		859,92	328,53	0,3820518	0,204743	0,1564448	0,17	714	357	42,996	2100	520	798	4Ø16	884
cabeza	400	1611,61	183,9	0,1141095	0,383717	0,0875714	0,05	210	105	80,5805	2100	520	520	4Ø12	529,3
Planta tercera	500														
base		1648,1	228,82	0,1388387	0,392405	0,1089619	0,05	210	105	82,405	2100	520	520	4Ø12	529,3
cabeza	400	2393,49	222,77	0,0930729	0,569879	0,1060805	0,05	210	105	119,675	2100	520	520	4Ø12	529,3
Planta segunda	500														
base		2435,34	226,99	0,0932083	0,579843	0,1080924	0,05	210	105	121,767	2100	520	520	4Ø12	529,3
cabeza	400	3140,37	215,76	0,068705	0,747707	0,1027424	0,05	210	105	157,019	2100	520	520	4Ø12	529,3
Planta primera	500														
base		3172,94	154,46	0,0486788	0,755462	0,07355	0,05	210	105	158,647	2100	520	520	4Ø12	529,3
cabeza	400	3448,5	114,9	0,033318	0,821071	0,0547129	0,05	210	105	172,425	2100	520	520	4Ø12	529,3
Planta baja	500														
base		3481,1	75,393	0,25	0,828833	0,0359014	0,05	210	105	174,055	2100	520	520	4Ø12	529,3

COMPROBACIÓN A CORTANTE

	b	h	U _{st,min}	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción					V _{cu} +V _{su}	
						K	V _{u1}	σ _{cd}	V _{cu}		V _{su}		V _{cu}		V _{su}
									(*)	(**)	St	V _{su}			
cabeza	400	500	4L	823,47	160,96	1	1171,8	-0,30265	76,1795	114,874	191,054	602,64	793,693598	OK	
Planta cuarta	400	500	4L	823,47	160,96	1	1171,8	-0,30265	76,1795	114,874	191,054	602,64	793,693598	OK	
base				859,92	160,96	1,078719	1264,04	1,6531	62,8848	119,959	182,844	300	785,483659	OK	
cabeza	400	500	4L	1611,6	75,502	1,2576929	1473,76	5,41155	62,8848	224,82	287,704	300	890,344414	OK	
Planta tercera	400	500	4L	1611,6	75,502	1,2576929	1473,76	5,41155	62,8848	224,82	287,704	300	890,344414	OK	
base				1648,1	75,502	1,25	1464,75	5,594	62,8848	229,91	292,795	300	895,434769	OK	
cabeza	400	500	4L	2393,5	72,542	1,25	1464,75	9,32095	62,8848	333,892	396,777	300	999,416674	OK	
Planta segunda	400	500	4L	2393,5	72,542	1,25	1464,75	9,32095	62,8848	333,892	396,777	300	999,416674	OK	
base				2435,3	72,542	1,25	1464,75	9,5302	62,8848	339,73	402,615	300	1005,25475	OK	
cabeza	400	500	4L	3140,4	76,73	0,9457917	1108,28	13,05535	62,8848	438,082	500,966	300	1103,60643	OK	
Planta primera	400	500	4L	3140,4	76,73	0,9457917	1108,28	13,05535	62,8848	438,082	500,966	300	1103,60643	OK	
base				3172,9	76,73	0,9264048	1085,56	13,2182	62,8848	442,625	505,51	300	1108,14995	OK	
cabeza	400	500	4L	3448,5	39,4	0,762381	893,358	14,596	62,8848	481,066	543,951	300	1146,59057	OK	
Planta baja	400	500	4L	3448,5	39,4	0,762381	893,358	14,596	62,8848	481,066	543,951	300	1146,59057	OK	
base				3481,1	39,4	0,7429762	870,62	14,759	62,8848	485,613	548,498	300	1151,13827	OK	

Imagen 5.4. Cuadro soporte extremo izquierda con CFRP.

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (KN)	Md (KN.m)	e, cal	v	μ	$\dot{\omega}$, tot	Us, tot	Us, cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	Us, cara	Armado (por cara)	Áreas
	cabeza	686,464	50,235	0,02	0,130755	0,01914	0,03	157,5	78,75	34,3232	2625	300	300	4Ø16	559
	Planta tercera base	708,064	58,487	0,0826	0,134869	0,02228	0,03	157,5	78,75	35,4032	2625	300	300	4Ø16	559
	cabeza	1338,08	66,056	0,04937	0,19272	0,01655	0,03	208,294	104,1469	66,904	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559
	Planta segunda base	1376,25	52,3	0,038	0,198218	0,0131	0,03	208,294	104,1469	68,8125	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559
	cabeza	2018,879	102,9	0,05097	0,246111	0,02007	0,04	328,125	164,0625	100,94395	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559
	Planta primera base	2096,791	113,592	0,05417	0,255609	0,02216	0,04	328,125	164,0625	104,83955	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559
	cabeza	2737,936	118,35	0,02	0,333767	0,02308	0,05	410,156	205,0781	136,8968	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559
	Planta baja base	2798,569	152,3	0,05442	0,341159	0,02971	0,05	410,156	205,0781	139,92845	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	Ust, min	Nd	Vd	Agotamiento por compresión		Agotamiento por tracción			Vcu+Vsu			
					σ_{cd}	K	Vu1	Vcu (*)	Vcu (**)		Vcu	Vsu St	Vsu
	cabeza	4L	686,464	5,541	0,385524	2,4541	4133,85	97,0309	83,27107	180,302	602,64	782,942	OK
	Planta tercera base	432	708,064	5,541	0,450855	2,44633	4120,75	97,0309	85,89124	182,92218	602,64	785,56218	OK
	cabeza	4L	1338,08	21,918	2,356386	2,21948	4341,63	104,144	188,4947	292,63827	699,84	992,47827	OK
	Planta segunda base	432	1376,25	21,918	2,471834	2,20573	4314,75	104,144	193,8717	298,01526	699,84	997,85526	OK
	cabeza	4L	2018,879	34,904	3,73729	2,05508	4774,22	114,878	285,8733	400,75137	764,64	1165,3914	OK
	Planta primera base	432	2096,791	34,904	3,936745	2,03134	4719,06	114,878	296,9056	411,78371	764,64	1176,4237	OK
	cabeza	6L	2737,936	9,878	5,578076	1,83594	4265,13	114,878	387,6917	502,56984	1146,96	1649,5298	OK
	Planta baja base	648	2798,569	9,878	5,733297	1,81746	4222,2	114,878	396,2774	511,15548	1146,96	1658,1155	OK

Imagen 5.5. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con GFRP.

Limitaciones (por cara)															
b	h	Nd (kN)	Md (kNm)	e, cal	v	μ	ω , tot	U _s , tot	U _s , cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _s , cara	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	500	686,464	50,235	0,02	0,130755	0,01914	0,03	157,5	78,75	34,3232	2625	650	650	4Ø16	804,224
Planta tercera															
base	500	708,064	58,487	0,0826	0,134869	0,02228	0,03	157,5	78,75	35,4032	2625	650	650	4Ø16	804,224
cabeza	575	1338,08	66,056	0,04937	0,19272	0,01655	0,03	208,294	104,1469	66,904	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	804,224
Planta segunda															
base	575	1376,25	52,3	0,038	0,198218	0,0131	0,03	208,294	104,1469	68,8125	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	804,224
cabeza	625	2018,879	102,9	0,05097	0,246111	0,02007	0,04	328,125	164,0625	100,94395	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta primera															
base	625	2096,791	113,592	0,05417	0,255609	0,02216	0,04	328,125	164,0625	104,83955	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412
cabeza	625	2737,936	118,35	0,02	0,333767	0,02308	0,05	410,156	205,0781	136,8968	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta baja															
base	625	2798,569	152,3	0,05442	0,341159	0,02971	0,05	410,156	205,0781	139,92845	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st,min}	Nd	V _d	Agotamiento por compresión				Agotamiento por tracción					V _{cu+V_{su}}
					K	V _{u1}	V _{cu}			V _{su}				
							σ _{cd}	(*)	(**)	V _{cu}	St	V _{su}		
cabeza	575	4L	686,464	5,541	1684,46	1	1684,46	97,0309	83,27107	180,302	602,64	782,942	OK	
Planta tercera														
base	575	432	708,064	5,541	1684,46	1	1684,46	97,0309	85,89124	182,92218	602,64	785,56218	OK	
cabeza	575	4L	1338,08	21,918	4582,33	2,34252	4582,33	104,144	188,4947	292,63827	699,84	992,47827	OK	
Planta segunda														
base	575	432	1376,25	21,918	4739,45	2,42285	4739,45	113,112	193,8717	306,98414	699,84	1006,8241	OK	
cabeza	625	4L	2018,879	34,904	4760,35	2,23885	4760,35	119,578	261,6467	381,22482	699,84	1081,0648	OK	
Planta primera														
base	625	432	2096,791	34,904	4709,87	2,21511	4709,87	119,578	271,7441	391,32222	699,84	1091,1622	OK	
cabeza	625	6L	2737,936	9,878	4692,04	2,01971	4692,04	124,771	387,6917	512,46319	1146,96	1659,4232	OK	
Planta baja														
base	625	648	2798,569	9,878	4649,11	2,00123	4649,11	124,771	396,2774	521,04882	1146,96	1668,0088	OK	

Imagen 5.6. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con BFRP.

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	e, cal	v	μ	ω , tot	U _s , tot	U _s , cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _s , cara	Armado (por cara)	Áreas
	500	686,464	50,235	0,02	0,130755	0,01914	0,03	157,5	78,75	34,3232	2625	650	650	4Ø16	884,65
Planta tercera															
base	500	708,064	58,487	0,0826	0,134869	0,02228	0,03	157,5	78,75	35,4032	2625	650	650	4Ø16	884,65
cabeza															
Planta segunda															
base	575	1338,08	66,056	0,04937	0,19272	0,01655	0,03	208,294	104,1469	66,904	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
cabeza															
Planta primera															
base	625	2018,879	102,9	0,05097	0,246111	0,02007	0,04	328,125	164,0625	100,94395	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4
cabeza															
Planta baja															
base	625	2798,569	152,3	0,05442	0,341159	0,02971	0,05	410,156	205,0781	136,8968	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4
cabeza															
base	625	2798,569	152,3	0,05442	0,341159	0,02971	0,05	410,156	205,0781	139,92845	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st} , min	Nd	V _d	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu} +V _{su}	
					O _{cd}	K	V _{u1}	V _{cu}		V _{su}			
								(*)	(**)	V _{cu}	St		
	575	4L	686,464	5,541	-0,599428	1	1956,15	104,144	96,70189	200,84541	699,84	900,68541	OK
Planta tercera													
base	575	432	708,064	5,541	-0,534098	1	1956,15	104,144	99,74467	203,88819	699,84	903,72819	OK
cabeza													
Planta segunda													
base	575	4L	1338,08	21,918	1,371433	2,33673	4571	104,144	188,4947	292,63827	699,84	992,47827	OK
cabeza													
Planta primera													
base	575	432	1376,25	21,918	0,686276	2,4183	4730,56	113,112	193,8717	306,98414	699,84	1006,8241	OK
cabeza													
Planta primera													
base	575	6L	2018,879	34,904	2,629955	2,18691	4277,92	113,112	284,3986	397,51101	1049,76	1447,271	OK
cabeza													
Planta primera													
base	575	648	2096,791	34,904	2,865606	2,15886	4223,05	113,112	295,374	408,48644	1049,76	1458,2464	OK
cabeza													
Planta baja													
base	625	6L	2737,936	9,878	4,06678	2,01586	4683,09	124,771	387,6917	512,46319	1146,96	1659,4232	OK
cabeza													
Planta baja													
base	625	648	2798,569	9,878	4,222001	1,99738	4640,17	124,771	396,2774	521,04882	1146,96	1668,0088	OK

Imagen 5.7. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con CFRP.

5.4.- Soporte extremo izquierda 3:

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (kN)	M _{id} (kNm)	e _{r,cal}	v	μ	ω _{t,tot}	U _{s,tot}	U _{s,cara}	0,05Nd	0,5 Ac f _{cd}	0,002 Ac f _{yd}	U _{s,cara}	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	500	1590,026	66,157	0,025	0,302862	0,0252	0,03	157,5	78,75	79,5013	2625	300	300	4Ø16	804,224
Planta tercera base	500	1619,186	45,883	0,025	0,308416	0,01748	0,03	157,5	78,75	80,9593	2625	300	300	4Ø16	804,224
cabeza	575	3398,186	79,136	0,03	0,489432	0,01982	0,03	208,294	104,1469	169,9093	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	804,224
Planta segunda base	575	3449,716	64,743	0,03	0,496854	0,01622	0,03	208,294	104,1469	172,4858	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	804,224
cabeza	625	5166,493	98,826	0,04	0,62982	0,01928	0,04	328,125	164,0625	258,32465	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	804,224
Planta primera base	625	5271,674	84,645	0,04	0,642642	0,01651	0,04	328,125	164,0625	263,5837	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	804,224
cabeza	625	6984,296	44,233	0,05	0,851419	0,00863	0,08	656,25	328,125	349,2148	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	804,224
Planta baja base	625	7066,15	26,85	0,05	0,861397	0,00524	0,09	738,281	369,1406	353,3075	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	804,224

COMPROBACIÓN A CORTANTE

	b	h	U _{st,min}	Nd	V _d	Agotamiento por compresión				Agotamiento por tracción				V _{cu+V_{su}}	OK
						σ _{cd}	K	V _{u1}	V _{cu}	V _{cu}		V _{su}	St		
										(*)	(**)				
cabeza	575	575	4L	1590,026	20,748	3,118415	2,12876	3585,82	97,0309	192,8771	289,908	602,64	602,64	892,548	OK
Planta tercera base	575	575	432	1619,186	20,748	3,206612	2,11826	3568,13	97,0309	196,4143	293,44524	602,64	602,64	896,08524	OK
cabeza	575	575	4L	3398,186	26,644	8,58733	1,4777	2890,6	104,144	478,701	582,84451	699,84	699,84	1282,6845	OK
Planta segunda base	575	575	432	3449,716	26,644	8,743186	1,45914	2854,31	104,144	485,96	590,10351	699,84	699,84	1289,9435	OK
cabeza	625	625	4L	5166,493	29,592	11,79518	1,09581	2545,71	114,878	731,5754	846,45352	764,64	764,64	1611,0935	OK
Planta primera base	625	625	432	5271,674	29,592	12,06445	1,06376	2471,24	114,878	746,469	861,34715	764,64	764,64	1625,9871	OK
cabeza	625	625	4L	6984,296	7,366	16,44876	0,54181	1258,7	114,878	988,9763	1103,8544	764,64	764,64	1868,4944	OK
Planta baja base	625	625	432	7066,15	7,366	16,6583	0,51687	1200,75	114,878	1000,567	1115,4449	764,64	764,64	1880,0849	OK

Imagen 5.8. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con GFRP.

Limitaciones (por cara)																
b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	e,cal	v	μ	$\dot{\omega}$,tot	Us,tot	Us,cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	Us,cara	Armado (por cara)	Áreas	
cabeza	500	1590,026	66,157	0,025	0,302862	0,0252	0,03	157,5	78,75	79,5013	2625	650	650	4Ø16	900,73	804,224
Planta tercera base	500	1619,186	45,883	0,025	0,308416	0,01748	0,03	157,5	78,75	80,9593	2625	650	650	4Ø16	900,73	804,224
cabeza	575	3398,186	79,136	0,03	0,489432	0,01982	0,03	208,294	104,1469	169,9093	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	900,73	804,224
Planta segunda base	575	3449,716	64,743	0,03	0,496854	0,01622	0,03	208,294	104,1469	172,4858	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	900,73	804,224
cabeza	625	5166,493	98,826	0,04	0,62982	0,01928	0,04	328,125	164,0625	258,32465	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1162	1030,412
Planta primera base	625	5271,674	84,645	0,04	0,642642	0,01651	0,04	328,125	164,0625	263,5837	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1162	1030,412
cabeza	625	6984,296	44,233	0,05	0,851419	0,00863	0,05	410,156	205,0781	349,2148	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1162	1030,412
Planta baja base	625	7066,15	26,85	0,05	0,861397	0,00524	0,05	410,156	205,0781	353,3075	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1162	1030,412

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	Ust,min	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción					Vcu+Vsu		
					Ocd	K	Vu1	Vcu		Vsu		Vsu			
								(*)	(**)	Vcu	St				
cabeza	575	4L	1590,026	20,748	2,084827	1	1684,46	97,0309	192,8771	289,908	602,64	300	602,64	892,548	OK
Planta tercera base	575	432	1619,186	20,748	2,173024	1	1684,46	97,0309	196,4143	293,44524	602,64	300	602,64	896,08524	OK
cabeza	575	4L	3398,186	26,644	7,553742	1,60074	3131,3	104,144	478,701	582,84451	699,84	300	699,84	1282,6845	OK
Planta segunda base	575	432	3449,716	26,644	6,919428	1,67626	3279,01	113,112	485,96	599,07239	699,84	300	699,84	1298,9124	OK
cabeza	625	6L	5166,493	29,592	10,25155	1,27958	2720,7	119,578	669,5775	789,1556	1049,76	300	1049,76	1838,9156	OK
Planta primera base	625	648	5271,674	29,592	10,52082	1,24752	2652,54	119,578	683,209	802,78706	1049,76	300	1049,76	1852,5471	OK
cabeza	625	6L	6984,296	7,366	14,90513	0,72558	1685,61	124,771	988,9763	1113,7478	1146,96	300	1146,96	2260,7078	OK
Planta baja base	625	648	7066,15	7,366	15,11468	0,70063	1627,66	124,771	1000,567	1125,3383	1146,96	300	1146,96	2272,2983	OK

Imagen 5.9. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con BFRP.

		Limitaciones (por cara)													
b	h	Nd (kN)	Md (kNm)	E_{cal}	v	μ	$\dot{\omega}_{tot}$	$U_{s,tot}$	$U_{s,cara}$	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	$U_{s,cara}$	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	500	1590,026	66,157	0,025	0,302862	0,0252	0,03	157,5	78,75	79,5013	2625	650	650	4Ø16	884,65
Planta tercera base	500	1619,186	45,883	0,025	0,308416	0,01748	0,03	157,5	78,75	80,9593	2625	650	650	4Ø16	884,65
cabeza	575	3398,186	79,136	0,03	0,489432	0,01982	0,03	208,294	104,1469	169,9093	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
Planta segunda base	575	3449,716	64,743	0,03	0,496854	0,01622	0,03	208,294	104,1469	172,4858	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
cabeza	625	5166,493	98,826	0,04	0,62982	0,01928	0,04	328,125	164,0625	258,32465	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4
Planta primera base	625	5271,674	84,645	0,04	0,642642	0,01651	0,04	328,125	164,0625	263,5837	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4
cabeza	625	6984,296	44,233	0,05	0,851419	0,00863	0,05	410,156	205,0781	349,2148	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4
Planta baja base	625	7066,15	26,85	0,05	0,861397	0,00524	0,05	410,156	205,0781	353,3075	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1149,4

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st,min}	Nd	V _d	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción			V _{cu+V_{su}}	OK	
					$\bar{\sigma}_{cd}$	K	V _{u1}	V _{cu}	V _{su}	St			
cabeza	575	4L	1590,026	20,748	2,133462	1	1956,15	104,144	223,9863	328,12979	699,84	1027,9698	OK
Planta tercera base	575	432	1619,186	20,748	2,221659	1	1956,15	104,144	228,094	332,23755	699,84	1032,0775	OK
cabeza	575	4L	3398,186	26,644	7,602377	1,59496	3119,97	104,144	478,701	582,84451	699,84	1282,6845	OK
Planta segunda base	575	432	3449,716	26,644	6,957629	1,67171	3270,12	113,112	485,96	599,07239	699,84	1298,9124	OK
cabeza	625	6L	5166,493	29,592	10,28389	1,27573	2712,52	119,578	669,5775	789,1556	1049,76	1838,9156	OK
Planta primera base	625	648	5271,674	29,592	10,55315	1,24367	2644,36	119,578	683,209	802,78706	1049,76	1852,5471	OK
cabeza	625	6L	6984,296	7,366	14,93746	0,72173	1676,67	124,771	988,9763	1113,7478	1146,96	2260,7078	OK
Planta baja base	625	648	7066,15	7,366	15,14701	0,69678	1618,72	124,771	1000,567	1125,3383	1146,96	2272,2983	OK

Imagen 5.10. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con CFRP.

5.5.- Soporte extremo izquierda 4:

b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	e _{cal}	v	μ	ω _{tot}	U _{s,tot}	U _{s,cara}	Limitaciones (por cara)				U _{s,cara}	Armado (por cara)	Áreas
										0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	0,002 Ac fyd			
cabeza	575	5007,2	84,8	0,025	0,721174	0,02124	0	0	0	250,36	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
Planta tercera																
base	575	5036,3	82	0,025	0,725365	0,02054	0	0	0	251,815	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
cabeza		6310,7	192,5	0,0305	0,908913	0,04822	0,03	208,294	104,1469	315,535	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
Planta segunda	575															
base		6362,3	157,2	0,03	0,916345	0,03938	0,04	277,725	138,8625	318,115	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
cabeza		7674,3	331,6	0,04321	0,935534	0,06468	0,06	492,188	246,0938	383,715	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224
Planta primera	625															
base		7779,51	324,3	0,04169	0,948359	0,06325	0,07	574,219	287,1094	388,9755	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224
cabeza		9115,35	137,6	0,04	1,11205	0,02684	0,16	1312,5	656,25	455,7675	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16+2Ø20	1013	1432,524
Planta baja	625															
base		9279,1	70,4	0,04	1,131166	0,01373	0,16	1312,5	656,25	463,955	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16+2Ø20	1013	1432,524

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st,min}	Nd	V _d	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu} +V _{su}	OK
					σ _{cd}	k	V _{u1}	V _{cu}	V _{cu}	V _{cu}	V _{su}		
cabeza			5007,2	30,9	13,45391	0,89834	1757,3	104,144	705,3621	809,50561	699,84	1509,3456	OK
Planta tercera	575	4L											
base		432	5036,3	30,9	13,54193	0,88787	1736,8	104,144	709,4614	813,60491	699,84	1513,4449	OK
cabeza			6310,7	65,8	17,39645	0,42899	839,178	104,144	888,9856	993,12909	699,84	1692,9691	OK
Planta segunda	575	4L											
base		432	6362,3	65,8	17,55251	0,41041	802,833	104,144	896,2544	1000,398	699,84	1700,238	OK
cabeza			7674,3	105,78	18,21517	0,33153	770,18	114,878	1086,681	1201,559	764,64	1966,199	OK
Planta primera	625	4L											
base		432	7779,51	105,78	17,32227	0,43783	1017,12	139,255	1101,579	1240,8341	764,64	2005,4741	OK
cabeza			9115,35	22	20,74202	0,03071	71,3487	139,255	1290,734	1429,989	1146,96	2576,949	OK
Planta baja	625	6L											
base		648	9279,1	22	21,16122	-0,01919	-44,5863	139,255	1313,921	1453,176	1146,96	2600,136	OK

Imagen 5.11. Cuadro soporte extremo izquierda 4 con GFRP.

b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	E _{cal}	v	μ	ω _{tot}	U _{s,tot}	U _{s,cara}	Limitaciones (por cara)			U _{s,cara}	Armado (por cara)	Áreas
										0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd			
cabeza	575	5007,2	84,8	0,025	0,721174	0,02124	0	0	0	250,36	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
Planta tercera															
base	575	5036,3	82	0,025	0,725365	0,02054	0	0	0	251,815	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
cabeza	575	6310,7	192,5	0,0305	0,908913	0,04822	0,03	208,294	104,1469	315,535	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
base	575	6362,3	157,2	0,03	0,916345	0,03938	0,04	277,725	138,8625	318,115	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
cabeza	575	7674,3	331,6	0,04321	1,105309	0,08306	0,3	2082,94	1041,469	383,715	3471,5625	859,625	1145,62	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta primera															
base	575	7779,51	324,3	0,04169	1,120462	0,08123	0,33	2291,23	1145,616	388,9755	3471,5625	859,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412
cabeza	625	9115,35	137,6	0,04	1,111205	0,02684	0,16	1312,5	656,25	455,7675	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta baja															
base	625	9279,1	70,4	0,04	1,131166	0,01373	0,16	1312,5	656,25	463,955	4101,5625	1015,625	1015,625	4Ø16+2Ø12	1030,412

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st,min}	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu+Vsu}	OK
					σ _{cd}	K	V _{u1}	(*)	(**)	V _{cu}	V _{su}		
cabeza	575	4L	5007,2	30,9	12,42033	1,02139	1997,99	104,144	705,3621	809,50561	699,84	1509,3456	OK
Planta tercera													
base	575	432	5036,3	30,9	12,50834	1,01091	1977,5	104,144	709,4614	813,60491	699,84	1513,4449	OK
cabeza	575	4L	6310,7	65,8	16,36286	0,55204	1079,87	104,144	888,9856	993,12909	699,84	1692,9691	OK
Planta segunda													
base	575	432	6362,3	65,8	15,72876	0,62753	1227,54	113,112	896,2544	1009,3668	699,84	1709,2068	OK
cabeza	575	6L	7674,3	105,78	19,697	0,15512	303,437	113,112	1081,075	1194,1877	1049,76	2243,9477	OK
Planta primera													
base	575	648	7779,51	105,78	20,01521	0,11724	229,332	113,112	1095,896	1209,0086	1049,76	2258,7686	OK
cabeza	625	6L	9115,35	22	20,36063	0,07612	176,827	124,771	1290,734	1415,505	1146,96	2562,465	OK
Planta baja													
base	625	648	9279,1	22	20,77983	0,02621	60,8915	124,771	1313,921	1438,692	1146,96	2585,652	OK

Imagen 5.12. Cuadro soporte extremo izquierda 4 con BFRP.

5.6.- Soporte central:

		Limitaciones (por cara)											Áreas			
b	h	Nd (kN)	Md (kNm)	e, cal	v	μ	$\dot{\omega}$, tot	Us, tot	Us, cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	Us, cara	Armado (por cara)	Áreas	
cabeza	575	1029,895	84,8	0,025	0,148333	0,021124	0,03	208,294	104,1469	51,49475	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
Planta tercera	575															
base	575	1059,055	82	0,025	0,152533	0,02054	0,03	208,294	104,1469	52,95275	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
cabeza	575	2019,268	192,5	0,09533	0,29083	0,04822	0,03	208,294	104,1469	100,9634	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
Planta segunda	575															
base	575	2071,326	157,2	0,03	0,298328	0,03938	0,04	277,725	138,8625	103,5663	3471,5625	396,75	396,75	4Ø16	559	804,224
cabeza	625	3027,159	331,6	0,10954	0,369025	0,06468	0,06	492,188	246,0938	151,35795	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224
Planta primera	625															
base	625	3172,312	324,3	0,10223	0,38672	0,06325	0,07	574,219	287,1094	158,6156	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224
cabeza	625	4057,714	137,6	0,04	0,494655	0,02684	0,08	656,25	328,125	202,8857	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224
Planta baja	625															
base	625	4224,132	70,4	0,04	0,514942	0,01373	0,08	656,25	328,125	211,2066	4101,5625	468,75	468,75	4Ø16	559	804,224

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	Ust, min	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				Vcu+Vsu	
					K	Vu1	$\dot{\sigma}_{cd}$	(*)	(**)	Vcu	Vsu		St
cabeza	575	4L	5007,2	30,9	0,89834	1757,3	104,144	705,3621	809,50561		699,84	1509,3456	OK
Planta tercera	575	432	5036,3	30,9	0,88787	1736,8	104,144	709,4614	813,60491	300	699,84	1513,4449	OK
base	575	4L	6310,7	65,8	0,42899	839,178	104,144	888,9856	993,12909	300	699,84	1692,9691	OK
Planta segunda	575	432	6362,3	65,8	0,41041	802,833	104,144	896,2544	1000,398		699,84	1700,238	OK
cabeza	625	4L	7674,3	105,78	0,33153	770,18	114,878	1086,681	1201,559	300	764,64	1966,199	OK
Planta primera	625	432	7779,51	105,78	0,43783	1017,12	139,255	1101,579	1240,8341		764,64	2005,4741	OK
base	625	6L	9115,35	22	0,03071	71,3487	139,255	1290,734	1429,989	300	1146,96	2576,949	OK
Planta baja	625	648	9279,1	22	-0,01919	-44,5863	139,255	1313,921	1453,176		1146,96	2600,136	OK
base	625												

Imagen 5.14. Cuadro soporte central con GFRP.

Limitaciones (por cara)															
b	h	Nd (kN)	Md (KNm)	e, cal	v	μ	$\dot{\omega}$, tot	U _s , tot	U _s , cara	0,05Nd	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _s , cara	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	575	1029,895	84,8	0,025	0,148333	0,02124	0	0	0	51,49475	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
Planta tercera base	575	1059,055	82	0,025	0,152533	0,02054	0	0	0	52,95275	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
cabeza	575	2019,268	192,5	0,09533	0,29083	0,04822	0,03	208,294	104,1469	100,9634	3471,5625	859,625	859	4Ø16	804,224
Planta segunda base	575	2071,326	157,2	0,03	0,298328	0,03938	0,04	277,725	138,8625	103,5663	3471,5625	859,625	1041,469	4Ø16+2Ø12	1030,412
cabeza	575	3027,159	331,6	0,10954	0,435994	0,08306	0,3	2082,94	1041,469	151,35795	3471,5625	859,625	1041,469	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta primera base	575	3172,312	324,3	0,10223	0,4569	0,08123	0,33	2291,23	1145,616	158,6156	3471,5625	859,625	1041,469	4Ø16+2Ø12	1030,412
cabeza	625	4057,714	137,6	0,04	0,494655	0,02684	0,16	1312,5	656,25	202,8857	4101,5625	1015,625	1041,469	4Ø16+2Ø12	1030,412
Planta baja base	625	4224,132	70,4	0,04	0,514942	0,01373	0,16	1312,5	656,25	211,2066	4101,5625	1015,625	1041,469	4Ø16+2Ø12	1030,412

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st} , min	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción				V _{cu} +V _{su}	
					Ø _{cd}	K	Vu1	(*)	(**)	V _{cu}	V _{su}		St
cabeza	575	4L	1029,895	30,9	0,390669	2,45349	4799,4	104,144	145,0809	249,22438	699,84	949,06438	OK
Planta tercera base	575	432	1059,055	30,9	0,478866	2,44299	4778,86	104,144	149,1886	253,33214	699,84	953,17214	OK
cabeza	575	4L	2019,268	65,8	3,383102	2,09725	4102,54	104,144	284,4534	388,59693	699,84	1088,4369	OK
Planta segunda base	575	432	2071,326	65,8	2,750385	2,17257	4249,88	113,112	291,7868	404,89919	699,84	1104,7392	OK
cabeza	575	6L	3027,159	105,78	5,641373	1,82841	3576,64	113,112	426,4346	539,54697	1049,76	1589,307	OK
Planta primera base	575	648	3172,312	105,78	6,080399	1,77614	3474,4	113,112	446,8822	559,99461	1049,76	1609,7546	OK
cabeza	625	6L	4057,714	22	7,413079	1,61749	3757,63	124,771	574,5723	699,34375	1146,96	1846,3038	OK
Planta baja base	625	648	4224,132	22	7,839109	1,56677	3639,81	124,771	598,1371	722,90854	1146,96	1869,8685	OK

Imagen 5.15. Cuadro soporte central con BFRP.

Limitaciones (por cara)														
b	h	Nd (KN)	Md (KNm)	e, cal	v	μ	ω , tot	U _s , tot	U _s , cara	0,5 Ac fcd	0,002 Ac fyd	U _s , cara	Armado (por cara)	Áreas
cabeza	575	1029,895	84,8	0,025	0,148333	0,02124	0,04	277,725	138,8625	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
Planta tercera base	575	1059,055	82	0,025	0,152533	0,02054	0,04	277,725	138,8625	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
cabeza	575	2019,268	192,5	0,09533	0,29083	0,04822	0,04	277,725	138,8625	100,9634	859,625	859,625	4Ø16	884,65
Planta segunda base	575	2071,326	157,2	0,03	0,298328	0,03938	0,04	277,725	138,8625	3471,5625	859,625	859,625	4Ø16	884,65
cabeza	575	3027,159	331,6	0,10954	0,435994	0,08306	0,3	2082,94	1041,469	151,35795	859,625	859,625	4Ø16+3Ø12	1281,6
Planta primera base	575	3172,312	324,3	0,10223	0,4569	0,08123	0,32	2221,8	1110,9	158,6156	859,625	859,625	4Ø16+3Ø12	1281,6
cabeza	625	4057,714	137,6	0,04	0,494655	0,02684	0,18	1476,56	738,2813	202,8857	1015,625	1015,625	4Ø16+3Ø12	1143,51
Planta baja base	625	4224,132	70,4	0,04	0,514942	0,01373	0,16	1312,5	656,25	211,2066	1015,625	1015,625	4Ø16+3Ø12	1143,51

COMPROBACIÓN A CORTANTE

b	h	U _{st} , min	Nd	Vd	Agotamiento por compresión			Agotamiento por tracción			V _{cu} +V _{su}	OK	
					Ø _c d	K	V _{u1}	(*)	(**)	V _{cu}			V _{su}
cabeza	575	4L	1029,895	30,9	0,439304	2,4477	4788,07	104,144	145,0809	249,22438	699,84	949,06438	OK
Planta tercera base	575	432	1059,055	30,9	0,527501	2,4372	4767,53	104,144	149,1886	253,33214	300	953,17214	OK
cabeza	575	4L	2019,268	65,8	3,431737	2,09146	4091,21	104,144	284,4534	388,59693	300	1088,4369	OK
Planta segunda base	575	432	2071,326	65,8	2,388585	2,21564	4334,13	117,108	291,7868	408,8948	699,84	1108,7348	OK
cabeza	575	6L	3027,159	105,78	5,279574	1,87148	3660,89	117,108	426,4346	543,54257	1049,76	1593,3026	OK
Planta primera base	575	648	3172,312	105,78	5,7186	1,81921	3558,66	117,108	446,8822	563,99021	1049,76	1613,7502	OK
cabeza	625	6L	4057,714	22	7,106852	1,65395	3842,32	129,179	574,5723	703,7512	1146,96	1850,7112	OK
Planta baja base	625	648	4224,132	22	7,532882	1,60323	3724,5	129,179	598,1371	727,31599	1146,96	1874,276	OK

Imagen 5.16. Cuadro soporte central con CFRP.

5.7.- Tren de vigas de planta tercera.

Para el análisis de los diferentes trenes de vigas, se ha seguido, como en el caso de pilares, el caso práctico resuelto en clase⁴⁹.

Como primer paso se ha realizado el análisis de las solicitaciones que tenemos en cada punto del tren de vigas y se ha calculado el momento relativo para poder obtener la capacidad mecánica necesaria a colocar. Los ábacos que hemos empleado son los adimensionales con armadura tanto arriba como abajo, y que según las dimensiones nos hemos ido adaptando⁵⁰.

Una vez considerada la armadura necesaria, se han tenido en cuenta las limitaciones tanto geométricas como mecánicas necesarias. En cuanto a las cuantías geométricas mínimas, tomando que se trata de pilares, consideramos según la Tabla 5⁵¹, que el mínimo a colocar será un 3.3 por mil en total. Para las limitaciones mecánicas, tenemos que sobrepasar la siguiente fórmula:

$$^{(14)} 0.04 \cdot b \cdot h \cdot fcd$$

En el caso de que esta fórmula resulte inferior a la capacidad mecánica obtenida por cálculo en las zonas de máximo momento flector, no será necesario tener en cuenta ninguna limitación mecánica.

A continuación mostramos el ejemplo de la viga en planta 3, con el proceso ya simplificado. Este es el caso para las barras GFRP.

Cabe destacar que las dimensiones empleadas han ido variando bastante de las empleadas en el proyecto originalmente hasta llegar a estas, buscando obtener la mayor coherencia posible. El hecho de tener vigas de 1 metro de canto es excesivo, obviamente, pero se tiene en cuenta, ya que es un proyecto teórico. El hecho de tener 10 metros de luz y ser un edificio público nos ha condicionado bastante el diseño.

⁴⁹ Apuntes de clase CT3, ejercicios prácticos, autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV.

⁵⁰ Ábacos del capítulo de ábacos, del libro "Hormigón Armado, autores: Jiménez Montoya, Pedro; García Meseguer, Álvaro; Morán Cabré, Francisco; Arroyo Portero, Juan Carlos. Ed. Gustavo Gili, 15ª Edición.

⁵¹ Tabla 5 de los apuntes de Clase de CT3, autor autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV. Tema 10, página 28.

	559	839	1066	1818	1818	1066	699	1066
	4Ø16	6Ø16	6Ø16+1Ø20	8Ø20	8Ø20	6Ø16+1Ø20	5Ø16	6Ø16+1Ø20
Us1	506,625	788,083333	1013,25	1688,75	1801,33333	1035,76667	675,5	1013,25
ω	0,045	0,07	0,09	0,15	0,16	0,092	0,06	0,09
μ	0,04614714	0,07414713	0,09235273	0,142475925	0,15366027	0,09133251	0,06750887	0,08795695
Md	501,356	805,556	1003,347	1547,9	1669,41	992,263	733,436	955,59
Md	333,37		710,501		833,479		303,602	
μ	0,03068493		0,06539782		0,07671729		0,02794494	
ω	0,04		0,06		0,065		0,04	
Us1	450,333333		675,5		731,791667		450,333333	
	4Ø16		5Ø16		6Ø16		4Ø16	
	559,3		699		839		559,3	
L (m)	7,5		10		10		10	
b x h (cm)	50x100		50x100		50x100		50x100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.17. Tren de vigas de planta tercera con GFRP

De este modo hemos considerado 4Ø16 como armadura pasante tanto bajo como arriba. Podríamos haber tomado 4 barras que no fueran iguales, pero por simplificar tanto constructivamente como los cálculos, se ha procedido de este modo.

Por tanto, son 559 KN los que componen la armadura pasante, cumpliendo los mínimos para todos los nudos evaluados.

El siguiente paso sería evaluar uno de los nudos, el más desfavorable, para estudiar la separación entre barras y comprobar que se cumplen los mínimos establecidos.

En este caso estudiaremos el tercer nudo donde se juntan 8Ø20 (en este caso variamos obviamente la armadura pasante), aunque no se debería. Esta comprobación es:

(15) Distancia entre ejes de armadura de montaje:

$$a = \frac{500 - 2 \cdot 35}{3} = \frac{430}{3} = 143.33 \text{ mm}$$

(16) Separación entre barras:

$$s = (143.33 - (40 \cdot 1.2)) - (2 \cdot 20 \cdot 1.2) = 47.33$$

En este caso hemos calculado una de las ventanas, que podría ser la lateral, para poder conformar una sección totalmente simétrica. Con esto conseguimos permitir

que el vibrador entrara en la pieza sin problemas para vibrar el hormigón. Esquemáticamente el resultado sería:

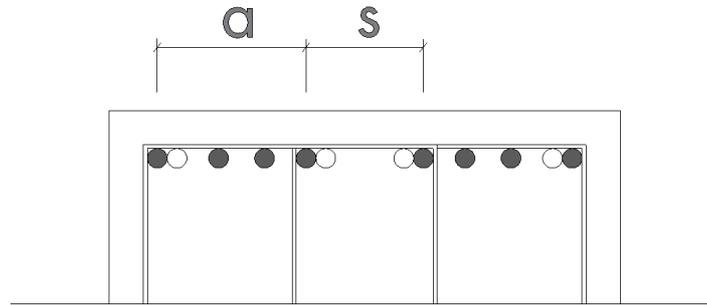


Imagen 5.18. Nudo 3, separación en ventanas.

Una vez ya tenemos calculado el armado total, debemos replantearnos las longitudes de anclaje y empalme. Como dijimos en el apartado 4.5., resolveremos el anclaje de extremo con la pieza especial conformada por acero inoxidable, y las longitudes de solape intermedias, nos serviremos de la normativa japonesa⁵².

Para no realizar todos los cálculos y como consejo del profesor, nos serviremos de calcular uno de los tramos más desfavorables, y posteriormente asemejar todos los encuentros al mismo valor. Se trata de solo un tanteo, no un plano de ejecución de ferralla final.

$$(17) f_{bod} = 0.28 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} = 0.28 \cdot 1 \cdot \frac{35^{\frac{2}{3}}}{1.5} = 1.9973$$

$$(18) K_c = \frac{c}{\varnothing} + \frac{15At}{s\varnothing} \cdot \frac{Et}{E_0} = \frac{35}{20} + \frac{15314 \cdot 16}{68 \cdot 20} \cdot \frac{230000}{2.1 \cdot 10^8} = 1.75$$

Por tanto, $\alpha_1 = 0.8$

$$(19) l_d = \alpha \cdot \frac{f_d}{4 f_{bod}} \cdot \varnothing = 0.8 \cdot \frac{1220}{4 \cdot 1.9973} \cdot 20 = 2443 \text{ mm}$$

Este ejemplo podría valer para el tramo del tercer nudo. Como se ve, las longitudes de solape son mucho mayores que las normales en acero. Esto se debe a que la adherencia entre hormigón y este tipo de barras poliméricas es mucho más bajo que con el acero⁵³, de ahí que se precisen estas longitudes.

Como ya explicamos en el apartado correspondiente a anclajes, apartado 4.5.2., el anclaje en nudo lo resolveremos con la pieza especial para evitar el doblado

⁵² JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures" for fiber reinforcing materials, chapter 10.5.3.

⁵³ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

de la barra en ese punto. Para ello y como ya dijimos nos serviremos de la pieza de recubrimiento anclada a una pletina del mismo material para poder anclar. Esta pieza la plantearemos de acero inoxidable. Aunque se realiza el cambio de material, la compatibilidad la aseguramos totalmente ya que la pieza queda totalmente fijada. Además, empleamos este material, que a pesar de ser más caro nos evitará la oxidación, resolviendo el problema planteado al inicio.

Una vez calculada la sección y los anclajes, procederemos al cálculo del dimensionado frente a esfuerzo cortante. Para ello, consideraremos que la carga en las vigas es uniformemente repartida, dada por la expresión:

$$^{(20)} V_{rd}(x) = V_d - q_d x, \text{ siendo } q_d = 159.15 \text{ KN/m en vanos laterales y } 143.15 \text{ KN/m en vanos interiores.}$$

Ahora, deberemos calcular el cortante tanto en V_{rd1} (eje del pilar) y V_{rd2} (eje del pilar + d). Para ello nos serviremos de las expresiones:

Vano lateral:

$$^{(21)} V_{rd1}(x=40/2) = 713.838 - 159.15(0.40/2) = 682.008 \text{ KN}$$

$$^{(22)} V_{rd2}(x=40/2 + 36.5) = 713.838 - 159.15(0.40/2 + 0.365) = 623.92 \text{ KN}$$

En el caso de los nudos laterales:

$$^{(23)} V_{rd1}(x=45/2) = 698.75 - 143.15(0.45/2) = 666.54 \text{ KN}$$

$$^{(24)} V_{rd2}(x=45/2 + 41.5) = 698.75 - 143.15(0.45/2 + 0.415) = 607.134 \text{ KN}$$

Aunque este valor no se repite, sino que varía mínimamente en cada nudo, lo tomamos como referencia.

Para la armadura transversal, en el caso de proceder como armado con acero, trabajaríamos con estribos. En cambio, al tratarse de armaduras con barras de fibras, el hecho de doblar las mismas es muy difícil. En este caso, como ya hicimos con el armado transversal de los soportes, nos serviremos de perfiles en L que conforman el estribado⁵⁴.

Estas piezas, como ya dijimos, tenía una resistencia de 108MPa por cada pletina. En la mayoría de casos, al tratarse de 4 barras conformando la armadura pasante, dispondremos de 4 pletinas, conformadas, tal y como se muestra en la figura. De este modo, la resistencia del estribado será de 432 MPa.

⁵⁴ Apartado 4.4. Esfuerzo a cortante.

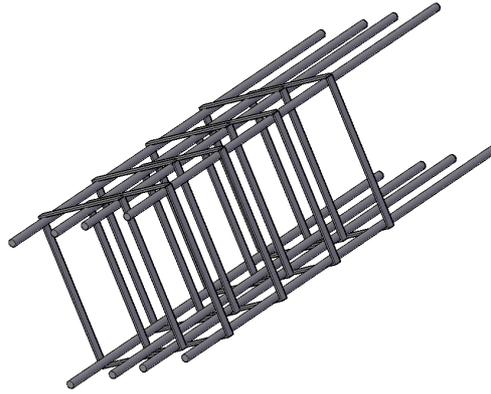


Imagen 5.19. Esquema de estribo.

Para el cálculo de las tensiones de compresión en las bielas de hormigón, en este caso, en el nudo 2:

$$(25) V_{u1} = 0.3 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} = 0.3 \cdot 500 \cdot 965 \cdot (35/1.5) \cdot 10^{-3} = 3377.5 \text{ KN}$$

$$(26) V_{u1} = 3377.5 \text{ KN} > V_{rd1} = 666.54 \text{ KN} \text{ (CUMPLE)}$$

Para definir la separación de los estribos, nos serviremos de las limitaciones y disposiciones constructivas reflejadas en los apuntes⁵⁵. En nuestro caso, como $1/5 V_{u1} < V_{rd1} \leq 2/3 V_{u1}$ ($535.5 \text{ KN} < 666.54 \text{ KN} < 1785 \text{ KN}$), se tiene que:

$$(27) S_t \leq 0.6 d = 579 \text{ mm}$$

$$(28) S_t \leq 450 \text{ mm}$$

Además, deberemos verificar que:

$$(29) S_t \leq \frac{A_{st} \cdot f_{y\alpha,d}}{\left(\frac{0.3}{7.5}\right) \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot b_0} = \frac{432 \cdot 10^3}{\left(\frac{0.3}{7.5}\right) \cdot 35^{\frac{2}{3}} \cdot 500} = \frac{432000}{(0.04) \cdot 35^{\frac{2}{3}} \cdot 500} = \frac{432000}{(0.04) \cdot 10.7 \cdot 500} = \frac{432000}{214} = 2018.7 \text{ mm}$$

Y además, por otro lado, para evitar los pandeos localizados de la armadura de compresión:

$$(30) S_t \leq 15 \varnothing \text{ min} \leq 15 \times 16 = 240 \text{ mm}$$

Y como última limitación, trataríamos que $\varnothing_t \geq 1/4 \varnothing_{\text{max}}$, pero en este caso, la armadura transversal no se trabaja con redondos, por tanto, podemos ignorarla.

⁵⁵ Apuntes de clase CT3, teoría, autor: Manuel Octavio Valcuende, departamento de Construcciones Arquitectónicas CSA, ETSAV, UPV. Tema 12, Apartado 7, página 31.

Una vez conocidas las limitaciones, reconocemos que la que más nos limita es la de 240 mm, por tanto, y para mayor facilidades constructivas, optaremos por colocar los estribos cada 200 mm como armadura transversal: 4 (L) c 200.

Ahora deberemos comprobar que en las secciones de referencia se cumplen los mínimos exigidos:

En la sección de referencia, la armadura efectivamente anclada se compone de 4Ø16 + 2Ø16, el cortante V_{cu} que es capaz de absorber el hormigón es el siguiente:

$$(31) \rho_L = A_{s1} / b \cdot d = (6 \cdot \pi \cdot 16^2 / 4) / (500 \cdot 965) = 1206.37 / 482500 = 0.0025$$

$$(32) \zeta = 1 + \left(\frac{200}{d}\right)^{1/2} = 1 + (200/965)^{1/2} = 1.45525$$

$$(33) \sigma'_{cd} = 0; \beta = 1.0; f_{cv} = f_{ck}; \gamma_c = 1.5$$

De donde:

$$(34) V_{cu} = [(0.15 / \gamma_c) \cdot \zeta \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{cd})^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot \beta \cdot d \cdot b = \\ [(0.15 / 1.5) \cdot 1.45525 \cdot (100 \cdot 0.0025 \cdot 35)^{1/3} + 0.15 \cdot 0] \cdot 1 \cdot 965 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = \\ [(0.1) \cdot 1.45525 \cdot 2.06] \cdot 482.5 = 144.64 \text{ KN}$$

Por lo que respecta al cortante V_{su} que se absorbe con los estribos mínimos, se tiene:

$$(35) V_{su} = 0.9 \cdot d \cdot A_{st} \cdot f_{ya,d} / s_t = 0.9 \cdot 965 \cdot 432 / 200 = 1875.96 \text{ KN}$$

Así pues, el cortante total que absorbe la sección es:

$$(36) V_u = V_{cu} + V_{su} = 144.64 + 1875.96 = 2020.6 \text{ KN}$$

En este caso, 2020.6 KN > 606.134 KN

Por tanto, el armado de estribos considerado cumple. El hecho de cumplir de una manera tan holgada se debe a que la capacidad mecánica de la armadura impuesta es muy superior a lo normal en acero, debido a que estos perfiles colocados acumulan mucha más inercia que los redondos. Por tanto, ya no sería necesario plantearse si juntar más los estribos o colocarlos dobles, ya que con la primera solución planteada, el sistema cumple.

Este estribado se debería calcular también para el resto de nudos, pero como ya hemos comentado, simplificaremos, ya que cumple muy holgadamente.

Esta ha sido la comprobación de la viga de planta tercera con las armaduras conformadas por barras de fibra de vidrio. A continuación y a modo de resumen, se exponen los cálculos de las otras vigas con el resto de tipologías de los armados trabajados.

En el caso de realizar el armado disponiendo de redondos conformados por fibra de basalto, el esquema de valores de momentos sería:

	522	972	1197	1873,6	1873,6	1197	972	1197
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+3Ø16	4Ø12+6Ø16	4Ø12+6Ø16	4Ø12+3Ø16	4Ø12+2Ø16	4Ø12+3Ø16
Us1	506,625	788,083333	1013,25	1688,75	1801,33333	1035,76667	675,5	1013,25
ó	0,045	0,07	0,09	0,15	0,16	0,092	0,06	0,09
μ	0,04614714	0,07414713	0,09235273	0,142475925	0,15366027	0,09133251	0,06750887	0,08795695
Md	501,356	805,556	1003,347	1547,9	1669,41	992,263	733,436	955,59
Md		333,37	710,501		833,479		303,602	
μ		0,03068493	0,06539782		0,07671729		0,02794494	
ó		0,04	0,06		0,065		0,04	
Us1		450,333333	675,5		731,791667		450,333333	
		4Ø12	4Ø12+2Ø16		4Ø12+2Ø16		4Ø12	
		522	972		972		522	
L (m)	7,5		10		10		10	
b x h (cm)	50 x 100		50 x 100		50 x 100		50 x 100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.20. Tren de vigas de planta tercera con BFRP.

Como vemos, la armadura pasante en este caso se reduce a 4 redondos del 12. Esto se debe a que la capacidad mecánica de este tipo de barras es muy superior a las de fibra de vidrio.

Por tanto, son 522 KN los que componen la armadura pasante, cumpliendo los mínimos para todos los nudos evaluados.

El siguiente paso sería evaluar uno de los nudos, el más desfavorable, para estudiar la separación entre barras y comprobar que se cumplen los mínimos establecidos.

En este caso estudiaremos el tercer nudo donde se juntan 4Ø12 + 6Ø16. Esta comprobación es:

(37) Distancia entre ejes de armadura de montaje:

$$a = \frac{500 - 2 \cdot 35}{3} = \frac{430}{3} = 143.33 \text{ mm}$$

(38) Separación entre barras:

$$s = (143.33 - (2 \cdot 12 \cdot 1.2) - (3 \cdot 16 \cdot 1.2)) = 56.93 \text{ mm}$$

En este caso hemos calculado una de las ventanas, que podría ser la lateral, para poder conformar una sección totalmente simétrica. Con esto conseguimos permitir que el vibrador entrara en la pieza sin problemas para vibrar el hormigón. Esquemáticamente el resultado sería:

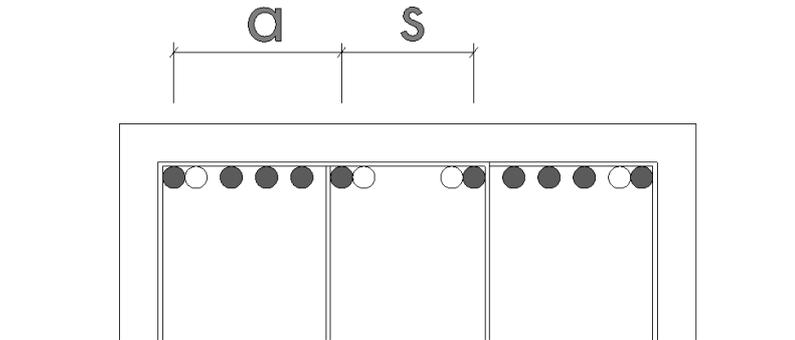


Imagen 5.21. Nudo 3, separación en ventanas.

Una vez ya tenemos calculado el armado total, debemos replantearnos las longitudes de anclaje y empalme. Como dijimos en el apartado 4.5., resolveremos el anclaje de extremo con la pieza especial conformada por acero inoxidable, y las longitudes de solape intermedias, nos serviremos de la normativa japonesa⁵⁶.

Para no realizar todos los cálculos y como consejo del profesor, nos serviremos de calcular uno de los tramos más desfavorables, y posteriormente asemejar todos los encuentros al mismo valor. Se trata de solo un tanteo, no un plano de ejecución de ferralla final.

$$(39) \quad f_{bod} = 0.28 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} = 0.28 \cdot 1 \cdot \frac{35^{\frac{2}{3}}}{1.5} = 1.9973$$

$$(40) \quad K_c = \frac{c}{\varnothing} + \frac{15At}{s\varnothing} \cdot \frac{Et}{E_0} = \frac{35}{16} + \frac{15 \cdot 314 \cdot 16}{68 \cdot 16} \cdot \frac{230000}{2.1 \cdot 10^8} = 2.19$$

Por tanto, $\alpha_1 = 0.7$

$$(41) \quad l_d = \alpha \cdot \frac{f_d}{4 f_{bod}} \cdot \varnothing = 0.7 \cdot \frac{1220}{4 \cdot 1.9973} \cdot 16 = 1710.31 \text{ mm}$$

Este ejemplo podría valer para el tramo del tercer nudo. Como se ve, las longitudes de solape son mucho mayores que las normales en acero. Esto se debe a que

⁵⁶ JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures" for fiber reinforcing materials, chapter 10.5.3.

la adherencia entre hormigón y este tipo de barras poliméricas es mucho más bajo que con el acero⁵⁷, de ahí que se precisen estas longitudes.

Una vez calculada la sección y los anclajes, procederemos al cálculo del dimensionado frente a esfuerzo cortante. Para ello, consideraremos que la carga en las vigas es uniformemente repartida. En este caso, al tratarse de la misma viga que la anterior y las piezas de estribado ser las mismas, se repetirían los cálculos y se comprobaría que efectivamente sí que cumpliría. Solo nos cambiarían ciertas limitaciones que se exponen a continuación:

$$(42) S_t \leq 0.6 d = 579 \text{ mm}$$

$$(43) S_t \leq 450 \text{ mm}$$

Además, deberemos verificar que:

$$(44) S_t \leq \frac{A_{st} \cdot f_{y\alpha,d}}{\left(\frac{0.3}{7.5}\right) \cdot f_{ck}^3 \cdot b_0} = \frac{432 \cdot 10^3}{\left(\frac{0.3}{7.5}\right) \cdot 35^3 \cdot 500} = \frac{432000}{(0.04) \cdot 35^3 \cdot 500} = \frac{432000}{(0.04) \cdot 10.7 \cdot 500} = \frac{432000}{214} = 2018.7 \text{ mm}$$

Y además, por otro lado, para evitar los pandeos localizados de la armadura de compresión:

$$(45) S_t \leq 15 \varnothing \text{ min} \leq 15 \times 12 = 180 \text{ mm}$$

Y como última limitación, trataríamos que $\varnothing_t \geq \frac{1}{4} \varnothing_{\text{max}}$, pero en este caso, la armadura transversal no se trabaja con redondos, por tanto, podemos ignorarla.

Una vez conocidas las limitaciones, reconocemos que la que más nos limita es la de 180 mm, por tanto, y para mayor facilidades constructivas, optaremos por colocar los estribos cada 150 mm como armadura transversal: 4 (L) c 150.

Ahora deberemos comprobar que en las secciones de referencia se cumplen los mínimos exigidos:

En la sección de referencia, la armadura efectivamente anclada se compone de 4 \varnothing 12 + 6 \varnothing 16, el cortante V_{cu} que es capaz de absorber el hormigón es el siguiente:

$$(46) \rho_L = A_{s1} / b \cdot d = ((4 \cdot \pi \cdot 12^2 + 6 \cdot \pi \cdot 16^2) / 4) / (500 \cdot 965) = 1658.76 / 482500 = 0.0034$$

⁵⁷ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

$$(47) \quad \gamma = 1 + \left(\frac{200}{d}\right)^{1/2} = 1 + (200/965)^{1/2} = 1.45525$$

$$(48) \quad \sigma'_{cd} = 0; \beta = 1.0; f_{cv} = f_{ck}; \gamma_c = 1.5$$

De donde:

$$(49) \quad V_{cu} = [(0.15/\gamma_c) \cdot \gamma \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{cd})^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot \beta \cdot d \cdot b =$$

$$[(0.15/1.5) \cdot 1.45525 \cdot (100 \cdot 0.0034 \cdot 35)^{1/3} + 0.15 \cdot 0] \cdot 1.965 \cdot 500 \cdot 10^{-3} =$$

$$[(0.1) \cdot 1.45525 \cdot 2.28] \cdot 482.5 = 160.3 \text{ KN}$$

Por lo que respecta al cortante V_{su} que se absorbe con los estribos mínimos, se tiene:

$$(50) \quad V_{su} = 0.9 \cdot d \cdot A_{st} \cdot f_{ya,d} / s_t = 0.9 \cdot 965 \cdot 432 / 150 = 2501.28 \text{ KN}$$

Así pues, el cortante total que absorbe la sección es:

$$(51) \quad V_u = V_{cu} + V_{su} = 160.3 + 2501.28 = 2661.58 \text{ KN}$$

En este caso, $2661.58 \text{ KN} > 606.134 \text{ KN}$ (CUMPLE)

Por último, en el caso de que la misma viga se armara con redondos de fibra de carbono, los resultados serían similares:

	529	971	1220	1911	1911	1220	971	1220
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+2Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+2Ø20	4Ø12+2Ø16	4Ø12+2Ø20
Us1	506,625	788,083333	1013,25	1688,75	1801,33333	1035,76667	675,5	1013,25
ω	0,045	0,07	0,09	0,15	0,16	0,092	0,06	0,09
μ	0,04614714	0,07414713	0,09235273	0,142475925	0,15366027	0,09133251	0,06750887	0,08795695
Md	501,356	805,556	1003,347	1547,9	1669,41	992,263	733,436	955,59
Md		333,37	710,501		833,479		303,602	
μ		0,03068493	0,06539782		0,07671729		0,02794494	
ω		0,04	0,06		0,065		0,04	
Us1		450,333333	675,5		731,791667		450,333333	
		4Ø12	6Ø12		4Ø12+2Ø16		4Ø12	
		529	793		971		529	
L (m)	7,5		10		10		10	
b x h (cm)	50 x 100		50 x 100		50 x 100		50 x 100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
f _{cd}	35		35		35		35	

Imagen 5.22. Tren de vigas de planta tercera con CFRP.

Como vemos, en este caso, la armadura pasante vuelven a ser 4 redondos del 12. Esto se debe a que la capacidad mecánica de este tipo de barras también es muy superior a las de fibra de vidrio.

Por tanto, son 529.3 KN los que componen la armadura pasante, cumpliendo los mínimos para todos los nudos evaluados.

El siguiente paso sería evaluar uno de los nudos, el más desfavorable, para estudiar la separación entre barras y comprobar que se cumplen los mínimos establecidos.

En este caso estudiaremos el tercer nudo donde se juntan $4\varnothing 20+4\varnothing 12$. Esta comprobación es:

(52) Distancia entre ejes de armadura de montaje:

$$a = \frac{500 - 2 \cdot 35}{3} = \frac{430}{3} = 143.33 \text{ mm}$$

(53) Separación entre barras:

$$s = (143.33 - (2 \cdot 12 \cdot 1.2) - (2 \cdot 20 \cdot 1.2)) = 66.53 \text{ mm}$$

En este caso hemos calculado una de las ventanas, que podría ser la lateral, para poder conformar una sección totalmente simétrica. Con esto conseguimos permitir que el vibrador entrara en la pieza sin problemas para vibrar el hormigón. Esquemáticamente el resultado sería:

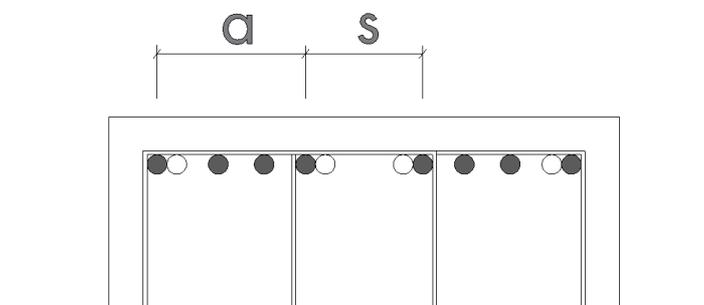


Imagen 5.23. Nudo 3, separación en ventanas.

Una vez ya tenemos calculado el armado total, debemos replantearnos las longitudes de anclaje y empalme. Como dijimos en el apartado 4.5., resolveremos el anclaje de extremo con la pieza especial conformada por acero inoxidable, y las longitudes de solape intermedias, nos serviremos de la normativa japonesa⁵⁸.

Para no realizar todos los cálculos y como consejo del profesor, nos serviremos de calcular uno de los tramos más desfavorables, y posteriormente asemejar todos los encuentros al mismo valor. Se trata de solo un tanteo, no un plano de ejecución de ferralla final.

⁵⁸ JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures" for fiber reinforcing materials, chapter 10.5.3.

$$(54) f_{bod} = 0.28 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} = 0.28 \cdot 1 \cdot \frac{35^{\frac{2}{3}}}{1.5} = 1.9973$$

$$(55) K_c = \frac{c}{\phi} + \frac{15At}{s\phi} \cdot \frac{Et}{E_0} = \frac{35}{20} + \frac{15 \cdot 314 \cdot 16}{68 \cdot 16} \cdot \frac{230000}{2.1 \cdot 10^8} = 1.75$$

Por tanto, $\alpha_1 = 0.8$

$$(56) l_d = \alpha \cdot \frac{f_d}{4 f_{bod}} \cdot \phi = 0.8 \cdot \frac{1220}{4 \cdot 1.9973} \cdot 20 = 2443.3 \text{ mm}$$

Este ejemplo podría valer para el tramo del tercer nudo. Como se ve, las longitudes de solape son mucho mayores que las normales en acero. Esto se debe a que la adherencia entre hormigón y este tipo de barras poliméricas es mucho más bajo que con el acero⁵⁹, de ahí que se precisen estas longitudes.

Una vez calculada la sección y los anclajes, procederemos al cálculo del dimensionado frente a esfuerzo cortante. Para ello, consideraremos que la carga en las vigas es uniformemente repartida. En este caso, al tratarse de la misma viga que la anterior y las piezas de estribado ser las mismas, se repetirían los cálculos y se comprobaría que efectivamente sí que cumpliría. Las limitaciones serían las mismas que las anteriores, por tanto, como armadura transversal: 4 (L) c 150.

Ahora deberemos comprobar que en las secciones de referencia se cumplen los mínimos exigidos:

En la sección de referencia, la armadura efectivamente anclada se compone de 4Ø12 + 4Ø20, el cortante V_{cu} que es capaz de absorber el hormigón es el siguiente:

$$(57) \rho_L = A_{s1} / b \cdot d = (4 \cdot \pi \cdot 12^2 + 4 \cdot \pi \cdot 20^2 / 4) / (500 \cdot 965) = 1709.03 / 482500 = 0.0035$$

$$(58) \zeta = 1 + \left(\frac{200}{d}\right)^{1/2} = 1 + (200/965)^{1/2} = 1.45525$$

$$(59) \sigma'_{cd} = 0; \beta = 1.0; f_{cv} = f_{ck}; \gamma_c = 1.5$$

De donde:

$$(60) V_{cu} = [(0.15 / \gamma_c) \cdot \zeta \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{cd})^{1/3} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot \beta \cdot d \cdot b = [(0.15 / 1.5) \cdot 1.45525 \cdot (100 \cdot 0.0035 \cdot 35)^{1/3} + 0.15 \cdot 0] \cdot 1 \cdot 965 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = [(0.1) \cdot 1.45525 \cdot 2.3] \cdot 482.5 = 161.5 \text{ KN}$$

⁵⁹ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

Por lo que respecta al cortante V_{su} que se absorbe con los estribos mínimos, se tiene:

$${}^{(61)} V_{su} = 0.9 \cdot d \cdot A_{st} \cdot f_{y\alpha,d} / s_t = 0.9 \cdot 965 \cdot 432 / 150 = 2501.28 \text{ KN}$$

Así pues, el cortante total que absorbe la sección es:

$${}^{(62)} V_u = V_{cu} + V_{su} = 161.5 + 2501.28 = 2662.78 \text{ KN}$$

En este caso, $2662.78 \text{ KN} > 606.134 \text{ KN}$ (CUMPLE)

Este ejemplo es para la viga de última planta con los tres tipos de armaduras trabajados. A modo de conclusión, y sin repetir todos los cálculos ni explicaciones, se adjuntan los tres trenes de vigas restantes con los diferentes tipos de armado:

	559	1013,7	1013,7	1818	1818	1013,7	839	1013,7
	4Ø16	4Ø16+2Ø20	4Ø16+2Ø20	8Ø20	8Ø20	4Ø16+2Ø20	6Ø16	4Ø16+2Ø20
Us1	506,625	956,958333	1013,25	1688,75	1857,625	1013,25	731,791667	1013,25
ω	0,045	0,085	0,09	0,15	0,165	0,09	0,065	0,09
μ	0,04614714	0,07414713	0,09235273	0,14247565	0,15365981	0,09133251	0,06750887	0,08795695
Md	501,356	805,556	1003,347	1547,897	1669,405	992,263	733,436	955,59
Md		333,37	710,501		833,479		303,602	
μ		0,03068493	0,06539782		0,07671729		0,02794494	
ω		0,045	0,07		0,085		0,045	
Us1		506,625	788,083333		956,958333		506,625	
		4Ø16	6Ø16		7Ø16		4Ø16	
		559,3	839		978		559,3	
L (m)	7,5		10		10		10	
b x h (cm)	50 x 100							
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.24. Tren de vigas de planta segunda con GFRP.

CURSO 2015-2016

	529 4Ø12	971 4Ø12+2Ø16	1220 4Ø12+2Ø20	1911 4Ø12+4Ø20	1911 4Ø12+4Ø20	1220 4Ø12+2Ø20	971 4Ø12+2Ø16	1220 4Ø12+2Ø20
Us1	506,625	956,958333	1013,25	1688,75	1857,625	1013,25	731,791667	1013,25
ω	0,045	0,085	0,09	0,15	0,165	0,09	0,065	0,09
μ	0,04614714	0,07414713	0,09235273	0,14247565	0,15365981	0,09133251	0,06750887	0,08795695
Md	501,356	805,556	1003,347	1547,897	1669,405	992,263	733,436	955,59
Md	333,37	710,501	833,479	303,602				
μ	0,03068493	0,06539782	0,07671729	0,02794494				
ω	0,045	0,07	0,085	0,045				
Us1	506,625	788,083333	956,958333	506,625				
	4Ø12	6Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12				
	529	793	971	529				
L (m)	7,5	10	10	10				
b x h (cm)	50x100	50x100	50x100	50x100				
b (mm)	500	500	500	500				
h (mm)	1000	1000	1000	1000				
d (mm)	965	965	965	965				
fcd	35	35	35	35				

Imagen 5.25. Tren de vigas de planta segunda con CFRP.

	559 4Ø16	1013,7 4Ø16+2Ø20	1241,36 4Ø16+3Ø20	1696,08 4Ø16+5Ø20	1696,08 4Ø16+5Ø20	1241,36 4Ø16+3Ø20	699 5Ø16	1066 6Ø16+1Ø20
Us1	506,625	956,958333	1182,125	1576,16667	1688,75	1238,41667	675,5	900,666667
ω	0,045	0,085	0,105	0,14	0,15	0,11	0,06	0,08
μ	0,04074633	0,07401918	0,10941615	0,13011525	0,14468721	0,11000874	0,06502053	0,08353789
Md	442,68	804,166	1188,729	1413,61	1571,924	1195,167	706,402	907,58
Md	366,139	676,881	783,465	340,654				
μ	0,03370114	0,06230328	0,07211377	0,03135538				
ω	0,04	0,06	0,065	0,04				
Us1	450,333333	675,5	731,791667	450,333333				
	4Ø16	5Ø16	6Ø16	4Ø16				
	559,3	699	839	559,3				
L (m)	7,5	10	10	10				
b x h (cm)	50x100	50x100	50x100	50x100				
b (mm)	500	500	500	500				
h (mm)	1000	1000	1000	1000				
d (mm)	965	965	965	965				
fcd	35	35	35	35				

Imagen 5.26. Tren de vigas de planta primera con GFRP.

CURSO 2015-2016

	522	972	1197	1648,6	1648,6	1422,36	783,74	1197
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+3Ø16	4Ø12+5Ø16	4Ø12+5Ø16	4Ø12+4Ø16	6Ø12	4Ø12+3Ø16
U _{s1}	506,625	956,958333	1182,125	1576,16667	1632,45833	1238,41667	675,5	900,666667
ó	0,045	0,085	0,105	0,14	0,145	0,11	0,06	0,08
μ	0,04074633	0,07401918	0,10941615	0,13011525	0,14468721	0,11000874	0,06502053	0,08353789
Md	442,68	804,166	1188,729	1413,61	1571,924	1195,167	706,402	907,58
Md	366,139		676,881		783,465		340,654	
μ	0,03370114		0,06230328		0,07211377		0,03135538	
ó	0,04		0,06		0,065		0,04	
U _{s1}	450,333333		675,5		731,791667		450,333333	
	4Ø12		6Ø12		6Ø12		4Ø12	
	522		783,74		783,74		522	
L (m)	7,5		10		10		10	
bxh (cm)	50x100		50x100		50x100		50x100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.27. Tren de vigas de planta primera con BFRP.

	529	971	1220	1911	1911	1220	793,25	971,62
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+2Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+2Ø20	6Ø12	4Ø12+2Ø16
U _{s1}	506,625	956,958333	1182,125	1576,16667	1688,75	1182,125	675,5	900,666667
ó	0,045	0,085	0,105	0,14	0,15	0,105	0,06	0,08
μ	0,04074633	0,07401918	0,10941615	0,13011525	0,14468721	0,11000874	0,06502053	0,08353789
Md	442,68	804,166	1188,729	1413,61	1571,924	1195,167	706,402	907,58
Md	366,139		676,881		783,465		340,654	
μ	0,03370114		0,06230328		0,07211377		0,03135538	
ó	0,04		0,06		0,065		0,04	
U _{s1}	450,333333		675,5		731,791667		450,333333	
	4Ø12		6Ø12		6Ø12		4Ø12	
	529		793		793		529	
L (m)	7,5		10		10		10	
bxh (cm)	50x100		50x100		50x100		50x100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.28. Tren de vigas de planta primera con CFRP.

CURSO 2015-2016

	559	839	1293,69	1590,65	1818	1521,04	839	839
	4Ø16	6Ø16	6Ø16+2Ø20	7Ø20	8Ø20	6Ø16+3Ø20	6Ø16	6Ø16
Us1	506,625	788,083333	1125,833333	1576,16667	1688,75	1351	788,083333	788,083333
ω	0,045	0,07	0,1	0,14	0,15	0,12	0,07	0,07
μ	0,04139073	0,07377978	0,10642802	0,1307336	0,14181992	0,11435398	0,07187464	0,07618444
Md	449,681	801,565	1156,265	1420,328	1540,773	1242,375	780,867	827,69
Md	363,469		690,465		775,08		341,253	
μ	0,03345538		0,06355361		0,07134197		0,03141052	
ω	0,04		0,06		0,07		0,04	
Us1	450,333333		675,5		788,083333		450,333333	
	4Ø16		5Ø16		6Ø16		4Ø16	
	559,3		699		839		559,3	
L (m)	7,5		10		10		10	
bxh (cm)	50x100		50x100		50x100		50x100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.29. Tren de vigas de planta baja con GFRP.

	522	972	1197	1648,6	1648,6	1422,36	783,74	972
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+3Ø16	4Ø12+5Ø16	4Ø12+5Ø16	4Ø12+4Ø16	6Ø12	4Ø12+2Ø16
Us1	506,625	788,083333	1125,833333	1576,16667	1632,458333	1351	788,083333	788,083333
ω	0,045	0,07	0,1	0,14	0,145	0,12	0,07	0,07
μ	0,04139073	0,07377978	0,10642802	0,1307336	0,14181992	0,11435398	0,07187464	0,07618444
Md	449,681	801,565	1156,265	1420,328	1540,773	1242,375	780,867	827,69
Md	363,469		690,465		775,08		341,253	
μ	0,03345538		0,06355361		0,07134197		0,03141052	
ω	0,04		0,06		0,07		0,04	
Us1	450,333333		675,5		788,083333		450,333333	
	4Ø12		6Ø12		6Ø12		4Ø12	
	522		783,74		783,74		522	
L (m)	7,5		10		10		10	
bxh (cm)	50x100		50x100		50x100		50x100	
b (mm)	500		500		500		500	
h (mm)	1000		1000		1000		1000	
d (mm)	965		965		965		965	
fcd	35		35		35		35	

Imagen 5.30. Tren de vigas de planta baja con BFRP.

CURSO 2015-2016

	529	971	1220	1911	1911	1565,565	793,25	793,25
	4Ø12	4Ø12+2Ø16	4Ø12+2Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+4Ø20	4Ø12+3Ø20	6Ø12	6Ø12
Us1	506,625	788,083333	1125,83333	1576,16667	1688,75	1351	788,083333	788,083333
ω	0,045	0,07	0,1	0,14	0,15	0,12	0,07	0,07
μ	0,04139073	0,07377978	0,10642802	0,1307336	0,14181992	0,11435398	0,07187464	0,07618444
Md	449,681	801,565	1156,265	1420,328	1540,773	1242,375	780,867	827,69
Md	363,469	690,465	690,465	775,08	775,08	775,08	341,253	341,253
μ	0,03345538	0,06355361	0,06355361	0,07134197	0,07134197	0,07134197	0,03141052	0,03141052
ω	0,04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,04	0,04
Us1	450,333333	675,5	675,5	788,083333	788,083333	788,083333	450,333333	450,333333
	4Ø12	6Ø12	6Ø12	6Ø12	6Ø12	6Ø12	4Ø12	4Ø12
	529	793	793	793	793	793	529	529
L (m)	7,5	10	10	10	10	10	10	10
b x h (cm)	50 x 100							
b (mm)	500	500	500	500	500	500	500	500
h (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
d (mm)	965	965	965	965	965	965	965	965
f _{cd}	35	35	35	35	35	35	35	35

Imagen 5.31. Tren de vigas de planta baja con CFRP.

Una vez obtenidos todos estos cálculos de cada uno de los trenes de vigas, por cuestiones de simplificado, tanto el armado de los estribos como los empalmes los asemejaremos a los valores obtenidos en la primera viga analizada. Posteriormente cabe recalcar que al haber trabajado con vigas simétricas, estos cuadros solo eran la mitad del tren de vigas.

Ahora, ya con los armados tanto de soportes como de vigas, podemos realizar una tabla de los armados obtenidos. Para ello, ya que disponemos del que se realizó en la práctica del curso de armado con acero, asemejaremos unos planos iguales, pero con los diferentes armados empleados. Para ello los adjuntaremos en el Anexo Gráfico 6.

Como posibles alternativas al armado estudiado y antes de acabar este capítulo, cabría remarcar un par de cuestiones. Por un lado, estamos trabajando con cantos de viga de 1 metro, por lo que, aunque no se ha tenido en cuenta, sería necesario colocar armadura de piel. Estas armaduras se compondrían de barras del 8 o del 10 y se colocarían en los laterales para evitar fisuraciones. En el apartado calculado para acero corrugado, el Software Architrave nos daba esta solución. En este trabajo, al salirse de la materia no se ha especificado solución, pero en caso de construcción, se debería tener en cuenta.

Otra de las alternativas para este caso de vigas sería trabajar con piezas en T. En este caso esta solución nos aportaría mucho más espacio en la parte superior de la pieza, permitiendo separar más las barras, aunque como hemos visto cumplimos en todos los casos. Al tener la fibra neutra dentro del canto más ancho podríamos considerar una pieza rectangular para los cálculos y nos ayudaría en el caso de armar la pieza.

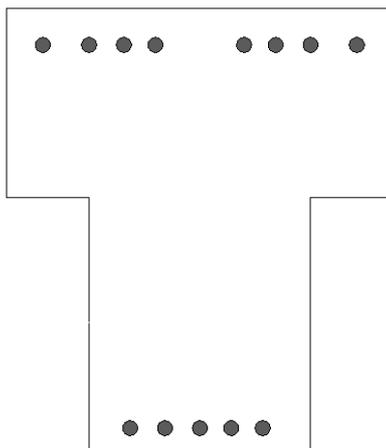


Imagen 5.32. Ejemplo de pieza en T.

Con todo esto, y como se dijo en el Capítulo anterior, se ha pretendido crear un abanico de posibilidades en el que trabajar con todos estos nuevos materiales.

5.8. FRP Armado.

Como curiosidad y a modo de referencia, en la Tesis de la profesora Ana Almerich⁶⁰, se desarrolló un soporte informático a modo de Software para la realización de comprobaciones de secciones con armadura compuesta por barras de fibra de vidrio.

Gracias a su colaboración pude conseguir una copia que ella misma modificó y adaptó a mis necesidades. Amplió el campo de resistencias de las barras para incluir las de carbono y basalto de manera que con la misma interfaz pudiera comprobar las secciones de cualquiera de los sistemas.

Esto favoreció que si con barras de acero, Architrave nos daba mucha seguridad, con este software disponía de las herramientas para asegurar las secciones trabajadas. De este modo, y como posible ampliación, comprobé un soporte y una viga, para demostrar que los cálculos se habían realizado correctamente. Para ello, a continuación adjunto las capturas de pantalla del software y los resultados obtenidos:

⁶⁰ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr, Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

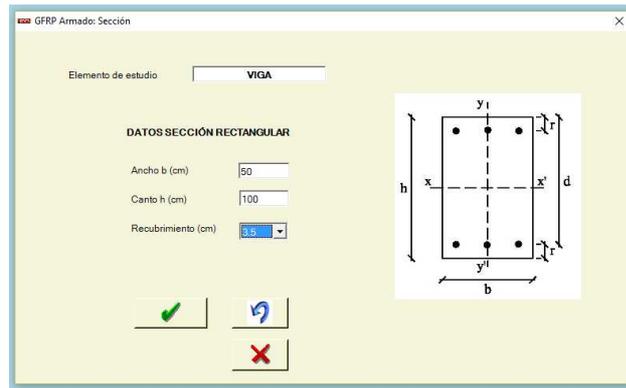


Imagen 5.33. Dimensionado de la pieza.

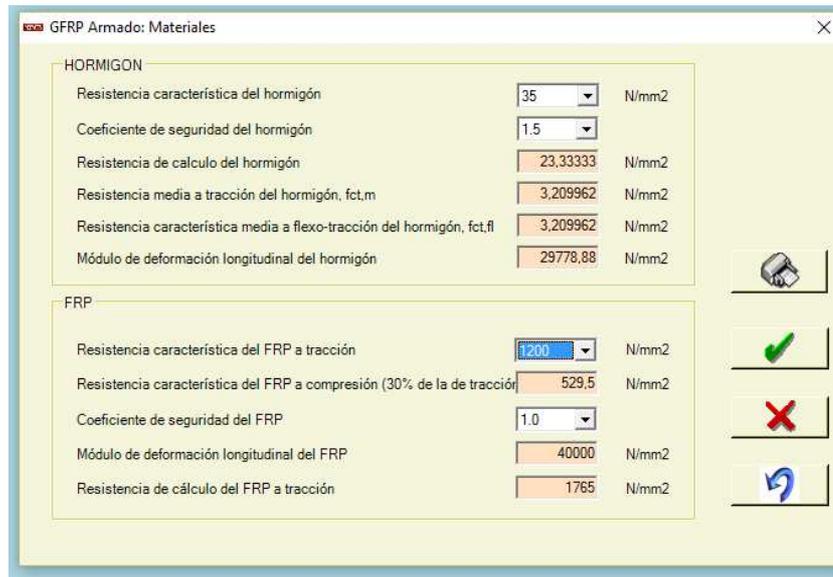


Imagen 5.34. Muestra de los materiales a emplear.

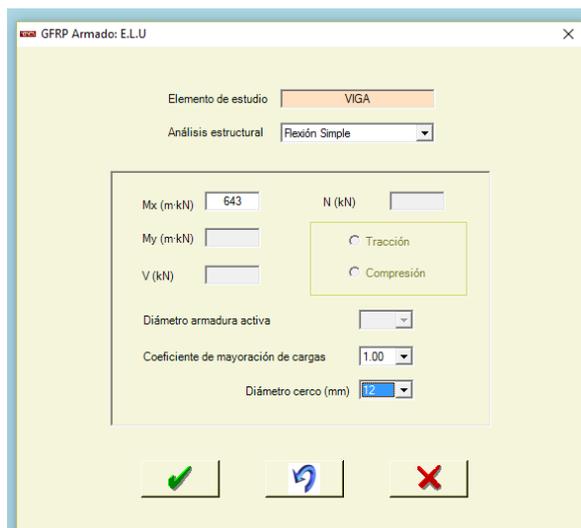


Imagen 5.35. Muestra de solicitaciones.

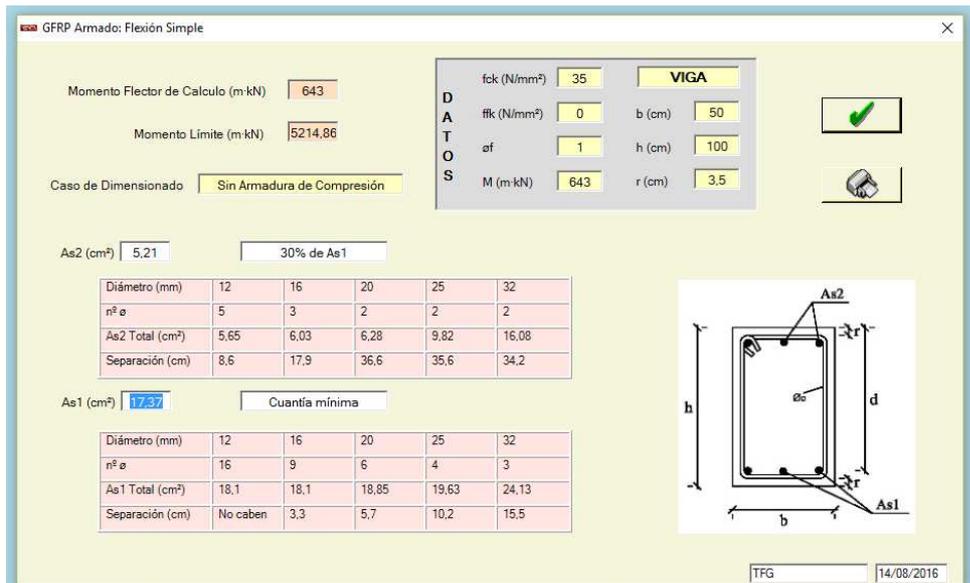


Imagen 5.36. Posibles soluciones que el software nos proporciona.

Esta comprobación se ha realizado para la primera viga de la planta tercera, en la que nosotros proyectamos con carbono, una armadura pasante de $4\phi 16$ y como refuerzo, $2\phi 20$, lo cual, como podemos ver, se aproxima bastante a los datos del software aunque los valores sean simplemente orientativos.

Como ejemplo, también se adjunta una comprobación se soporte:

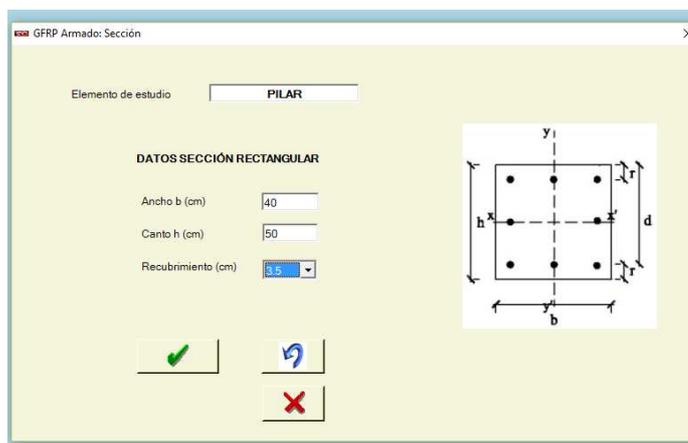


Imagen 5.37. Dimensionado de la pieza.

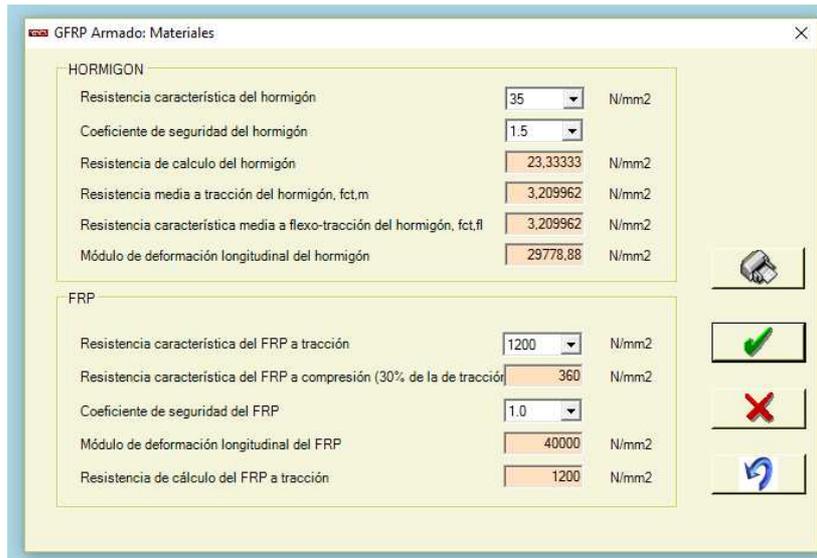
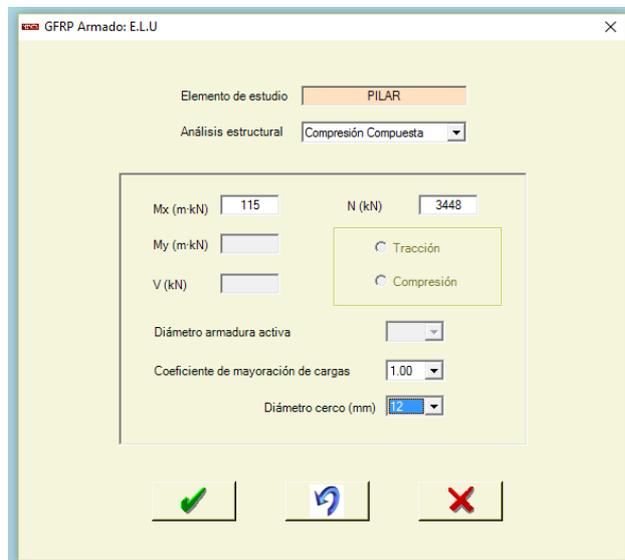


Imagen 5.38. Muestra de los materiales a emplear.



Imaaen 5.39. Muestra de solicitaciones.

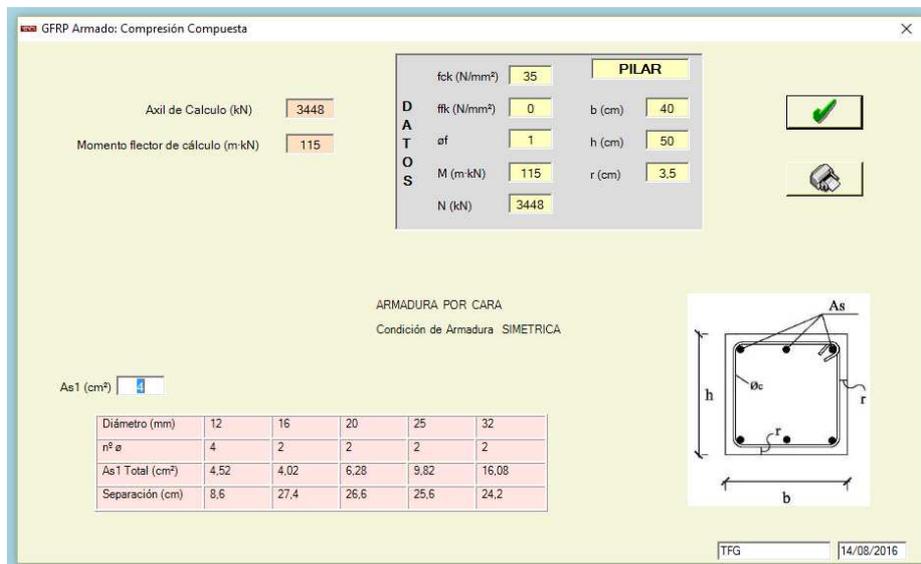


Imagen 5.40. Posibles soluciones que el software nos da.

Esta comprobación se ha realizado para el soporte de planta baja del eje de pilares del extremo izquierda, en la que nosotros proyectamos con carbono, una armadura por cara y simétrica de $4\varnothing 12$, lo cual, como podemos ver, es exactamente lo que el software nos plantea.

Por tanto, podemos concluir afirmando la utilidad del programa desarrollado por Ana Almerich en su tesis⁶¹. De este modo podríamos comprobar y aproximarnos a una solución óptima de diseño sin la necesidad de realizar tantos cálculos.

⁶¹ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr, Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

6.- COMPARATIVA ECONÓMICA

Con la finalidad de acercarnos un poco más al marco laboral actual, se ha pretendido establecer una comparativa orientativa de la diferencia de precios que puede llegar a suponer un material u otro en el armado. Para ello nos hemos servido de los precios facilitados por varias empresas para de esta manera llegar a una conclusión lo más próxima posible a la realidad. Cabe destacar que estos cálculos son bastante orientativos ya que no se calculará todo al milímetro.

Como precio del primero de los materiales, el acero corrugado, nos hemos servido del banco de precios de "Cype Ingenieros SA"⁶².

CHA011 kg Acero para hormigón.					
Acero UNE-EN 10080 B 500 S para elaboración y montaje de la ferralla en losa de cimentación.					
Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
mt07aco010g	kg	Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, suministrado en obra en barras sin elaborar, diámetros varios.	1,020	0,62	0,63
mt08var050	kg	Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro.	0,005	1,11	0,01
			Subtotal materiales:		0,64
2		Mano de obra			
mo043	h	Oficial 1ª ferrallista.	0,009	18,10	0,16
mo090	h	Ayudante ferrallista.	0,013	16,94	0,22
			Subtotal mano de obra:		0,38
3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	1,02	0,02
Coste de mantenimiento decenal: 0,02€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3):		1,04

Imagen 6.1. Tabla de precios de CYPE Ingenieros SA para acero corrugado.

El precio por KG por tanto es de 1.04 €.

Para las armaduras compuestas por fibra de vidrio (GFRP), nos hemos servido de una de las hojas facilitadas por la empresa Aslan al profesor Víctor Calvet durante la realización de su Tesis⁶³. Para definirla nos serviremos de la siguiente tabla:

Bar Diameter	List Price/ft	Unit Weight/ft
6 mm	0.33 \$	0.052
10 mm	0.47 \$	0.107
12 mm	0.68 \$	0.189
16 mm	1.10 \$	0.287
20 mm	1.45 \$	0.408
22 mm	1.76 \$	0.544
25 mm	2.46 \$	0.730

Imagen 6.2. Tabla facilitada por Aslan.

⁶²http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Cimentaciones/Hormigones__aceros_y_encofrados/Aceros/Acero_para_hormigon.html, revisada a fecha de 14/08/2016

⁶³ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

En el caso de pasar estos precios a unidades métricas y euros para poder realizar la comparativa con mayor facilidad nos quedaría:

Diámetro	Precio €/m	Unidades
6 mm	0.96 €/m	0.052
10 mm	1.38 €/m	0.107
12 mm	1.99 €/m	0.189
16 mm	3.23 €/m	0.287
20 mm	4.26 €/m	0.408
22 mm	5.17 €/m	0.544
25 mm	7.23 €/m	0.730

Imagen 6.3. Tabla facilitada por Aslan convertida a unidades de m y euros.

Para el caso de las barras de fibras de carbono (CGRP) nos hemos servido de esta misma empresa, ya que facilitaba los valores también:

Bar Diameter	List Price / ft	Unit Weight/ft
6 mm	1.40 \$	0.035
10 mm	2.85 \$	0.075
12 mm	3.82 \$	0.125
16 mm	5.76 \$	0.167
20 mm	7.7 \$	0.208

Imagen 6.4. Tabla facilitada por Aslan.

Al convertirla:

Diámetro	Precio €/m	Unidades
6 mm	2.65 €/m	0.035
10 mm	5.32€/m	0.075
12 mm	6.38 €/m	0.125
16 mm	8.37 €/m	0.167
20 mm	12.25 €/m	0.208

Imagen 6.5. Tabla facilitada por Aslan convertida a unidades de m y euros.

Para conocer el precio de las barras de fibra de basalto (BGRP), debido a que se solicitó a la compañía "Smarter Building Systems"⁶⁴ un presupuesto que nunca se obtuvo, se ha tomado una de las tablas de trabajo final de Paula Vallés⁶⁵. Aquí encontramos la siguiente tabla:

⁶⁴ <http://smarter-building-systems.com/> Consultada el 11/07/2016.

⁶⁵ Trabajo Final de Máster sobre "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación" la autora: Paula Vallés Pla; y la tutora académica: Montse Haro Rodríguez; publicada en Valencia, 12 de septiembre de 2004.

Diámetro	Precio €/Kg	Kg/m	Precio €/m
8 mm	2.62 €/Kg	0.25	0.655
10 mm	3.275 €/Kg	0.3125	1.023
12 mm	3.93 €/Kg	0.375	1.47
16 mm	5.24 €/Kg	0.5	2.62

Imagen 6.6. Tabla extraída del Trabajo Final de Paula Vallés.

También hay que reseñar que las piezas de estribado, al ser de fibra de carbono, supondrán un incremento del precio considerable respecto al estribado con redondos de acero, el cual, deberemos considerar.

Como dijimos en el apartado 4.5, estas piezas se habían tomado del catálogo de Sika, el cual nos facilitó que el precio de estas piezas era de entorno a los 2 € por pieza, suponiendo un mínimo de pedidos y según medidas. Para este trabajo, ya que el presupuesto no fue muy preciso, nos serviremos de la referencia de 2 € por cada una de las piezas empleadas para realizar la prueba.

Por último cabe destacar las piezas que empleamos para el anclaje en nudos extremos. Como dijimos en el apartado 4.6, se emplearían unas piezas armadas y conformadas con acero inoxidable. Por tanto, precisaremos conocer el precio de este material. Como dato facilitado por el tutor y recomendación, se tomará el valor de 4.1 € por Kg. Tomando como referencia una pieza estándar, calcularemos que cada una de estas piezas rondará los 8.3 €, por tanto ese dato será el dato que tomaremos de referencia.

Ahora que ya conocemos todos los valores, deberemos pasar a tomar todas las piezas que disponemos y comparar las unidades. Para ello nos serviremos de unas Tablas Excel que se adjuntan en Anexo Gráfico número 7. A modo de conclusión, los precios aproximados para el pórtico 3 serían:

Material	Precio total
GFRP	23.658 €
CFRP	50.959,70 €
BFRP	20.405 €
Acero corrugado	15.316 €

Imagen 6.7. Tabla de conclusión de precios.

Como podemos ver, el material que sigue siendo más económico es el acero, en contraposición a los nuevos sistemas utilizados. En este punto es donde debemos colocar en la balanza los posibles riesgos y gastos de reparación que el acero nos pueda generar. Los problemas por oxidación en armaduras son complicados de detectar y muy costosos de reparar. Por tanto será con estos datos donde deberemos

evaluar los riesgos, ventajas e inconvenientes de emplear cada uno de estos materiales y sus consecuencias, tanto económicas como funcionamiento futuro.

Un punto a remarcar en este caso es que las piezas que se han empleado son de gran tamaño, las vigas llegan a alcanzar los 10 metros. En el caso de obras pequeñas, como viviendas unifamiliares, el armado a utilizar sería mucho menor y se realizaría con barras de diámetros muy pequeños ya que sus capacidades mecánicas son altas. El precio aumenta conforme aumenta el diámetro de manera considerable, por tanto, si se trabajara con piezas menores, el precio podría llegar a ser menor que el acero corrugado.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este último capítulo, se establecen las conclusiones a las que he llegado una vez realizado la comparativa anteriormente detallada en este proyecto.

Al mismo tiempo, se definen las futuras líneas de investigación que pueden llevarse a cabo a partir de este estudio experimental.

7.1. Conclusiones.

Se puede sacar la conclusión de que los redondos GFRP, CFRP y BFRP como materiales innovadores tienen unas propiedades mecánicas muy exclusivas mejores que el acero.

En cuanto al precio, los resultados obtenidos han sido bastante dispares. Además de que en este trabajo nos vemos influenciados por el haber utilizado un abanico de soluciones variado, como el cerchado o el doblado en extremos, en la realidad y con un estudio más detallado, se podrían haber logrado resultados mucho más precisos. Aún así se puede ver como las barras de fibra de vidrio y de basalto son bastante económicas aunque no llegan al valor del acero. El carbono si que llega a multiplicar por 4 el presupuesto. En cambio y como ya se ha comentado, estos valores deben ser analizados en el sentido de que posteriormente el presupuesto en reparaciones puede ser mínimo frente a tener daños por oxidación. En este caso, las reparaciones pueden ser muy costosas.

Además, un punto positivo de estas barras con materiales innovadores es su bajo peso, por lo que el transporte y el trabajo en obra puede ser mucho más cómodo y ágil, reduciendo costes y tiempo de obra.

En cambio, se trata de materiales innovadores y todavía en vías de desarrollo. En este trabajo se han planteado soluciones hipotéticas con la finalidad de no doblar barras y de evitar el empleo de acero corrugado. Aún así, todavía queda un largo recorrido para plantear soluciones más certeras mediante ensayos.

La mayoría de datos se han basado en trabajos anteriormente realizados como la Tesis de Ana Almerich⁶⁶ o de Víctor Calvet⁶⁷, o el Trabajo Final de Paula Vallés⁶⁸, y por tanto todos los datos de este trabajo son de alguna manera valores aproximados.

⁶⁶ Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr. Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.

⁶⁷ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

⁶⁸ Trabajo Final de Máster sobre "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación" la autora: Paula Vallés Pla; y la tutora académica: Montse Haro Rodríguez; publicada en Valencia, 12 de septiembre de 2004.

Aún así, todavía falta bastante para poder tener cálculos mucho más certeros. Esto se podría facilitar con una normativa española que recoja de alguna manera un proceso de cálculo certero y preciso. Aquí se han seguido fórmulas de diferentes normativas, como la ACI, la norma japonesa o la italiana.

Por último, destacar que este sistema posee ya una herramienta bastante potente que ha sido desarrollada en la tesis de Ana Almerich, GFRP Armado, que si se puede adaptar y mejorar, podría facilitar y agilizar bastante los cálculos, y permitiría estandarizar los cálculos y facilitar procesos.

Como conclusión final se podría afirmar que este tipo de materiales puede ser muy beneficioso en casos de edificios que puedan tener un mayor presupuesto a favor de evitar grandes reparaciones posteriormente. Y además, se trataría de proyectos en lugares donde la oxidación pueda suponer un grave problema posteriormente. Además, uno de los puntos a favor sería que lo mejor sería trabajar con piezas pequeñas en vez de con piezas grandes como en este caso. El precio de las barras aumenta mucho con el diámetro, y si no se emplean grandes diámetros, el precio de estos materiales podría incluso llegar a ser inferior que el acero, haciendo de esta solución, una vía favorable. El inconveniente sigue siendo que en España no se ha desarrollado esta industria en exceso y se debería recurrir a empresas extranjeras, aumentando por tanto el precio de transporte. De esta manera, si se consiguiera potenciar estos materiales, se podrían atraer empresas y conseguir precios competitivos que pudieran rivalizar con el acero. Además se propiciaría conseguir una normativa que permitiera realizar todos estos cálculos.

7.2. Futuras líneas de investigación.

Tras la realización de este análisis, hemos conseguido muchos datos y resultados sobre los diferentes tipos de barras empleadas. Propiedades, características, ventajas y desventajas, pero aun así, se han dejado bastantes temas libres para futuras líneas de investigación.

·Realizar ensayos y estudiar las posibles soluciones en el cercado de las piezas. En este trabajo se ha optado por la solución de perfiles en L, pero en el mercado es probable que dentro de poco se encuentren soluciones de barras dobladas más ventajosas que este método.

·Realizar ensayos y estudiar la solución de extremo de vano como método para evitar el doblado de barras. Debe comprobarse si esta solución es óptima o si se pueden encontrar sistemas que permitan el doblado de las barras.

·Revisar y potenciar la herramienta GFRP Aramdo que ya ha sido modificada y tratada en este trabajo cuya autora es Ana Almerich para su tesis.

·Estudio detallado de presupuestos y rastreo en el mercado español de empresas que pueden ofrecer estos servicios y facilitar precios. Los presupuestos empleados en este trabajo son la mayoría de empresas americanas y han sido facilitados por Víctor Calvet⁶⁹, derivado de su tesis.

·Estructurar un sistema o normativa española que permita trabajar y facilitar los cálculos y sistemas con estos materiales innovadores.

·Por último, estudiar y ensayar este tipo de soluciones y armados, e ir más allá de cálculos y teorías, para poder determinar y trabajar con datos verídicos.

⁶⁹ Tesis Doctoral sobre " Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CT : construcción 3.

FRP: Fiber Reinforced Polymer.

BFRP: Basalt Fiber Reinforced Polymer.

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer.

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer.

I: Intensidad.

t: tiempo.

pH: Potencial de Hidrogeniones.

H.R. : Humedad Relativa.

Cl⁻: Iones cloruro.

PIB: Producto Interior Bruto.

HA: Hormigón Armado.

SD: Barra soldable de alta ductilidad.

EHE: Instrucción Española del Hormigón Estructural.

B x H: Base por canto (dimensiones).

DB-SE-AE: Documento Básico-Seguridad Estructural- Acciones en la Edificación.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

KN/m²: KiloNewtons por metro cuadrado.

μ: Coeficiente de forma de la cubierta.

q_n: valor de la carga.

ELU: Estados Límites Últimos.

ELS: Estados Límites de Servicio.

g/cm³ : gramos por centímetro cúbico.

°C: grados centígrados.

PAN: poliacrilonitrilo.

DMSO: dimetil-sulfóxido.

DMAC: dimetilacetamida.

MSDS: dimetilformamida.

US\$: United States Dollars.

RTM: Método por transferencia de resina.

RTI: Método por infusión.

ACI: American Concrete Institute.

GPa: GigaPascales.

MPa: MegaPascales.

Ø: número de redondos / diámetro

ETSAV: Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de València.

UPV: Universitat Politècnica de València.

ÍNDICE DE IMÁGENES

- Imagen 1.1. Protones, neutrones y electrones.
- Imagen 1.2. Fase de Plasma.
- Imagen 1.3. Descripción del arco eléctrico.
- Imagen 1.4. Imagen de la construcción del tranvía de Granada, tramo enterrado.
- Imagen 2.1. Vistas interior y exterior del edificio ilustrado.
- Imagen 2.2. Capturas de pantalla del software y diseño empleado.
- Imagen 2.3. Capturas de pantalla del software y diseño empleado.
- Imagen 2.4. Capturas de pantalla del software y diseño empleado.
- Imagen 2.5. Capturas de pantalla del Software y solicitudes obtenidas.
- Imagen 2.6. Capturas de pantalla del Software y solicitudes obtenidas.
- Imagen 2.7. Capturas de pantalla del Software y solicitudes obtenidas.
- Imagen 3.1. Puente sobre el tren. Lleida.
- Imagen 3.2. Propiedades mecánicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales.
- Imagen 3.3. Propiedades físicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales.
- Imagen 3.4. Tabla empleada de resistencia a tracción de las BFRP bars.
- Imagen 3.5. Propiedades de los laminados en función del tipo de fibra empleada.
- Imagen 3.6. Propiedades de los tejidos.
- Imagen 3.7. Tabla adaptada de la resistencia de las Barras de Fibra de Carbono.
- Imagen 3.8. Coeficientes de Expansión Térmica, Longitudinal y Transversal.
- Imagen 3.9. Ventajas y desventajas de los refuerzos FRP.
- Imagen 3.10. Tabla de capacidades de barras GFRP a Tracción.

- Imagen 3.11. Tabla de capacidades de barras GFRP a Compresión.
- Imagen 4.1. Recreación tridimensional de las piezas empleadas como cercos.
- Imagen 4.2. Posibilidad de anclaje 1, perfil transversal.
- Imagen 4.3. Posibilidad de anclaje 2, barra transversal.
- Imagen 4.4. Posibilidad de anclaje 3, discos de anclaje.
- Imagen 4.5. Anclaje del tipo Goujon-cret.
- Imagen 4.6. Anclaje patentado por Plaka Spain
- Imagen 4.7. Anclaje tipo con pieza soldada y resina.
- Imagen 5.1. Esquema del pórtico 3 a analizar.
- Imagen 5.2. Cuadro soporte extremo izquierda con GFRP.
- Imagen 5.3. Cuadro soporte extremo izquierda con BFRP.
- Imagen 5.4. Cuadro soporte extremo izquierda con CFRP.
- Imagen 5.5. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con GFRP.
- Imagen 5.6. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con BFRP.
- Imagen 5.7. Cuadro soporte extremo izquierda 2 con CFRP.
- Imagen 5.8. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con GFRP.
- Imagen 5.9. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con BFRP.
- Imagen 5.10. Cuadro soporte extremo izquierda 3 con CFRP.
- Imagen 5.11. Cuadro soporte extremo izquierda 4 con GFRP.
- Imagen 5.12. Cuadro soporte extremo izquierda 4 con BFRP.
- Imagen 5.13. Cuadro soporte extremo izquierda 4 con CFRP.
- Imagen 5.14. Cuadro soporte central con GFRP.
- Imagen 5.15. Cuadro soporte central con BFRP.
- Imagen 5.16. Cuadro soporte central con CFRP.
- Imagen 5.17. Tren de vigas de planta tercera con GFRP.

- Imagen 5.18. Esquema de nudo, separación de ventanas.
- Imagen 5.19. Esquema de estribado.
- Imagen 5.20. Tren de vigas de planta tercera con BFRP.
- Imagen 5.21. Nudo 3, separación entre ventanas.
- Imagen 5.22. Tren de vigas de planta tercera con CFRP.
- Imagen 5.23. Nudo 3, separación entre ventanas.
- Imagen 5.24. Tren de vigas de planta segunda con GFRP.
- Imagen 5.25. Tren de vigas de planta segunda con CFRP.
- Imagen 5.26. Tren de vigas de planta primera con GFRP.
- Imagen 5.27. Tren de vigas de planta primera con BFRP.
- Imagen 5.28. Tren de vigas de planta primera con CFRP.
- Imagen 5.29. Tren de vigas de planta baja con GFRP.
- Imagen 5.30. Tren de vigas de planta baja con BFRP.
- Imagen 5.31. Tren de vigas de planta baja con CFRP.
- Imagen 5.32. Ejemplo de pieza de sección en T.
- Imagen 5.33. Dimensionado de la pieza.
- Imagen 5.34. Muestra de los materiales a emplear.
- Imagen 5.35. Muestra de solicitaciones.
- Imagen 5.36. Posibles soluciones que el software nos proporciona.
- Imagen 5.37. Dimensionado de la pieza.
- Imagen 5.38. Muestra de los materiales a emplear.
- Imagen 5.39. Muestra de las solicitaciones.
- Imagen 5.40. Posibles soluciones que el software nos proporciona.
- Imagen 6.1. Tabla de precios de CYPE Ingenieros SA para acero corrugado.
- Imagen 6.2. Tabla de precios Aslan.

- Imagen 6.3. Tabla facilitada por Aslan convertida a unidades m y euros.
- Imagen 6.4. Tabla de precios Aslan.
- Imagen 6.5. Tabla de precios Aslan convertida a unidades m y euros.
- Imagen 6.6. Tabla de precios extraída del Trabajo de Paula Vallés.
- Imagen 6.7. Tabla de conclusión de precios.
- Imagen A1.1. Apuntes de CT3. Riesgo de corrosión según posición.
- Imagen A1.2. Tabla de ambientes según clase de hormigón.
- Imagen A1.3. Esquema de la corrosión de las armaduras.
- Imagen A1.4. Diagrama de Pourbaix.
- Imagen A1.5. Riesgo de corrosión de la barra de refuerzo con relación a los rangos de concentraciones críticas de iones cloruros y solubles.
- Imagen A1.6. Relaciones agua/cemento y resistencias mínimas recomendadas para las diferentes zonas de exposición.
- Imagen A1.7. Recubrimientos recomendados.
- Imagen A1.8. Valores típicos de la velocidad de corrosión de aceros estructurales en ambientes marítimos.
- Imagen A2.1. Tabla 7 de recubrimientos mínimos EHE-08.
- Imagen A2.2. Tabla del Departamento de mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras.
- Imagen A2.3. Tabla C.5. DB-SE-AE.
- Imagen A2.4. Tabla F.4. Catálogo de los elementos constructivos del CTE.
- Imagen A2.5. Tabla C.2. DB-SE-AE.
- Imagen A2.6. Tabla P.1. Catálogo de elementos constructivos del CTE.
- Imagen A2.7. Tabla 3.1. DB-SE-AE.
- Imagen A2.8. Localización de Trondheim.
- Imagen A2.9. Mapa de Nieves de Noruega.
- Imagen A3.1. Tabla de las principales rocas ígneas volcánicas.

- Imagen A3.2. Resumen de la formación de las rocas ígneas en función del tipo de magma.
- Imagen A3.3. Composición aproximada de las principales rocas ígneas volcánicas.
- Imagen A3.4. Proceso de fabricación de las barras de fibra de basalto.
- Imagen A3.5. Proceso de fabricación de las barras de fibra de basalto.
- Imagen A3.6. Propiedades físicas y mecánicas de las resinas comerciales.
- Imagen A3.7. Fibra de carbono.
- Imagen A3.8. Diseño patentado de flujo de Despatch Industries.
- Imagen A3.9. Representación simplificada de la etapa de carbonización.
- Imagen A3.10. Filamentos de fibra de carbono.
- Imagen A3.11. Propiedades físicas y mecánicas de las fibras de vidrio comerciales.
- Imagen A3.12. Propiedades físicas y mecánicas de las resinas comerciales.
- Imagen A3.13. Ejemplo de las configuraciones de los refuerzos de FRP.

FÓRMULAS

- (1) Cálculo de la Inercia de una de las piezas de cercado.
- (2) Resistencia de una de las piezas de cercado.
- (3) Cálculo de la resistencia a cortante de 4 piezas en cercado.
- (4) Fórmula para el cálculo de la longitud de empalme de la norma ACI, y su posterior desarrollo en las fórmulas 5-8.
- (9) Fórmula para el cálculo de la longitud de empalme de la normativa Japonesa.JSCE Standard Specification for Design and COstruction of Concrete Structures for fiber reinforcing materials. Desarrollo en las fórmulas 10-12.
- (13) Limitación mecánica
- (14) Limitación mecánica.
- (15) Distancia entre ejes de armadura.
- (16) Separación entre barras.
- (17) Fórmula longitud de solape. (Desarrollo en fórmulas 18 y 19).
- (20) Cargas de la pieza.
- (21) Cortante 1
- (22) Cortante 2
- (23) Cortante 1
- (24) Cortante 2
- (25) Tensión de compresión en la biela de hormigón.
- (26) Comparación de tensiones.
- (27) Límite de separación de estribos.
- (28) Límite de separación de estribos.
- (29) Límite de separación de estribos.

- (30) Límite de separación de estribos.
- (31) Desarrollo de la absorción del hormigón a tracción (Desarrollo en fórmulas 32-34).
- (35) Cortante absorbido por los estribos.
- (36) Suma total de la resistencia a cortante de estribos y hormigón.
- (37) Distancia entre ejes de armadura de montaje.
- (38) Separación entre barras.
- (39) Longitud de anclaje según normativa japonesa (Desarrollo en fórmulas 40 y 41).
- (42) Límite de separación de estribos.
- (43) Límite de separación de estribos.
- (44) Límite de separación de estribos.
- (45) Límite de separación de estribos.
- (46) Cortante capaz de absorber el hormigón (Desarrollo en fórmulas 47-49).
- (50) Cortante capaz de absorberse con los estribos.
- (51) Suma total de la resistencia a cortante de estribos y hormigón.
- (52) Distancia entre ejes de armadura de montaje.
- (53) Separación entre barras.
- (54) Longitud de anclaje según normativa japonesa (Desarrollo en fórmulas 55 y 56).
- (57) Cortante capaz de absorber el hormigón (Desarrollo en fórmulas 58-60).
- (61) Cortante capaz de absorberse con los estribos.
- (62) Suma total de la resistencia a cortante de estribos y hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

- Apuntes Construcción 3. Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Manuel Octavio Valcuende. Curso 2015/2016. ETSAV. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de València. UPV. Universitat Politècnica de València.
- Libro "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado", ECU editorial club universitario, AAVV: Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.
- Apuntes Ingeniería Química de la Universidad de Alicante.
- Libros informativos de la empresa Galvanizadora Valenciana "Galesa" y su página web: <http://www.galesa.com/>
- Diario Online "Expansión 20", artículo sobre el "boom" inmobiliario en España, publicado por L. Ramírez, Madrid.
- Apuntes de clase, IES Machado, FP.
- Tesis "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de Fibra de Carbono en su comportamiento Adherente con el Hormigón", Dr. Víctor Calvet Rodríguez. Directores, Dr. Javier Benlloch Marco y Dr. Manuel Valcuende Payá. Valencia, Febrero 2014.
- Tablas de David Gallardo Llopis para la asignatura de Estructuras 2, Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y la Teoría de las Estructuras, ETSAV, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de València, UPV, Universitat Politècnica de València.
- Catálogo de elementos constructivos del CTE.
- Eurocódigo EN 1991-1-3:2003
- Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con redondos de fibra de Vidrio GFRP", Ana Isabel Almerich Chuliá, Departamento Mecánica de los Suelos y los Medios Continuos, ETSAV, UPV, Valencia, 2010.
- Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz polioléfinica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal
Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla;
publicada en Valladolid, Julio 2012

- Blog de "Los materiales en la arquitectura":
<http://eauclmmateriales.blogspot.com.es/2012/06/2-el-basalto.html> publicado el 4/06/12 y visitado el 09/07/14
- Catálogo informativo de la empresa suministradora de las barras de basalto "Thermalguard Technology, LLC"
- Trabajo Final de Máster sobre "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación" la autora: Paula Vallés Pla; y la tutora académica: Montse Haro Rodríguez; publicada en Valencia, 12 de septiembre de 2004.
- Página de Ingeniería Civil y medio ambiente "Milliarium".
(http://www.miliarium.com/prontuario/tablas/normasmv/tabla_2-1.asp)
- ACI 440.6M-08. "Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement". ACI Standard. Reported by ACI Committee 440.
- Tesis Doctoral "Diseño según Estados Límites, de Estructuras de Hormigón Armado con Redondos de Fibra de Vidrio GFRP", de autora: Ana Isabel Almerich Chuliá; y tutor: Dr. Pedro E. Martín Concepción, publicada en Valencia en 2010.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Título: Hormigón Armado; Autores: Pedro Jiménez Montoya, Álvaro García Meseguer, Francisco Morán Cabré, Juan Carlos Arroyo Portero, Gustavo Gili, Edición 15ª. Tablas y ábacos.
- JSCE Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures for fiber reinforcing materials.
- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Structure di Calcestruzzo Armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato, publicado en Roma CNR 18 Giugno 2007.
- <http://www.edingaps.com/productos/goujon-cret> Página de encuentros y soluciones constructivas Edingaps.
- Publicación "Influence of moderate temperatures on the bond between carbón fibre reinforced polymer bars (CFRP) and concrete", cuyos autores: V. Calvet, M. Valcuende, J. Benlloch, J. Cánocves, CSA, ETSAV, UPV. Publicado en "Construction and Building Materials", 94(2015) 589-604.