# La fibra de carbono:
## Más allá del refuerzo estructural

**Adrià Rosell Sáenz de Villaverde**

Trabajo de Fin de Grado. GArqEtsaB (Plan 2014)
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Ambito_**Tecnología**
Director: Guma Esteve, Ramon
Presidente Tribunal_Alonso Montolío, Carlos
Miembros Tribunal_ Marmolejo Duarte, Carlos Ramiro; Marti Casanovas, Miquel

Mayo de 2021

# Resumen

La fibra de carbono es un material muy capaz para la arquitectura y la construcción, por sus capacidades mecánicas y su ligereza. Actualmente su uso queda reducido mayoritariamente al refuerzo estructural. Sin embargo, poco a poco la industria y algunos equipos de investigación están desarrollando nuevos productos y técnicas para que en un futuro no muy lejano se generalice el uso de este material.

Este trabajo analiza en primer lugar las propiedades y el proceso de obtención del material, en segundo lugar, hace una revisión del uso actual de la fibra de carbono y se centra en la búsqueda de los productos y las nuevas técnicas basadas en este material y, por último, se realiza un estudio comparativo de diferentes elementos de madera con elementos estructurales composite de madera y fibra de carbono, sometidos a las mismas condiciones.

Los resultados han mostrado que no es necesario añadir una gran cantidad de fibra de carbono para conseguir resultados satisfactorios. Añadiendo solamente una lámina de 1,2 mm al elemento es posible reducir un 25% la deformación respecto a una viga del mismo canto y conseguir las mismas capacidades resistentes mecánicas que otra viga de madera con un canto de 4 cm mayor. Con un peso un 8% menor y por un precio similar.

Una vez realizado el comparativo y la parte de estudio de los productos que se están desarrollando, se ha observado y demostrado que la fibra de carbono puede ser un gran avance para realizar, no solamente estructuras de madera más capaces, sino que puede aportar nuevas posibilidades al campo de la arquitectura y la construcción.

# Resum

La fibra de carboni és un material molt capaç per a l'arquitectura i la construcció, per les seves capacitats mecàniques i la seva lleugeresa. Actualment el seu ús queda reduït majoritàriament al reforç estructural. No obstant això, a poc a poc la indústria i alguns equips de recerca estan desenvolupant nous productes i tècniques perquè en un futur no gaire llunyà es generalitzi l'ús d'aquest material en l'arquitectura i la construcció.

Aquest treball, analitza en primer lloc les propietats i el procés d'obtenció del material. En segon lloc, fa una revisió de l'ús actual de la fibra actual i se centra a buscar els productes i les noves tècniques basades en aquest material i, per últim es fa un estudi comparatiu de diferents elements estructurals de fusta amb elements estructurals composite de fusta i fibra de carboni, sotmesos a les mateixes condicions.

Els resultats han mostrat que no és necessari afegir una gran quantitat de fibra de carboni per aconseguir resultats satisfactoris. Afegint únicament una làmina d'1,2 mm a l'element és possible reduir un 25% la deformació respecte a una biga del mateix cantell i assolir les mateixes capacitats resistents mecàniques que una biga de fusta amb un cantell 4 cm major. Amb un pes un 8% menor i per un preu similar.

Una vegada realitzat el comparatiu dels elements i la part d'estudi de productes, s'ha observat i demostrat que la fibra de carboni pot ser un gran avenç per a realitzar no només estructures de fusta amb més capacitat sinó que pot aportar noves possibilitats al camp de l'arquitectura i la construcció.

# Abstract

Carbon fiber is a very capable material for architecture and construction due to its mechanical capabilities and lightness. Currently its use is largely reduced to structural reinforcement. However, the industry and some research teams are developing new products and techniques so that the use of this material becomes general in the not too distant future.

This work first analyses the properties and process of obtaining the material. Secondly, it makes a review of the current use of the current fibre and focuses on looking for products and new techniques based on this material and, finally, a comparative study of different structural elements of wood with structural elements of wood and carbon fibre, subject to the same conditions.

The results have shown that it is not necessary to add a large amount of carbon fiber to achieve satisfactory results. By adding only a 1.2 mm sheet to the element it is possible to reduce the deformation by 25% compared to a beam of the same edge and achieve the same mechanically resistant capacities as another wooden beam with a 4 cm larger edge. With a weight of 8% lower and for a similar price.

Once the comparative elements and the product study part have been made, it has been noted and demonstrated that carbon fiber can be a major advance to not only make wood structures with more capacity, but can also bring new possibilities to the field of architecture and construction.

## Agradecimientos

En primer lugar agradecer al tutor Ramon Guma por aconsejarme y guiarme a redactar este trabajo y a todos aquellos profesores que me han formado durante mis estudios.

A mi familia por darme la oportunidad de estudiar y apoyarme en todos los buenos y malos momentos durante la carrera y la vida. Y a mis amigos que han seguido conmigo este largo y bonito camino.

A todos ellos, muchas gracias.

# Índice

Resumen ..... I
Resum ..... II
Abstract ..... III
Agradecimientos ..... IV
Motivaciones y objetivos ..... 1
1. La fibra de carbono ..... 2
1.1 El material ..... 2
1.1.1 El proceso de obtención ..... 3
1.1.2 El reciclaje y la sostenibilidad ..... 6
1.2 Las propiedades ..... 7
1.2.1 Propiedades mecánicas ..... 7
1.2.2 El concepto lightweighting ..... 8
1.2.3 Capacidad de resistencia al calor ..... 8
1.2.4 Precio ..... 8
2. La actualidad de la fibra de carbono fuera de la construcción ..... 9
2.1 La automoción ..... 9
2.2 La industria aeronáutica y aeroespacial ..... 10
2.3 La industria naval ..... 11
2.4 Otras industrias ..... 12
3. Arquitectura y fibra de carbono ..... 13
3.1 Uso actual mayoritario. El refuerzo estructural ..... 13
3.1.1 Aplicación ..... 13
3.1.2 Limitaciones ..... 14
3.1.3 Materiales ..... 14
3.1.4 Criterios de diseño ..... 15
3.2 Otros usos ..... 15
3.2.1 Los perfiles pultrusionados ..... 15
3.2.2 Estructuras ligeras ..... 17
3.2.3 Las estructuras composite ..... 19
3.2.4 Módulos prefabricados ..... 22
3.2.5 Otros elementos ..... 22
4. Comparación del comportamiento de elementos estructurales de madera con elementos estructurales composite ..... 23
4.1 Metodología ..... 23
4.1.1 Software utilizado – Ram Series ..... 23
4.2 Caso de estudio ..... 25

4.2.1 Metodología ..... 25
4.2.2 Resultados ..... 26
4.2.3 Conclusiones ..... 29
4.3 Comparación de una viga laminar de madera con vigas laminares composite ..... 30
4.3.1 Introducción ..... 30
4.3.2 Elementos y metodología ..... 30
4.3.3 Resultados ..... 31
4.3.4 Análisis de costes ..... 35
4.3.5 Relación Costes-Propiedades mecánicas ..... 35
4.3.6 Extensión a suelos ..... 35
4.4 Comparación del comportamiento de un pilar homogéneo de madera con pilares composite ..... 36
4.4.1 Introducción ..... 36
4.4.2 Teoría y metodología ..... 36
4.4.3 Resultados ..... 38
4.4.4 Modelos con carga axil excéntrica ..... 39
Conclusiones ..... 42
Bibliografía ..... 44
Índice de figuras ..... 46
Índice de tablas ..... 48
Anexos a la memoria ..... 49
An. 1 Software utilizado – Ram Series ..... 49
An. 1.1 Definición de los elementos ..... 49
An. 1.2 Cálculo del elemento y extracción de los resultados ..... 51
An. 2 Definición de elementos ..... 53
An. 2.1 Vigas ..... 53
An. 2.2 Pilares ..... 54
An. 3 Resultados ..... 55
An. 3.1 Vigas ..... 55
An. 3.2 Pilares ..... 58

## Motivaciones y objetivos

A lo largo de mis estudios he ido desarrollando un cierto interés por las nuevas tecnologías y técnicas, tanto en el ámbito de la arquitectura como en otros ámbitos. En un punto de la carrera, mientras cursaba la asignatura de Construcción III y los cursos de Proyectos V y VI, asistí a una serie de charlas de carácter técnico que fueron el punto de partida para que este interés se volviera un tema importante para mí. En estos cursos aprendí a combinar arquitectura y construcción, cosa que hasta ese momento no había ocurrido en la carrera. A partir de ese momento, he intentado en todos los trabajos realizados, pensar desde el primer momento en como quiero que sea el edificio y como quiero que se construya.

Con estas premisas buscaba un tema que pudiera relacionar la construcción con las nuevas tecnologías y materiales. Era conocedor del uso de la fibra de carbono como refuerzo estructural, pero me pregunté que más era capaz de hacer este material, que en otras industrias ya se está generalizando, como en la del automóvil o la aeronáutica. Por estos motivos he decidido realizar este tema.

La fibra de carbono está en fase de desarrollo en el mundo de la arquitectura y la construcción. Es cierto que se está utilizando para refuerzos estructurales, pero por sus capacidades puede llegar a ser un claro substituto del acero. A pesar de tener actualmente un precio más elevado que los materiales usuales la tendencia es que se reduzca a lo largo de los años venideros.

Con este trabajo quiero, en primer lugar entender el material, qué hace que sea tan caro, su proceso de fabricación y sus propiedades; en segundo lugar conocer el uso que tiene actualmente la fibra de carbono en otras industrias de manera muy general y en tercer lugar, y el relacionado con la arquitectura y el punto más importante del trabajo, se basará en un primer apartado donde se expondrán diferentes estudios que se han realizado y se están realizando con el material en la actualidad y un segundo apartado donde se hará la comparación de comportamiento entre una serie de elementos estructurales de madera convencionales con elementos estructurales composite compuestos por madera y fibra de carbono.

El objetivo general del trabajo es evaluar las capacidades que tienen las estructuras composite de madera y fibra de carbono respecto a las actuales de madera para extraer si pueden llegar a ser un tipo de estructura a tener en cuenta para realizar estructuras de madera más capaces que las actuales.

Los objetivos concretos del trabajo son:

- Conocer la forma de obtención y las propiedades de los elementos basados en fibra de carbono
- Revisar los usos de la fibra en diversos ámbitos y en especial en la arquitectura
- Analizar el comportamiento de elementos composite de madera y fibra de carbono a partir de estudios ya existentes y la comparación de estructuras utilizando herramientas de simulación numérica por elementos finitos

# 1. La fibra de carbono

En este primer capítulo se pretende explicar de una forma clara y concisa que es la fibra de carbono. Se describirá el ciclo de vida de este material, desde su obtención hasta el reciclaje de esta.

En segundo lugar, se presentarán las propiedades del material y se compararán con los materiales que se usan actualmente en la construcción como el acero, el hormigón y la madera.

## 1.1 El material

La fibra de carbono se enmarca dentro de los conocidos materiales composites, estos se caracterizan por estar formados por la combinación de dos o más elementos, naturales o artificiales, que son más fuertes como conjunto que de manera individual.

Diseñados particularmente para otorgar más fortaleza, eficiencia o durabilidad, están compuestos por: una fibra, que puede ser de vidrio, de carbono, etc. Y una matriz, que acostumbran a ser resinas.

***Figura 1-1*** Esquema composición composite. Fuente: www.kacoverings.com/que-es-un-composite/

A continuación, se explica el método de obtención de la fibra, no del "composite", que sería el producto final.

### 1.1.1 El proceso de obtención

Actualmente, el 90% de la fibra de carbono que se produce mundialmente se obtiene a partir de un polímero, el poliacrilonitrilo (de ahora en adelante PAN o precursor). Para la obtención de la fibra de carbono, en términos simples, este polímero es sometido a un proceso de pirolisis en una atmosfera inerte, sin oxígeno y a temperaturas por encima de los 980°C que le hacen perder las moléculas no carbónicas.

Apuntar que cada fabricante de fibra de carbono se reserva el derecho de propiedad del proceso de fabricación y del producto final. Las cifras de temperaturas del proceso, materiales, disolventes y propiedades de la fibra de carbono pueden variar por este motivo. Aunque la mayoría recurra al proceso que se explica a continuación.

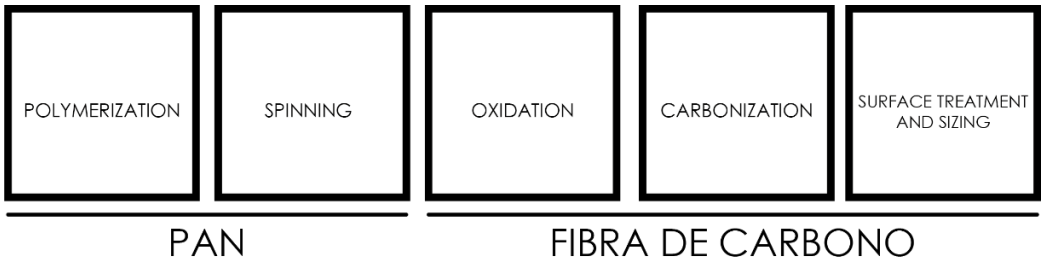



***Figura 1-2*** Esquema obtención fibra de carbono, fuente: propia

#### *1.1.1.1 El precursor*

Para entender pues que es la fibra de carbono hay que definir en primer lugar que es un polímero y como se obtiene este. Un polímero es una substancia molecular formada por cadenas o aros de subunidades llamadas monómeros. En el caso del PAN este monómero es el acrilonitrilo, que está formado por propileno y amoníaco. El acrilonitrilo es sometido a dos fases principales para obtener el PAN, estas dos fases son la polimerización y la denominada "spinning".

Polimerización:

Es el proceso químico que crea largas cadenas de polímeros que pueden formar fibras acrílicas. Para conseguir esto, el monómero, combinado con acrílicos plastificados y un catalizador son sometidos a una agitación continua que mezcla los productos asegurando la consistencia y la pureza e inicia a formación de radicales libres dentro de la estructura molecular del acrilonitrilo.

Los detalles de esta fase como la temperatura, la atmosfera y la especificidad de los comonomeros y catalizadores son de propiedad de cada fabricante.

Antes de someterse a la siguiente fase, el acrilonitrilo, en forma de polvo, se disuelve en disolventes. Esta mezcla viscosa resultante es la que se transformaran en las fibras de PAN.

Spinning:

Las fibras se forman con un proceso llamado "wet spinning". La mezcla se sumerge en un líquido coagulante y se hace pasar a través de los agujeros de un hilador. La fibra, aun gelatinosa y frágil, se lava, se seca y se estira. La forma externa y la sección del filamento viene determinada por el grado de disolvente y coagulante que se han aplicado a la mezcla, la cantidad de tensión aplicada y el porcentaje de alargamiento del filamento.

El último paso del proceso de formación de las fibras precursoras del PAN es la aplicación de un aceite para evitar que los filamentos se peguen entre sí, se vuelve a secar y se enrolla en bobinas.

### *1.1.1.2 La fibra de carbono*

Hasta este punto hemos visto cómo se obtiene el PAN, el material del cual se formará la fibra de carbono (véase figura 1-2). Para conseguir esta transformación el PAN se someterá a tres fases: la oxidación donde se incrementa la densidad de fibras, la carbonización donde las moléculas que no son carbono desaparecen y por último la fase del tratamiento de la superficie y el "sizing".

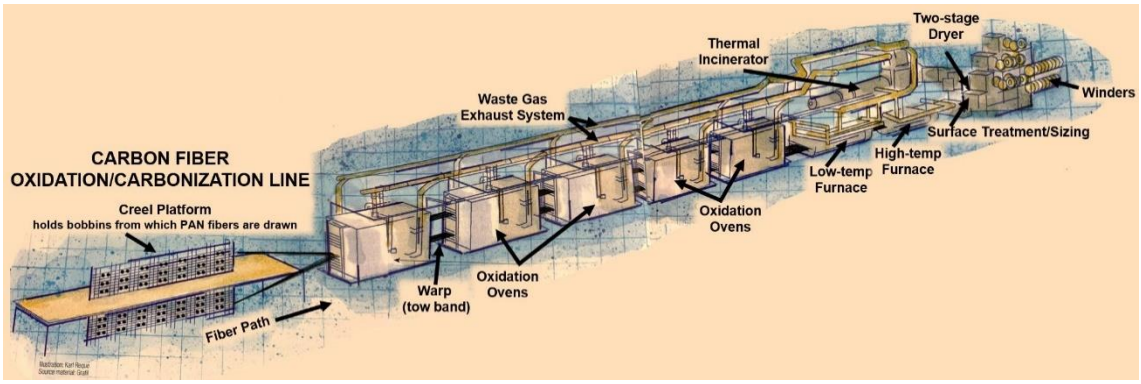



***Figura 1-3*** Esquema línea de producción, fuente: Illustration | Karl Reque; Source material | Grafil Inc.

Oxidación:

Las bobinas de PAN se cargan en una plataforma, se desenrollan y se las hace pasar a través de una serie de hornos. El proceso consiste en incrementar la densidad de la fibra desde ≈1,18g/cc hasta máximo 1,38g/cc. Para conseguir esto las fibras de PAN se combinan con las moléculas de oxígeno del aire. Esto produce que las cadenas de polímeros empiecen a "crosslinking". Este proceso se realiza entre los 200 y 300°C. El tiempo de esta fase varía según la composición del precursor. Al final de este proceso se estima que las fibras de PAN contienen entre un 50 y un 65% de moléculas de carbono junto con una mezcla de hidrogeno, nitrógeno y oxígeno.

Carbonización:

La carbonización ocurre en una atmosfera inerte, sin oxígeno, en una serie de hornos que van aumentando la temperatura. A la entrada y salida de cada horno hay unas cámaras que provienen de la intrusión de moléculas de oxígeno. En ausencia del oxígeno, las partículas que no son de carbono son extraídas del horno para ser incineradas en un ambiente controlado. La carbonización empieza a unos 700-800°C y termina entre los 1200-1500°C. Finalmente la cristalización de las moléculas de carbono puede optimizarse para producir una fibra con más del 90% de carbono. Con las temperaturas anteriores se alcanzan porcentajes de hasta el 93-95% de carbono.

En toda esta fase de carbonización está demostrado que la cantidad de material que entra de PAN y el que sale es de 2:1, ya que pierde masa y volumen. Se contrae entre un 5 y un 10% de longitud y disminuye el diámetro.

Tratamiento de la superficie y "sizing":

La última fase para obtener la fibra de carbono tiene como objetivo mejorar la capacidad de adhesión entre la fibra y la resina matricial en un material composite.

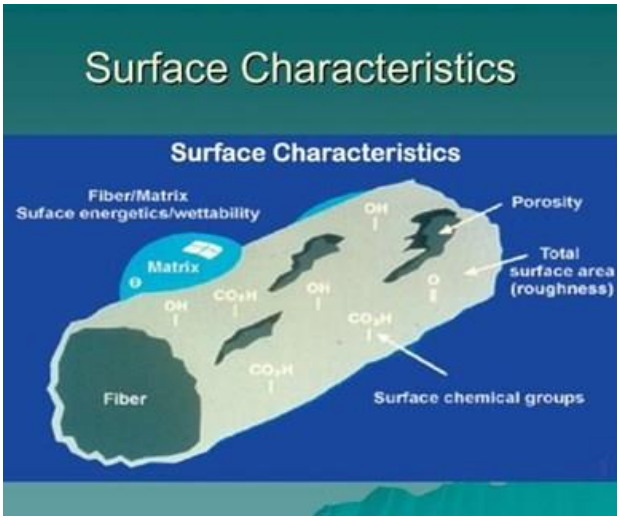



***Figura 1-4*** Características de la superficie Fuente: Grafil Inc

Este paso es crítico para obtener una buena fibra de carbono en términos de propiedades y, a parte del precursor, es lo que diferencia un productor de otro. La unión entre la resina y la fibra de carbono es crucial en un composite reforzado. Para conseguir una buena unión los fabricantes sumergen la fibra en un baño de soluciones químicas como puede ser el sodio hipoclorito o el ácido nítrico. Estos materiales hacen que la superficie de la fibra sea más rugosa aumentando así el área para favorecer la unión y añade grupos químicos reactivos.

A continuación se le aplica el "sizing", una capa que protege la fibra de carbono durante la manipulación del producto en piezas. Este producto mantiene unidos también los filamentos individuales para reducir la formación de nudos, mejorar la procesabilidad y aumentar la resistencia al corte entre las resinas. Recientemente los productores pueden adaptarse más a las necesidades del cliente gracias a los avances de la técnica y del "sizing".

Una vez el "sizing está seco, el proceso de fabricación está terminado. Las láminas de fibra de carbono se enrollan y están listas para los clientes.

### 1.1.2 El reciclaje y la sostenibilidad

El reciclaje de la fibra de carbono es un procedimiento con mucha dificultad debido a la composición final de la fibra que se combina con unas resinas epoxis para conseguir su dureza. Conseguir un resultado satisfactorio conllevaría a reducir el precio de este alrededor de un 20% y 40% respecto al material virgen. En consecuencia, sería un material más accesible en el mercado para muchas industrias como la de la automoción que se prevé que sea la gran beneficiada. Actualmente la producción de fibra de carbono resulta insignificante por el contrario de otros materiales y sus deshechos son mínimos. Pero con el avance que está teniendo el material virgen, algunas empresas se han puesto a trabajar en el método de reciclaje. Las empresas ven en la industria de la aviación como el gran aportador de piezas para reciclar. Las diferentes empresas que se dedican al reciclaje usan distintos criterios para el proceso, ELG Carbon Fibre (UK) utiliza la técnica de la pirolisis y sostiene que su fibra de carbono reciclada (de ahora en adelante FCr) mantiene el 90% de las propiedades que la original. Vartega (U.S.A), otra empresa dedicada al sector clama que su FCr exhibe la misma capacidad mecánica con su proceso químico. Shocker Composites (Wichita, Kan., U.S.A) utiliza un proceso de solvolisis y mantiene que su fibra es de alta calidad y que no percibe daños en las fibras.

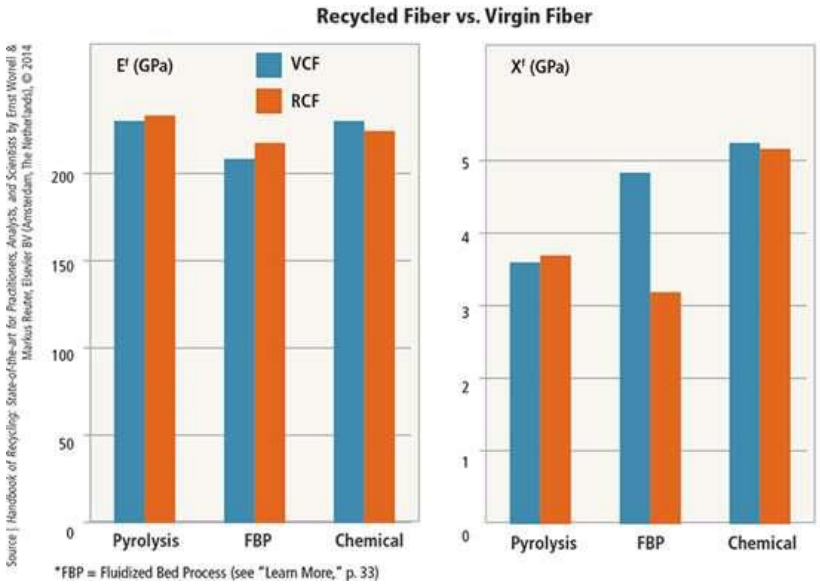



***Figura 1-5*** Comparación entre fibra de carbono virgen (VCF) y fibra de carbono reciclada (RFC) en términos de Modulo de Young (E) y fuerza (X); Fuente: Web CompositesWorld, ver link en bibliografía (09/06/2020)

## 1.2 Las propiedades

### 1.2.1 Propiedades mecánicas

La fibra de carbono posee unas características que la hacen un material que puede aportar muchas cosas buenas al ámbito de la arquitectura más allá de los refuerzos estructurales. Estas son:

- Alta resistencia mecánica, aunque conserva un módulo de elasticidad también elevado.
- Buena conductividad eléctrica.
- Baja conductividad térmica, respecto al acero y el hormigón.
- Baja expansión térmica.
- Baja densidad comparada con materiales como el acero
- No es un material corrosivo.
- Tiene una alta flexibilidad.

Por el contrario, aún presenta un coste de producción y de compra elevado respecto a otros materiales que se utilizan para aplicaciones similares, como el acero.

Al contrario que en los aceros donde hay unos standards para que entre productores no haya diferencias a la hora de producir un mismo tipo, la fibra de carbono, al basarse en las características de la propia fibra y de las resinas, hacen que cada fabricante tenga su propio producto con las características que ellos quieren, serán similares, pero no idénticos.

Así pues, en el mercado podemos encontrar que las fibras de carbono pueden variar de módulo de elasticidad y de rigidez y de resistencia a la compresión y a fatiga.

Por ejemplo, podemos encontrar fibras de carbono con un Módulo de elasticidad (E) menor de 220,5 kN/m$^2$ que son las más bajas, hasta las que tienen una (E) de 965 kN/m$^2$.

| | | Resistencia a tracción (Mpa) | Modulo elasticidad E (Gpa) |
|---|---|---|---|
| Fibra de carbono | Baja<br>Alta<br>Ultra | 2000-4000 | 200-350<br>350-450<br>>450 |
| Acero | | 200-300 | 210 |
| Hormigón | | 1-4 | 20-50 |
| Aluminio | Blando<br>Duro | 50-90<br>130-195 | 70 |
| Madera (CLT, Sebastía) | | 10 | 11 |

***Tabla 1-1***Comparación de las capacidades mecánicas; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias publicaciones

### 1.2.2 El concepto lightweighting

Una de las grandes ventajas que tiene la fibra de carbono es la relación que tiene de rigidez-peso respecto a los demás materiales, y su baja densidad. Es por ese motivo que la industria ha aplicado en sus productos una reducción de peso.

En la siguiente tabla se muestran las densidades de la fibra de carbono respecto a las densidades de los metales y materiales de construcción más comunes.

| | Densidad g/cm$^3$ |
|---|---|
| Fibra de carbono | 1,55 |
| Acero | 7,9 |
| Aluminio | 2,7 |
| Titanio | 4,54 |
| Hormigón | 2,3 |
| Madera (CLT, Sebastía) | 4,70 |

***Tabla 1-2*** Comparativa de densidades de la fibra de carbono respecto metales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del CTE

Observamos que el acero es 5 veces más denso que la fibra de carbono. Eso significa 5 veces más pesado para una misma pieza realizada con los dos materiales. Pongamos de ejemplo una plancha de 1m$^2$ por 6mm de espesor, en acero esta plancha pesa 47,4kg mientras que en fibra de carbono pesa solamente 9,3kg; en aluminio, que es el segundo más ligero, la misma plancha marcaría en la báscula 16,2kg. Esta ligereza junto a la gran capacidad mecánica que tiene hace de la fibra de carbono un material muy capaz. Como se está demostrando en los ámbitos fuera de la arquitectura y dentro de ella con los refuerzos estructurales.

### 1.2.3 Capacidad de resistencia al calor

La fibra de carbono tiene una conductividad térmica baja comparado con el acero o el aluminio. Este factor favorecería a la hora de hacer los cálculos de una estructura al ser un material con menos dilatación.

| | Dilatación cm/C$^o$ | Conductividad térmica W/m$^2$ |
|---|---|---|
| Fibra de carbono | 3,6 | 5-7 |
| Acero | 12,6 | 50 |
| Aluminio | 23,4 | 230 |
| Hormigón armado | - | 2,5 |
| Madera (Paneles) | - | 0,24-0,09 |

***Tabla 1-3*** Comparativa del comportamiento respecto al calor en materiales estructurales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del CTE

### 1.2.4 Precio

El precio de la fibra de carbono es uno de los motivos de su poco uso si lo comparamos con los materiales más utilizados.

| | Precio €/kg |
|---|---|
| Fibra de carbono alta resistencia | 30 |
| Acero laminado para perfiles estructurales | 0,96 |
| Hormigón | 0,04 |

# 2. La actualidad de la fibra de carbono fuera de la construcción

Este capítulo pretende hacer un repaso por las industrias que poco a poco han ido introduciendo la fibra de carbono en sus productos o elementos de sus productos finales. Las más importantes en este campo son la de la automoción, la aeronáutica y la naval. Otras industrias más pequeñas también están introduciendo las ventajas de la fibra de carbono en sus productos. Eso demuestra las buenas cualidades de este material.

## 2.1 La automoción

La industria del automóvil puede ser la que dé el impulso definitivo del uso de la fibra de carbono de manera más generalizada.

El uso de la fibra se ha utilizado en los últimos años mayoritariamente para el desarrollo de coches deportivos de alta gama y vehículos de competición. Aunque en los últimos años marcas más generalistas han empezado a introducir este material en sus vehículos.

El concepto de “lightweighting” se ha aplicado a la industria del automóvil y se ha entendido como el movimiento de la industria para reducir el peso de los vehículos para disminuir las emisiones y los consumos de los coches.

La automoción lleva décadas de desarrollo de la fibra de carbono en el ámbito de la competición. Ese campo que ha permitido ser un banco de pruebas e investigación para trasladarlo al público general. Han sido capaces de desarrollar desde la estructura del coche hasta los elementos más pequeños de un automóvil o motocicleta.

**Los chasis monocasco**

El chasis es una de las partes más importantes de un vehículo. Junto con la carrocería es lo que recibirá los impactos en caso de accidente. Los primeros chasis monocasco aparecieron a principios de siglo XX demostrando una gran capacidad de resistencia frente los chasis convencionales. No fue hasta 1981 que apareció el primer chasis monocasco de fibra de carbono que fue presentado por Mclaren para competir en la Formula 1.

La industria ha encontrado en la fibra de carbono el aliado perfecto, ya que aporta más rigidez que el aluminio y es más ligero. Este tipo de chasis, realizados en fibra de carbono, pueden ser además la propia carrocería ya que la fibra de carbono puede dejarse expuesta.

***Figura 2-1*** Chasis monocasco de fibra de carbono de Koenigsegg; Fuente: Web de Koenigse

Observando este tipo de estructura caparazón, podría plantearse trasladar la técnica a la arquitectura modular.

## 2.2 La industria aeronáutica y aeroespacial

Otra de las industrias que lleva años desarrollando cada vez más componentes con este material y con otros tipos de composites es la aeronáutica y la aeroespacial. Las razones son las mismas que en la industria de la automoción: reducción de peso, más rigidez, menor consumo, menos mantenimiento (a lo largo de la vida útil no se oxidan) y el uso de menos piezas para ensamblar un objeto. En el caso de los aviones, además aporta una mejor experiencia al pasajero dentro de la cabina (amortiguando el ruido y la vibración del motor). El cambio hacia esta tecnología vino precedido por la competencia, la legislación y la incertidumbre del precio del combustible. Actualmente un avión de última generación ya está realizado con un 50% de materiales composites. El otro 50 está mayoritariamente realizado con metales más ligeros que el acero como son el aluminio y el titanio. (Ver **Tabla 1-2**)

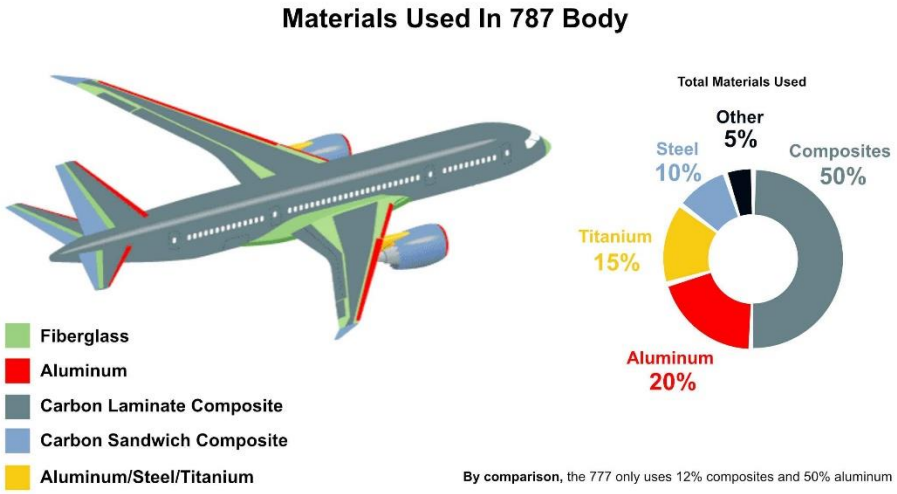



***Figura 2-2*** Materiales usados en la construcción de un Boeing 787; Fuente: Student Pilot Portal

Uno de los inconvenientes que tiene construir un cuerpo de un avión con este tipo de materiales es que son malos conductores de la electricidad y podrían no distribuir bien la energía producida por el impacto de un rayo si no se añaden materiales conductores a la piel del composite.

## 2.3 La industria naval

La industria naval lleva años desarrollando componentes con fibra de carbono y otro tipo de fibras y composites para mejorar las capacidades de los navíos. La característica de no oxidarse de este tipo de materiales es una gran ventaja para la industria que ve en estos materiales un ahorro de mantenimiento a lo largo de la vida útil del barco.

Como en la industria del motor, la competición también juega un papel importante en el desarrollo de nuevas técnicas y el uso de nuevos materiales.

## 2.4 Otras industrias

**Deporte**

Una de las industrias que más está aprovechando los materiales composites y de la fibra de carbono es la del deporte. Sus productos, como bicicletas, raquetas y otro tipo de material deportivo han llegado al alcance del público en general, no solamente a nivel de competición.

**Medicina**

En el campo de la medicina se está investigando las cualidades de la fibra de carbono para aplicarlo a equipos médicos, prótesis y otro tipo de equipamiento de quirófano.

El uso de la fibra de carbono como hemos observado se ha ido expandiendo progresivamente por muchas industrias gracias a las características del material. Poco a poco los costes de producción han ido bajando y ha sido posible este cambio.

Analizando el tipo de estructuras que se desarrollan en el campo de la aeronáutica y naval, hace pensar que sería posible transportar estas técnicas hacia la arquitectura. El cuerpo de un avión, con todas sus diferencias respecto a un edificio, se ha demostrado que puede ser utilizado como restaurantes, hoteles y otros usos. Así que, por qué no aplicar esos conocimientos para realizar estructuras habitables.

Es interesante ver como la competición hace que una industria invierta en i+d para mejorar los resultados y a la vez sea un campo de investigación y pruebas para el producto fuera de esta.

En arquitectura, el símil de la competición lo podríamos encontrar en los pabellones feriales. A lo largo de la historia han sido muchos los arquitectos que han aprovechado un evento así para demostrar las virtudes y capacidades de un material o aportar técnicas innovadoras a la hora de construir y trabajar un material.

# 3. Arquitectura y fibra de carbono

Este apartado de la memoria se divide en dos partes, en la primera de estas se realiza una visión al uso actual mayoritario de la fibra de carbono y otros tipos de fibras en el ámbito de la rehabilitación y refuerzo estructural, explicará el uso actual del material en la construcción, la forma como se aplica, las técnicas y los procesos.

Para cerrar el capítulo se mostrarán las posibilidades que tiene el material actualmente para aplicarlo en el futuro, se citarán algunos estudios de diversos grupos de investigación que están desarrollando diferentes técnicas de aplicación de la fibra y se mostrarán ejemplos de productos y actuaciones.

## 3.1 Uso actual mayoritario. El refuerzo estructural

Actualmente la fibra de carbono tiene poco peso en el ámbito de la obra nueva. Es en la rehabilitación donde mayoritariamente se han aprovechado las capacidades de este material. Poco a poco van desarrollándose nuevas técnicas y productos que permitirán hacer de la fibra de carbono un material accesible y útil en la arquitectura.

El refuerzo estructural de estructuras de hormigón es el campo de la construcción donde el uso de la fibra de carbono, en todas sus formas, se está utilizando más. Esto es debido a la alta capacidad de resistencia, su durabilidad en ambientes agresivos y su ligereza. Lo que resulta un material fácil y rápido de colocar en obra respecto los sistemas convencionales de refuerzo.

Adicionalmente estos materiales pueden adaptarse a gran variedad de geometrías gracias a su flexibilidad. Pueden resultar más caros los materiales, pero se compensan con el ahorro en tiempo de puesta en obra, transporte y mano de obra.

### 3.1.1 Aplicación

Las causas por las cuales se deba recurrir al refuerzo estructural pueden ser:

- Incremento de sobrecarga.
- Restitución de la capacidad resistente original.
- Solucionar defectos de proyecto o ejecución.
- Cambios en la estructura original
- Perdida de resistencia del armado.

### 3.1.2 Limitaciones

Todo sistema tiene sus limitaciones, en este caso las desventajas están relacionadas con factores externos:

- Impactos y actos vandálicos
- Exposición prolongada a rayos ultravioleta que produzcan una degradación en las resinas de adhesión.
- Exposición a altas temperaturas: estas pueden reblandecer las resinas de adhesión o de la matriz cuando llegan a la temperatura de transición vítrea. Consideración que debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el refuerzo ya que, en caso de incendio, este no contribuye a la resistencia del elemento estructural.
- El carbono es un material conductor de electricidad, es por ese motivo que hay que evitar instalarlo en zonas donde pueda interferir.

### 3.1.3 Materiales

Estos sistemas de refuerzo estructural van adheridos o embebidos en el elemento estructural a reforzar, aumentando así la capacidad resistente del mismo. Los FRP (Fiber Reinforced Polymer) son sistemas compuestos de fibras que trabajan siempre a tracción y matriz polimérica de resinas que reparten el esfuerzo entre las fibras y transmiten el mismo al soporte por rasante.

La fibra de carbono se puede encontrar en cuatro formatos, estos son:

- Laminados
- Tejidos
- Barras
- Mechas

No hay que olvidar que estas fibras van reforzadas con las resinas que pueden ser de tres tipos: de imprimación, de impregnación y de adhesión.

| TIPOLOGÍA | USO | COLOCACIÓN | ELEMENTOS A REFORZAR |
|---|---|---|---|
| Laminados | Refuerzo a flexión | Adherido/Embebido/Bulonado | Elementos lineales |
| | Refuerzo a cortante | Adherido | Elementos lineales |
| Tejidos | Refuerzo a flexión | Adherido | Elementos no lineales |
| | Refuerzo a cortante | Adherido | Vigas, ménsulas, muros |
| | Refuerzo por confinamiento | Adherido | Pilares, silos, torres |
| Barras | Refuerzo a flexión | Embebido | Elementos lineales |
| | Refuerzo a cortante | Embebido | Elementos lineales |
| Mechas | Refuerzo por tracción | Embebido/Adherido | Elementos lineales |

***Tabla 3-1*** Cuadro resumen tipologías y uso de elementos de refuerzo; Fuente: propia, datos extraídos de, La Fibra de Carbono en Refuerzos de Estructuras de Hormigón, Josep Baquer Sistach

### 3.1.4 Criterios de diseño

A la hora de diseñar un refuerzo estructural hay que tener en cuenta varios factores como:

Estados límite

El procedimiento para realizar un buen refuerzo se basa en el cumplimiento de los posibles estados límites de servicio y últimos.

Flexión

Para los refuerzos a flexión se aplican mayoritariamente los sistemas laminados adheridos externamente a la viga o losa en la zona de momentos positivos y negativos.

Cortante

El refuerzo a cortante funciona con la misma idea que los estribos de acero. Se refuerza la viga con unas bandas adheridas al exterior y se cose la viga transversalmente. Lo ideal es envolver el elemento, si no es posible, se pueden aplicar unas bandas en forma de U.

Confinamiento

El sistema se aplica principalmente a pilares. La fibra de carbono no tiene capacidad de resistir fuerzas a compresión cuando las fibras están en la misma dirección. Sin embargo, cuando se colocan transversalmente a la fuerza, es capaz de minimizar la deformación transversal del hormigón.

## 3.2 Otros usos

La gran capacidad de resistencia y su ligereza que tiene la fibra de carbono hacen de esta un material muy capaz en el mundo de la arquitectura y construcción. Pero el proceso de pasar de los materiales actuales a la FCR será lento. Tal y como pasó con las estructuras de acero, los arquitectos y constructores necesitaron nuevas formas de construir y diseñar con el nuevo material. Este capítulo da visibilidad a lo que se está realizando actualmente para que la fibra de carbono sea un material usual en la arquitectura y la construcción en un futuro no muy lejano.

### 3.2.1 Los perfiles pultrusionados

La fibra de carbono y otros materiales hechos a partir de fibras y resinas son muy buenos materiales para crear perfiles con la forma deseada. Actualmente se usan poco, pero podrían sustituir a los perfiles metálicos que se vienen utilizando hasta ahora.

Y no solamente estamos hablando de perfiles estructurales. El cambio de perfiles metálicos a materiales “composite” en carpinterías, barandillas y otros elementos favorecería a la reducción de la conductividad térmica de estos. Como hemos observado anteriormente (Ver **Tabla 1-3**) son mucho más ligeros, resistentes a la corrosión y no hace falta ninguna parte metálica para unir dos perfiles entre sí.

Si hacemos la comparación entre dos perfiles H, observaremos mejor las cualidades del perfil realizado con material "composite" respecto al perfil estandarizado HEB 200.

| Tipo de perfil | Dimensiones | | | | Sección A $mm^2$ | Peso G Kg/m | Propiedades de la sección | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Eje y-y | | | Eje z-z | | |
| | h mm | b mm | $t_w$ mm | $t_f$ mm | | | ly $cm^4$ | Wy $cm^3$ | iy cm | lz $cm^4$ | Wz $cm^3$ | iz cm |
| H (fibras)[1] | 200 | 200 | 15 | 10 | 6700 | 11,7 | 4323 | 434 | 8,1 | 1338 | 133 | 4,5 |
| HEB metálico | 200 | 200 | 9 | 15 | 7810 | 61,3 | 3690 | 389 | 8,28 | 1340 | 134 | 4,98 |

***Tabla 3-2*** Comparación perfil HEB metálico con perfil pultrusionado de plásticos reforzados con fibra de vidrio; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de Eurograte (perfil de plástico reforzado) y Prontubeam

Como se puede observar en la tabla anterior las ganancias en todas las características son importantes, solo respecto el eje z-z la diferencia es casi nula. Esto es solo un ejemplo de los beneficios que aportan los materiales composites en la arquitectura y construcción.

[1] Perfil de la casa Eurograte, ticomm & Promaco. Perfil de PRFV (Plasticos Reforados con Fibras de Vidrio)

### 3.2.2 Estructuras ligeras

Una de las posibilidades que tiene la fibra de carbono es la construcción de estructuras ligeras tipo pabellón. El "Institute for Computational Design and Contruction" (ICD) y el "Building Structures and Structural Design" (ITKE) de la universidad de Stuttgart han desarrollado durante estos últimos años una serie de pabellones con fibra de carbono que conforman la estructura y fibras de vidrio con una técnica de construcción muy novedosa. Esta se fija en la técnica que usan algunos insectos para formar sus crisálidas y redes de captura y lo aplican a la fibra de carbono. La organización, la direccionalidad y la densidad de las estructuras biológicas está finamente ajustado y varia localmente para garantizar que el material solo se coloque donde sea necesario. Gracias a las propiedades de la fibra de carbono es posible crear filamentos de gran longitud que se entrelazan entre ellos para formar las estructuras recreando esas estructuras biológicas.

Esta estructura se construye con unos brazos robóticos monotorizados que "imprimen" el material y van tejiendo esta red hasta conseguir el modelo. Previamente modelado en 3D y comprobado sus tensiones en software a través del diseño computacional y de simulación de los procesos de construcción.

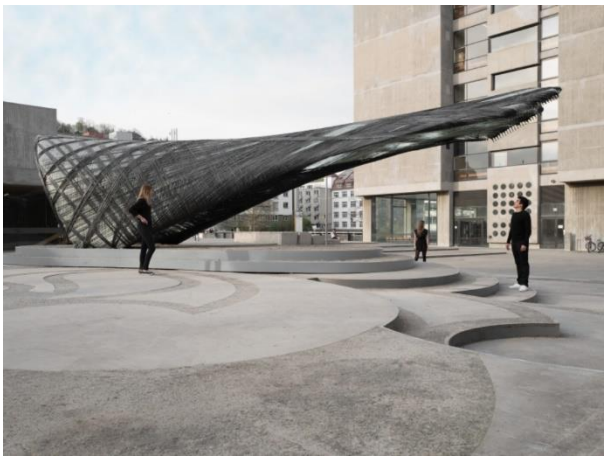


***Figura 3-1*** *Imagen del pabellón ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17; Fuente: Web del ICD, Burggraf / Reichert*

#### *3.2.2.1 ICD/ITKE Research Pavilion 2016-2017*

Uno de estos proyectos es el pabellón que realizaron durante los años 2016-2017 el "ICD/ITKE research pavillon 2016-17, que se inspiró en dos especies de insectos que tejen su nido de larvas entre la superficie de una hoja, la *Lyonetia clerkella* y la *Leucoptera erythinella*

***Figura 3-2*** *Nido de Lyonetia clerkella; Fuente: Web del ICD, imágenes del proceso.*

En esta ocasión, el pabellón fue creado superponiendo un total de 184 km de fibras. El resultado fue un voladizo de 12 m, que fue el escenario estructural máximo. Esto es posible gracias al poco peso del material. El área que cubre el pabellón es de 40 $m^2$ y apenas llega a pesar 1000 Kg.

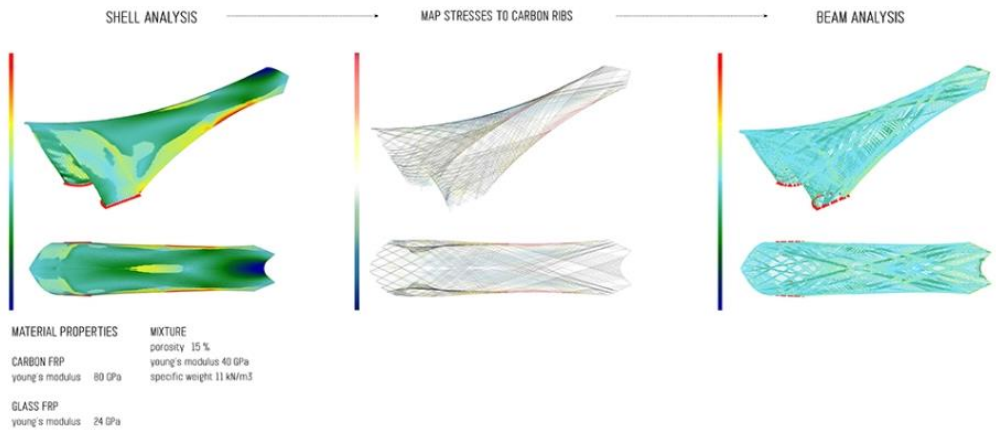



***Figura 3-3*** *Modelo de elementos finitos del pabellón; Fuente: Web del ICD, imágenes del proceso.*

Este instituto de investigación tiene otros pabellones realizados con técnicas similares, muchos de ellos basados también en otras estructuras biológicas de otros animales e insectos que crean estos tejidos multicapa.  Un ejemplo es el BUGA Fibre Pavilion, del año del 2019.

***Figura 3-4*** BUGA Fibre Pavilion 2019; Fuente: Web del ICD

Estos pabellones son una muestra a pequeña escala de lo que podría llegarse a construir con este sistema de construcción a partir de filamentos.

### 3.2.3 Las estructuras composite

Cuando en arquitectura se habla de las “composite structures” se refieren a aquellas que unen dos materiales y funcionan como uno mejorando sus prestaciones y la capacidad de soportar cargas. El tipo más conocido de estas estructuras son las que combinan el acero con el hormigón, aunque recientemente se están introduciendo otras tipologías que usan la madera y el hormigón.

El avance de la fibra de carbono abre un nuevo abanico de posibilidades en este tipo de estructuras, aprovechando las cualidades de la fibra de carbono para obtener grandes resultados.

#### *3.2.3.1 Fibra de carbono + Madera*

El uso de la madera laminada y de paneles de madera contralaminada (CLT) en construcción es cada vez más habitual, pero esta tiene unas características mecánicas que limitan su uso a partir de cierta altura. Es por eso que ya hay investigaciones que recurren a la introducción de láminas de fibra de carbono entre las planchas de madera para mejorar la estabilidad y la resistencia mecánica de la madera principalmente. Aunque el uso de la fibra de carbono mejoraría también el aislamiento térmico del panel y la resistencia al fuego.

En 2015, la compañía japonesa Teijin Limited presentó la CFRW, (Carbon Fiber Reinforced Wood). Esta solución consigue doblar la rigidez a flexión que ofrece la madera laminada convencional y es ideal para vigas.

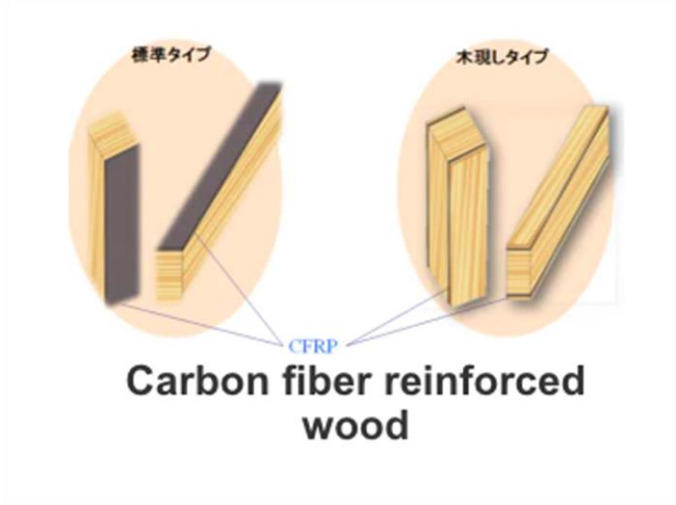



***Figura 3-5*** *Composición de una biga composite CFRW; Fuente: Teijin*

Esta combinación permite no solo crear vigas y paneles con más capacidad resistente, sino que permite gran variedad de posibilidades, una de estas es el sistema AGM, acrónimo de “Adaptive Grid Monocoque”, desarrollado por el equipo de Digital Architects desde Austria. El sistema de construcción AGM es un método de fabricación de superficies estructurales curvadas en 3D muy ligeras y muy delgadas mediante capas de paneles AGM en un orden específico. El sistema permite crear unas cubiertas caparazón con formas libres, se consigue a partir de combinar placas de madera muy finas, de unos 0,7mm, con capas de fibra de carbono. (Ver **Figura 3-6**),

***Figura 3-6*** Composición del panel AGM; Fuente: Web de Digital Architects

Actualmente no se ha desarrollado ningún proyecto con este sistema. Pero sí que se ha desarrollado un panel a escala más pequeña para demostrar las capacidades y las posibilidades que tiene esta solución, es el proyecto "concept AIA – Adaptive Intelligent Architecture", que mide 3.7 m de alto por 1.6 m de ancho.

***Figura 3-7*** Proceso de construcción del panel CONCEPT AIA; Fuente: Web de Digital Architects

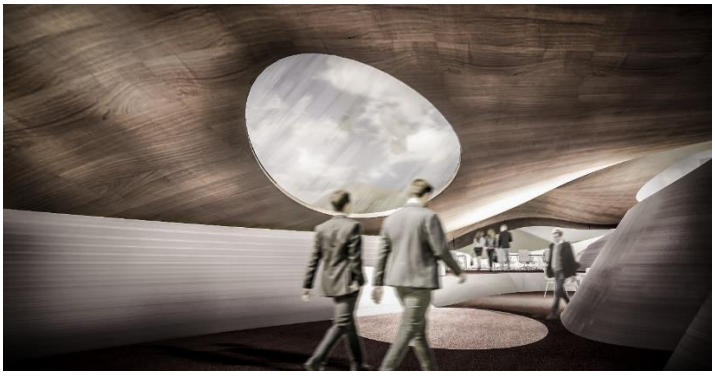


***Figura 3-8*** Render del UVA Learning Center, Digital Architects; Fuente: Web de Digital Architects

### *3.2.3.2 Fibra de carbono + Hormigón*

Aparte de la técnica ya mencionada de refuerzo estructural utilizando la fibra de carbono, se está contemplando la posibilidad de substituir el acero de una estructura de hormigón armado por fibra de carbono.

Esta combinación, como en el acero, tiene varios sistemas de aplicación:

Redondos, fibras y mallas

Estructuras In Situ: la fibra de carbono en este caso se podría aplicar o en redondos, simulando los de acero, o en fibras cortas que se mezclarían con el hormigón. Estas técnicas permitirían hacer estructuras más ligeras, se reduciría el volumen de hormigón, que beneficiaria los tiempos de construcción y de fraguado y se evitarían problemas de corrosión del acero y los problemas derivados de esta patología.

Paneles prefabricados de hormigón: Los paneles podrían ser más finos y más ligeros. Consecuentemente sería mucho más fácil el transporte y la puesta en obra de estos. Ahorrando en tiempo y en costes que compensarían el precio del material hasta que este fuese normalizado y su precio fuese comparable con los demás materiales.

Encofrado perdido

El sistema funcionaria como un pilar metálico relleno de hormigón substituyendo una vez más el acero por la fibra de carbono. Uno de los sistemas que ya está en funcionamiento es el que está desarrollando la Universidad de Maine con su sistema “Composite Arch Bridge System”. Esta tecnología acelera los tiempos de construcción y reduce los costes de mantenimiento a lo largo de la vida útil del puente. Se basa en la construcción de unos tubos de fibra de carbono que hacen de encofrado y de refuerzo para el hormigón que se colocara in situ. Este hormigón va sin armar, hecho que elimina los problemas de corrosión del acero.

***Figura 3-9*** Puente en construcción con sistema Composite; Fuente: Canal de Youtube de la Universidad de Maine

### 3.2.4 Módulos prefabricados

Analizando las posibilidades que tiene el material, sería posible construir módulos prefabricados a partir de estructuras de fibra de carbono sustituyendo a los modelos actuales de Steel frame y Wood frame por los perfiles pultrusionados que se han explicado anteriormente (Ver **Los perfiles pultrusionados**). Este sistema constructivo se beneficiaria de la ligereza del material, característica que permitiría un transporte y una colocación en obra mucho más fácil.

### 3.2.5 Otros elementos

Como en las otras industrias, la arquitectura, la construcción y el diseño podrían desarrollar cualquier elemento a partir de la fibra de carbono, dejando atrás los costes de producción y venta.

# 4. Comparación del comportamiento de elementos estructurales de madera con elementos estructurales composite

En este capítulo procederé a realizar un estudio comparativo del comportamiento de una serie de elementos estructurales, en primera instancia se calcularán unas vigas de madera laminada convencionales con unas vigas laminadas composite, que se componen de madera laminada y una lámina de fibra de carbono. Y en segundo lugar se realiza la misma comprobación para pilares y su comportamiento al pandeo.

La comprobación y el posterior estudio de comportamiento de los elementos propios se realizan con Ram Series, un software de cálculo a partir de elementos finitos.

Para verificar si el programa de cálculo elegido era fiable y no se cometían errores, se ha realizado en primer lugar, la comparación de los resultados del simulador frente a los resultados experimentales de un estudio coreano (Yo-Jin Song, 2019). En este trabajo coreano se compara el comportamiento de un forjado de CLT de 3 planchas con otro de las mismas características reforzado con una plancha de 1,2 mm de fibra de carbono. Este estudio realiza la comparativa en el laboratorio con elementos físicos.

## 4.1 Metodología

### 4.1.1 Software utilizado – Ram Series

RamSeries es un completo entorno de elementos finitos (FEM) para el análisis estructural que proporciona la capacidad de analizar todos los aspectos estructurales de un producto.

El motivo por el cual se usa este programa es que este ofrece utilidades avanzadas para el análisis de estructuras compuestas de vigas y láminas de compuestos laminares, y dispone de una intuitiva interfaz de usuario para la definición de los materiales, secuencias de laminado y su dirección.

En el Anexo 1 se hace una descripción más detallada del software utilizado para el comparativo más completo.

#### *4.1.1.1 Definición de los elementos*

Para definir los elementos, previamente se deben introducir las características de los materiales en la base de datos del programa. Seguidamente se dibuja la geometría deseada en 2D, ya que se definirá el espesor del elemento laminar a partir del espesor de cada lamina y material del que está compuesto.

Una vez definido el elemento se procede a introducir las cargas y se definen como son los puntos de apoyo.

Hasta aquí se ha explicado la definición del elemento a estudiar. A partir de este momento se puede realizar el cálculo y observar cómo se comporta el elemento.

#### *4.1.1.2 Cálculo del elemento y extracción de los resultados*

Para realizar el cálculo se debe generar una malla de elementos, cuantos más elementos tenga esta malla mejor definida estará la geometría y más exacto será el resultado. Para saber cuál es la malla adecuada teniendo en cuenta el error que la malla produce se ha realizado un estudio de convergencia. Se entiende por convergencia cuando al refinar la malla, el resultado no varía y, por lo tanto, el error es despreciable.

En la geometría del estudio comparativo se han comprobado varias mallas para comprobar cuál es la malla ideal para realizar los cálculos. (Ver An. 1.2 Cálculo del elemento y extracción de los resultados) para ver las mallas comprobadas.

Una vez definida la malla se pueden realizar los cálculos y obtener los resultados.

Los resultados se muestran de forma intuitiva a través de una escala de colores o a partir de vectores, pudiendo diferenciar a simple vista el comportamiento del elemento calculado. Se obtienen los resultados para todas las direcciones.

Los resultados que podemos extraer son:

- Deformada, Torsión, Reacciones, axiales y momentos, Reacción a cortantes

## 4.2 Caso de estudio

El caso de estudio se basa en simular los elementos del trabajo "Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP" (Yo-Jin Song, 2019) para comprobar el correcto funcionamiento del software de simulación.

Se simulan dos casos del estudio, las series A y B, que corresponden a un forjado de 3 placas de CLT en la Serie A y del mismo forjado reforzado con una placa de 1,2 mm de fibra de carbono en la Serie B.

### 4.2.1 Metodología

Para realizar los cálculos se siguen los pasos descritos en el apartado 4.1 de esta memoria, añadiendo los valores obtenidos del mismo estudio, para aproximarse al máximo a sus resultados.

- Medidas pieza analizada: 2.500 x 27,5 x 10,65 (largo x ancho x altura) cotas en mm
- Carga aplicada en la simulación 20.000N
- Módulo Elástico Madera: 10.693,16 Mpa (Media obtenida de sus cálculos)

Table 3. Bending strength properties of CLT floors and composite CLT floors.

| Series | M.C. (%) | $MOE_{Global}$ (MPa) | $MOE_{Local}$ (MPa) | MOR (MPa) | $EI_{Global}$ (N·mm$^2$) | $EI_{Local}$ (N·mm$^2$) | Failure mode |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 11.8 | 10,171.5 | 10,993.5 | 31.9 | $2.82 \times 10^{11}$ | $3.04 \times 10^{11}$ | Tension and rolling shear |
| A2 | 11.5 | 10,471.3 | 11,764.0 | 44.2 | $2.90 \times 10^{11}$ | $3.26 \times 10^{11}$ | Tension and rolling shear |
| A3 | 13.1 | 12,977.3 | 14,912.6 | 42.4 | $3.59 \times 10^{11}$ | $4.13 \times 10^{11}$ | Tension and rolling shear |
| A4 | 8.8 | 10,193.1 | 11,640.3 | 34.4 | $2.82 \times 10^{11}$ | $3.22 \times 10^{11}$ | Tension and rolling shear |
| A5 | 13.0 | 9652.6 | 10,856.3 | 40.2 | $2.67 \times 10^{11}$ | $3.01 \times 10^{11}$ | Tension and rolling shear |
| B1 | 8.1 | 15,010.5 | 17,709.2 | 39.1 | $4.16 \times 10^{11}$ | $4.90 \times 10^{11}$ | Delamination and rolling shear |
| B2 | 9.8 | 11,905.4 | 12,962.4 | 66.8 | $3.30 \times 10^{11}$ | $3.59 \times 10^{11}$ | Delamination and rolling shear |
| B3 | 9.9 | 15,275.5 | 16,999.7 | 59.0 | $4.23 \times 10^{11}$ | $4.71 \times 10^{11}$ | Delamination and rolling shear |
| B4 | 13.7 | 13,468.9 | 14,599.8 | 57.9 | $3.73 \times 10^{11}$ | $4.04 \times 10^{11}$ | Delamination and rolling shear |
| B5 | 11.9 | 12,308.0 | 13,467.5 | 63.5 | $3.41 \times 10^{11}$ | $3.73 \times 10^{11}$ | Delamination and rolling shear |

***Tabla 4-1*** Propiedades de los suelos del estudio; Fuente: "Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP"

- Módulo Elástico Fibra de Carbono: 487.000 Mpa
- Los apoyos se consideran elásticos.

NOTA: No se aplican más cargas en la simulación al observar un comportamiento lineal

El esquema de cargas del estudio es el siguiente:

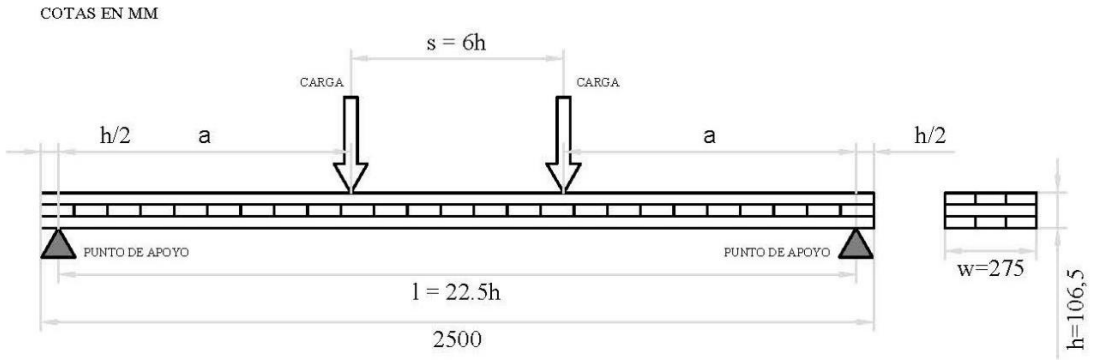



***Figura 4-1*** Esquema cargas estudio coreano; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del estudio

### 4.2.2 Resultados

#### *4.2.2.1 Caso 1: Simulación de la Serie A*

Forjado de CLT de 3 capas de madera. Espesor 106,5 mm (3 placas de 35,5 mm).

Los resultados del trabajo coreano se muestran a continuación. La siguiente imagen muestra la deformación de los distintos elementos de la Serie A a distintas cargas, se observa un comportamiento lineal al tener un módulo elástico constante.

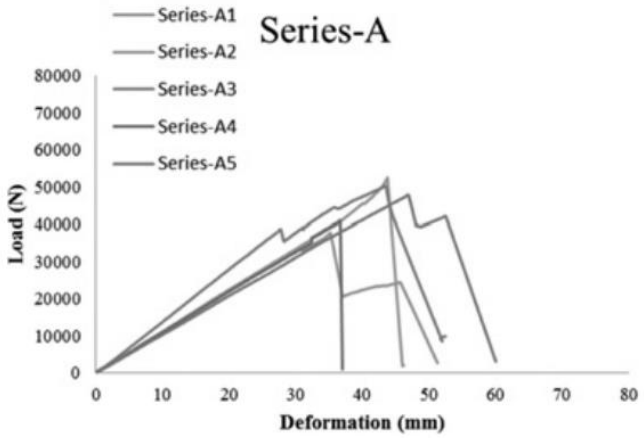



***Figura 4-2*** Resultados de la Serie A: Estudio Coreano; Fuente: *Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP"*

De su gráfico obtenemos que por una carga de 20.000N la deformación media de este forjado está en una franja entre los 15 y 20 mm.

A continuación, se realizó el cálculo de este mismo elemento en el programa RamSeries, se definió el forjado de la siguiente manera:

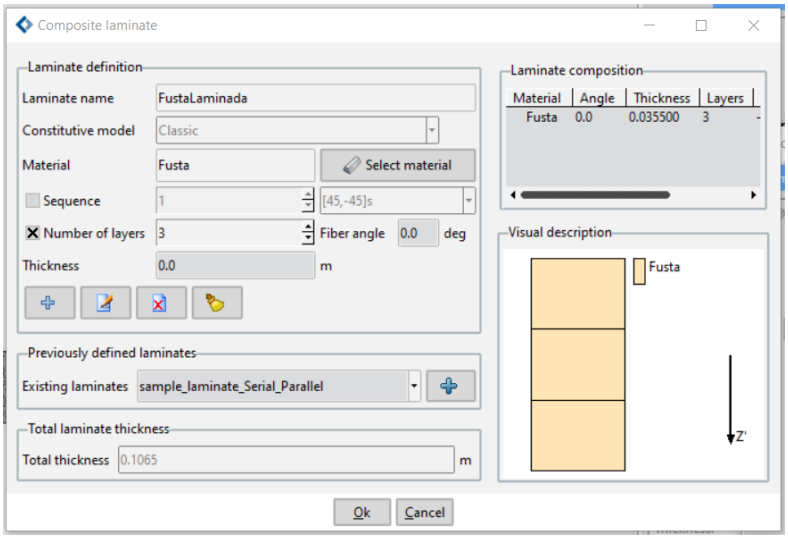



***Figura 4-3*** Composición de la Serie A; Fuente: Elaboración propia

La carga que se aplicó fue de 20.000 N en global en los puntos indicados en la **Figura 4-1** y se tuvo en cuenta el peso propio de la pieza.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

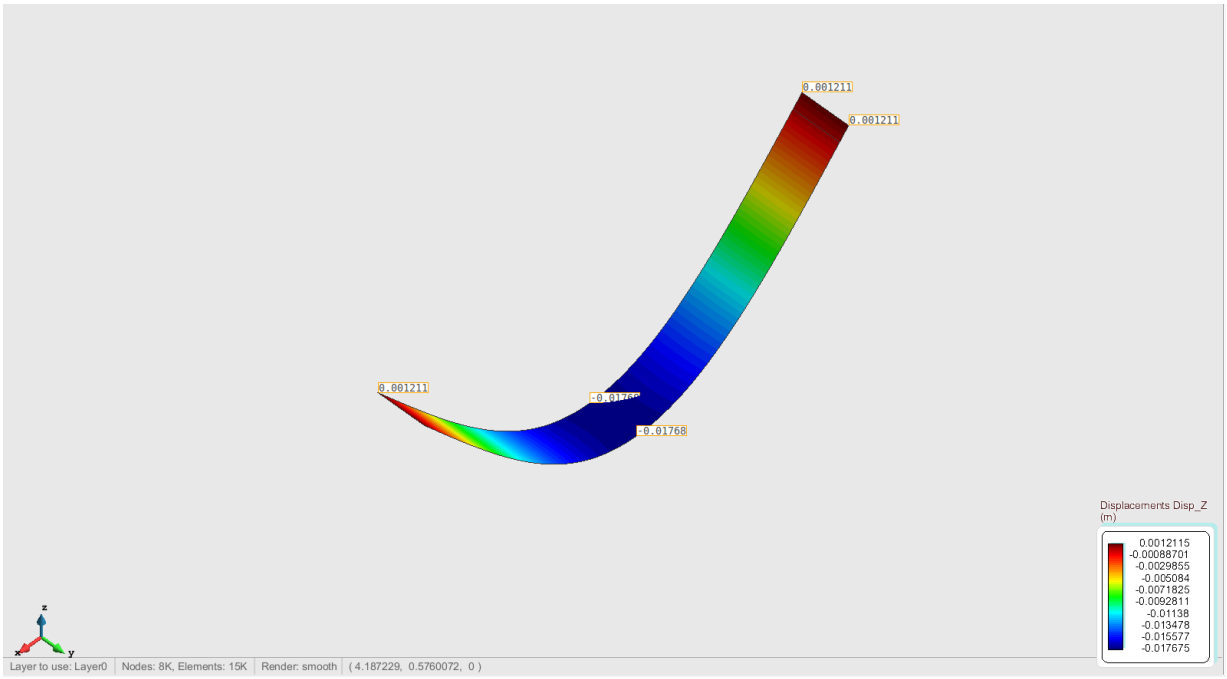



***Figura 4-4*** Deformación de la Serie A; Fuente: Elaboración propia

El punto máximo de la deformación de la simulación es de 17,68 mm, un valor que se sitúa en la media de los resultados del estudio coreano.

#### *4.2.2.2 Caso 2: Simulación de la Serie B*

Forjado de CLT de 3 capas de madera con lamina de fibra de carbono de 1,2 mm. Espesor 107,7 mm (3 placas de 35,5 mm + 1,2 mm de fibra de carbono).

Los resultados del trabajo coreano se muestran a continuación, la siguiente imagen muestra la deformación de los distintos elementos de la Serie B a distintas cargas, se observa un comportamiento lineal al tener un módulo elástico constante.

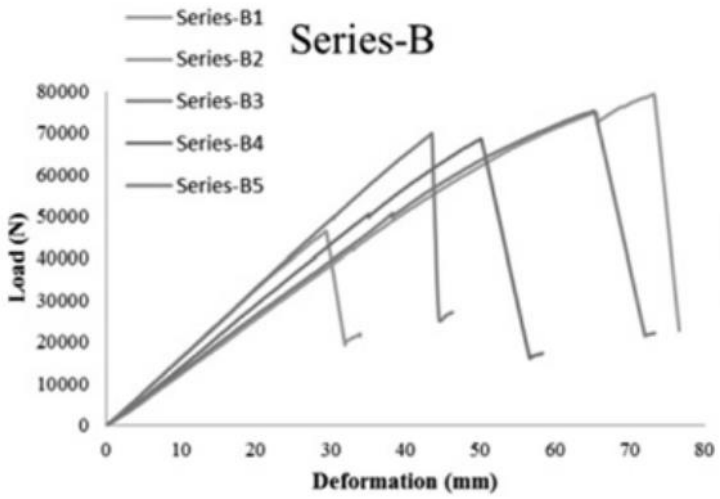



***Figura 4-5*** Resultados de la Serie B: Estudio Coreano; Fuente: *Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP"*

De su gráfico obtenemos que por una carga de 20.000N la deformación media de este forjado está en una franja entre los 10 y 15 mm.

A continuación, se realizó el cálculo de este mismo elemento en el programa RamSeries, se definió el forjado de la siguiente manera:

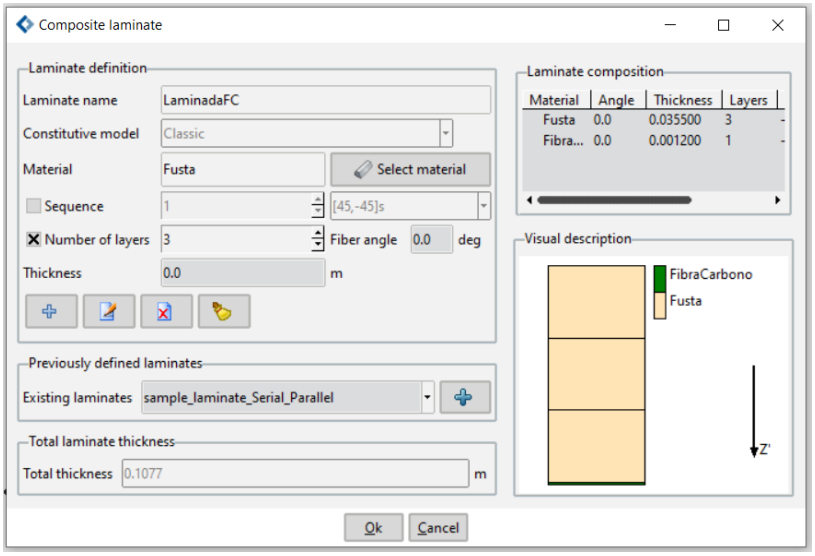



***Figura 4-6*** Composición de la Serie B; Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

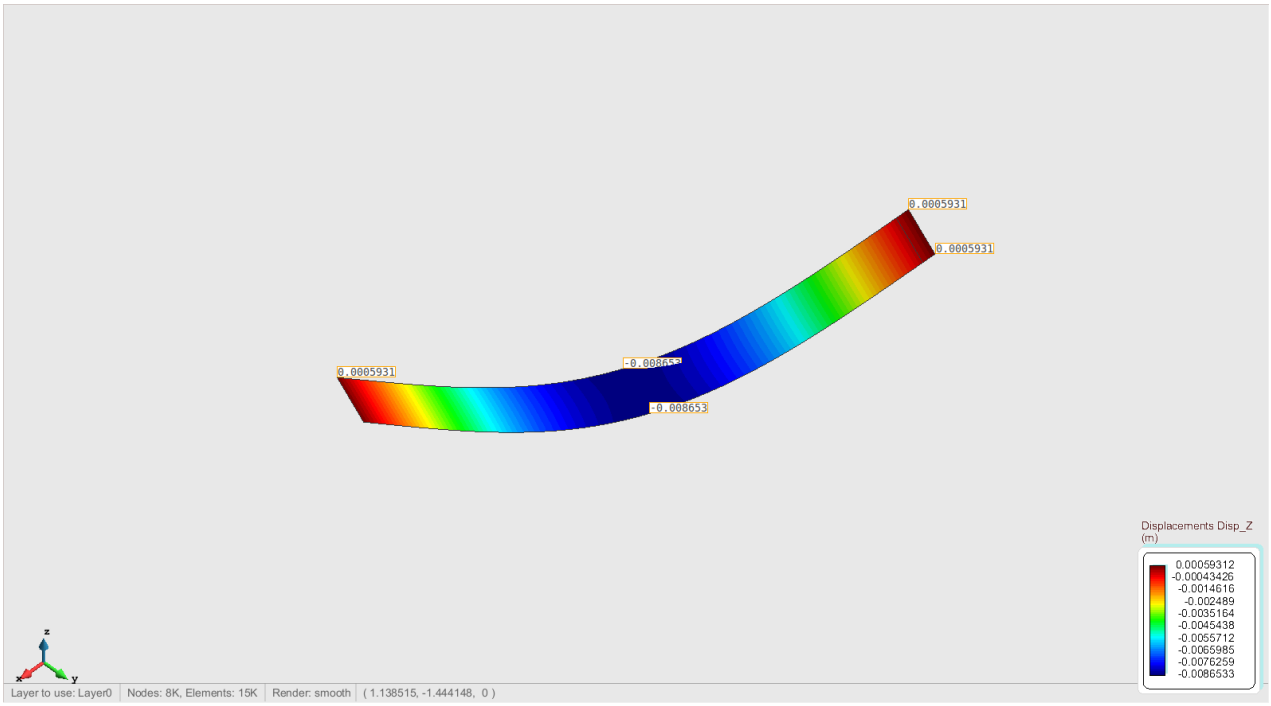



***Figura 4-7*** Deformación de la Serie B; Fuente: Elaboración propia

El punto máximo de la deformación de la simulación es de 8,65 mm, un valor con un margen de error del 2-3% sobre sus valores. Este error puede ser debido a las características de la fibra de carbono introducida en el programa de cálculo, distinta a la del estudio original.

### 4.2.3 Conclusiones

Se ha podido comprobar después de obtener los resultados y compararlos que el software Ram Series es una herramienta adecuada para realizar los cálculos de los elementos propuestos en este estudio comparativo. Ya que coinciden con los resultados obtenidos experimentalmente.

## 4.3 Comparación de una viga laminar de madera con vigas laminares composite

### 4.3.1 Introducción

En este punto del trabajo se compararán una serie de vigas de madera laminada de diferentes espesores y, se estudian casos con y sin lámina de fibra de carbono para observar el comportamiento de estos elementos sometidos a unas cargas.

### 4.3.2 Elementos y metodología

#### *4.3.2.1 Propiedades y elementos*

Las propiedades de los materiales difieren de los del estudio coreano por el motivo de que se han elegido materiales que podemos encontrar en catálogos de nuestro mercado. En base a estos las propiedades de los materiales son:

| **MATERIALES** | | |
|---|---|---|
| | Densidad (kg/m³) | Modulo Elástico (MPa) |
| Madera laminada encolada GL24h | 380 | 11600 |
| Fibra de carbono | 1750 | 450000 |

***Tabla 4-2*** *Propiedades de los materiales; Fuente: Elaboración propia*

Las vigas sometidas al estudio comparativo son las siguientes:

| **ELEMENTOS** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Viga | Material | Espesor madera (mm) | Lamina fibra de carbono | Espesor total vigas (mm) | Dimensiones Viga |
| Viga 1 | Madera laminada encolada GL24h | 400 | - | 400 | 240x400x6000 |
| Viga 2 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 400 | 1,2 mm | 401,2 | 240x401,2x6000 |
| Viga 3 | Madera laminada encolada GL24h | 440 | - | 440 | 240x440x6000 |
| Viga 4 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 320 | 1,2 mm | 321,2 | 240x321,2x6000 |
| Viga 5 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 320 | 2 mm | 322 | 240x322x6000 |

***Tabla 4-3*** *Elementos del comparativo*

Para más detalles sobre la composición de los elementos ver anexo (An. 2.1 Vigas)

La carga a la que se han sometido los elementos es de 35 kN/m$^2$.

El método de cálculo es el mismo que el explicado anteriormente, se realizó la geometría básica (Viga 1) y se sometió a la carga, los resultados obtenidos son la base para los siguientes cálculos para determinar el comportamiento de una viga laminada composite respecto a una viga laminada convencional.

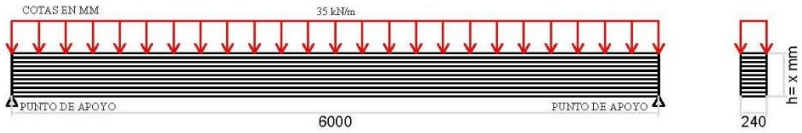



***Figura 4-8*** Esquema de condiciones del elemento; Fuente: Elaboración propia

Esquema básico del comparativo. A partir de este se desarrolla el estudio, reduciendo el canto y añadiendo la lámina de fibra de carbono.

### 4.3.3 Resultados

| TABLA COMPARATIVA RESULTADOS | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Deformación (mm) | Diferencia respecto inicial (%) | Fletxa límite L/350 6000/350 (mm) | PESO (kg) | Diferencia respecto inicial (%) | Cortantes (N/m) |
| Viga 1 | 9,96 | - | 17,14 | 218,88 | - | -108,31 |
| Viga 2 | 7,405 | -25 | 17,14 | 221,9 | +1,01 | -95,91 |
| Viga 3 | 7,51 | -24,6 | 17,14 | 240,77 | +10,00 | -108,76 |
| Viga 4 | 13,5 | +35 | 17,14 | 178,13 | -18,62 | -95,36 |
| Viga 5 | 11,33 | +11,4 | 17,14 | 180,14 | -17,7 | -96,79 |

***Tabla 4-4*** *Tabla comparativa de los resultados obtenidos*

De la tabla 4-4 podemos extraer como es el comportamiento de cada uno de los elementos sometidos a la misma carga.

Los resultados muestran que:

- Comparación Viga 1 – Viga 2:

  Añadiendo una lámina de 1,2 mm a la viga 1 se reduce en un 25% la deformada del elemento, aumentando el peso en únicamente un 1% y el cortante máximo en el punto central es un 11,45% menor que el elemento base.

- Comparación Viga 1 – Viga 4:

  En el caso de la viga 4, la de menor canto, la deformación augmenta en un 35%, lo que representan 3,54 mm más de deformación, pero reduce su peso en un 18,62%, un factor a tener en cuenta en una estructura. El cortante en este elemento también es menor en la parte central que en la Viga 1.

- Comparación Viga 1 – 5:

La viga número 5, como la número 4 reduce el canto en 8 cm de madera respecto a la 1, reduce su peso en 38,75 kg, un 17,7% menos y la deformación es solamente 1,37 mm. más.

- Comparación Viga 2 – 3:

Con la Viga número 3 se ha querido buscar la sección de madera que iguale a la sección de la Viga 2, reforzada con lámina de fibra de carbono. A igualdad de deformación podemos observar que con la Viga 2 reducimos 4 cm el canto y que el peso es un 8% menor que la Viga 3. Sin comparar los precios de los elementos la solución propuesta por la viga 2 es más efectiva que la Viga 3.

- Comparación Viga 2 – 4:

Reduciendo el canto en 8 cm respecto a la Viga 2 y con una diferencia de peso de 43,77 kg, se observa un augmento de 6,1 mm en la deformación.

- Comparación Viga 2 – 5:

La diferencia es menor que respecto a la Viga 4 augmentando el espesor de la fibra de carbono de 1,2 a 2 mm, la deformación se incrementa en 3,925 mm, y el peso se reduce en 41,76 kg.

- Comparación Viga 4 – 5:

Resulta interesante es que augmentando en solamente 0,8 mm la plancha de fibra de carbono respecto la viga número 3 se obtiene una reducción del 16,07% en la deformación augmentando 2 kg el peso global del elemento.

#### *4.3.3.1 Otros casos*

Además de los casos expuestos anteriormente se han realizado más simulaciones con distintos elementos, disponiendo la lámina de fibra de carbono en otras posiciones o añadiendo más laminas a los elementos anteriores para ver el comportamiento de estos.

Se ha seguido la misma metodología que hasta ahora y se han sometido a las mismas condiciones de contorno y cargas.

- Caso 1:

Viga de 401,2 mm de canto, con lámina de fibra de carbono en la fibra neutra de la viga.

La deformación de esta viga es de 9,88 mm, difiere en 0,08 mm respecto a la Viga 1, que significa menos de un 1% de mejora respecto al elemento inicial. Demostrando que el momento a flexión en la fibra neutra de la viga es 0.

- Caso 2:

Viga de 401,2 mm de canto, con lámina de fibra de carbono entre las planchas 6 y 7.

En este caso la mejora es de un 2,21 % respecto a la Viga número 1, y sigue siendo un número muy inferior al obtenido por la Viga 2, que consigue reducir la deformación en un 25% respecto a la Viga 1.

- Caso 3:

El caso 3 parte de la Viga 2 del comparativo, se añade una lámina de fibra de carbono en la fibra neutra de la viga como en el caso 1, la mejora respecto en este caso a la Viga 2 es solamente del 0,81%, resultado poco satisfactorio contando que el peso global del elemento son 3 kg más.

Estos tres primeros casos demuestran que el estrés a flexión se incrementa linealmente a medida que nos alejamos de la fibra neutra del elemento, encontrando el máximo en las fibras más alejadas de esta. Es por este motivo que la mejor posición para colocar la lámina de fibra de carbono es en la parte inferior del elemento.

- Caso 4:

Viga de 400 mm de canto con dos láminas de fibra de carbono en sus laterales, una en cada lado de 1,2 mm de espesor.

Se observa que el desplazamiento en el eje Z del elemento es de 7,193 mm, una cifra que difiere en un 3% respecto a la Viga 2, que tiene una deformación de 7,405 mm, elemento que lleva solamente una lámina de fibra de carbono en la cara inferior de la viga, respecto a la Viga 1 se obtiene un 27% menos de deformación.

Comparando los pesos, este elemento con las láminas en los laterales sitúa la báscula en 228,96 kg, 10,06 kg más que el elemento base (Viga 1) y 7,06 kg más respecto a la Viga 2, hecho que demuestra que las láminas en los laterales no son tan efectivas cuando están sometidas a compresión, ya que para obtener valores similares a los de la Viga 2 debes colocar más material, que significa más coste por elemento.

A cortante se observa que en el elemento de este caso 4, los cortantes se concentran en la unión de los dos elementos y en las láminas de fibra de carbono, representando con la misma escala de colores se visualiza que en los extremos los cortantes de la viga con las láminas en los laterales es inferior que en la Viga 1, alrededor de un 21,2 % menos (***Figura 4-9*** y ***Figura 4-10***).

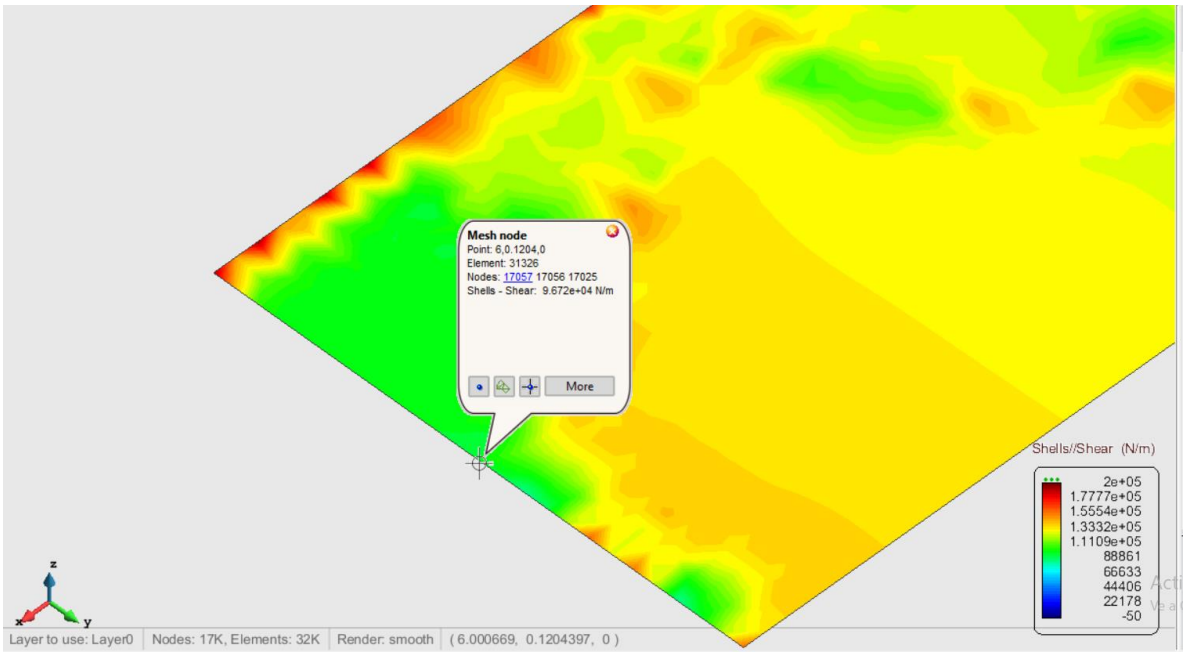



***Figura 4-9*** Viga 1: Cortante en extremo; Fuente: Elaboración propia

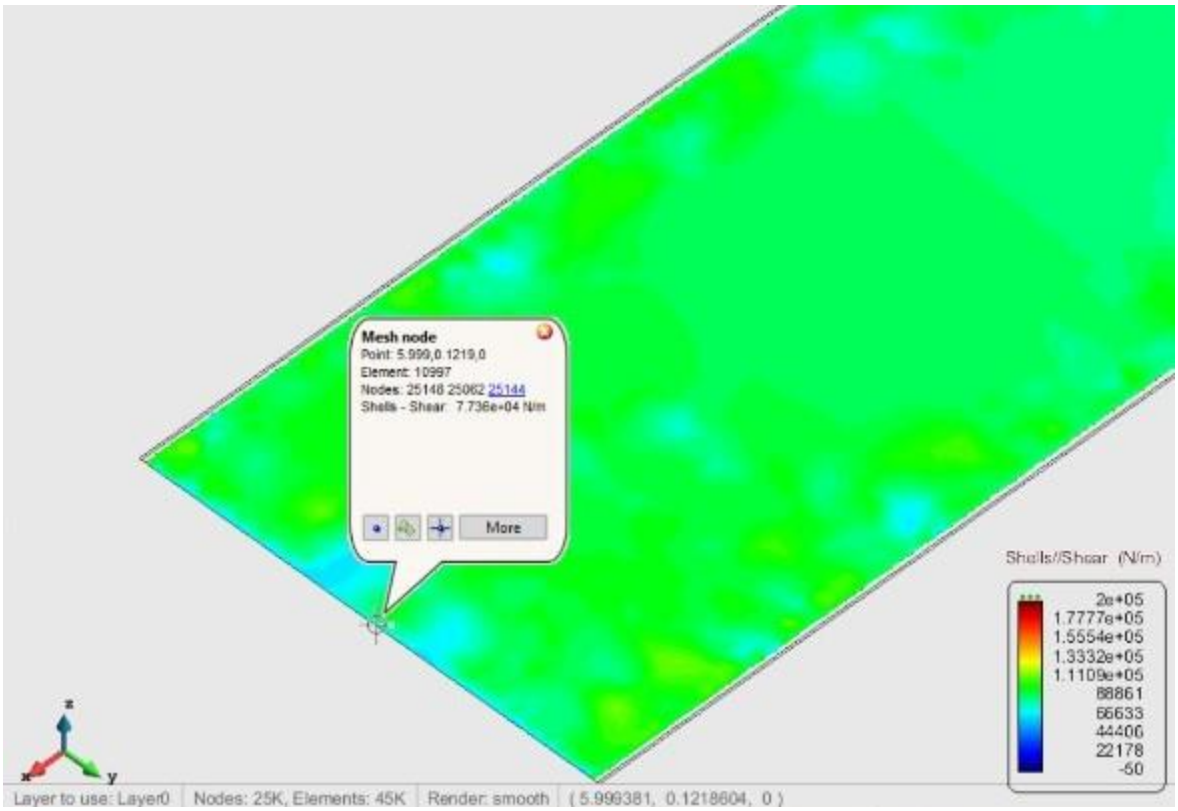



***Figura 4-10*** Viga con láminas laterales: Cortante en extremo; Fuente: Elaboración propia

### 4.3.4 Análisis de costes

Un factor a tener en cuenta es el precio de los elementos anteriormente comparados. A continuación se realiza un estudio de mercado para determinar el precio de cada elemento.

El precio de las vigas laminares es:

Viga laminar:

- Sección 240 x 400: 70,56 €/ml x 6 m = 423,36 €
- Sección 240 x 320: 61,74 €/ml x 6 m = 370,44 €
- Sección 240x 440: 79,38 €/ml x 6 m = 476,28 €

Fibra de carbono:

- Precio medio por $m^2$ = 30,88 €/ $m^2$

Área de fibra de carbono de las vigas 2, 3 y 4: 0,24 x 6 = 1,44 $m^2$

Área de fibra de carbono de la viga del caso 4: 0,40 x 6 x 2 = 4,80 $m^2$

| TABLA ANÁLISIS DE COSTES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Elemento | Precio Viga | $m^2$ Fibra de carbono | € Fibra de carbono | € Totales | % Diferencia |
| Viga 1 | 423,36 | - | - | 423,36 | Precio Base |
| Viga 2 | 423,36 | 1,44 | 44,46 | 467,96 | + 10,5% |
| Viga 3 | 476,28 | - | - | 476,28 | +12,5% |
| Viga 4 | 370,44 | 1,44 | 44,46 | 415,04 | -1,96% |
| Viga 5 | 370,44 | 1,44 | 44,46 | 415,04 | -1,96% |
| Viga Caso 4 | 423,36 | 2,40 | 148,22 | 518,66 | +22,5% |

***Tabla 4-5*** Comparativa de costes por elemento; Fuente: Elaboración propia

### 4.3.5 Relación Costes-Propiedades mecánicas

- Viga 2 - 3:

Resulta interesante la comparación de estas vigas, anteriormente, comparadas mecánicamente salía beneficiada la Viga 2, con un canto menor que la Viga 3 y un peso también inferior. En el apartado del precio se sigue esta tendencia, donde la Viga 2 es un 2% más económica que la Viga 3.

- Viga Caso 4:

Teniendo en cuenta el rendimiento mecánico de la viga del Caso 4, similar a la de la Viga 2, su mayor peso y su mayor precio respecto a las demás, la solución de colocar las laminas en los laterales es la menos eficiente de las soluciones propuestas en todos los aspectos.

### 4.3.6 Extensión a suelos

El comportamiento observado en las vigas se podria extrapolar a suelos, ya que los dos elementos trabajan a flexión.

## 4.4 Comparación del comportamiento de un pilar homogéneo de madera con pilares composite

### 4.4.1 Introducción

En este apartado se quiere comprobar el comportamiento de elementos que trabajan a compresión como son los pilares y ver el efecto que tiene el añadir una o varias láminas de fibra de carbono en sus laterales cuando sufren pandeo. Para realizar la comparativa se realizaron varias pruebas con diferentes condiciones de entorno para demostrar las teorías de deformación de Euler.

### 4.4.2 Teoría y metodología

Según las teorías de deformación de Euler, los pilares, según sus condiciones de entorno de sus nudos la longitud equivalente de pandeo será distinta. Esta longitud de pandeo ($L_k$) se calcula multiplicando la longitud del pilar (L) por el coeficiente K, que es distinto para cada situación.

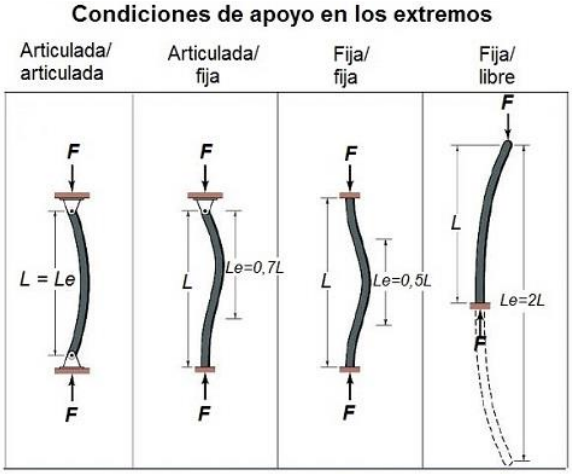



***Figura 4-11*** Condiciones de apoyo en los extremos, coeficiente K; Fuente: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html

| LONGITUD DE PANDEO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Condiciones de extremo | biarticulada | biempotrada | Empotrada articulada | Empotrada libre | Biempotrada desplazable |
| $L_e$ | 1,0 x L | 0,5 x L | 0,7 x L | 2,0 x L | 1,0 x L |

***Tabla 4-6*** Longitud de pandeo según condiciones de extremo

Partiendo con la base de cómo debería deformarse el pilar según sus condiciones en el extremo se realizó una primera simulación con un pilar homogéneo de madera de base rectangular (30x45), y tres metros de altura, sus extremos presentan la siguiente condición, el extremo inferior esta empotrado mientras que el extremo superior permite el desplazamiento y el giro en la dirección del eje Z, mientras que en los ejes X e Y no se permite el movimiento ni el giro, no encontramos pues con el caso Articulada/Fija de la ***Figura 4-11***.

Se realiza la simulación con un pilar de sección rectangular para favorecer la deformación en la dirección más flexible. Que en este caso es la que presenta un momento de inercia menor ($I_{min}$).

$$Ix = \frac{1}{12} \times B \times H^3 = \frac{1}{12} \times 0{,}30 \times 0{,}45^3 = \mathbf{2{,}28 \times 10^{-3}}$$

$$Iy = \frac{1}{12} \times B \times H^3 = \frac{1}{12} \times 0{,}45 \times 0{,}30^3 = \mathbf{1{,}01 \times 10^{-3}}$$

Como B < H → $I_y < I_x$, por lo tanto, $I_{min} = I_y$.

Esto significa que el pilar del estudio debe pandear en el plano XZ, alrededor del eje Y.

Se ha calculado la carga crítica del pilar para aplicarla después en el programa. Esta carga se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Pcr = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(\mathrm{L}e)^2}$$

Siendo (E) modulo elástico del material, (I) módulo de Inercia y (Le) la longitud efectiva, que se obtiene multiplicando la longitud del pilar por el factor K, que mide el grado de limitación contra rotación de los extremos. La carga crítica en el pilar del estudio es:

$$Pcr = \frac{\pi^2 \times 1{,}16 \times 10^{10} \times 1{,}01 \times 10^{-3}}{(0{,}7 \times 3)^2} = 26.220.472 \text{ N} = \mathbf{26.220\ kN}$$

En el software se aplica una carga de 30.000 kN centrada al eje del pilar para estar seguros de sobrepasar la carga crítica.

### 4.4.3 Resultados

Una vez introducidos los datos y las condiciones en la geometría se procede a realizar el cálculo. Se espera, según las teorías de pandeo un esquema de deformación con desplazamiento en el eje X con una longitud de pandeo equivalente a 0,7 L (Ver ***Figura 4-11***), sin embargo, si nos fijamos en los resultados de la tabla siguiente se observa que la deformación no cumple con la teoría de pandeo, ya que se observa sólo una compresión del pilar en el eje z.

Esto es debido a que el pandeo es un fenómeno dinámico que ocurre de golpe al exceder la carga límite pero el programa Ram-series contempla sólo la solución estática por lo que no es capaz de simular esta reacción.

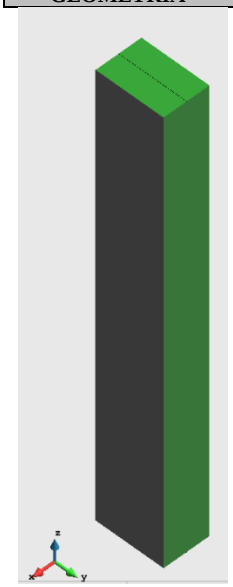
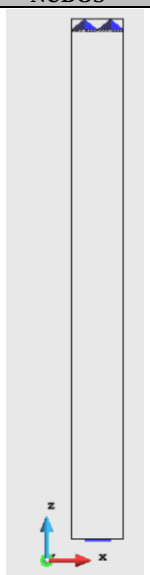
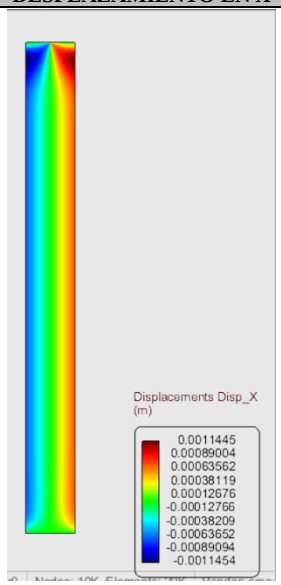
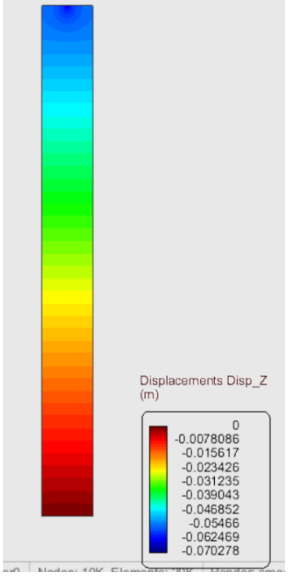
| GEOMETRIA | NUDOS | DESPLAZAMIENTO EN X | DESPLAZAMIENTO EN Z |
|---|---|---|---|
|  |  |   |   |

***Tabla 4-7*** Resumen de condiciones y resultados de la simulación

Al observar que por las condiciones perfectas no cumple con la teoría, el siguiente paso para observar el comportamiento de pilares es someter al mismo elemento a iguales condiciones de extremos a una carga axil excéntrica y, así poder determinar el efecto de las láminas de fibra de carbono en los pilares.

### 4.4.4 Modelos con carga axil excéntrica

#### *4.4.4.1 Introducción y elementos*

Para superar esta limitación del programa se consideró la posibilidad de realizar la comparativa utilizando cargas axil excéntricas lo que produce una componente lateral que provocará una deformación del pilar. En este apartado se somete al mismo pilar de 300 x 450 mm del apartado anterior a una carga axil de 3000 kN aplicada en el lado izquierdo ***Figura 4-12***.

Los materiales utilizados para este comparativo son los siguientes.

| **MATERIALES** | | |
|---|---|---|
| | Densidad (kg/m³) | Modulo Elástico (MPa) |
| Madera | 380 | 11600 |
| Fibra de carbono | 1750 | 450000 |

***Tabla 4-8*** Propiedades de los materiales

Los elementos sometidos al comparativo son los siguientes:

| **ELEMENTOS** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Viga | Material | Base madera (mm) | nº de láminas y espesor | Posición | Dimensiones Pilar (A x B x H) |
| Pilar 1 | Madera | 300 x 450 | - | - | 300x450x3000 |
| Pilar 2 | Mad. + FC | 300 x 450 | 1 x 1,2 mm | 1 lateral lado derecho | 301,2x450x3000 |
| Pilar 3 | Mad. + FC | 300 x 450 | 1 x 1,2 mm | 1 lateral lado izquierdo | 301,2x450x3000 |
| Pilar 4 | Mad. + FC | 300 x 450 | 2 x 1,2 mm | 2 laterales | 302,4x450x3000 |

***Tabla 4-9*** Elementos del comparativa; Fuente: Elaboración propia

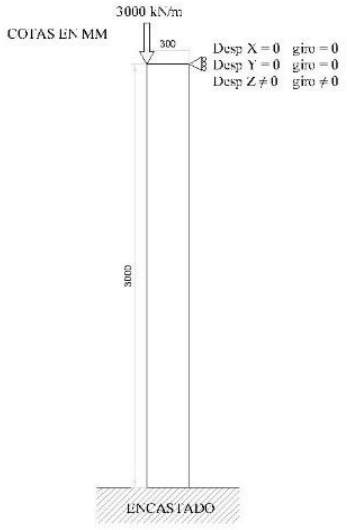



***Figura 4-12*** Esquema de condiciones del elemento; Fuente: Elaboración propia

Todos presentan la misma condición en sus extremos, en el nudo inferior el pilar se encuentra empotrado, mientras que el extremo superior permite el desplazamiento y el giro en la dirección del eje Z, mientras que en los ejes X e Y no se permite el movimiento ni el giro.

El pilar tiene una altura de 3 m.

Esquema básico del comparativo. A partir de este se desarrolla el estudio, reduciendo el canto y añadiendo la lámina de fibra de carbono.

Para más detalles sobre la composición de los elementos ver Anexo 2.2

#### *4.4.4.2 Resultados*

| TABLA COMPARATIVA RESULTADOS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Deformación en X (mm) | Diferencia respecto inicial (%) | Deformación en Y (mm) | Deformación en Z (mm) | Diferencia respecto inicial (%) |
| Pilar 1 | 13,03 | - | - | 12,5 | - |
| Pilar 2 | 9,82 | -25 | - | 10,90 | -12,8 |
| Pilar 3 | 6,39 | -49 | - | 6,48 | -48,16 |
| Pilar 4 | 5,23 | -60 | - | 5,77 | -55,71 |

***Tabla 4-10*** Tabla comparativa de los resultados

De la tabla 5-11 podemos extraer como es el comportamiento de cada uno de los elementos sometidos a la misma carga.

Los resultados muestran que:

- Comparación Pilar 1 – Pilar 2:

  Añadiendo una lámina de 1,2 mm al pilar 1 en la cara más alejada de la carga se reduce en un 25% la deformada del elemento en el eje X. El punto de más deformación en el eje Z con la lámina se reduce un 12,8% respecto al pilar 1, respecto al punto inicial se encuentra a 10,90 mm.

- Comparación Pilar 1 – Pilar 3:

  En este caso la lámina se encuentra en la misma cara donde se ejerce la carga excéntrica. La deformación en este caso se reduce en un 49% en el eje X respecto la inicial del pilar 1. La deformación máxima también se reduce aproximadamente un 50%, con una diferencia de 6,02 mm.

- Comparación Pilar 1 – 4:

  Era de esperar observando el comportamiento de los pilares 2 y 3 que este pilar numero 4 sea el que menor deformación tenga respecto al 1. En este caso la reducción es de un 60% en el eje X y un 55% en el eje X.

- Comparación Pilar 2 – 3:

  Resulta interesante que en el caso de los pilares donde la lámina trabaje mejor para evitar la deformación sea la misma donde se ejerza la fuerza y no en la cara más alejada. Entre los dos pilares hay una diferencia de 3,43 mm en la deformación en el eje X, siendo el pilar 3 el que mejor se comporta. Esta menor deformación en el eje X hace también disminuir la compresión en el eje Z en un 40,5%.

- Comparación pilar 3 – 4:

  Añadir la segunda lamina respecto al pilar 3 se traduce en una mejora de la deformación en el eje X de 1,16 mm, un 18,15% menos. En eje Z esta diferencia se queda en un 10,95% a favor del pilar 4.

En el caso de los pilares colocar una lámina no es la solución más efectiva, se sabe que la deformación lateral de un pilar se produce en el caso de pilares rectangulares en la dirección donde el momento de inercia es menor, pero no se puede deducir hacia qué lado pandeara si tenemos en cuenta únicamente un axil centrado al eje del pilar. En una sección cuadrada, donde el momento de inercia es igual en los dos sentidos X e Y, la dirección de la deformación será imprevisible y puede producirse en todos los sentidos. Por último, en un pilar de sección circular el pandeo o deformación se podrá producir en cualquier dirección.

Todas estas posibilidades hacen que resulte más difícil la decisión de colocar la lámina en los pilares, en los rectangulares se demuestra que la posición optima es en las dos caras largas, y en los casos de sección cuadrada y circular lo óptimo seria colocar las láminas alrededor de todo su perímetro, lo que nos lleva a la técnica ya conocida de confinamiento en las técnicas de refuerzo estructural.

# Conclusiones

El objetivo de este trabajo era conocer en primer lugar el material de la fibra de carbono y en segunda instancia, descubrir las posibilidades que tiene en un futuro no muy lejano en el ámbito de la arquitectura y de la construcción y ver su comportamiento realizando unas simulaciones con un programa de cálculo para demostrar las capacidades de estructuras composite basada en madera y fibra de carbono.

Una vez realizados los cálculos y extraído y analizado los resultados de las simulaciones de los elementos, se demuestra el potencial que tiene la fibra de carbono para realizar estructuras composite con madera.

En el caso de las vigas se han extraído las siguientes conclusiones:

- No es necesario añadir una gran cantidad de fibra de carbono para conseguir resultados satisfactorios. Añadiendo solamente una lámina de 1,2 mm al elemento es posible reducir un 25% la deformación.
- Reduciendo el canto y añadiendo la lámina se reduce peso del elemento y se obtienen las mismas capacidades resistentes mecánicas por un precio similar (como se ha observado en la viga 2 y 3).
- Con un aumento relativamente pequeño de la sección de fibra de carbono se favorece aún más el comportamiento, como se ha podido observar en la Viga 5, aumentado solamente 0,8 mm la sección de fibra de carbono produce que se reduzca un 16% la deformación, incrementando solamente un 1% el peso global del elemento (como se ha podido observar en la viga 5 respecto la 4).
- Se ha comprobado también cual es la posición óptima para la colocación de las láminas de fibra de carbono realizando una serie de simulaciones con la lámina en diferentes posiciones. Siendo la cara inferior de la Viga la que mejor relación presenta entre comportamiento y cantidad de fibra de carbono utilizada, al ser donde se produce mayor estrés por flexión..
- Colocar la lámina en la cara inferior también favorece al cortante con respecto a la inserción de las láminas en los laterales, que ha resultado la forma más ineficiente de colocar las láminas.

  A nivel de cortantes la reducción no es tan favorable en el punto central de la viga, si en los extremos, donde la reducción alcanza el 20%, pero se trasladan a la unión entre los dos materiales y a la fibra de carbono. A efectos de la deformación se ha comprobado que se requiere de más material para alcanzar valores similares que aquellas vigas con la fibra en la cara inferior, lo que supone más precio y más coste por elemento.

Las ventajas de reducir el peso global de la estructura es que favorece que los cantos de vigas y suelos sean más reducidos, por lo que se utiliza menos volumen de material, que a la vez se traduce en unos costes más contenidos en las partidas de estructura y transporte de esta.

Estos resultados en las vigas se podrían extrapolar a otros elementos que trabajen a flexión, como los suelos de CLT.

Este trabajo se ha querido centrar en el aspecto estructural y mecánico. Dejando a un lado aspectos como el acabado de la estructura.

En el caso de los pilares se han extraído las siguientes conclusiones;

- Colocar una única lámina no es la solución más efectiva, debido a que no se sabe en qué dirección pandeará el pilar si no se conoce la excentricidad de la carga.
- En pilares rectangulares se debe colocar las láminas en las caras largas de este.
- En pilares cuadrados y con sección circular, al no saber en qué dirección pandeará se recurrirá a colocar fibra de carbono alrededor del perímetro del elemento, que nos lleva a la técnica ya conocida de confinamiento en las técnicas de refuerzo estructural.
- En pilares rectangulares añadiendo las láminas de 1,2 mm en las caras largas se puede llegar a reducir en un 60% la deformación del pilar.

Las conclusiones extraídas del comportamiento de pilares de sección rectangular se podrían extrapolar al comportamiento de muros.

El precio es uno de los motivos por los cuales algunas soluciones o materiales se descartan para realizar obras, es el caso de la fibra de carbono, su precio se sitúa por encima de la media de los materiales usuales, pero se ha comprobado que encontrando el equilibrio entre los materiales es posible conseguir los mismos resultados a precio similar con las ventajas que se han comentado. Aunque esto no signifique que siga siendo un impedimento a la hora de colocar este material en mayor proporción para que no se dispare el precio de la estructura, pero la tendencia es a la baja, por lo que no hay motivos para no creer en una instauración más generalizada de este material y en mayor proporción respecto la madera u otros materiales.

Se puede deducir del estudio de las aplicaciones en la arquitectura y de los resultados del comparativo, que quedan años de desarrollo hasta que sea un material a considerar como principal junto al hormigón, el acero y la madera. Pero que la fibra de carbono puede ser una gran aliada para realizar estructuras de madera de mayor envergadura u otro tipo de estructuras y usos por las cualidades que tiene como material como se está desarrollando en otras industrias.

## Bibliografía

- Architecture and design (2019, agosto). US researchers develop engineered timber from recycled carbon fibre. *Architecture and design.* Recuperado en https://www.architectureanddesign.com.au/sustainability-awards/engineered-timber-from-recycled-carbon-fibre#

- BAQUER, J. (coordinador). Monográfico, *La fibra de carbono en refuerzo de estructures de hormigón*. Institut d'Estudis Estructurals.

- Características Vigas laminares

  https://www.binderholz.com/es/

- Composite Arch Bridges. Advanced Structures & Composites Center. *The university of Maine.* Recuperado en https://composites.umaine.edu/research/bridge-in-a-backpack/

- Digital Architects. https://www.digitalarchitects.at/agm/

- Egoin https://egoin.com/

- FRANCIS, S. (2019, abril). Th estate of recycled carbon fiber. *Composites World.* Recuperado en https://www.compositesworld.com/articles/the-state-of-recycled-carbon-fiber

- Fustes Sebastia. https://www.sebastia.eu/

- GARDINER, G. (2014, noviembre). Recycled carbón fiber: Comparing cost and properties. *Composites World.* Recuperado en https://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-comparing-cost-and-properties

- Generador de preciós. http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva

- HELMENSTINE, A. (2019, septiembre). What is a Polymer?. ThoughtCo. Recuperado en https://www.thoughtco.com/definition-of-polymer-605912

- HOODIN, K. (2019, marzo). WSU Researchers are Turning Carbon Fiber into Green Building Materials. *Composites Manufacturing.* Recuperado en http://compositesmanufacturingmagazine.com/2019/03/wsu-researchers-are-turning-recycled-carbon-fiber-into-green-building-materials/

- Ingemecanica.

  https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html
  https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html (Marzo de 2021)

- Kakoverings. https://www.kacoverings.com/que-es-un-composite/

- KNIPPERS, J & MENGES, A. (2017). ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17. *University of Stuttgart*. Recuperado en https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2016-17/

- Koenigsegg. (2015) #Build 128 Agera RS Station 1: Chassis Bonding. Recuperado en https://www.koenigsegg.com/build128-agera-rs-station-1-chassis-bonding/

- MCCONNELL, V. (2020, marzo). The making of carbon fiber. *Composites World*. Recuperado en https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-carbon-fiber

- MENGES, A & KNIPPERS, J. (2019) BUGA Fibre Pavilion 2019. *University of Stuttgart*. Recuperado en https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-fiber-pavilion/

- MORGAN, P. (2005). Carbon Fibers and their Composites (1ª ed). Boca Raton: CRC Press

- Perfiles pultrusionados de fibra de vidrio o prfv: Estructuras, Barandillas, Escaleras. Recuperado en https://www.eurograte.es/perfiles_pultrusionados/ https://www.eurograte.es/doc/Catalogo-Perfiles-Estructuras-Eurograte.pdf

- Prontubeam. https://www.prontubeam.com/Pag_prontu_inercias_secciones.php?tipo_prontuario=2

- Plastiform (precio Fibra de Carbono)

  Tejido carbono (Metro cuadrado) - Cronolab Spain, S.L.

- SLOAN, J. (2017, agosto). Recycled carbon fiber moves into automotive. *Composites World*. Recuperado en https://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-moves-into-automotive

- Teijin Carbon. https://www.teijincarbon.com/applications/civil-engineering?r=1

- Types of Aircraft Construction. *Student Pilot Portal*. Recuperado en: https://studentpilotportal.com/lessons/types-of-aircraft-construction

- https://www.cairn.info/revue-cahiers-d-histoire-de-l-aluminium-2011-1-page-50.htm# (Fuente original texto: Cahiers d'histoire de l'aluminium 2011/1-2 (nº46-47) Institut pour l'histoire de l'aluminium. (pag 50 a 67)

- Y. SONG, I. LEE, DA-BIN SONG, SOONIL HONG (2019, enero) "Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP" Recuperado en https://www.semanticscholar.org/paper/EVALUATION-OF-DELAMINATION-AND-BENDING-PERFORMANCE-Song-Lee/23cacec92c8c04ae7f86d6c82ed5ea06faba7952

# Índice de figuras

***Figura 1-1*** Esquema composición composite. Fuente: www.kacoverings.com/que-es-un-composite/ 2
***Figura 1-2*** Esquema obtención fibra de carbono, fuente: propia 3
***Figura 1-3*** Esquema línea de producción, fuente: Illustration | Karl Reque; Source material | Grafil Inc. 4
***Figura 1-4*** Características de la superficie Fuente: Grafil Inc 5
***Figura 1-5*** Comparación entre fibra de carbono virgen (VCF) y fibra de carbono reciclada (RFC) en términos de Modulo de Young (E) y fuerza (X); Fuente: Web CompositesWorld, ver link en bibliografía (09/06/2020) 6
**Figura 2-1** Chasis monocasco de fibra de carbono de Koenigsegg; Fuente: Web de Koenigse10
**Figura 2-2** Materiales usados en la construcción de un Boeing 787; Fuente: Student Pilot Portal 10
Figura 3-1 Imagen del pabellón ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17; Fuente: Web del ICD, Burggraf / Reichert 17
Figura 3-2 Nido de Lyonetia clerkella; Fuente: Web del ICD, imágenes del proceso. 17
Figura 3-3 Modelo de elementos finitos del pabellón; Fuente: Web del ICD, imágenes del proceso. 18
***Figura 3-4*** BUGA Fibre Pavilion 2019; Fuente: Web del ICD 18
Figura 3-5 Composición de una biga composite CFRW; Fuente: Teijin 19
**Figura 3-6** Composición del panel AGM; Fuente: Web de Digital Architects 20
**Figura 3-7** Proceso de construcción del panel CONCEPT AIA; Fuente: Web de Digital Architects 20
**Figura 3-8** Render del UVA Learning Center, Digital Architects; Fuente: Web de Digital Architects 20
**Figura 3-9** Puente en construcción con sistema Composite; Fuente: Canal de Youtube de la Universidad de Maine 21
**Figura 4-1** Esquema cargas estudio coreano; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del estudio 25
***Figura 4-2*** Resultados de la Serie A: Estudio Coreano; Fuente: *Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP"* 26
***Figura 4-3*** Composición de la Serie A; Fuente: Elaboración propia 26
***Figura 4-4*** Deformación de la Serie A; Fuente: Elaboración propia 27
***Figura 5-5*** Resultados de la Serie B: Estudio Coreano; Fuente: *Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP"* 28
***Figura 4-6*** Composición de la Serie B; Fuente: Elaboración propia 28
***Figura 4-7*** Deformación de la Serie B; Fuente: Elaboración propia 29
***Figura 4-8*** Esquema de condiciones del elemento; Fuente: Elaboración propia 31
***Figura 4-9*** Viga 1: Cortante en extremo; Fuente: Elaboración propia 34
***Figura 4-10*** Viga con láminas laterales: Cortante en extremo; Fuente: Elaboración propia 34
***Figura 4-11*** Condiciones de apoyo en los extremos, coeficiente K; Fuente: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html 36
***Figura 4-12*** Esquema de condiciones del elemento; Fuente: Elaboración propia 39
**Figura AN-0-1** Interface del Programa: Pantalla de definición del elemento; Fuente: Elaboración propia 49
**Figura AN-0-2** Interface del programa: Pantalla general; Fuente: Elaboración propia 50
***Figura AN-0-3*** Interface del programa, Representación de las cargas; Fuente: Elaboración propia 50
***Figura AN-0-4*** Convergencia de la malla; Fuente: Elaboración propia 51
***Figura AN-0-5*** Interface del programa: Esquema de resultados; Fuente: Elaboración propia 52

***Figura AN0-6*** Cuadro resumen posición lámina FC en Vigas; Fuente: Elaboración propia 53
***Figura AN0-7*** Cuadro resumen posición lámina FC en Pilares; Fuente: Elaboración propia 54
***Figura AN0-8*** Deformada Viga 1; Fuente: Elaboración propia 55
***Figura AN0-9*** Deformada Viga 2; Fuente: Elaboración propia 56
***Figura AN0-10*** Deformada Viga 3; Fuente: Elaboración propia 56
***Figura AN0-11*** Deformada Viga 4; Fuente: Elaboración propia 57
***Figura AN0-12*** Deformada Viga 5; Fuente: Elaboración propia 57
***Figura AN0-13*** Deformada Pilar 1; Fuente: Elaboración propia 58
***Figura AN0-14*** Deformada Pilar 2; Fuente: Elaboración propia 59
***Figura AN0-15*** Deformada Pilar 3; Fuente: Elaboración propia 59
***Figura AN0-16*** Deformada Pilar 4; Fuente: Elaboración propia 60

# Índice de tablas

**Tabla 1-1**Comparación de las capacidades mecánicas; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de varias publicaciones 7
**Tabla 1-2** Comparativa de densidades de la fibra de carbono respecto metales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del CTE 8
**Tabla 1-3** Comparativa del comportamiento respecto al calor en materiales estructurales; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos del CTE 8
***Tabla 3-1*** Cuadro resumen tipologías y uso de elementos de refuerzo; Fuente: propia, datos extraídos de, La Fibra de Carbono en Refuerzos de Estructuras de Hormigón, Josep Baquer Sistach 14
**Tabla 3-2** Comparación perfil HEB metálico con perfil pultrusionado de plásticos reforzados con fibra de vidrio; Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de Eurograte (perfil de plástico reforzado) y Prontubeam 16
**Tabla 4-1** Propiedades de los suelos del estudio; Fuente: "Evaluation of delamination and bending perfomance of composite CLT reinforced with CRFP" 25
Tabla 4-2 Propiedades de los materiales; Fuente: Elaboración propia 30
Tabla 4-3 Elementos del comparativo 30
Tabla 4-4 Tabla comparativa de los resultados obtenidos 31
***Tabla 4-5*** Comparativa de costes por elemento; Fuente: Elaboración propia 35
***Tabla 5-6*** Longitud de pandeo según condiciones de extremo 36
***Tabla 4-7*** Resumen de condiciones y resultados de la simulación 38
***Tabla 4-8*** Propiedades de los materiales 39
***Tabla 4-9*** Elementos del comparativa; Fuente: Elaboración propia 39
***Tabla 4-10*** Tabla comparativa de los resultados 40
Tabla AN-0-1 Comprobación de la malla 51
***Tabla AN0-2*** Elementos del comparativo Vigas; Fuente: Elaboración propia 53
***Tabla AN0-3*** Elementos del comparativo Pilares; Fuente: Elaboración propia 54
***Tabla AN0-4*** Resultados del comparativo de las Vigas; Fuente: Elaboración propia 55

# Anexos a la memoria

## An. 1 Software utilizado – Ram Series

RamSeries es un completo entorno de elementos finitos (FEM) para el análisis estructural que proporciona la capacidad de analizar todos los aspectos estructurales de un producto.

El motivo por el cual se usa este programa es que este ofrece utilidades avanzadas para el análisis de estructuras compuestas de vigas y láminas de compuestos laminares, y dispone de una intuitiva interfaz de usuario para la definición de los materiales, secuencias de laminado y su dirección, basada en la orientación de líneas geométricas o ejes locales o globales. RamSeries puede gestionar unas bases de datos de secuencias predefinidas y materiales.

### An. 1.1 Definición de los elementos

Para definir los elementos, previamente se deben introducir las características de los materiales en la base de datos del programa. Seguidamente se dibuja la geometría deseada en 2D, ya que se definirá el espesor del elemento laminar a partir del espesor de cada lamina y material del que está compuesto, como se puede observar en la imagen siguiente.

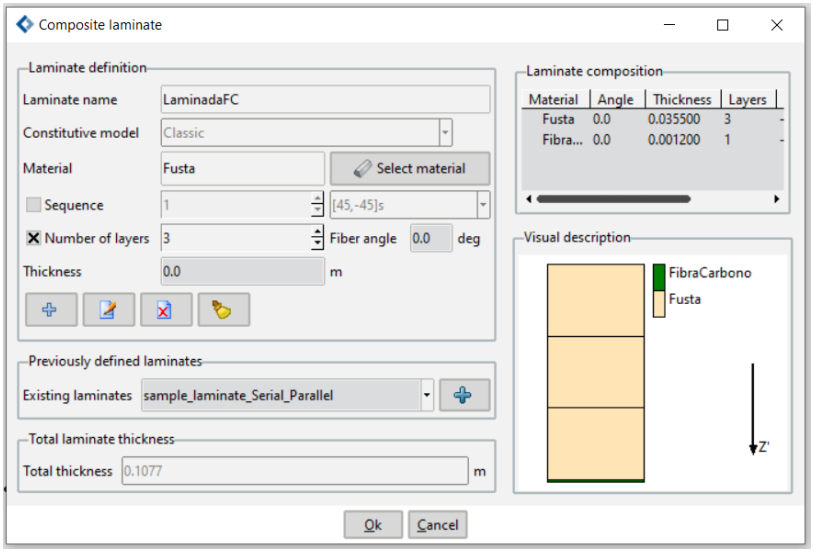



***Figura AN-0-1*** Interface del Programa: Pantalla de definición del elemento; Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el elemento se procede a introducir las cargas y se definen como son los puntos de apoyo. Todo se realiza a partir del menú que se encuentra en el lado derecho de la pantalla.

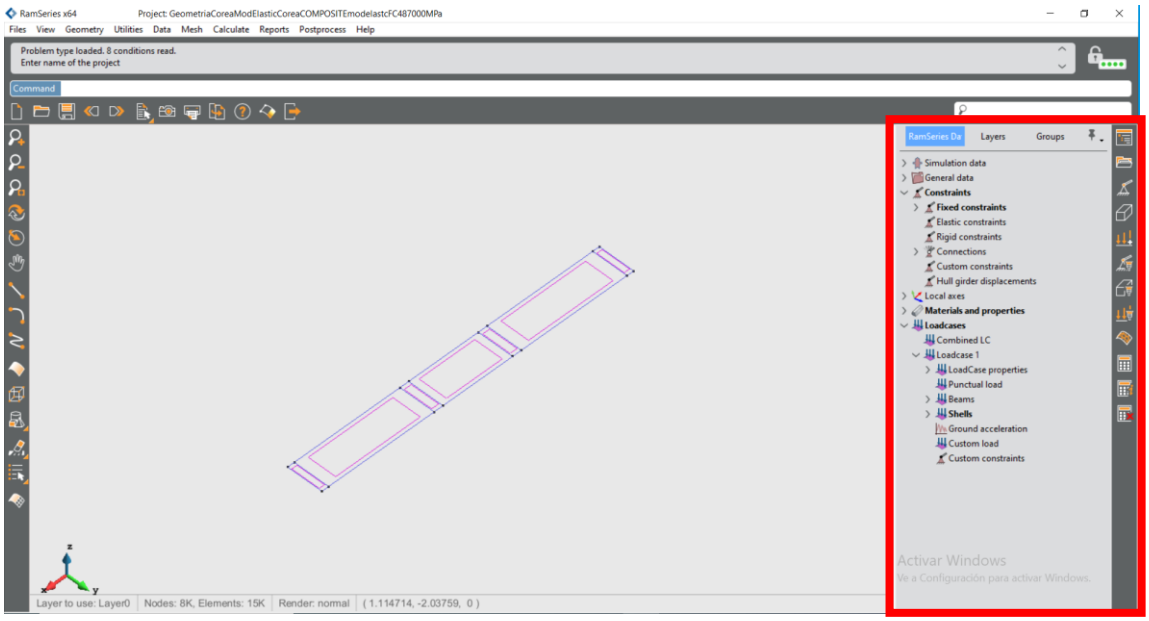



***Figura AN-0-2*** Interface del programa: Pantalla general; Fuente: Elaboración propia

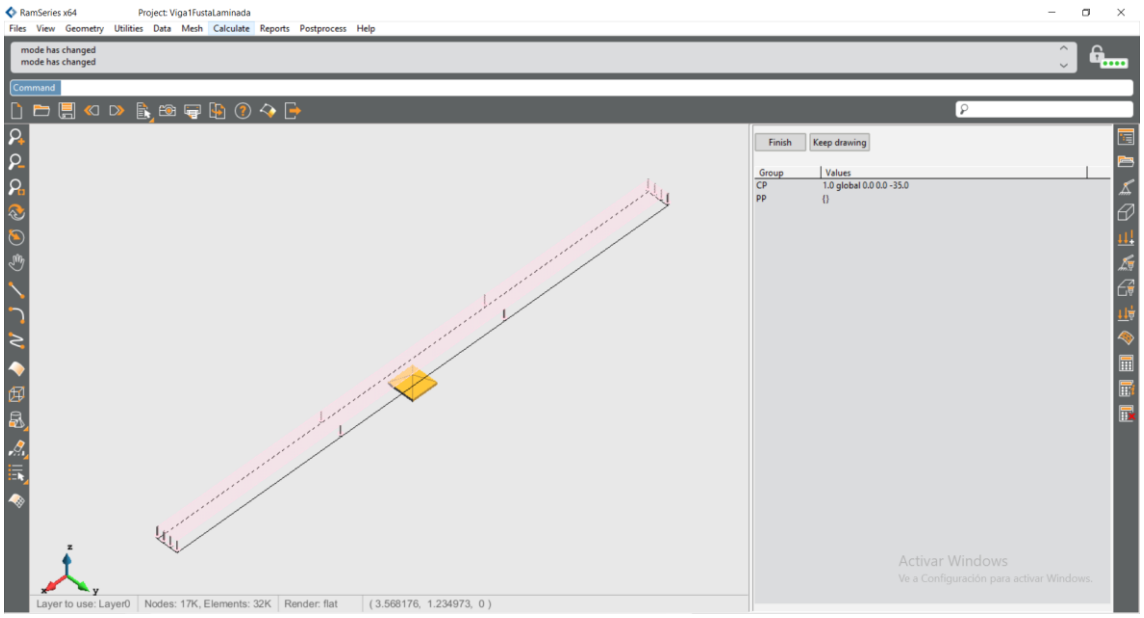



***Figura AN-0-3*** Interface del programa, Representación de las cargas; Fuente: Elaboración propia

Hasta aquí se ha observado la definición del elemento a estudiar. A partir de este momento se puede realizar el cálculo y observar cómo se comporta el elemento.

### An. 1.2 Cálculo del elemento y extracción de los resultados

Para realizar el cálculo se debe generar una malla de elementos, cuantos más elementos tenga esta malla mejor definida estará la geometría y más exacto será el resultado. Para saber cuál es la malla adecuada teniendo en cuenta el error que la malla produce se ha realizado un estudio de convergencia. Se entiende por convergencia cuando al refinar la malla, el resultado no varía y, por lo tanto, el error es despreciable.

En la geometría del estudio comparativo se han comprobado las siguientes mallas.

| DEFINICIÓN DE LA MALLA | | | | |
|---|---|---|---|---|
| TAMAÑO DE LA MALLA | NODOS | ELEMENTOS | DEFORMADA (m) | DEFORMADA (mm) |
| 0,5 | 30 | 28 | 0,0099084 | 9,9084 |
| 0,1 | 182 | 238 | 0,0099639 | 9,9639 |
| 0,05 | 715 | 1178 | 0,0099641 | 9,9641 |
| 0,01 | 17069 | 32888 | 0,0099643 | 9,9643 |

***Tabla AN-0-1*** *Comprobación de la malla*

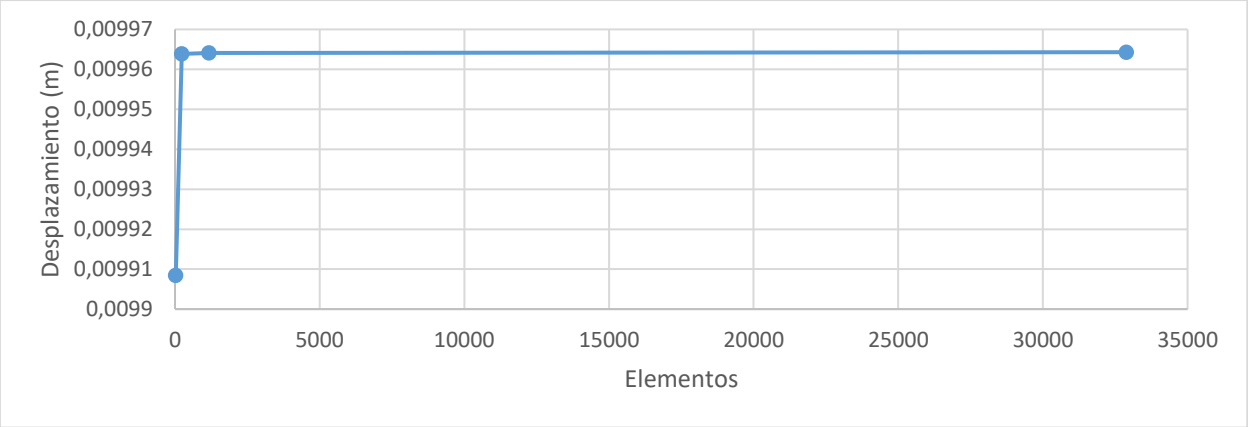



***Figura AN-0-4*** Convergencia de la malla; Fuente: Elaboración propia

De los resultados de la tabla se obtiene la gráfica siguiente, donde se observa que el error entre las dos mallas más densas es imperceptible por más elementos que introduzcas.

El tamaño de la malla utilizado para este trabajo es de 0,01 m.

Una vez definida la malla se pueden realizar los cálculos y obtener los resultados.

Los resultados se muestran de forma intuitiva a través de una escala de colores o a partir de vectores, pudiendo diferenciar a simple vista el comportamiento del elemento calculado. Se obtienen los resultados para todas las direcciones.

Los resultados que podemos extraer son:

- Deformada, Torsión, Reacciones, axiales y momentos, Reacción a cortantes

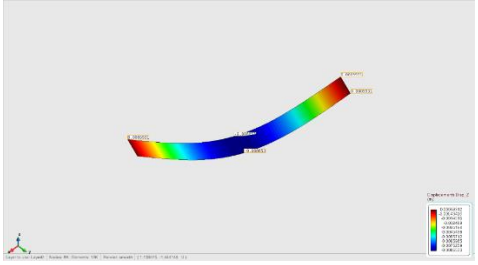


***Figura AN-0-5*** Interface del programa: Esquema de resultados; Fuente: Elaboración propia

## An. 2 Definición de elementos

### An. 2.1 Vigas

| ELEMENTOS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Viga | Material | Espesor madera (mm) | Lamina fibra de carbono | Espesor total vigas (mm) | Dimensiones Viga |
| Viga 1 | Madera laminada encolada GL24h | 400 | - | 400 | 240x400x6000 |
| Viga 2 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 400 | 1,2 mm | 401,2 | 240x401,2x6000 |
| Viga 3 | Madera laminada encolada GL24h | 440 | - | 440 | 240x440x6000 |
| Viga 4 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 320 | 1,2 mm | 321,2 | 240x321,2x6000 |
| Viga 5 | Mad. Lam. GL24h + Fibra de carbono | 320 | 2 mm | 322 | 240x322x6000 |

***Tabla AN0-2*** Elementos del comparativo Vigas; Fuente: Elaboración propia

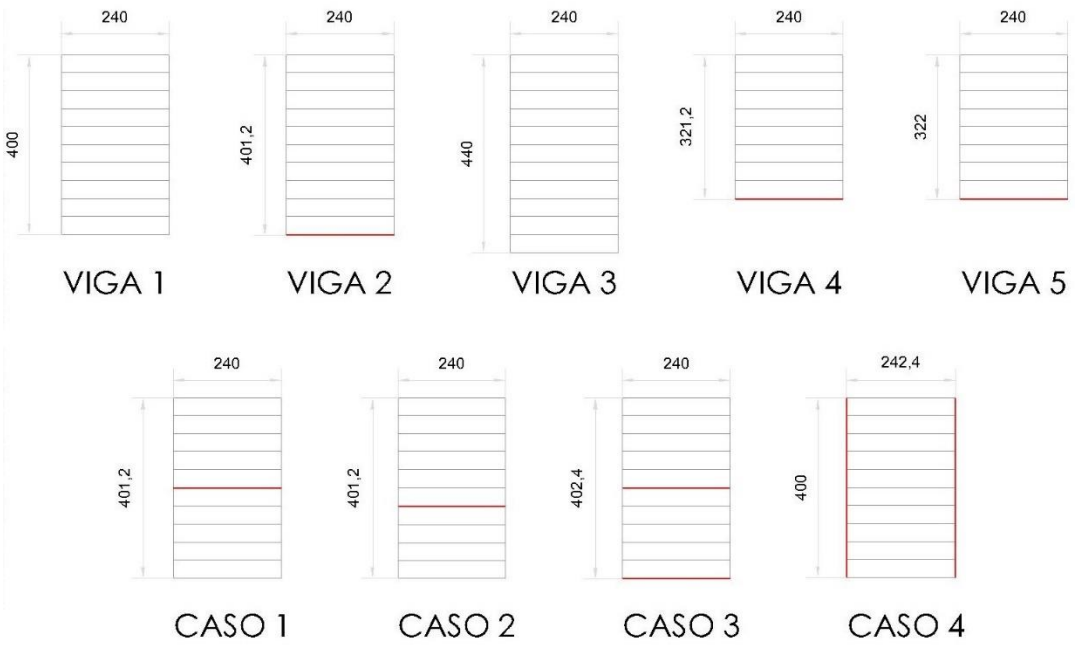



***Figura AN0-6*** Cuadro resumen posición lámina FC en Vigas; Fuente: Elaboración propia

## An. 2.2 Pilares

| ELEMENTOS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Viga | Material | Base madera (mm) | nº de láminas y espesor | Posición | Dimensiones Pilar (A x B x H) |
| Pilar 1 | Madera | 300 x 450 | - | - | 300x450x3000 |
| Pilar 2 | Mad. + FC | 300 x 450 | 1 x 1,2 mm | 1 lateral lado derecho | 301,2x450x3000 |
| Pilar 3 | Mad. + FC | 300 x 450 | 1 x 1,2 mm | 1 lateral lado izquierdo | 301,2x450x3000 |
| Pilar 4 | Mad. + FC | 300 x 450 | 2 x 1,2 mm | 2 laterales | 302,4x450x3000 |

***Tabla AN0-3*** Elementos del comparativo Pilares; Fuente: Elaboración propia

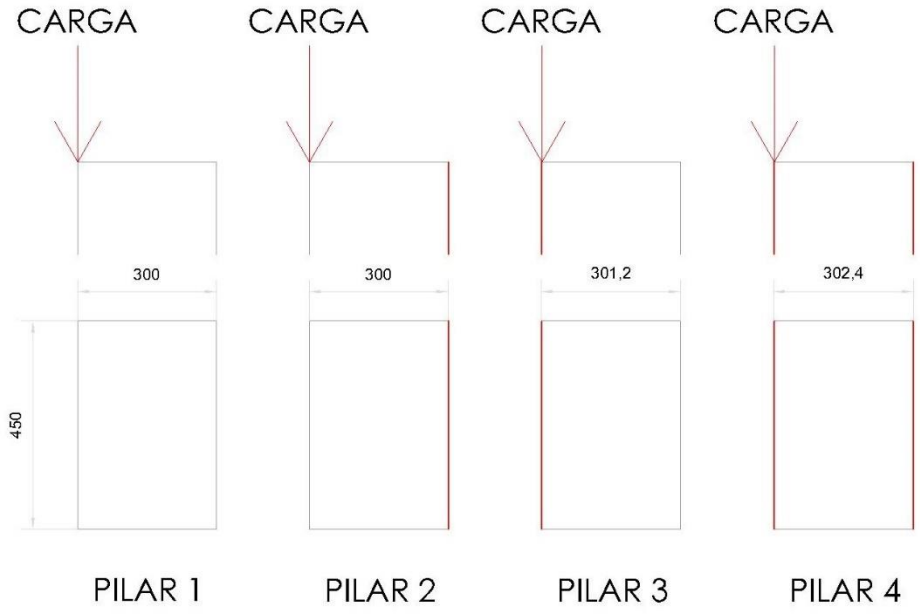



***Figura AN0-7*** Cuadro resumen posición lámina FC en Pilares; Fuente: Elaboración propia

# An. 3 Resultados

## An. 3.1 Vigas

| TABLA COMPARATIVA RESULTADOS | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Deformación (mm) | Diferencia respecto inicial (%) | Fletxa límite L/350 6000/350 (mm) | PESO (kg) | Diferencia respecto inicial (%) | Cortantes (N/m) |
| Viga 1 | 9,96 | - | 17,14 | 218,88 | - | -108,31 |
| Viga 2 | 7,405 | -25 | 17,14 | 221,9 | +1,01 | -95,91 |
| Viga 3 | 7,51 | -24,6 | 17,14 | 240,77 | +10,00 | -108,76 |
| Viga 4 | 13,5 | +35 | 17,14 | 178,13 | -18,62 | -95,36 |
| Viga 5 | 11,33 | +11,4 | 17,14 | 180,14 | -17,7 | -96,79 |

***Tabla AN0-4*** Resultados del comparativo de las Vigas; Fuente: Elaboración propia

Todas las deformadas están en la misma escala de colores, el límite inferior situado en 15 mm y el superior en 0.

La deformada no es dimensional, está exagerada para que se vea con más claridad.

- Viga 1: 9,96 mm

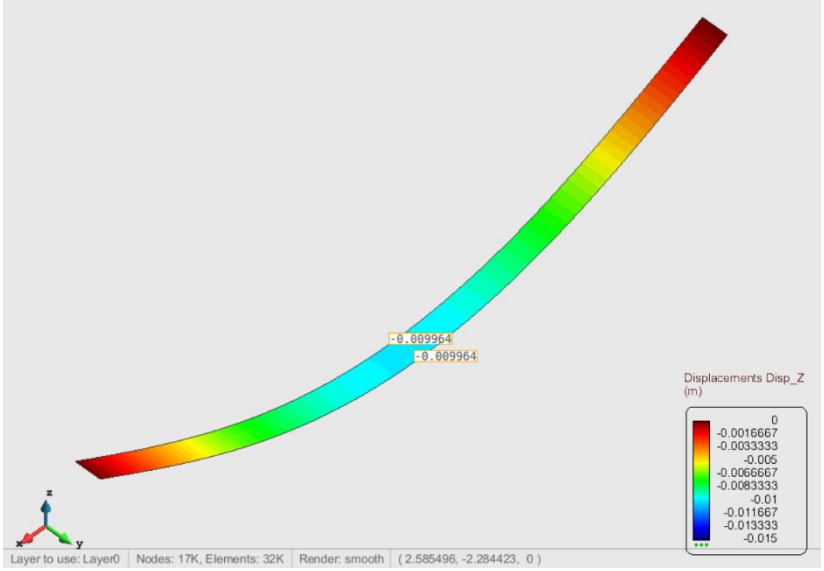



***Figura AN0-8*** Deformada Viga 1; Fuente: Elaboración propia

- Viga 2: 7,405 mm

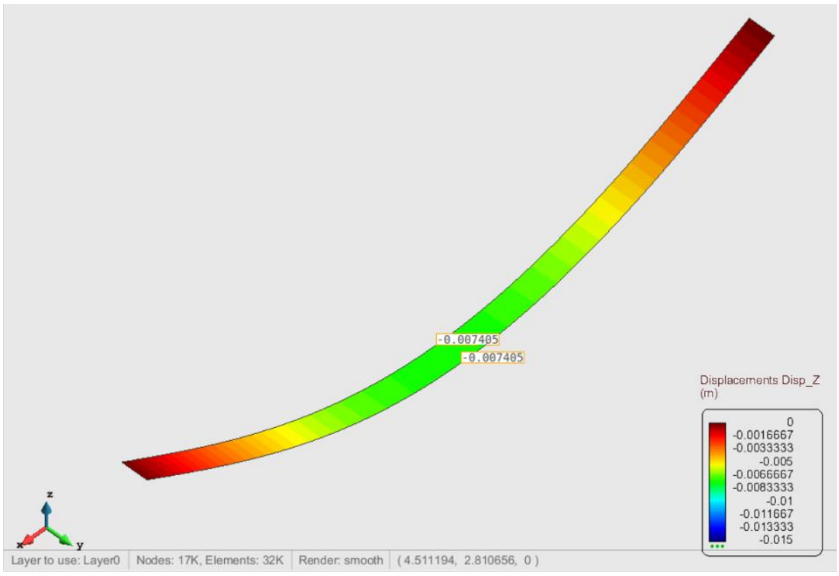



***Figura AN0-9*** Deformada Viga 2; Fuente: Elaboración propia

- Viga 3: 7,51 mm

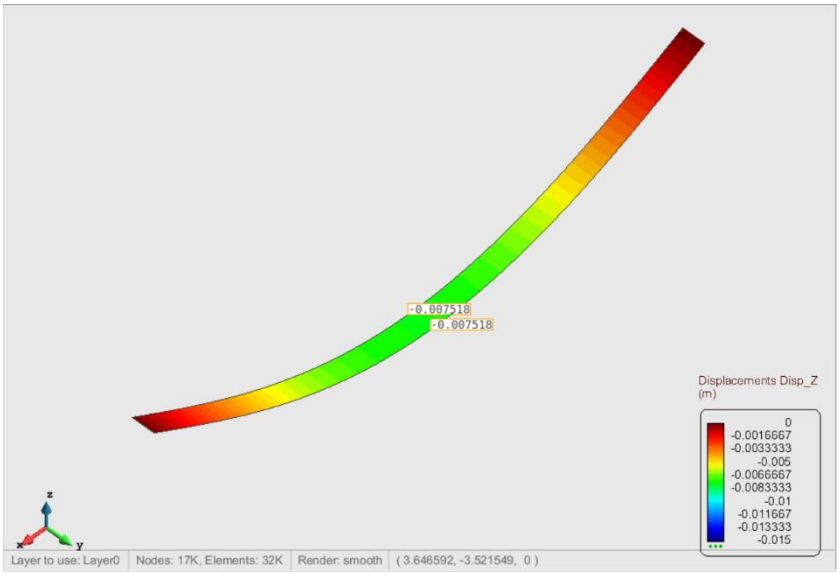



***Figura AN0-10*** Deformada Viga 3; Fuente: Elaboración propia

- Viga 4: 13,5 mm

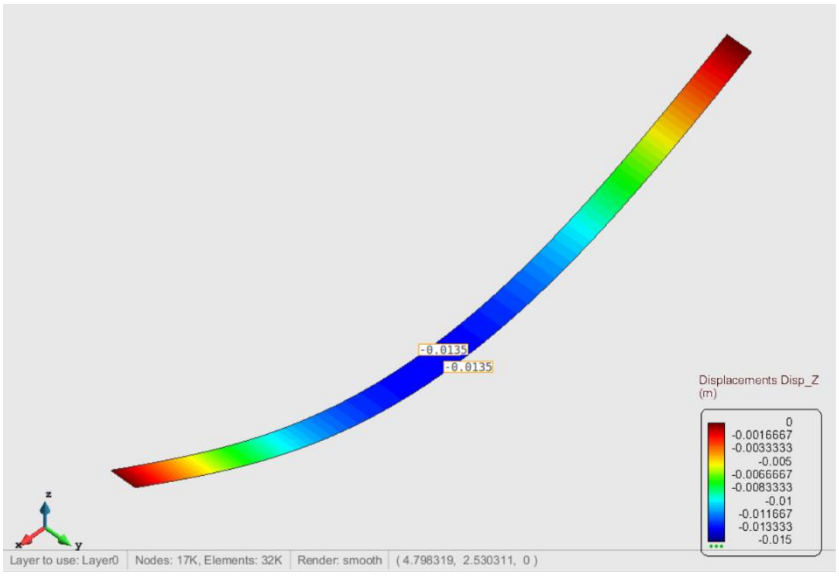



***Figura AN0-11*** Deformada Viga 4; Fuente: Elaboración propia

- Viga 5: 11,33 mm

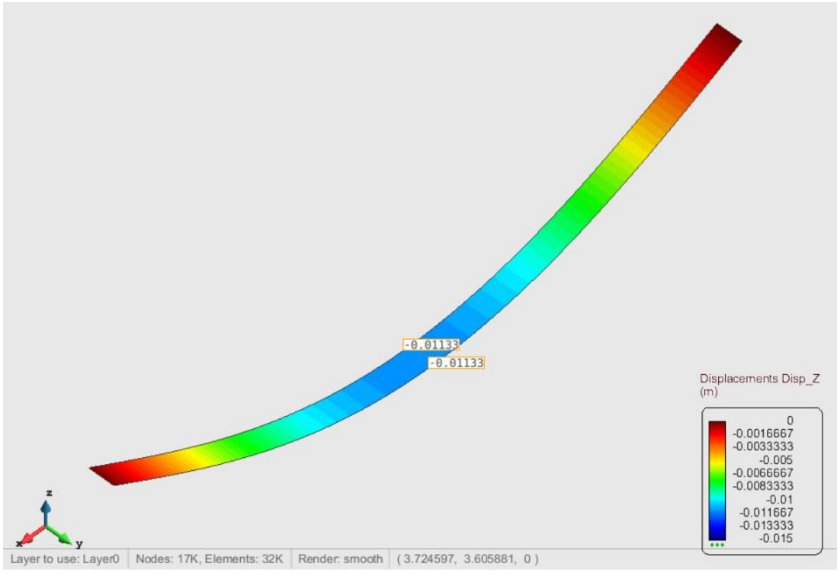



***Figura AN0-12*** Deformada Viga 5; Fuente: Elaboración propia

## An. 3.2 Pilares

| TABLA COMPARATIVA RESULTADOS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Deformación en X (mm) | Diferencia respecto inicial (%) | Deformación en Y (mm) | Deformación en Z (mm) | Diferencia respecto inicial (%) |
| Pilar 1 | 13,03 | - | - | 12,5 | - |
| Pilar 2 | 9,82 | -25 | - | 10,90 | -12,8 |
| Pilar 3 | 6,39 | -49 | - | 6,48 | -48,16 |
| Pilar 4 | 5,23 | -60 | - | 5,77 | -55,71 |

Todas las deformadas están en la misma escala de colores, el límite inferior situado en 0 mm y el superior en 15 mm.

La deformada no es dimensional, está exagerada para que se vea con más claridad.

- Pilar 1: 13,03 mm

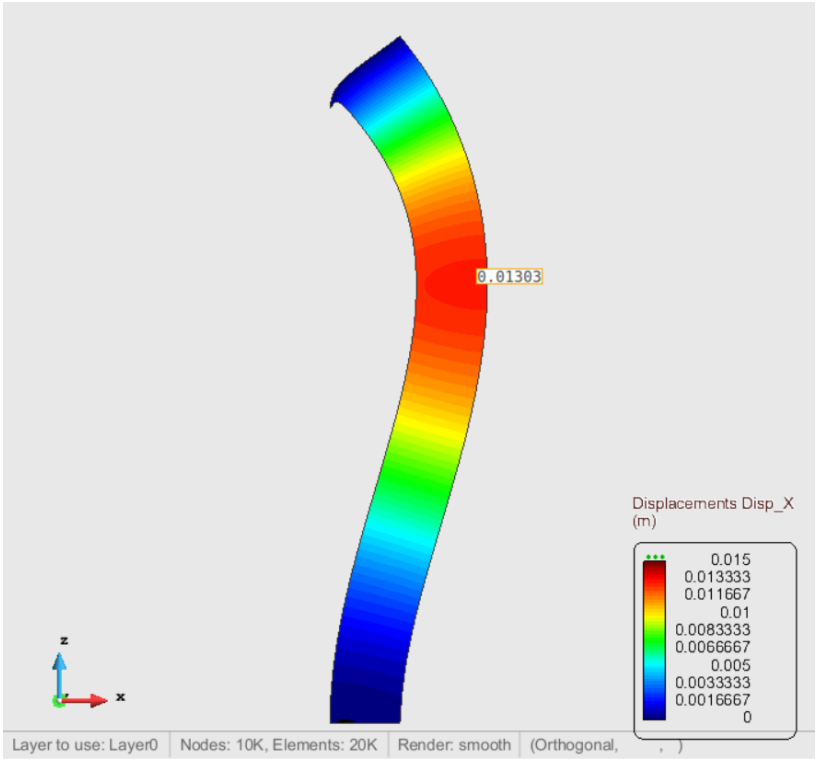



***Figura AN0-13*** Deformada Pilar 1; Fuente: Elaboración propia

- Pilar 2: 9,82 mm

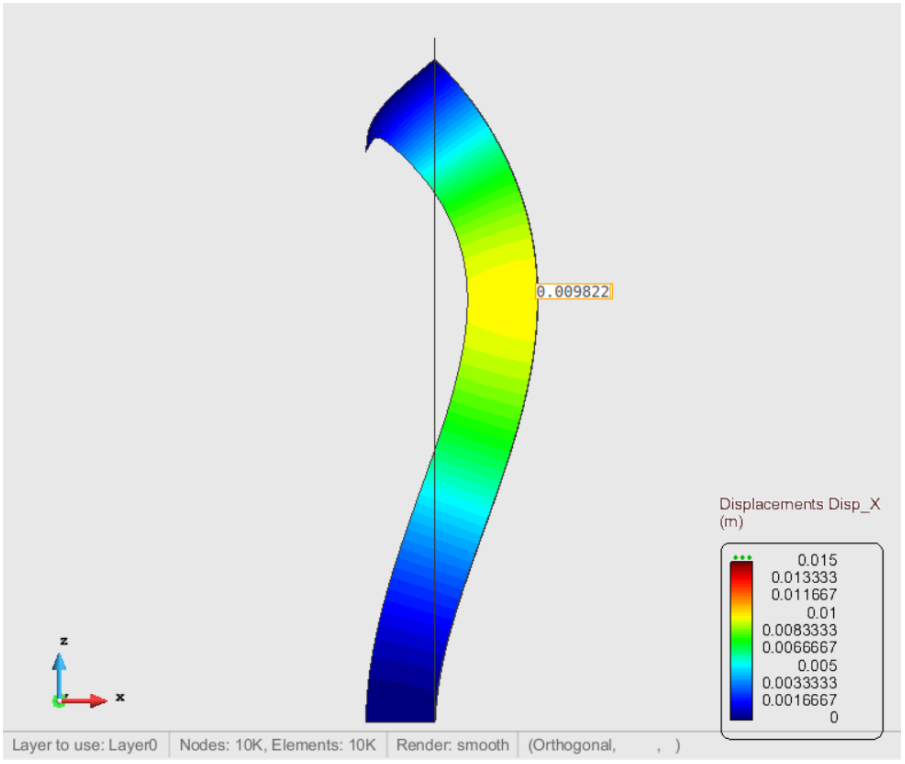



***Figura AN0-14*** Deformada Pilar 2; Fuente: Elaboración propia

- Pilar 3: 6,39 mm

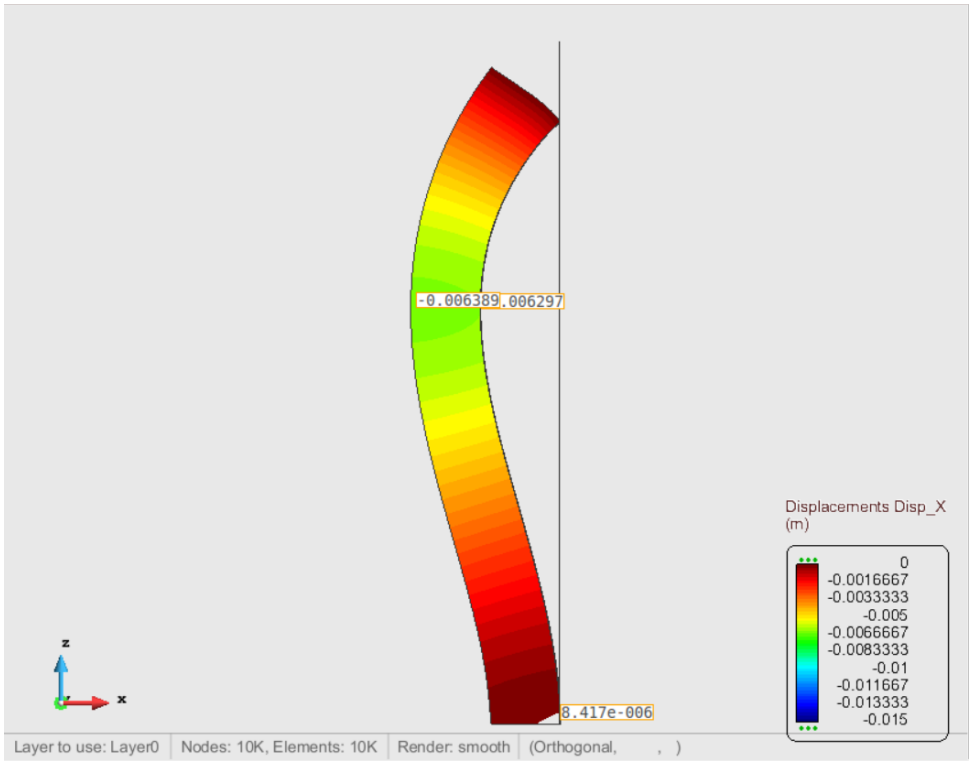



***Figura AN0-15*** Deformada Pilar 3; Fuente: Elaboración propia

- Pilar 4: 5,23 mm

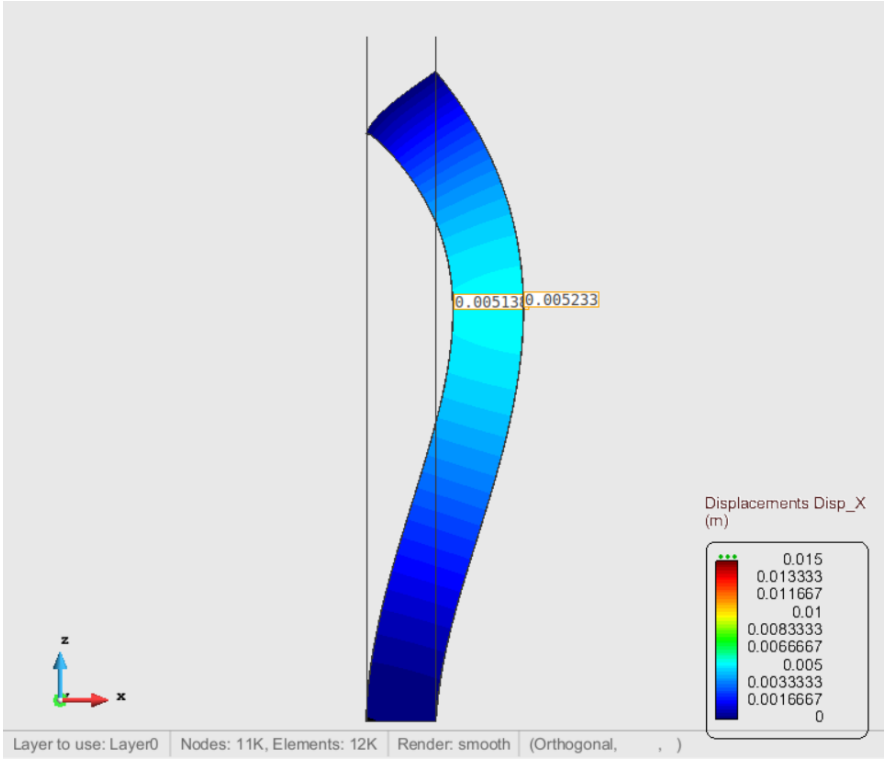



***Figura AN0-16*** Deformada Pilar 4; Fuente: Elaboración propia