

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA DE CHOPO DEL CLON I-214 Y VIGAS MIXTAS PINO/FRP CON INJERTOS DE CHOPO

MARÍA RODRÍGUEZ MARCOS

Tutores: RAFAEL BRAVO PAREJA y FRANCISCO J. RESCALVO FERNÁNDEZ

MASTER UNIVERSITARIO EN ESTRUCTURAS

TRABAJO FIN DE MASTER 2019



RESUMEN

El chopo es un árbol de rápido crecimiento con una madera de baja densidad y alta estabilidad dimensional. Actualmente, su uso estructural es prácticamente inexistente en España, debido a la falta de normativa de clasificación en clases resistentes. Este trabajo pretende estudiar las características mecánicas del chopo del clon I-214 obtenidas mediante un ensayo a flexión y compararlas con otras técnicas de obtención como son la clasificación visual o ensayos no destructivos.

La madera de chopo puede usarse como injerto en vigas mixtas de pino y FRP, esta técnica es una alternativa al refuerzo tradicional de estructuras de madera con acero u hormigón. Las distintas configuraciones se simulan numéricamente para poder comparar los diferentes refuerzos.

PALABRAS CLAVE:

Chopo, caracterización mecánica, simulación numérica, FRP, vigas mixtas.

ABSTRACT

Poplar is a fast growing tree which wood is lightweight and high dimensional stability. Nowadays, structural using is almost non-existent in Spain due to the lack of grading standards. This project aims to study mechanical properties of *Populus* clone I-214 obtained through bending test and compared with the ones obtained with visual grading criteria and non-destructive testing.

Poplar wood can be use as retrofitting of pine and FRP beams. This technique is an alternative to the traditional reinforcement of wood structures with steel or concrete. The different beams configurations are numerically simulated to compare reinforcement behaviour.

KEYWORDS:

Poplar, mechanical characterization, numerical simulation, FRP, beams retrofitted

Este trabajo ha recibido la financiación de:

Proyecto COMPOP_Timber (Desarrollo de productos de ingeniería elaborados a base de tablonés y chapas de chopo con inserciones de material compuesto para su uso en construcción) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad (**código BIA2017-82650-R**); Proyecto con fondos de la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Grupo de Investigación ADIME (Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras) de la Universidad de Granada



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	OBJETIVOS.....	8
1.2	MOTIVACIÓN Y CONTEXTO	8
1.3	METODOLOGÍA	9
2	ESTADO DEL ARTE	10
2.1	CHOIPO	10
2.2	MEJORA RESISTENTE, REFUERZO DE ESTRUCTURAS.....	13
3	CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1	MATERIALES: CHOPERA	15
3.2	MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN.....	17
3.2.1	CLASIFICACIÓN VISUAL	17
3.2.2	MEDIDA DE DENSIDADES	22
3.2.3	ENSAYO A FLEXIÓN	24
3.2.4	CLASES RESISTENTES	26
4	CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: RESULTADOS	29
4.1	CLASIFICACIÓN VISUAL	29
4.2	DENSIDAD	33
4.3	MÓDULO Y RESISTENCIA A FLEXIÓN.....	34
4.4	CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE ROTURA	37
4.5	CLASES RESISTENTES.....	38
5	MEJORA DE LA CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE UN COMPOSITE.	46
5.1	INTRODUCCIÓN A LA MEJORA RESISTENTE.....	46
5.2	TIPOS DE FRP.....	47
5.3	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.....	48
5.4	SIMULACIÓN NUMÉRICA	49
5.4.1	VIGA COMPUESTA (CHOIPO + FRP + CHOIPO)	50
5.4.2	VIGA REFORZADA (PINO + REFUERZO + CHOIPO)	59
5.5	RESULTADOS.....	68
5.5.1	VIGA COMPUESTA (CHOIPO + FRP + CHOIPO)	69
5.5.2	VIGA REFORZADA (PINO + REFUERZO + CHOIPO)	91
6	CONCLUSIONES	121
7	BIBLIOGRAFÍA	123

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la caracterización mecánica de la madera de chopo, así como realizar un estudio del comportamiento de vigas mixtas de madera de pino y FRP con injertos de chopo. Los objetivos específicos necesarios para conseguirlo se exponen a continuación:

- Caracterizar la madera de chopo del clon I-214 extraída de una plantación de la Cuenca del Río Henares (Guadalajara), siguiendo las normas sobre clasificación visual y asignación de clases resistentes.
- Realizar ensayos a flexión para obtener las propiedades mecánicas de vigas mixtas pino/FRP con injertos de chopo.
- Simular numéricamente distintas configuraciones de vigas mixtas pino/FRP con injertos de chopo y comparar con resultados experimentales.

1.2 MOTIVACIÓN Y CONTEXTO

La madera ha sido un material muy utilizado para la construcción de estructuras en el pasado. Aunque en las últimas décadas su uso ha disminuido en favor de otros materiales estructurales como el hormigón o el acero, actualmente existe un cierto auge, por ser uno de los materiales que más aportan a la sostenibilidad y la economía circular. Sus propiedades físico-mecánicas son altamente dependientes de la especie arbórea y del lugar de extracción.

La madera de chopo es una madera ligera con una gran estabilidad dimensional, con un rápido crecimiento, pero desgraciadamente en desuso como material estructural. Los motivos principales es su no inclusión en las normas de clasificación visual y de asignación de una clase resistente. Es decir, a diferencia de Francia, en España las normativas no incluyen al chopo como una especie apta para el uso estructural. El chopo a pesar de ser un árbol con unas propiedades mecánicas medias, puede ser usado en estructuras en forma de madera aserrada, o bien mediante productos tecnológicos (madera de ingeniería), como vigas laminadas, microlaminadas (LVL), contralaminadas (CLT), etc.

Otro posible uso del chopo es como complemento de refuerzo de estructuras, al ser un material de baja densidad (no aporta apenas peso a la estructura construida). Su mezcla con otros materiales como el FRP (materiales plásticos reforzados con fibras), puede aportar la capacidad mecánica requerida, con menos peso y espacio que un refuerzo tradicional de acero.

1.3 METODOLOGÍA

El trabajo se divide en dos bloques temáticos. Por un lado, se estudia la caracterización mecánica del clon I-214 de chopo extraído de la Cuenca del Río Henares (Guadalajara), y por otro, se analiza la mejora de la capacidad resistente de vigas de madera de pino mediante FRP e injertos de chopo.

La primera parte, si obviamos este capítulo de introducción (Capítulo 1), es un estado del arte sobre la situación actual del chopo y su aplicación como material estructural (Capítulo 2). También se hace un repaso del estado del refuerzo o mejora resistente de estructuras de madera, especialmente mediante FRP.

La caracterización mecánica del clon I-214 de chopo se extiende a lo largo de dos capítulos. En primer lugar (Capítulo 3) se describen los materiales y métodos y en Capítulo 4 se presentan detalladamente los resultados.

El Capítulo 5 se dedica a la mejora de la capacidad resistente de vigas de pino mediante FRP e injertos de chopo. Se comienza por una explicación sobre la mejora resistente, los tipos de FRP y el comportamiento mecánico de los distintos materiales que forman la viga. Posteriormente, se pasa a un apartado en el que se detalla la simulación numérica de las distintas vigas y se acaba con la exposición ordenada de los resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo (Capítulo 6).

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 CHOPO

El chopo (figura 2.1.1) pertenece a la familia *Populus*. Está extendido por el mundo debido a su rápido crecimiento y su adaptabilidad a diferentes climas y suelos. En el mundo existían 5,39 millones hectáreas de plantaciones productivas de chopo en el 2007, según la Comisión Internacional del Chopo de la Organización de la Alimentación y Agricultura (FAO) de Naciones Unidas. China es el mayor productor con 4,14 millones de hectáreas. En torno a 100.000 ha se dedican al chopo en España, muchas de ellas con la certificación ambiental PEFC (*Programa de Reconocimiento de la Certificación Forestal*).



Figura 2.1.1: Plantaciones de chopo en Aranda de Duero (Burgos).

Las plantaciones de chopo en España se concentran principalmente en la ribera del Ebro (25%), la ribera del Duero (50%), en Cataluña (5%) y Granada (3,5%). Son una alternativa a los cultivos agrícolas por su alto valor económico, especialmente a través de la elaboración de tableros contrachapados.

La familia *Salicaceae*, a la que pertenecen los chopos, está compuesta por dos géneros, *Salix* y *Populus*. La mayor parte de los clones de chopos utilizados en los países de Europa occidental proceden de tres especies (*Populus Nigra* L., *Populus Deltoides* Marsh y *Populus Torr&Gray*) y de híbridos entre ellos (*Populus x euramericana* y *Populus x interamericana*). Los chopos de mejor comportamiento se reproducen de forma vegetativa por medio de estacas o esquejes para utilizarlos masivamente en plantaciones.

El chopo utilizado en este trabajo es el clon I-214. El clon proviene de *Populus x Euramericana*, un híbrido de *Populus deltoides* y *Populus Nigra*. Se caracteriza por ser un árbol de tronco ligeramente flexuoso, rectitud modificable, con corteza de color gris marrón fina y lisa, y una copa bastante amplia. La poda del fuste debe ser atenta y continuada, ya que se ramifica rápidamente en ramas gruesas, y la poda de guía es imprescindible para evitar bifurcaciones del tronco.



Figura 2.1.2: Clon I-214.

El clon I-214 es el más utilizado en la populicultura española e italiana, ya que crece muy bien en la zona del mediterráneo. Su madera es blanda, ligera, de fibra homogénea y apta para el desarrollo, aserrío y fabricación de pasta.

El cultivo del chopo empieza en Europa en el siglo XVIII, durante los siguientes dos siglos aparecen nuevos genotipos importados desde América. El uso estructural del chopo siempre ha sido limitado, a pesar de su baja densidad y su alta estabilidad dimensional, debido principalmente a la ausencia de bosques puros en los que los chopos alcanzaran las dimensiones requeridas para una viga.

Aunque las estructuras de madera de chopo son viables, como demuestran las construcciones históricas, actualmente está en desuso en España ya que no existe ninguna norma de clasificación en clases resistentes que incluya el chopo. La versión UNE EN 56.544:1997 fue la última norma española de clasificación visual que incluyó el chopo junto a las coníferas por sus propiedades similares. En las siguientes normas quedó excluido por falta de datos. Este problema no ocurre en Francia donde sigue incluido en la norma NF B 52-001:2001.

El objetivo de muchos autores es volver a incluir el chopo en las normas de asignación de clase resistentes y así conseguir un incremento en su utilización estructural. Actualmente entre el 65 y el 70% del chopo producido en España se usa para contrachapados. España es el país líder europeo en este sector. En las últimas décadas, las características del chopo se han estudiado para nuevos productos industriales como LVL (vigas de madera microlaminada), OSB (tableros de fibras orientadas) y LSL (vigas de virutas de madera), vigas laminadas (GLULAM), etc.

Casado y colaboradores (2002) hicieron una caracterización mecánica y clasificación de madera estructural del clon I-214 de una plantación en Palencia. Realizaron un ensayo a flexión de cuatro puntos según la norma UNE EN 338:2016. El 55,3% de las vigas fueron rechazadas, el 34% fueron clasificadas como C14 y el 7,4% como C18. Comparando los resultados del ensayo mecánico destructivo con los resultados obtenidos tras la clasificación visual con la norma UNE EN 56.544:1997, el 46% de las vigas fueron clasificadas correctamente, el 17% fueron sobre-clasificadas y el 37% infra-clasificadas. Si los resultados de los ensayos a flexión se comparan con los obtenidos con la norma NF B 52-001:2007, se obtuvieron mejores resultados; el 70% de las vigas se clasificaron correctamente, el 23% se sobre clasificaron y el 7% se infra clasificaron. Una de las conclusiones a las que llegaron los autores es que la mala gestión de una plantación, es decir, la falta de podas fundamentalmente, tiene un alto impacto en la calidad de la madera por la existencia de nudos. Otra de las conclusiones a las que llegaron fue que aunque la resistencia (MOR) del chopo es similar a otras coníferas, el módulo de elasticidad (MOE) es bastante inferior, por lo que proponen dos nuevas

clases resistentes CHP1 y CHP2, exclusivas para el chopo, con un MOE inferior para el MOR.

2.2 MEJORA RESISTENTE, REFUERZO DE ESTRUCTURAS

La madera ha sido un material históricamente muy utilizado en las estructuras de edificios. Existen numerosas ocasiones en las que este tipo de estructuras necesitan ser intervenidas debido a su antigüedad y deterioro, o simplemente porque cambia su uso y por tanto sus solicitaciones. Actualmente, se tiende a rehabilitarlas en lugar de sustituirlas por ser una solución más sostenible.

Las principales causas para reforzar una estructura son el deterioro de parte o la totalidad de la estructura debido a agentes externos como los cambios de humedad y los ataques de agentes bióticos (insectos, xilófagos, termitas,..) o el cambio de uso del edificio requiriendo una mayor capacidad portante.

Las soluciones de refuerzo más comunes han sido la sustitución del elemento o de la estructura completa o el refuerzo empleando hormigón y/o acero. El problema de este tipo de refuerzo es el aumento del peso propio de la estructura, la disminución de la superficie y la altura libre. Otros problemas son la posible corrosión de las piezas metálicas, así como las limitaciones geométricas para adaptarse a formas no rectas y el tiempo de interrupción elevado que necesitan para ser colocados. En la figura 2.2.1. se pueden ver ambos tipos de refuerzos.



Figura 2.2.1: Estructura de madera reforzada con hormigón y estructura de madera reforzada con acero.

Actualmente, se tiende a reforzar las estructuras con material compuesto tipo FRP, especialmente fibra de carbono junto a resina epoxi (CFRP). La causa principal para

utilizar este material es el aumento de la capacidad mecánica del elemento reforzado sin aumentar apenas el peso. Existen recomendaciones para reparar estructuras de madera con refuerzos, pero no existe una metodología concreta para ello en el caso de CFRP.

Las estructuras de madera se llevan reforzando desde los años 60. El uso de los materiales compuestos como refuerzo no empezó hasta los años 90. Desde entonces numerosos autores empezaron a estudiar la posición óptima del refuerzo y los modelos de análisis más adecuados. Triantafillou y Deskovic (1992) fueron de los primeros en establecer una técnica para reforzar vigas de madera con FRP. Proponían colocar láminas de FRP envolviendo la madera en las zonas de máxima tensión. Otros autores como Fiorelli y Alves (2003) también proponían colocar el refuerzo en la cara inferior, pero esta solución es inadecuada en caso de incendio ya que es la cara más expuesta.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES: CHOPERA

La madera utilizada en la caracterización es chopo (*Populus x euramericana*), del clon I-214, extraída de una chopera privada plantada a raíz profunda sin riegos de la población de Yunquera de Henares (Guadalajara), con un marco de plantación de 5,5 x 5,5 m (330 pies por ha), como se observa en la figura 3.1.1. Los árboles de 13 años tenían un diámetro a altura de pecho medio de 38,1 cm y según la empresa que la cortó, una densidad media en verde (ρ_{verde}) de 750 kg/m³. La chopera estuvo sometida a podas adecuadas durante el crecimiento para asegurar una madera con pocos nudos en los primeros 6 m de árbol.



Figura 3.1.1: Chopera de I-214 de Yunqueras de Henares de la que se extrajo la madera.

En primer lugar se hizo una selección de 15 árboles ubicados en la zona central de la chopera, los cuales se apearon. Todavía en la chopera, se extrajeron dos trozas de igual dimensión desde el arranque el árbol (figura 3.1.2.). Se realizó una medida de velocidad de propagación de ondas elásticas en árbol y en troza. Las 29 trozas obtenidas (una de las ellas se partió durante el proceso de apeo) fueron transportadas a un aserradero- secadero (Maderas Pinosoria en Casarejos-Soria). De las trozas se obtuvieron 58 tablones de sección 70 mm x 140 mm y 2,5 m de largo que se secaron 10 días al aire y 15 días en estufa a 45°C y una HR del 38%.



Figura 3.1.2: Trozas obtenidas.

Los tablones obtenidos en el proceso anterior se transportaron al taller del grupo ADIME de la Universidad de Granada (figura 3.1.3) donde se estabilizó su humedad, se cepillaron y dividieron en probetas de distintas dimensiones para los diversos ensayos.



Figura 3.1.3: Probetas ensayos a flexión en el laboratorio de ADIME.

Este trabajo se centra en las probetas para ensayos a flexión, refiriéndose aquí a ellas como vigas, con unas dimensiones de 60 mm x 120mm x 1.250 mm, como se muestra en la figura 3.1.4.

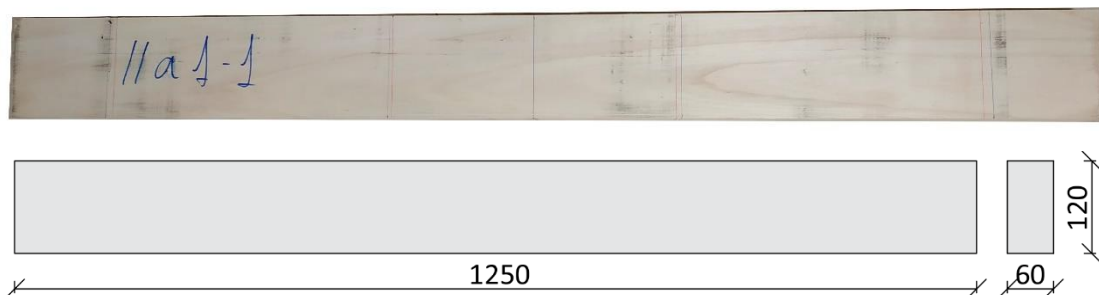


Figura 3.1.4: Ejemplo de probeta y dimensiones de una probeta para ensayo a flexión.

Las piezas estaban etiquetadas en todo momento, para poder conocer el origen de la pieza. El primer número que aparece es el del árbol del que proviene, es decir, del 1 al 15. A o una B simbolizan si se obtuvo de la traza inferior (A) o de la superior (B). De cada trozo se sacaron dos tablonos, 1 o 2. Por último se obtuvo un subtablón de dividir cada tablón en dos, 1 o 2. Por ejemplo, la probeta 1A1-2 se obtuvo del árbol 1, de la traza inferior, del primer tablón y el segundo subtablón.

3.2 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

3.2.1 CLASIFICACIÓN VISUAL

La clasificación visual es un método para caracterizar la madera según los defectos que posea. La madera con menos defectos se le presupone de mayor calidad, y por tanto, de mayor módulo de rigidez y resistencia. Existen diversas clasificaciones según el tamaño de escuadría de la pieza, la especie de la que provenga la madera y el país de origen de la normativa.

Los defectos de la madera se miden igual en las tres normativas utilizadas en este trabajo (las españolas UNE EN 56.544:2011 y UNE EN 56.544:1997 y la francesa NF B 52-001:2007). En este caso la madera solo tiene dos tipos de defectos, nudos y gemas:

Nudos

Se originan por las ramas de los árboles, tienen importancia en la resistencia y rigidez de la pieza, ya que crean una zona con distintas propiedades. Aunque no en todas las posiciones tiene el mismo impacto, se evalúan solo en función de su tamaño relativo como se muestra en la figura 3.2.1 y en el ejemplo de la figura 3.2.2. También se puede apreciar en la figura como se mide el diámetro cuando existe un grupo de nudos, dos o más nudos que distan menos de 15 cm o el ancho de la pieza en sentido de la fibra.



Figura 3.2.1: Criterio de medición de nudos.

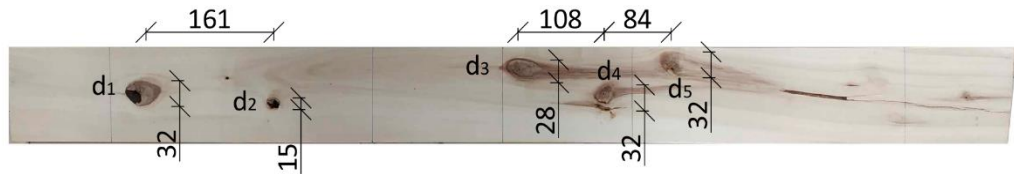


Figura 3.2.2: Ejemplo de medición de nudos. Distancias en mm.

Gemas

Se deben a un defecto en el aserrado. Es una superficie redondeada original de un tronco que aparece en una arista. Se evalúa en función de su largo respecto al largo de la pieza, o respecto de las dimensiones de la sección de máxima pérdida respecto de la sección de la pieza, como se muestra en la figura 3.2.3.

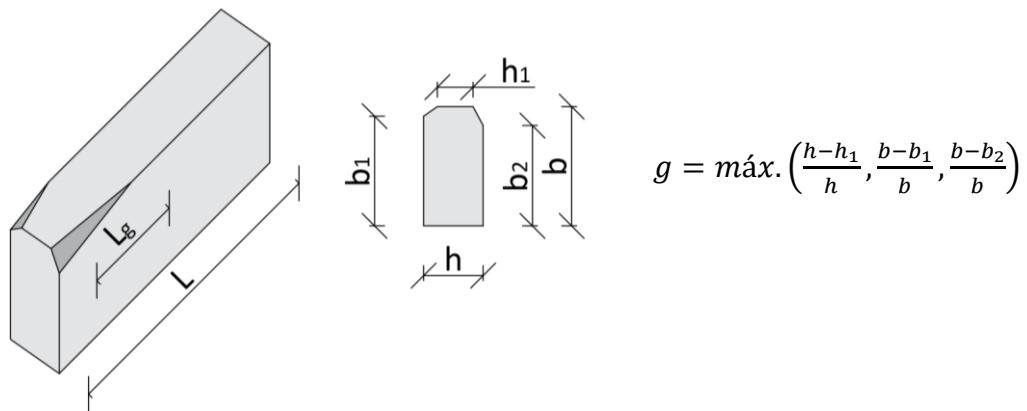


Figura 3.2.3: Criterio de medición de gemas.

La clasificación visual se ha realizado siguiendo tres normativas: 1) La UNE EN 56.544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Esta es la normativa vigente de clasificación en España, aunque no incluye el chopo; 2) La UNE EN 56.544:1997 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas, que es la última normativa de clasificación visual española donde estuvo incluida el chopo; 3) La NF B 52-001:2007 “*Règles d’utilisation du bois dans la construction. Classement visual pour l’emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus*”, la normativa actual francesa de clasificación visual, que sí que incluye el chopo.

CRITERIOS		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/5$ de "h"	$d \leq 1/2$ de "h"
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de "b"
Fendas	De secado ⁽²⁾⁽³⁾	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y 1 m.	
	- Rayo - Heladura - Abatimiento	No permitidas	
Acebolladuras		No permitidas	
Madera de compresión		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:10(10%)	1:6 (16,7 %)
Gemmas			
- Longitud		$L_g \leq 1/4$ de "L"	$L_g \leq 1/3$ de "L"
- Dimensión relativa		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Alteraciones biológicas			
- muérdago		No se admite	
- azulado		Se admite	
- pudrición		No admite	
- insectos xilófagos		No admite	
Deformación máxima ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾			
- Curvatura de la cara		10 mm (longitud de 2m)	20 mm (longitud de 2m)
- Curvatura del canto		8 mm (longitud de 2 m)	12 mm (longitud de 2 m)
- Alabeo		1 mm (por cada 25 mm de "h")	2mm (por cada 25mm de h)
- Abarquillado		Sin limitación	Sin limitación
(2) No se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.			
(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.			
(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción.			

Tabla.3.2.1: Criterios de la clasificación visual UNE EN 56544:2011

CRITERIOS		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/3$ de "h" y $d \leq 50$ mm	$d \leq 3/4$ de h y $d \leq 100$ mm
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 2/3$ de "b" y $d \leq 40$ mm	
Fendas	De secado ⁽²⁾⁽³⁾	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y 1 m.	
	- Rayo - Heladura - Abatimiento	$\leq 10\%$ de la longitud $\leq 3 \cdot h$	
Acebolladuras		No permitidas	
Madera de compresión		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:10(10%)	1:6 (16,7 %)
Gemas - Longitud - Dimensión relativa		No admitidas	$L_g \leq 1/3$ de "L" y ≤ 80 mm $g \leq 1/3$
Alteraciones biológicas - muérdago - azulado - pudrición - insectos xilófagos		No se admite Se admite No admite No admite	
Deformación máxima ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ - Curvatura de la cara - Curvatura del canto - Alabeo - Abarquillado		10 mm (longitud de 2m) 8 mm (longitud de 2 m) 1 mm (por cada 25 mm de "h") Sin limitación	20 mm (longitud de 2m) 12 mm (longitud de 2 m) 2mm (por cada 25mm de h) Sin limitación
(2) No se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo. (3) Referidas a un 20% de contenido de humedad. (4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción.			

Tabla.3.2.2: Criterios de la clasificación visual UNE EN 56544:1997

CRITERIOS	ST-II	ST-III
Ancho de los anillos de crecimiento (mm)	≤ 14	≤ 16
Diámetro de los nudos: - En la cara ^(a) - En el canto ^(b)	$\varnothing \leq 1/3$ de l y $\varnothing \leq 50$ mm $\varnothing \leq 2/3$ de e y $\varnothing \leq 40$ mm	$\varnothing \leq 3/4$ de l y $\varnothing \leq 100$ mm $\varnothing \leq 2/3$ de e y $\varnothing \leq 40$ mm
Fendas: ^{(c), (d)} - Atravesando. - No atravesando.	longitud $\leq 2 \cdot$ ancho pieza longitud $\leq 0,5 \cdot$ longitud pieza	Longitud ≤ 600 mm No limitada
Entrecascos	No admitido	
Desviación de la fibra (en fracción) - Local - General	1:4 1:6	
Gemas - Largo - Ancho	$L_g < 1/3$ de L y < 100 cm $< 1/3$ del grosor del canto	
Alteraciones biológicas - Azul, huellas de muérdago. - piqûres noires - Échauffure	Admisible Admisible si aparece por uno de los lados No admisible	
Deformación máxima en mm para una longitud de 2 m - Curvatura de la cara - Curvatura del canto - Alabeo - Abarquillado	< 10 mm < 8 mm 1 mm/ 25 mm ancho Sin restricciones	< 20 mm < 12 mm 2 mm/ 25 mm ancho Sin restricciones
(a) l: ancho de la pieza (h en la norma española) (b) e: espesor del canto (b en la norma española) (c) la longitud de las fendas está relacionada con el contenido de humedad, por esta razón los límites indicados son aplicables solo al momento de clasificación (d) para las piezas clasificadas en húmedo, el criterio de las fendas es difícil de aplicar		

Tabla.3.2.3: Criterios de la clasificación visual NF B 52-001:2007

Las tablas anteriores muestran los criterios de clasificación de las tres normas, las dos primeras son para piezas de sección rectangular con una anchura menor a 70 mm y la tercera para piezas con un área de testa menor a 20.000 mm². En los tres casos,

proporcionan dos tipos de madera clasificada según su calidad. La madera de mayor calidad se corresponde con la clase ME-1 en la normativa española y ST-II en la francesa. Si se comparan las tres normativas en los dos criterios de interés en este caso, nudos y gemas, la más restrictiva en relación con los nudos es la normativa española actual y la menos la normativa francesa. Si se compara respecto a las gemas, la más restrictiva es la normativa española derogada, que no permite la presencia de gemas para la clasificación ME-1, seguida de la española actual que permite la presencia, pero de menor tamaño. Las tres normativas tienen unos criterios similares, especialmente respecto a las gemas, pero la francesa es más permisiva respecto al tamaño de los defectos.

3.2.2 MEDIDA DE DENSIDADES

La densidad de la madera se midió en varias partes del proceso. En primer lugar, se midió la densidad en el árbol en verde. La empresa que realizó el apeo suministro el dato de la densidad media en verde, $\rho_{\text{verde}} = 750 \text{ kg/m}^3$.

Se obtuvo también la densidad en seco y al 10% de humedad para cada viga. El proceso se realizó en el laboratorio de ADIME como muestra la figura 3.2.4. Estas son las condiciones en las que se realiza el ensayo a flexión y sirve para tener unos datos de referencia. La densidad de cada viga se ha obtenido midiendo el tamaño de cada viga y pesándola. Las dimensiones de cada viga fueron 60 mm por 120 mm con un largo variable entre 1.240 mm y 1.278 mm. La viga más ligera tiene una masa de 2.876,6 g y la más pesada de 4.010,1 g.

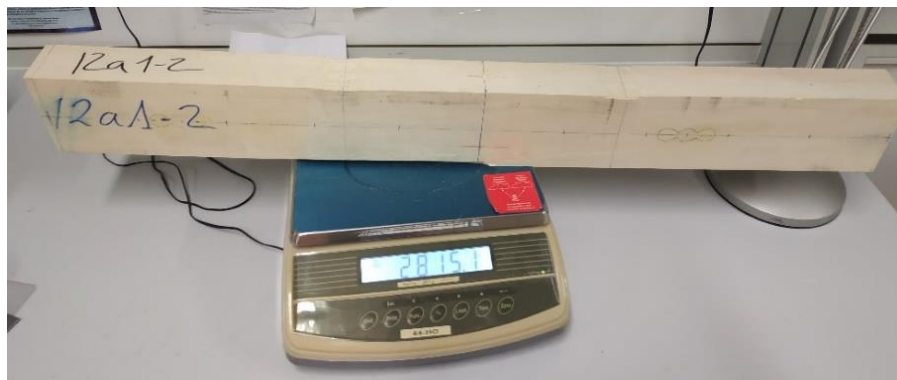


Figura 3.2.4: Masa de la viga al 10% de humedad.

La densidad de las vigas obtuvo, tanto con 10% de humedad como en seco con 0% de humedad, siguiendo el proceso recogido en la norma UNE EN 13.183-1:2002. Las probetas para medir la densidad se han obtenido de las vigas después de ensayarlas a flexión, sin más que cortar los extremos que no están dañados para obtener dos probetas. Se usaron un calibre de 150 mm con presión hasta 0,05 mm y una báscula de hasta 4.210 g y una precisión de 0,01 g.

Las probetas de densidad con un contenido de humedad en torno al 10% variaban en dimensión entre los 88 mm y los 142,3 mm, siendo las otras dos dimensiones iguales a la viga (60 mm y 120 mm). La masa en esas condiciones fue 210,7g y los 407,4 g. Una vez obtenida la densidad al 10% de humedad, se desecan en la estufa para obtener la densidad anhidrida. La figura 3.2.5. muestra el proceso.

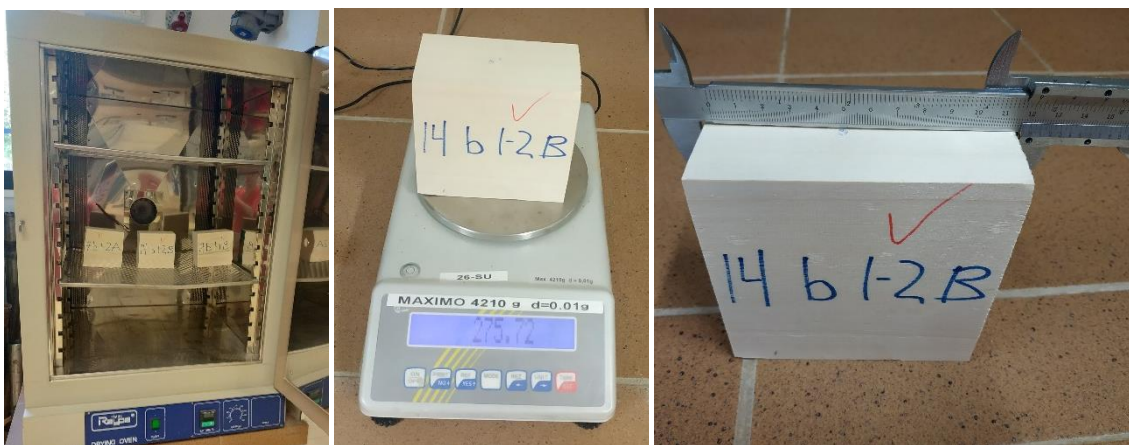


Figura 3.2.5: Probetas de densidad, obtención de masas y proceso de secado.

El proceso de secado en la estufa consistió en someter a las probetas a temperatura constante de 100 °C hasta conseguir su estabilización. Se entiende que el peso de una probeta está estabilizado cuando entre dos pesadas sucesivas la disminución de masa es menor al 0,1 % de su masa. El proceso en nuestro caso duró unas 12 horas continuas en el horno, y una pesada a las dos horas en la que se comprobaba que estaba estabilizada en todos los casos.

Las probetas después de la estufa perdieron masa, siendo la más ligera de 190,8 g con una pérdida de masa del 10,4% y la más pesada de 372,7 g con una del 9,3%. Como consecuencia de la pérdida de agua, las probetas reducen su dimensión. En sentido de

la fibra son prácticamente iguales, y en las otras dos dimensiones, las perpendiculares a la fibra, se reducen en torno al 0,8% en un sentido y en torno al 1,9% en el otro.

3.2.3 ENSAYO A FLEXIÓN

Este ensayo se realiza para obtener la rigidez (módulo elástico en dirección a la fibra) y la resistencia a flexión de cada viga, MOE y MOR respectivamente. El MOE es el módulo de elasticidad local. El MOR es el módulo de rotura, es decir, la capacidad de la madera para resistir cargas que tienden a flectarla con cargas aplicadas en la dirección perpendicular a la fibra. El punto débil de una viga sometida a flexión es la cara sometida a mayores solicitaciones a tracción, es decir, la cara inferior.

El ensayo a flexión de cuatro puntos se realizó según la UNE EN 408:2011, con las vigas a humedad y temperatura ambiente. La norma especifica unas dimensiones de viga, que en este caso no se han podido cumplir debido a las limitaciones de la máquina disponible. La norma indica que la distancia entre los apoyos debe medir entre 15 y 21 veces el canto (entre 1.800 mm y 2.500 mm) y la distancia entre los apoyos y las cargas debe ser 6 veces el canto (720 mm). En nuestro caso como las vigas son de menor tamaño, los apoyos distan 1.000 mm y las cargas están colocadas simétricamente, distanciadas 330 mm, tal y como se muestra en la figura 3.2.5.

Los datos se recogen mediante galgas extensométricas colocadas según la figura 3.2.5 y un LVDT colocado en el punto de máximo flecha (mitad de la vida).

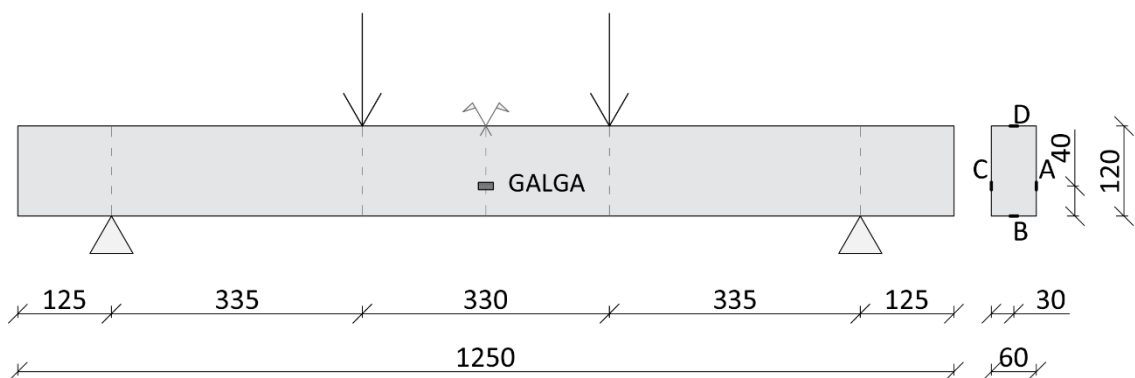


Figura 3.2.5: Esquema de ensayo a flexión. Distancias en mm.

El ensayo se hizo con carga continua hasta el fallo final, con control de desplazamientos a una velocidad de 3,8 mm/min y registro de datos (carga y desplazamiento) con una frecuencia de 1 Hz mediante una máquina multiensayos S-110 del grupo EP Ingeniería de la Instrumentación y Controls S.A. con capacidad máxima de 100 kN. Los datos se registraron con el equipo de extensometría modelo P70 de la misma empresa que la prensa, Controls S.A., registrando los datos con una frecuencia de 0,25 Hz. La figura 3.2.6. ilustra un ensayo.



Figura 3.2.6: Ensayo a flexión de cuatro puntos.

El MOR se determinó como el valor máximo en la curva esfuerzo-tiempo, y el MOE se determinó como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación entre el 20% y el 60% de la carga máxima de rotura. La figura 3.2.7. muestra un ejemplo de curvas esfuerzo-deformación y esfuerzo-tiempo de un árbol.

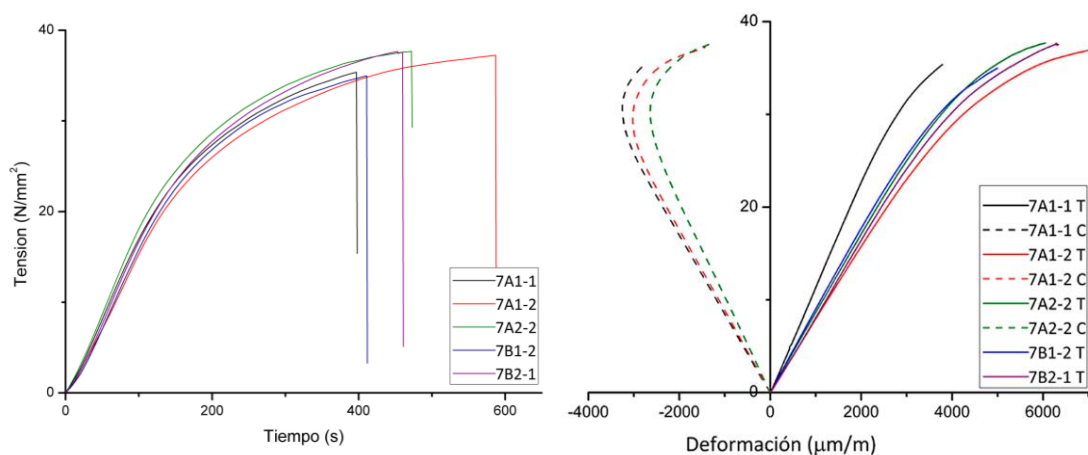


Figura 3.2.7: Curvas tensión-tiempo y tensión-deformación del árbol 7.

3.2.4 CLASES RESISTENTES

La clase resistente es una graduación de la madera en la que se asignan unas propiedades de resistencia, rigidez y densidad según la tabla 1 de la UNE EN 338:2016, de la que se muestra un extracto a continuación. Todas las propiedades van mejorando a medida que la clase resistente es más alta, aunque no todas lo hace en la misma proporción.

		Coníferas y chopo											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia (en N/mm ²)													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez (en kN/mm ²)													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{0,medio}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo medio de cortante	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad (en kg/m ³)													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Tabla 3.2.4: Clases resistentes. Valores característicos. Tabla 1 de la UNE EN 338:2016

La clase resistente de una viga se puede obtener a través de la clasificación visual. Una vez conocida la calidad de la madera tal y como se explica en el apartado 3.2.1, se puede recurrir a la lista recogida en la UNE EN 1912:2012 en la que a cada especie, según el país de procedencia y la calidad se le asigna una clase resistente como se muestra en el extracto de la tabla 3.2.5.

Clase resistente	País que publica la norma de clasificación	Calidad	Especies Nombre comercial	Procedencia	Identificación botánica
C24	Francia	ST-II	Pino y abeto	Francia	1,22
		ST-II	Pino Oregón	Francia	54
		ST-II	Pinos	Francia	39,44,47
		ST-II	Chopo	Francia	50
	Alemania y Austria	S10, S10K	Pino Oregón	Alemania y Austria	54
	Alemania, Austria Y República Checa	S10, S10K	Picea	CNE de Europa	22
		S10, S10K	Pino	CNE de Europa	47
		S10, S10K	Abeto	CNE de Europa	1
		S10, S10K	Alerce	CNE de Europa	15
	Italia	S2 y mejor	Pino de Córcega	Italia	39
		S2 y mejor	Picea y abeto	Italia	1,22
	Países Nórdicos	T2	Pino (silvestre)	NNE de Europa	47
		T2	Picea (blanca)	NNE de Europa	22
		T2	Abeto	NNE de Europa	1
		T2	Alerce	NNE de Europa	15
		T2 y mejor	Picea de Sitka	Dinamarca y Noruega	28
	República de Eslovaquia	SI	Picea	República de Eslovaquia	22
	Eslovenia	S10	Picea y abeto	Eslovenia	1,22
	España	ME1	Pino Radiata	España	49
		ME1	Pino pinaster	España	44
	Canadá	J&P Sel	Pino Oregón/Alerce	Canadá y EE.UU.	18,54
		J&P Sel	Hemlock/ Abeto	Canadá y EE.UU.	2,4,5,7,8,62
		J&P Sel	S-P-F	Canadá y EE.UU.	3,6,23,25,26,27,32,34
SLF Sel		Pino Oregón/Alerce	Canadá y EE.UU.	18,54	
SLF Sel		Hemlock/ Abeto	Canadá y EE.UU.	2,4,5,7,8,62	
Reino Unido	SLF Sel	S-P-F	Canadá y EE.UU.	3,6,23,25,26,27,32,34	
	SS	Pino Paraná	Brasil	12	
	SS	Pino Silvestre	CNE de Europa	47	
	SS	Abeto	CNE de Europa	1,22	
	SS	Oregón /Alerce	Canadá y EE.UU.	18,54	
	SS	Hemlock/Abeto	Canadá y EE.UU.	2,4,5,7,8,62	
	SS	S-P-F	Canadá y EE.UU.	3,6,23,25,26,27,32,34	
	SS	Pino Amarillo del Sur	EE.UU.	35,36,43,48	
	SS	Pino del Caribe	Caribe	33,42	
SS	Alerce	Reino Unido	15,16,17		
Países Bajos	T2	Pino (silvestre)	NNE de Europa	47	
	T2	Picea (blanca)	NNE de Europa	22	
	T2	Abeto	NNE de Europa	1	
	T2	Alerce	NNE de Europa	15	
C18	Canadá	J&P Sel	Picea de Sitka	Canadá	25
		J&P Sel	Cedro Rojo del Oeste	Canadá	58
		SLF Sel	Picea de Sitka	Canadá	28
		SLF Sel	Cedro Rojo del Oeste	Canadá	58
	Francia	ST-III	Pino y abeto	Francia	1,22
		ST-III	Pino Oregón	Francia	54
		ST-III	Pinos	Francia	39,44,47
		ST-III	Chopo	Francia	50
		ST-III	Alerce	Francia	15
	Irlanda	SS	Picea de Noruega	Irlanda	22
SS		Picea de Sitka	Irlanda	28	

		S3	Alerce	Italia	15
		S3	Picea y abeto	Italia	1,22
Países Nórdicos		T1	Pino silvestre	NNE de Europa	47
		T1	Picea (blanca)	NNE de Europa	22
		T1	Abeto	NNE de Europa	1
		T1	Alerce	NNE de Europa	15
		T1	Picea de Sitka	Dinamarca y Noruega	28
Portugal		E	Pino marítimo	Portugal	44
España		ME2	Pino radiata	España	49
		ME2	Pino pinaster	España	44
		ME2	Pino laricio	España	39
		ME2	Pino silvestre	España	47
Eslovenia		S7	Picea	Eslovenia	22
Reino Unido		SS	Cedro Rojo del Oeste	Canadá	58
		SS	Picea de Sitka	Canadá	28
		SS	Pino blanco del Oeste	EE.UU.	3,6,23,34,37,38,45,63
		SS	Pino Oregón	Reino Unido	54
		SS	Picea Británica	Reino Unido	22,28
		GS	Pino del Caribe	Caribe	33,42
		GS	Pino Amarillo del Sur	EE.UU.	35,36,43,48
Países Bajos		T1	Pino Silvestre	NNE de Europa	47
		T1	Picea (blanca)	NNE de Europa	22
		T1	Abeto	NNE de Europa	1
		T1	Alerce	NNE de Europa	15

Tabla 3.2.5: Asignación de calidades de especies de coníferas y chopo a clases resistentes. Extracto de la tabla 1 de la UNE EN 1912:2012

La otra forma de obtener la clase resistente de una pieza de madera es a través de sus propiedades mecánicas. Se obtiene el MOR y el MOE mediante el ensayo a flexión de cuatro puntos y la densidad de la pieza mediante ensayos de densidad. Según cada una de esas propiedades se le asigna una clase resistente según la tabla 1 de la UNE EN 338:2016. La clase resistente más restrictiva de las tres es la que le corresponde a la madera.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA: RESULTADOS

En este apartado se recogen los resultados de los distintos procesos explicados en el apartado anterior. Se presentan en el mismo orden en que fueron obtenidos, empezando por los resultados de la clasificación visual. En segundo lugar, se exponen la densidad obtenida. Posteriormente, se explican el módulo resistente y la resistencia a flexión. Finalmente se analizan las clases resistentes, cuya obtención es el objetivo de todos los procesos previos.

4.1 CLASIFICACIÓN VISUAL

Tal y como se recoge en el apartado 3.2.1, se analiza la calidad de la madera con tres métodos, ninguno de los cuales es totalmente adecuado para este fin, y se comparan los resultados con el objetivo de intentar encontrar cual de ellos proporciona mejores resultados.

La clasificación obtenida según la UNE 56.544:2011 para coníferas se divide en tres categorías de mayor a menor calidad: ME-1, ME-2 y rechazo. De las 89 vigas analizadas, 57 de ellas fueron clasificadas como ME-1, 27 fueron ME-2 y 5 de ellas fueron rechazo. La tabla 4.1.1. recoge la cantidad de vigas de las distintas calidades según el árbol de procedencia. La clasificación de las vigas como ME-2 se debe casi en un 90% a la presencia de nudos de mayor tamaño y el resto tanto por la presencia de nudos como de gemas. Las cinco vigas rechazadas se deben en dos casos al tamaño de nudos y tres a la presencia de una gema.

ÁRBOL	ME-1	ME-2	RECHAZO
1	2	2	1
2	5	-	-
3	3	2	-
4	3	1	1
5	3	2	1
6	3	3	-
7	5	2	-
8	5	1	1
9	3	4	-
10	2	5	-
11	3	4	-
12	7	-	-
13	3	1	1
14	7	-	-
15	3	-	-
Total	57	27	5

Tabla 4.1.1: Clasificación visual de las vigas (UNE 56.544:2011)

La clasificación obtenida según la norma UNE 56.544:1997, norma derogada en la que se incluía una clasificación específica para el chopo, se divide también en las mismas tres categorías: ME-1, ME-2 y rechazo. La clasificación ME-1 la obtuvieron 57 de las 89 vigas analizadas, ME-2 la obtuvieron 28 de ellas, y solo 4 fueron rechazo. La tabla 4.1.2. recoge la distribución de la calidad de las vigas por árbol. La principal causa de para no conseguir la clasificación ME-1 fue la presencia de nudos, aunque las gemas tengan un mayor impacto en esta clasificación fue un defecto menos común. La causa de rechazo fue la presencia de gemas de una anchura superior a la admitida.

ÁRBOL	ME-1	ME-2	RECHAZO
1	3	1	1
2	5	-	-
3	3	2	-
4	3	1	1
5	3	2	1
6	3	3	-
7	5	2	-
8	5	1	1
9	2	5	-
10	2	5	-
11	3	4	-
12	7	-	-
13	3	2	-
14	7	-	-
15	3	-	-
Total	57	28	4

Tabla 4.1.2: Clasificación visual de las vigas (UNE 56.544:1997)

La clasificación visual obtenida por la norma francesa NF B52-001:2007 se divide en tres categorías: ST-II, ST-III y rechazo. En este caso el número de vigas clasificadas con la máxima calidad, ST-II, es muy superior a los casos anteriores, ya que alcanza el 80% de las vigas. Solo 13 vigas fueron clasificadas como madera de peor calidad, ST-III, y 4 vigas fueron rechazadas. La tabla 4.1.3. muestra la cantidad de vigas clasificadas de cada calidad. En este caso, la causa de clasificar las vigas como ST-III siempre son los nudos, ya que la presencia de gemas solo condiciona la madera como admitida o rechazo.

ÁRBOL	ST-II	ST-III	RECHAZO
1	3	1	1
2	5	-	-
3	5	-	-
4	4	1	-
5	4	1	1
6	2	4	-
7	7	-	-
8	5	1	1
9	5	2	-
10	6	1	-
11	5	2	-
12	7	-	-
13	4	-	1
14	7	-	-
15	3	-	-
Total	72	13	4

Tabla 4.1.3: Clasificación visual de las vigas (NF B52-001:2007)

Las tres clasificaciones tienen criterios similares. En el caso de las dos normas españolas, la clasificación es muy parecida en resultado, aunque no en las causas, ya que aunque las rechazadas si sean prácticamente las mismas en el caso de las clasificadas como ME-2 no siempre son las mismas, unas se deben a los nudos (UNE 56.544:2011) y otras se deben a las gemas (UNE 56.544:1997). La clasificación según la norma francesa es más permisiva, ya que el número de rechazo es similar a las otras normativas, pero la clasificación como madera de mejor calidad es mayor pues se acepta un tamaño de nudos mayor y las gemas solo afectan en aceptar o rechazar las vigas. En la figura 4.1.1. se puede comparar la cantidad de vigas clasificadas en cada categoría según la normativa utilizada, siendo la parte verde la madera de mejor calidad, la parte amarilla la madera de mala calidad y la otra la madera rechazada.

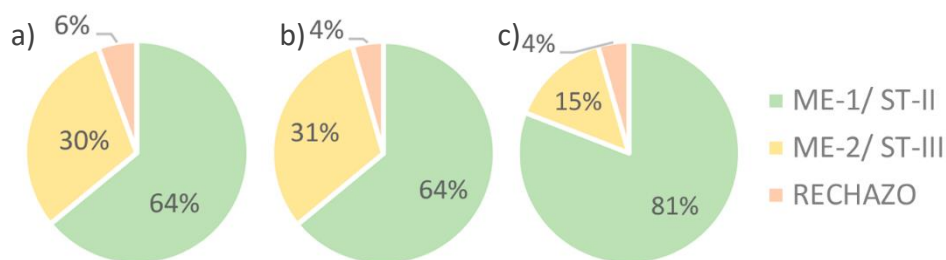


Figura 4.1.1: Clasificación visual según las diferentes normativas. a) UNE-EN 56.544:2011 b) UNE-EN 56.544:1997 c) NF B 52-001:2007.

4.2 DENSIDAD

La densidad se obtiene por el procedimiento explicado en el apartado 3.2.2. Los datos se consiguen para unas condiciones de temperatura y humedad ambiente (contenido de humedad aproximado de la madera de 10%), y después del secado en estufa hasta una pérdida total de humedad.

Como se ha explicado previamente, las propiedades de la madera tienen una gran variación dependiendo del árbol del que provengan, debido a las características de formación del material. En la tabla 4.2.1. se muestra la densidad de cada árbol.

ÁRBOL	DENSIDAD H.10% (kg/m ³)	DENSIDAD BÁSICA H. 0% (kg/m ³)
1	356	336
2	339	319
3	388	367
4	331	312
5	335	313
6	374	353
7	334	311
8	357	336
9	336	315
10	348	330
11	400	380
12	356	337
13	321	303
14	328	308
15	319	300
Total	350	329

Tabla 4.2.1: Densidad de árbol obtenida por probetas.

La densidad media antes del secado en estufa es de 350 kg/m^3 . La probeta más ligera proviene del árbol 13 y tiene una densidad de 303 kg/m^3 , pero si nos fijamos en la densidad media por árbol, el que tiene menor densidad es el número 15. Por el contrario, la probeta más pesada, con una densidad de 432 kg/m^3 , proviene del árbol con mayor densidad media 401 kg/m^3 , el número 11.

La densidad después del secado se reduce en torno a 20 kg/m^3 , ya que la densidad media es 330 kg/m^3 . La variación de la densidad en el proceso está alrededor del 5,9% de su densidad inicial. Las probetas más ligera y más pesada siguen siendo las mismas que antes del proceso, al igual que en el caso de los árboles. Esto indica que todas las probetas han variado su densidad en aproximadamente la misma proporción, y por tanto, su contenido de humedad era similar. El contenido de humedad media fue 9,35%, variando entre el 8,5% y el 11,1%.

4.3 MÓDULO Y RESISTENCIA A FLEXIÓN

Tal y como se recoge en el apartado 3.2.3, se realizó el ensayo a flexión de cuatro puntos. Los datos recogidos con las galgas extensométricas se usaron para obtener el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de la madera también es conocido como MOE. Existen dos módulos de elasticidad, el obtenido de tracciones y el de compresiones. En este caso solo se analizan los resultados de MOE de tracciones. El MOE de compresiones se ha obtenido cuando la viga tenía colocadas 4 galgas, una en cada cara.

La viga con un MOE mayor fue la 11B2-2 con 11253 MPa, y la que tiene menor MOE es 4A1-2 con 7042 MPa. El MOE medio obtenido de todas las vigas fue 8818 MPa, siendo 7294 MPa el percentil del 5% y 10852 MPa el percentil del 95%. En la tabla 4.3.1 están recogidos los valores de MOE medios de cada árbol.

El módulo de elasticidad se ha obtenido también con un ensayo mecánico no destructivo, un ensayo de vibraciones. El ensayo de vibraciones libres se realizó en

el laboratorio ADIME. Consiste en colocar un acelerómetro en uno de los extremos de la viga y golpear con un martillo sobre el extremo opuesto como podemos ver en la figura 4.3.1. La señal de respuesta se recogió con un osciloscopio y se obtuvo la frecuencia de resonancia fundamental de cada viga con el programa MATLAB. Con la frecuencia obtenida (f_1), asumiendo la sección constante de la viga y la formación de ondas estacionarias unidimensionales, se puede calcular la velocidad de propagación (v) de una viga de longitud (L), y con ello y la densidad (ρ), el módulo de elasticidad dinámico de la viga (MOE_{din}), es decir

$$v = 2Lf_1$$

$$MOE_{din} = \rho v^2$$

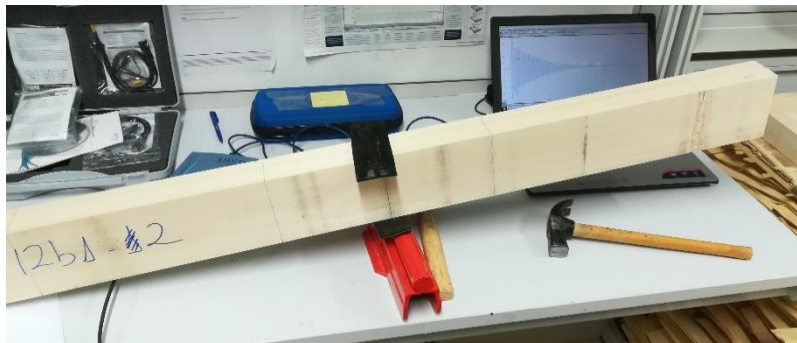


Figura 4.3.1: Ensayo de vibraciones libres

Si se compara el MOE estático con el MOE dinámico, es decir, el del ensayo a flexión respecto al del ensayo de vibraciones, se puede ver como generalmente se obtiene un MOE dinámico algo inferior al resultado del MOE estático. En la gráfica 4.3.2 se pueden ver los valores de uno y otro MOE de cada viga. Se observa una correlación positiva aceptable entre ambas metodologías.

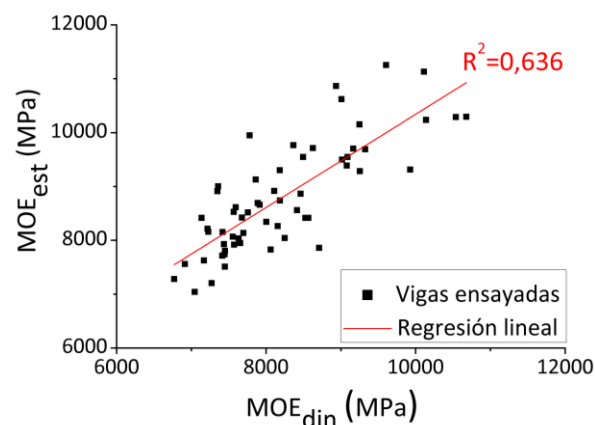


Figura 4.3.2: MOE_{est} frente a MOE_{din} de cada viga

Resistencia a flexión

La resistencia a flexión de la madera también es conocida como MOR. Es el valor máximo de la curva esfuerzo-tiempo, tal y como se muestra en la figura 4.3.3.

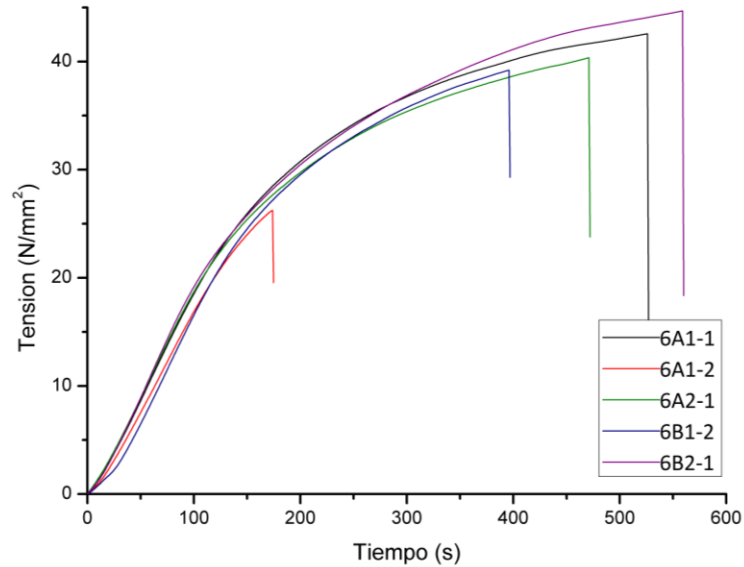


Figura 4.3.3: Curva tensión-tiempo del árbol 6

La viga con mejores propiedades en cuanto a la resistencia fue la 11A1-1 con 52 MPa, y la que peor la 1B1-2 con 29 MPa. La resistencia a flexión media obtenida fue de 39 MPa, siendo 32 MPa el percentil del 5% y 49 MPa el percentil del 95%. En la tabla 4.3.1 están recogidos los valores MOR medios de cada árbol.

Como se puede ver en la siguiente tabla, los valores del MOE y del MOR están relacionados. Los árboles que tienen un mayor MOE tienen generalmente un mayor MOR, como en el caso del árbol 11. Lo mismo ocurre en el caso contrario, como por ejemplo en el árbol 13. Existen excepciones como ocurre en el árbol 6, que tiene un alto MOE y un MOR de los más bajos.

ÁRBOL	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	8546	35
2	8055	37
3	8778	43
4	8242	35
5	8095	37
6	10261	38
7	8290	37
8	9441	42
9	8302	38
10	8137	36
11	10522	47
12	10142	48
13	8009	35
14	9027	38
15	8155	37

Tabla 4.3.1 MOE y MOR medios por árbol.

4.4 CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE ROTURA

La clasificación del tipo de rotura se realizó tras el ensayo a flexión explicado en el apartado 3.2.3. Las vigas ensayadas pueden fallar por compresión, tracción, tracción y cortante, cortante o por una rotura no visible como muestra la figura 4.4.1.



Figura 4.4.1: Clases de rotura.

El ensayo a flexión rompe las vigas de tres maneras distintas, fallan a tracción (tipo 3), a tracción y cortante (tipo 4) y a cortante (tipo 6) como puede verse en la figura 4.4.2.

En la mayoría de los casos la rotura se produce por cortante. En la gráfica 4.4.3. se puede ver una comparación entre la cantidad de cada tipo de fallo.

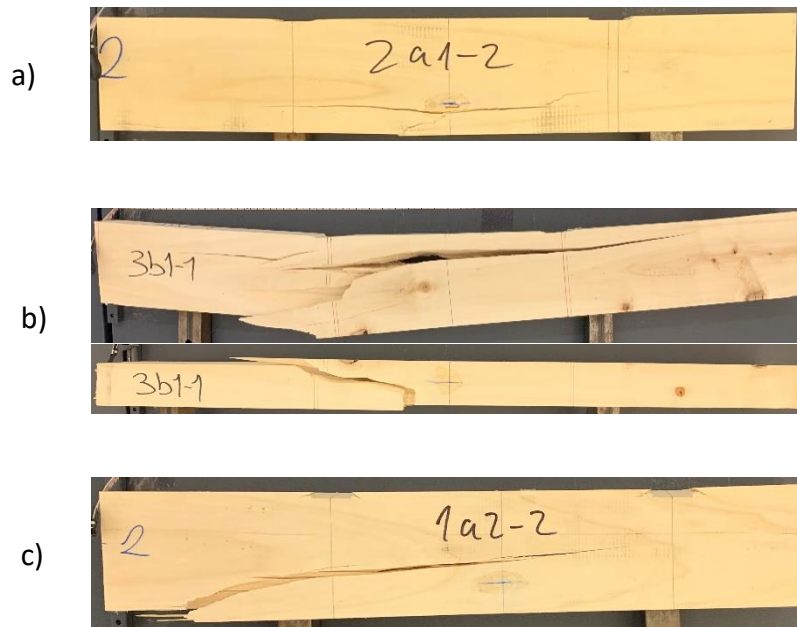


Figura 4.4.2: Tipos de rotura de las vigas. a) tracción, b) tracción y cortante y c) cortante.

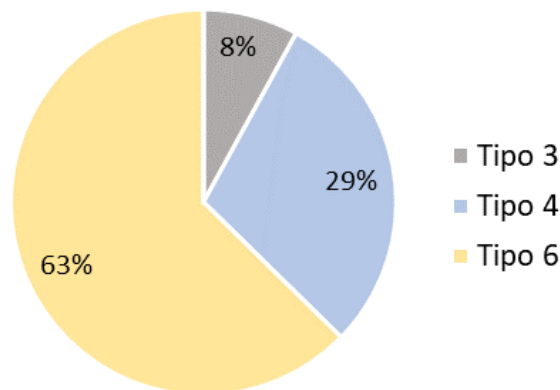


Figura 4.4.3: Cantidad proporcional de cada tipo de rotura.

4.5 CLASES RESISTENTES

Las clases resistentes proporcionan la información necesaria recogida en unas tablas de la normativa UNE EN 338:2016. Conociendo alguna de las propiedades o la clase resistente correspondiente por especie y calidad se pueden conocer el resto de características.

Según clasificación visual

La clasificación visual agrupa la madera en tres categorías distintas, dependiendo su calidad. La clase resistente se asigna según unas tablas recogidas en la UNE EN 1912:2012, dependen de la especie de la que provenga la madera y de su calidad.

Actualmente, como se ha comentado, el chopo no está incluido en las normas españolas. Para asignarle una clase resistente, se ha utilizado la correspondiente al pino, tal y como se hizo en la clasificación visual. Se ha seleccionado la especie de pino español de peor calidad (*Pino Radiata* y *Pino Pinaster*) cuya clase resistente es C24 para madera ME-1 y C 18 para madera ME-2. Como se puede ver en la figura 4.5.1., más del 64% (57 de las 89 vigas) obtuvieron la clase resistente C24, y un 30% (27 de las 89 vigas) la clase resistente C18.

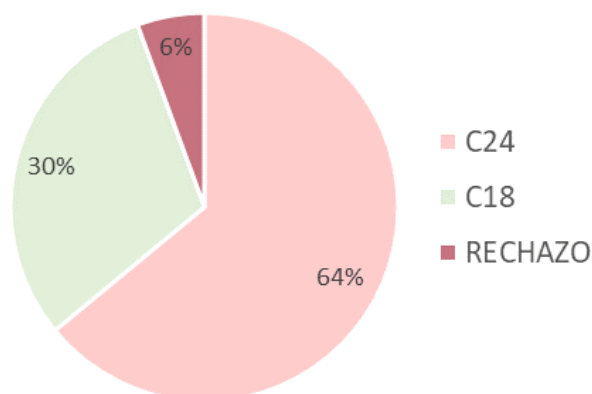


Figura 4.5.1: Cantidad proporcional de cada clase resistente UNE EN 1912:2012 con la clasificación visual según UNE 56.544:2011.

La madera clasificada por la normativa francesa NF B52-001:2007 para clasificación visual si tiene correspondencia con una clase resistente en la norma UNE EN 1912:2012. El chopo si es de origen francés está clasificado con la norma francesa y es de uno de los cuatro clones especificados (*Robusta*, *Dorskamp*, *I-214* y *I-4551*), tiene asignada una clase resistente C 24 para ST-II y C 18 para ST-III. Más del 80% de las vigas (72 de las 89) son clase resistente C24, y casi un 14% (13 de las 89) se clasifican como C18. En la figura 4.5.2. se puede ver la proporción de cada clase resistente.

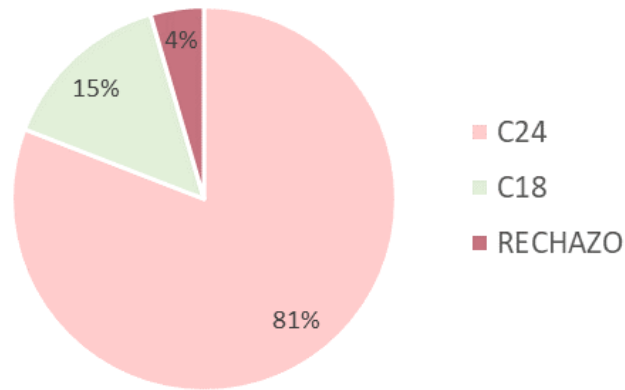


Figura 4.5.2: Cantidad proporcional de cada clase resistente UNE EN 1912:2012 con la clasificación visual según NF B52-001:2007.

Los dos métodos asignan las mismas clases resistentes, C24 para la madera de más calidad, y C18 para la otra. La diferencia entre ambos radica en la cantidad de cada una, al igual que ocurre en la clasificación visual.

Según ensayos de vibraciones

El ensayo de vibraciones proporciona datos de la rigidez de cada viga. Conociendo el módulo de rigidez en sentido de la fibra (E_0) se puede asignar la clase resistente le corresponde de la Tabla 1 de la UNE EN 338:2016. En este caso el módulo de rigidez se denomina módulo de rigidez dinámico (E_{din}) ya que se obtiene con vibraciones.

La rigidez dinámica de cada viga se obtiene con su densidad al 10% de humedad y la velocidad de propagación de una onda en sentido de las fibras.

La clase resistente puede diferir entre las vigas del mismo árbol, pero en la mayoría de los casos les corresponden clases contiguas. En la tabla 4.5.1. se puede ver el número de vigas de cada árbol asignado en cada clase resistente.

ÁRBOL	RECHAZO	C14	C16	C18	C20	C22
1		2	1			
2		4				
3			2	2		
4		5				
5		2	2			
6			2	1		
7		1	3			
8			2	3		
9		2	1			
10		4	1			
11				1	2	2
12				1		2
13	1	3				
14		3	2			
15	1	1				
TOTALES	2	27	16	8	2	4

Tabla 4.5.1: Número de vigas de cada clase resistente por cada árbol según el MOE_{din} y las propiedades de la Tabla 1 de la UNE EN 338:2016.

La mayoría de las vigas corresponden a la clase resistente C14, C16 y C18, siendo muy superior la cantidad de C14. Es decir, la mayoría de las vigas son aptas para su uso estructural, pero tienen la peor calidad admitida en cuanto a rigidez. En la figura 4.5.3. se aprecia la proporción de las clases resistentes obtenidas para esta madera.

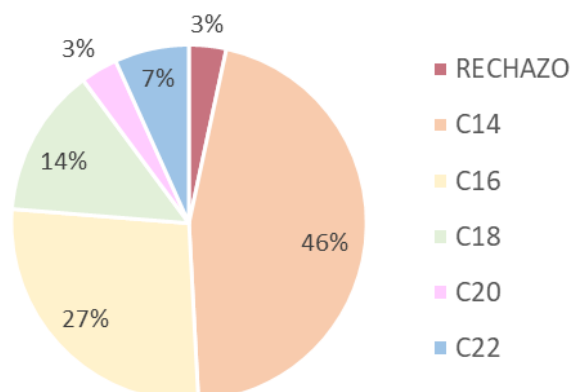


Figura 4.5.3: Cantidad proporcional de cada clase resistente.

Según ensayos mecánicos a flexión

La clase resistente se puede asignar por las propiedades mecánicas de la madera. De cada viga se dispone de tres propiedades a las que les corresponde una clase resistente, la densidad, la resistencia y la rigidez. Para saber la clase resistente de cada viga, se debe comprobar la clase resistente signada a cada propiedad y quedarse con la más restrictiva.

La densidad que se tiene en cuenta para asignar la clase resistente es la densidad con un 10% de humedad. Se han analizado 75 datos, ya que todos los ensayos fueron válidos. La variación de clases resistentes entre las distintas piezas es muy amplia, varían desde C14 hasta C35. Las clases resistentes obtenidas con mayor frecuencia son C18 con 17 vigas, C20 y C22 con 13 vigas cada una. Estas tres clasificaciones suponen más de la mitad de las vigas analizadas. En la figura 4.5.4. se puede ver la proporción obtenida de cada clase resistente.

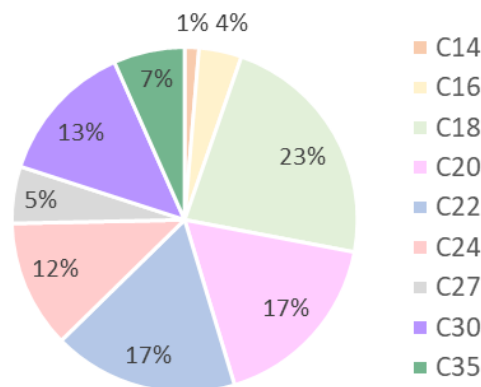


Figura 4.5.4: Cantidad proporcional de cada clase resistente según la densidad.

La resistencia de las vigas obtenida en los ensayos mecánicos a flexión (MOR) se compara con la resistencia media a flexión $f_{m,k}$ de la Tabla 1 de la UNE EN 338:2016 para obtener la clase resistente. Se ha asignado la clase resistente según el MOR a 60 vigas, que son de las que se han obtenido datos válidos en los ensayos.

La clase resistente asignada según el MOR varía desde C27 hasta C50. La mayor cantidad de vigas se clasificaron como C35, aunque la distribución es bastante uniforme si no se tienen en cuenta los valores extremos (C27 y C50). En la gráfica 4.5.5. se puede ver la cantidad proporcional de cada clase resistente.

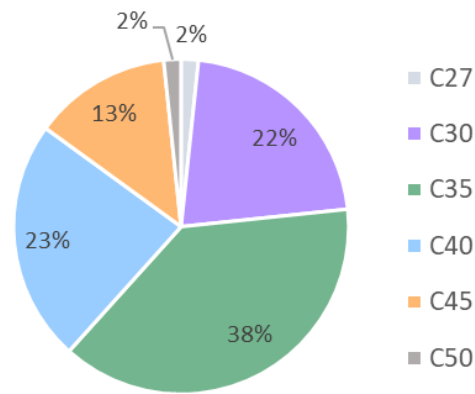


Figura 4.5.5: Cantidad proporcional de cada clase resistente según el MOR.

La rigidez de las vigas obtenida en los ensayos de flexión, el módulo de elasticidad (MOE), se compara con el módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra ($E_{0, \text{medio}}$) de la tabla 1 de la UNE EN 338:2016. La norma dice que para asignar una clase resistente a una población de madera, el valor característico de su módulo de elasticidad en flexión debe ser igual o superior que el percentil del 95% del valor indicado en la tabla. En este caso, como a cada viga se le asigna una clase resistente de forma individual, simplemente se compara el valor del MOE con el valor de $E_{0, \text{medio}}$ de la tabla para cada clase resistente.

La clase resistente asignada según el MOE varía de C14 a C24. La cantidad de vigas con un módulo de elasticidad bajo, por tanto, de una clase C14 o C16 es mayor al 60%. El número de vigas que obtienen cada una del resto de clases resistentes es similar. De los 15 árboles de los que se obtuvieron las probetas, las vigas de 9 de ellos solo son C14 y C16. En la figura 4.5.6. se puede ver la cantidad proporcional de cada clase resistente según su rigidez.

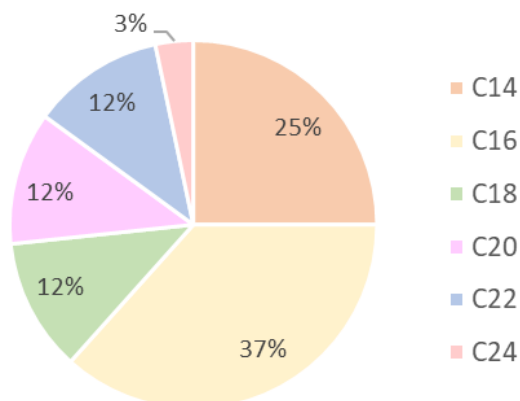


Figura 4.5.6: Cantidad proporcional de cada clase resistente según el MOE.

La clase resistente de cada viga se obtiene de comparar las clases obtenidas por la densidad, la resistencia y la rigidez y quedándonos con la menor de ellas. En este caso todas las vigas tienen una clase entre C14 y C24, ya que son los límites menores de las tres categorías. La mayoría de las vigas, al igual que pasaba con la clase resistente según el MOE, son C14 o C16.

En la figura 4.5.7. se compara la cantidad proporcional de vigas que obtiene cada clase resistente según su propiedad más restrictiva.

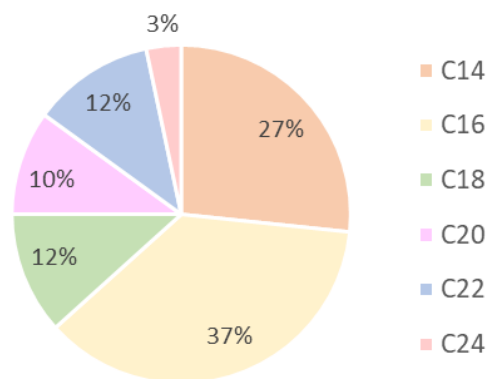


Figura 4.5.7: Cantidad proporcional de cada clase resistente.

Analizando cuál de las tres propiedades condiciona cada viga para obtener su clase resistente, se observa que con el MOE se obtienen clases resistentes menores, y por tanto es más condicionante. De las 60 vigas ensayadas, solo dos tienen su clase resistente condicionada por la densidad y en otras cinco la clase resistente obtenida por densidad y rigidez coinciden. En el gráfico 4.5.8. se puede apreciar la influencia de las distintas causas para obtener la clase resistente. El caso del MOR es llamativo, ya que en la gráfica aparece representado con un 0%, es decir, no condiciona en ningún caso la asignación de la clase resistente.

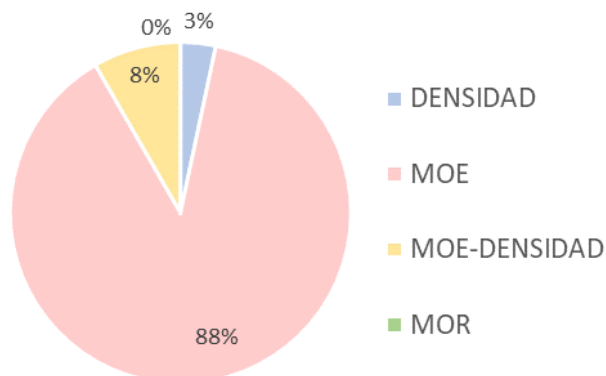


Figura 4.5.8: Cantidad proporcional de causa de cada clase resistente.

La clase resistente obtenida según cada uno de los métodos explicados anteriormente para cada viga no coincide. Siguiendo el procedimiento por clasificación visual, la clase es C18 o C24, bastante superiores a lo obtenido según los otros dos métodos.

En el caso de comparar la clase resistente obtenida según la rigidez de las vigas obtenidas con el ensayo de vibraciones y a flexión (tabla 4.5.2), se observa que casi en el 45% de las ocasiones la clase obtenida por uno y otro método coinciden. El 50% de las vigas fueron infraclasificadas (mayoritariamente una clase) con el método de vibraciones, es decir, se les asigna una menor clase resistente con el ensayo de vibraciones que con el ensayo a flexión, y por tanto, la clasificación queda del lado de la seguridad, al contrario de lo que ocurre con la asignación de clase resistente según la clasificación visual.

TOTAL	RECHAZO	C14	C16	C18	C20	C22	C24	FLEXIÓN
RECHAZO		3,4%						
C14		18,6%	22,0%	3,4%	1,7%			
C16		3,4%	15,3%	1,7%	5,1%	1,7%		
C18				5,1%	5,1%	3,4%		
C20				1,7%			1,7%	
C22						5,1%	1,7%	
C24								

VIBRACIONES

Tabla 4.5.2. Comparación de las clases resistentes obtenidas por el ensayo de vibraciones y el ensayo a flexión.

5 MEJORA DE LA CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE UN COMPOSITE.

5.1 INTRODUCCIÓN A LA MEJORA RESISTENTE

La madera de chopo, como hemos visto en la caracterización mecánica, es una madera de baja gradación con limitaciones para ciertas aplicaciones estructurales de uso directo. Los productos de ingeniería aumentan la cantidad de aplicaciones de este tipo de madera, pues pueden aumentar la resistencia y la rigidez mediante la eliminación de los defectos naturales. Un posible producto de ingeniería es una viga de chopo reforzada con FRP, tal cual se ve en la figura 5.1.1.

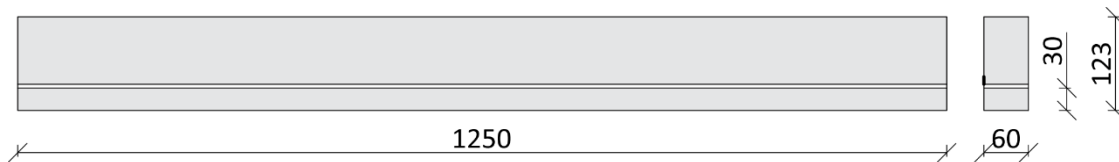


Figura 5.1.1. Esquema de viga compuesta.

La viga está compuesta por dos capas de chopo y un refuerzo de FRP entre ellas. La capa de chopo superior resiste parte de los esfuerzos y sirve como soporte del refuerzo. El refuerzo es quien absorbe la mayoría de los esfuerzos. La capa inferior de chopo tiene como función principal proteger el refuerzo frente al fuego y conseguir un resultado más estético. En mucha menor medida también soportará parte de los esfuerzos. Este producto se ha simulado numéricamente para analizar su comportamiento en este trabajo.

El refuerzo también se puede colocar en estructuras ya construidas. Las estructuras pueden necesitar aumentar su capacidad resistente por diversos motivos, como un cambio de uso del edificio o un deterioro de la madera de la estructura. Las estructuras de pino son comunes, por ello se propone colocar FRP como refuerzo y una capa de inferior de madera de chopo tal y como se muestra en la figura 5.1.2.

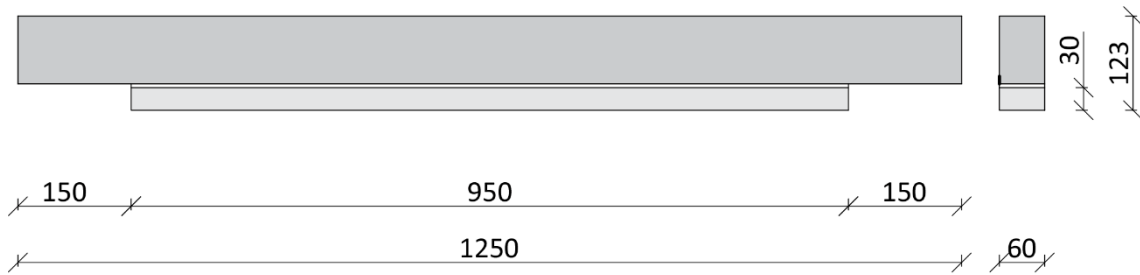


Figura 5.1.2. Esquema de viga reforzada.

La viga de pino será de mayor dimensión que las otras dos capas, tratando de simular que esta se encuentra empotrada en dos columnas, en cuyas zonas no se puede incluir el refuerzo. En este trabajo se simulan vigas con diferentes refuerzos de FRP.

5.2 TIPOS DE FRP

Las fibras de alto rendimiento de carbono fueron creadas en 1958 en el Centro Técnico de la *Union Carbide Parma* por Roger Bacon. El proceso de fabricación era muy ineficiente y consistía en calentar fibras de rayón provenientes de la celulosa hasta carbonizarlas. Las fibras resultantes tenían malas propiedades mecánicas, solo el 20% eran de carbono.

Dos años después, Akio Shindo (*Agencia de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología de Japón*) utilizó poliacrilonitrilo (PAN) como materia prima y consiguió un 55% de carbono. Durante la década de los 70 la producción se perfeccionó, consiguiendo un 85% de fibras de carbono con excelente resistencia a flexión a partir de brea de petróleo.

El hilo de carbono está compuesto por miles de filamentos de carbono, tubos muy delgados compuestos prácticamente solo por carbono. Las primeras fibras (T300 y AS4) tenían un diámetro de 7,8 μm , actualmente esa dimensión se ha reducido hasta 5 μm .

El material está compuesto por el refuerzo y la matriz, es conocido como plástico reforzado con fibras de carbono (CFRP). La fibra es el refuerzo y la matriz es un polímero, una resina termoestable generalmente tipo epoxi, aunque puede ser de otros tipos como poliéster, estervinílico o nailon.

Las fibras de carbono se clasifican siguiendo distintos criterios. Por ejemplo, según la temperatura de tratamiento térmico final, su tejido y número de filamentos, o según el material precursor. Una de las clasificaciones más interesantes es según las propiedades mecánicas de las fibras, las categorías son UHM (ultra alto módulo) con un módulo superior a los 450 GPa, HM (alto módulo) con un módulo entre 350 y 450 GPa, IM (módulo intermedio) con el módulo entre 200 y 350 GPa, HT (módulo bajo o alta resistencia a tracción) con el módulo menor a 100 GPa y una resistencia a tracción superior a 3 GPa, y SHT (superalta resistencia a tracción) con una resistencia a tracción mayor a 4,5 GPa.

Los polímeros se fabrican usando distintas técnicas, como el moldeo manual (*hand lay up*), la propulsión, el bobinado en hilo, la compresión, el BMC (*Bulk Moulding Compound*) y el SMC (*Sheet Moulding Compound*).

La fibra de carbono se emplea principalmente en la industria aeronáutica, aeroespacial y automotriz, la industria del transporte en general, así como en la industria eólica y el deporte de alta competición. El empleo en la construcción está en auge. El uso en el refuerzo de estructuras de hormigón y acero está extendido, aunque en estructuras de madera sigue siendo un material novedoso y poco utilizado a pesar de su gran potencial.

5.3 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

La madera y el FRP, los materiales que forman las vigas, son los dos conceptualmente similares. Ambos están compuestos por fibras dispuestas en una dirección principal en la cual tienen una gran resistencia a tracción. La principal diferencia entre ambos es su origen o elaboración. La madera es un material natural de origen orgánico, y por tanto afectado por numerosos factores como los nudos o cambios de humedad. Por el contrario, los materiales FRP son productos industriales y por tanto sometidos a un riguroso control.

Los dos materiales se comportan de manera similar a tracción, siguen una relación tensión-deformación lineal hasta la rotura frágil. El módulo elástico de los compuestos

de fibra rondan las 15 o 20 veces superior a la madera, cómo se observa en la figura 5.3.1.

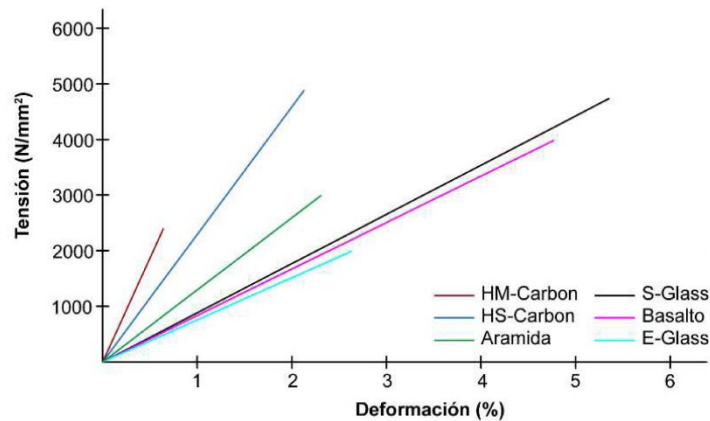


Figura 5.3.1. Gráfica tensión deformación a tracción.

El comportamiento mecánico, excluyendo la tracción, es bastante diferente. Por ejemplo, la madera tiene un excelente comportamiento a compresión con relación a su peso y su comportamiento es elastoplástico. El FRP se tiene un comportamiento frágil a compresión, y aunque la resistencia es similar debido a la gran esbeltez, su comportamiento es mucho peor.

Las propiedades mecánicas de los distintos materiales que se han utilizado en este trabajo para la simulación numérica se han obtenido de distintas fuentes y se explican en cada caso. Los datos de la madera se han obtenido de la caracterización mecánica realizada anteriormente, detallada únicamente la del chopo, y los datos del refuerzo obtenidos del catálogo comercial de las casas MAPEI y DRIZORO. El límite elástico de los FRP ha sido estimado con los datos proporcionados por la casa comercial. Este valor no influye en la simulación, ya que la madera plastifica mucho antes que el composite.

5.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se analizó el comportamiento elástico y elastoplástico de la viga compuesta por chopo y FRP y de la viga de pino reforzada con FRP y chopo. Los dos tipos de vigas se han analizado con tres tipos de FRP.

Ambas vigas se han simulado numéricamente utilizando el método de los elementos finitos (FEM). Este método permite obtener una solución numérica

aproximada, conociendo el comportamiento mecánico en los elementos en los que se divide la estructura y los nodos, e interpolando los resultados. El trabajo se ha realizado utilizando en un programa de cálculo de elementos finitos, en el que se han seguido las fases típicas de un análisis de elementos finitos: pre-proceso, cálculo y postproceso. Finalmente se han validado los materiales y resultados.

5.4.1 VIGA COMPUESTA (CHOPO + FRP + CHOPO)

La viga compuesta por chopo y FRP es un producto innovador, de ahí su necesidad de ensayarlo. Se ha calculado un elemento estructural sencillo: una viga biapoyada compuesta por tres capas.

Se han calculado tres tipos de vigas, según el tipo de FRP: una viga reforzada con tejido de carbono, otra con tejido de basalto y otra con laminado de carbono. Se ha estudiado la viga en dos estados de carga, uno con el comportamiento elástico y otro con el comportamiento elastoplástico.

5.4.1.1 Preproceso

Se ha calculado una viga compuesta de 1250 mm de largo y de sección 60 mm x 123-4 mm, biapoyada a 125 mm de cada extremo y sometida a dos cargas puntuales equidistantes, tal y como se muestra en la figura 5.4.1.

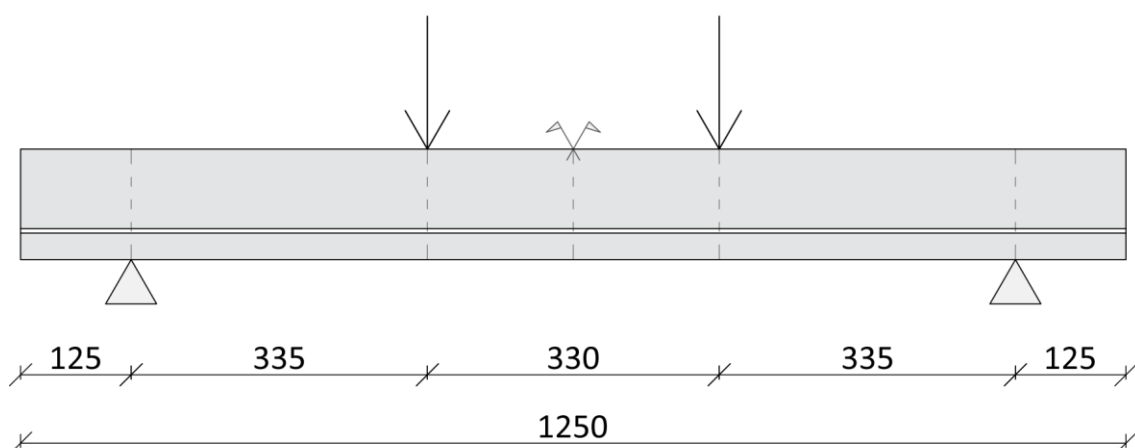


Figura 5.4.1. Geometría de la viga compuesta, posición de las cargas y los apoyos.

La capa superior es de 90 mm de espesor de chopo, el refuerzo tiene un espesor de 3 mm si es tejido de carbono o basalto y de 4 mm si es laminado de carbono. La capa

inferior es también de chopo, de espesor 30 mm. Las capas están unidas mediante una resina que no se ha tenido en cuenta en esta simulación.

El modelo se ha creado como tres partes sólidas independientes nombradas *CHOPO SUPERIOR*, *REFUERZO* y *CHOPO INFERIOR*. Todas las capas se deben unir para crear un solo elemento, denominado *VIGA COMPUESTA*. Para ello, se utiliza en el programa la herramienta de *Module: Assembly* para crear un caso independiente. Este tipo de *Assembly* no traspasa los esfuerzos entre las partes. Para unir las y que se comporten como un todo hay que utilizar *merge/cut instances*, manteniendo los bordes. La figura 5.4.2. muestra el proceso de creación del *Assembly*.

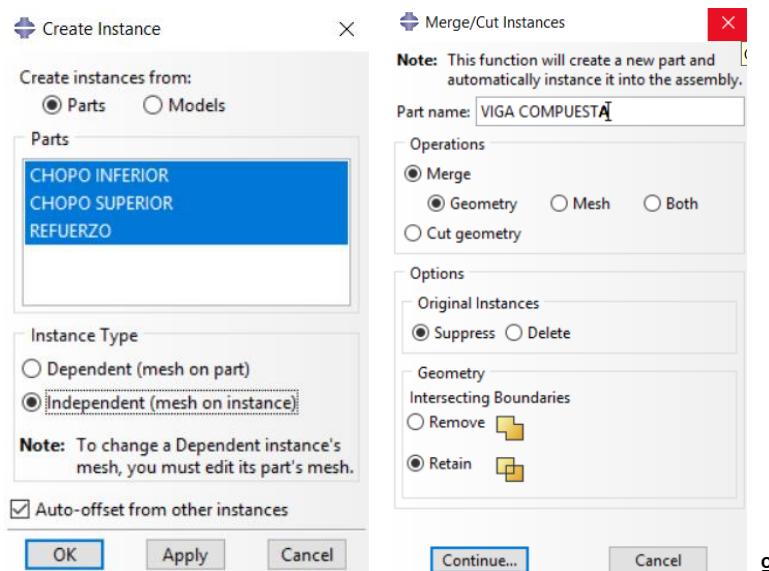


Figura 5.4.2. Proceso de crear un elemento a partir de las partes.

5.4.1.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales están explicadas detalladamente en el apartado 5.3. Características mecánicas. En la tabla 5.4.1. están resumidas las propiedades de los materiales utilizados en la simulación de este tipo de vigas.

Materiales	Módulo elástico	Límite elástico	Coefficiente de Poisson	Resistencia
Chopo	$8,818 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	0,37	$3,8 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
Tejido unidireccional de carbono	$2,3 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$	$3 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$	0,3	$4,83 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$
Tejido unidireccional de basalto	$8,9 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$	$2 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$	0,3	$4,84 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$
Laminado de carbono	$1,65 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$	$2,5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$	0,3	$2,6 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$

Tabla 5.4.1. Propiedades de los materiales utilizados en las vigas compuestas.

Las propiedades son elastoplásticas sin endurecimiento, es decir, una vez alcanzado el límite elástico el material no aumenta la tensión soportada, solo aumenta su deformación. En las figuras 5.4.3.,5.4.4., 5.4.5. y 5.4.6. se muestra el proceso de entrada en el programa.

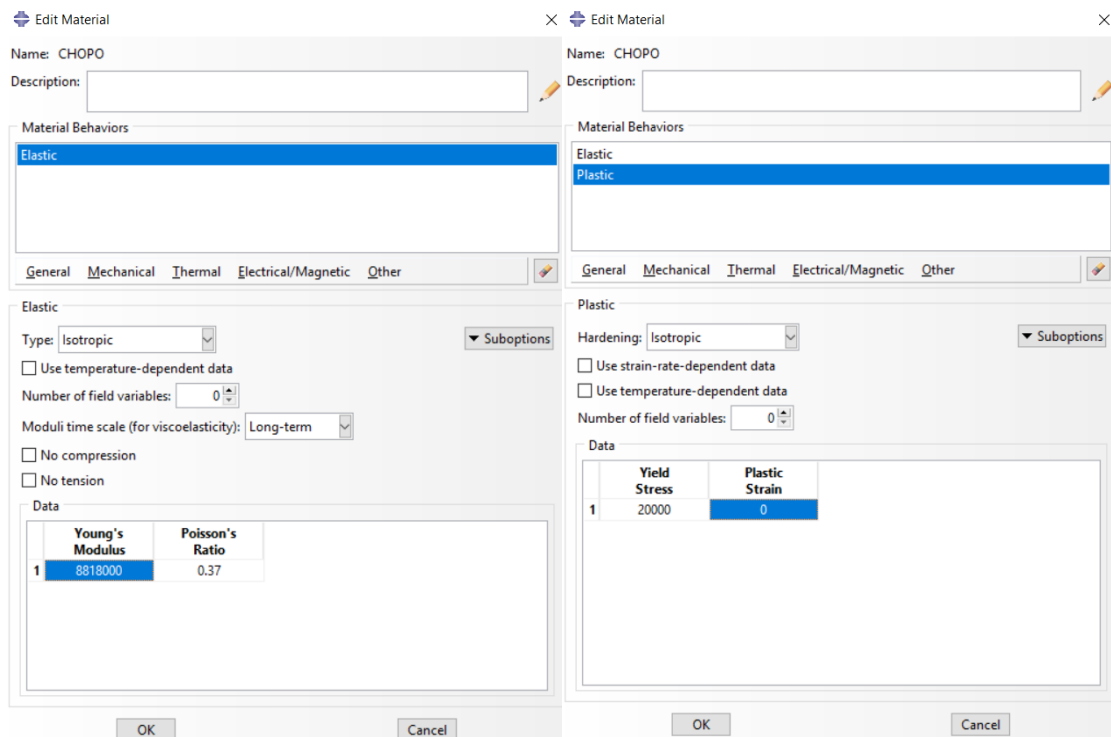


Figura 5.4.3. Propiedades elásticas y plásticas del chopo.

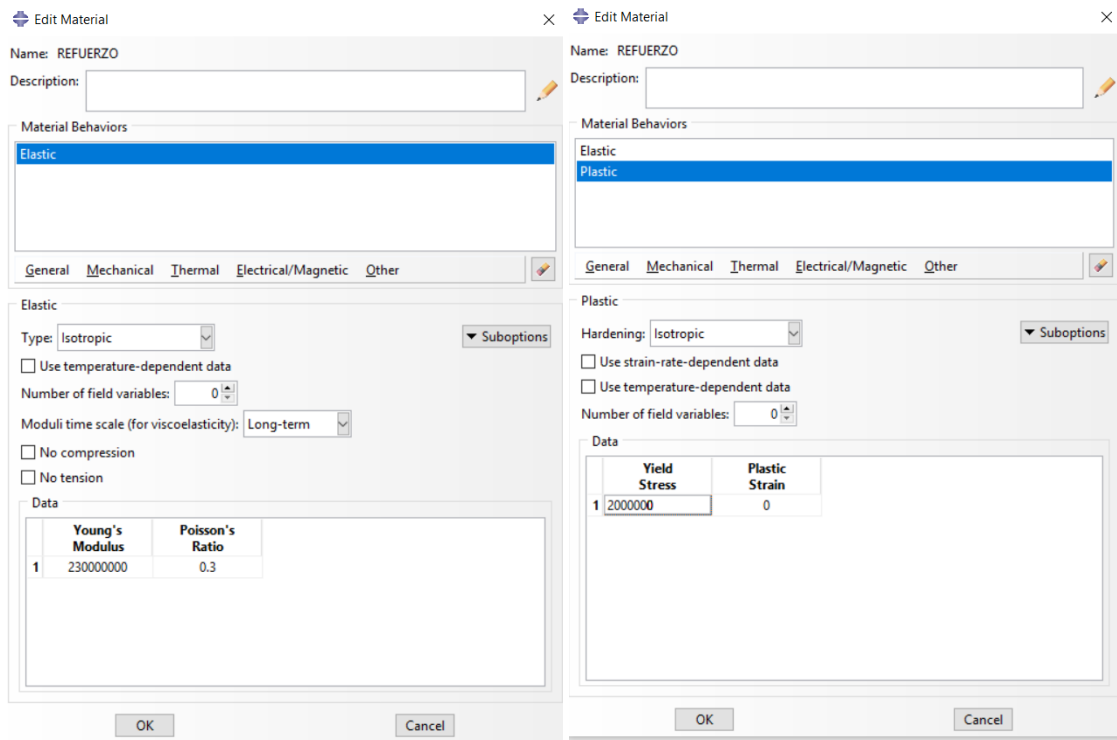


Figura 5.4.4. Propiedades elásticas y plásticas del tejido unidireccional de carbono.

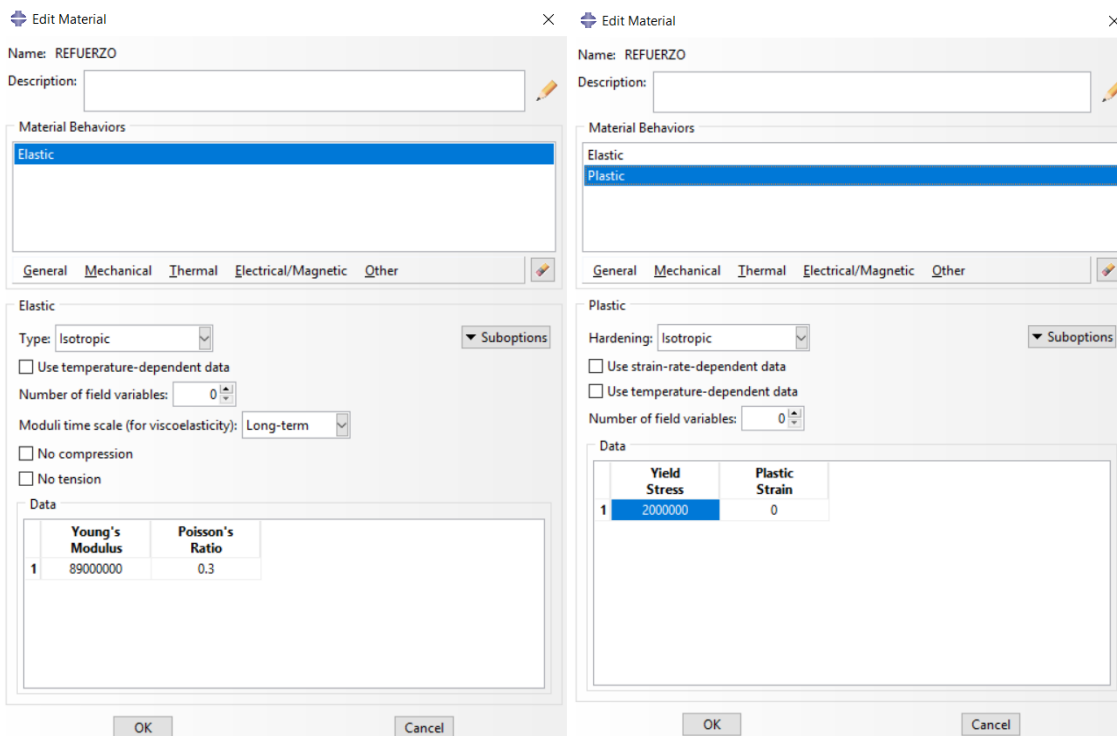


Figura 5.4.5. Propiedades elásticas y plásticas del tejido unidireccional de basalto.

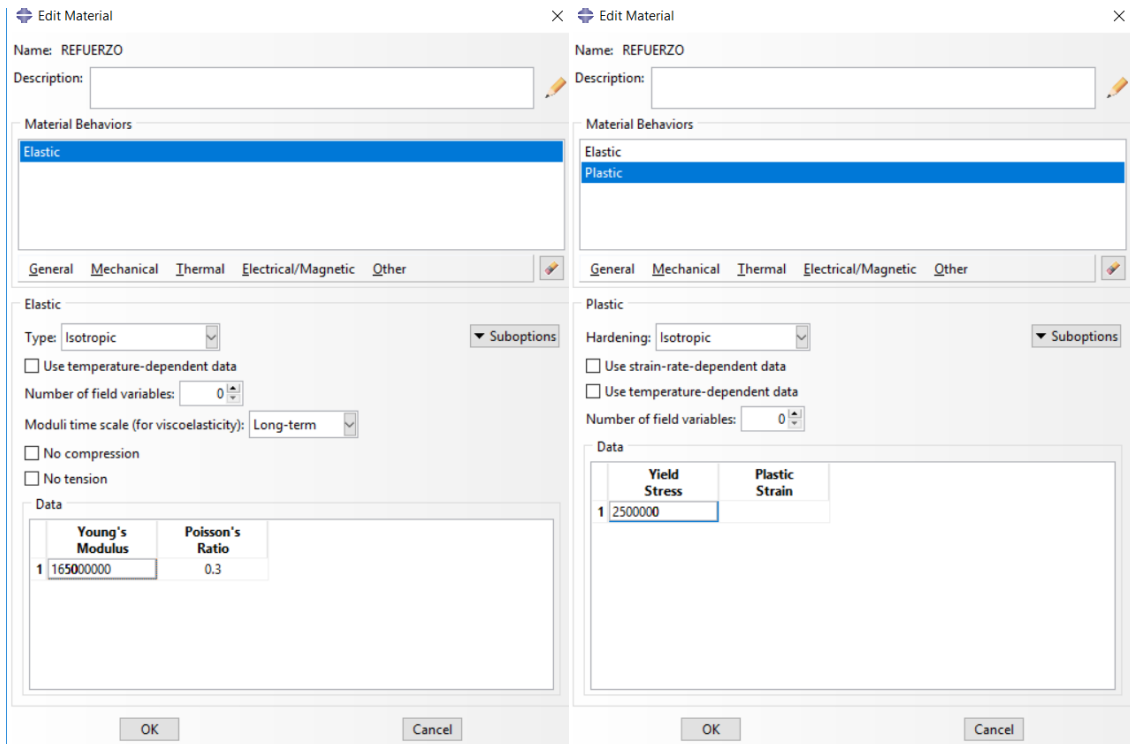
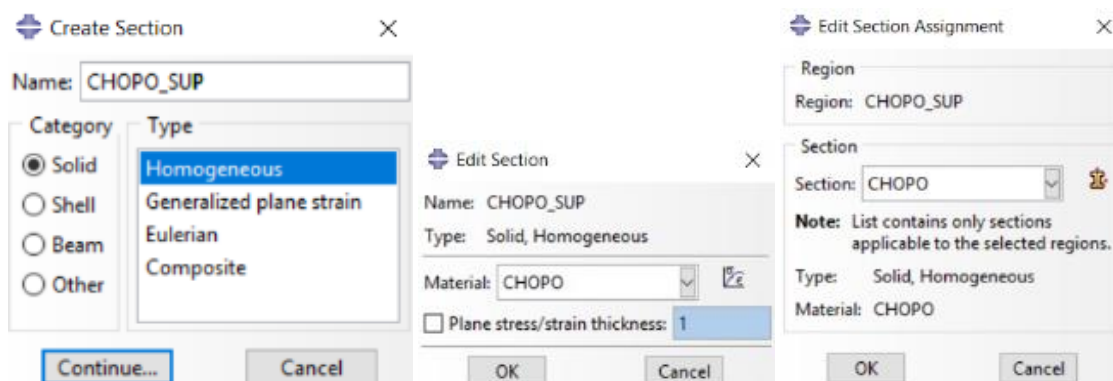


Figura 5.4.6. Propiedades elásticas y plásticas del laminado de carbono.

A cada capa que conforma la viga, le corresponde una sección sólida homogénea, a la que se asigna la sección correspondiente y su material. El proceso de entrada de datos se muestra en la figura 5.4.7. Este proceso se repite tres veces y en todos los casos la viga está formada por chopo en las capas exteriores y el FRP entre ellas.



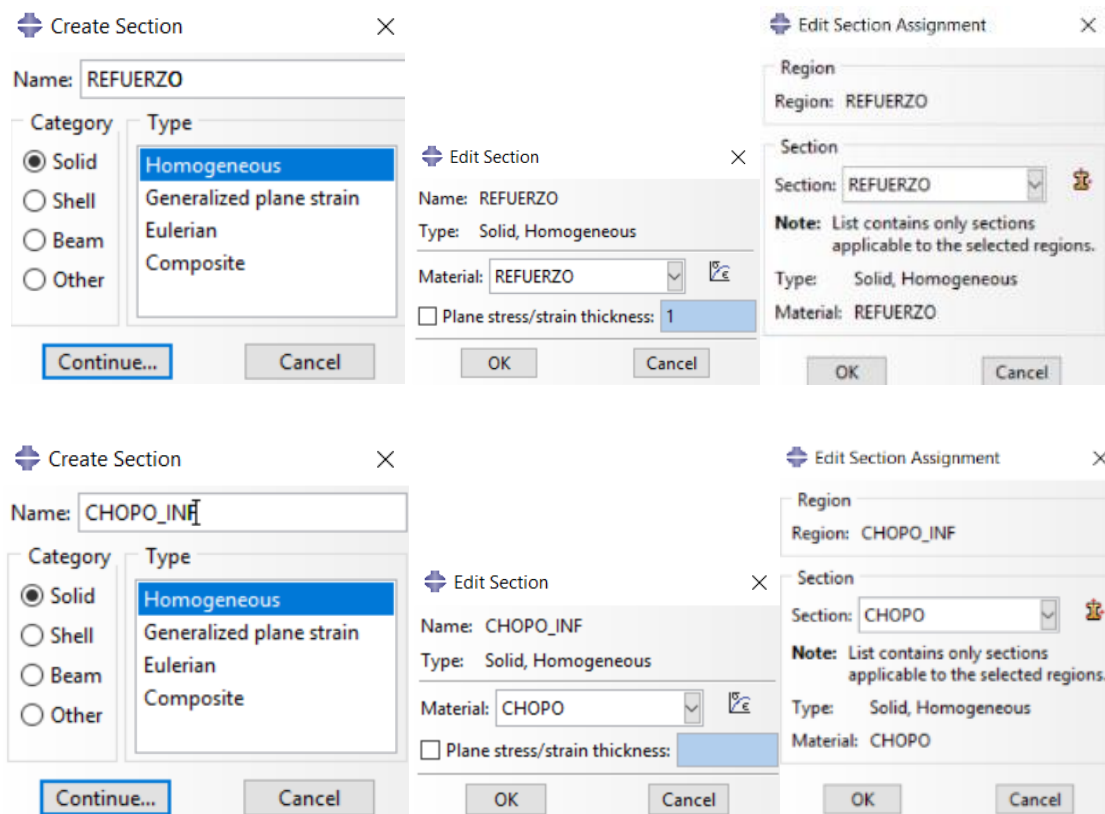


Figura 5.4.7. Creación y asignación de las secciones.

5.4.1.3 Acciones y condiciones de contorno

La viga está sometida a dos cargas lineales iguales y tiene las condiciones de contorno especificadas en el apartado 5.4.1.1. Preproceso. Las condiciones de contorno y carga son análogas a lo detallado en la norma UNE-EN 408:2011 para determinar algunas propiedades mecánicas a partir de un ensayo a flexión a cuatro puntos.

La carga total es aproximadamente tres toneladas tanto en el cálculo elástico como elastoplástico. Como el programa no permite introducir una carga lineal en sólidos en el sentido y posición necesarias, se introducen como cargas puntuales en cada uno de los nodos de la línea en que va colocada la carga lineal, creando un conjunto (*set*). Con la densidad de malla, hay 26 nodos entre las dos líneas de carga. Se colocan 1,2 kN en cada nodo, cargando la viga finalmente con 3,12 t.

El proceso de entrada de datos en el programa, creando los *set* en la malla y seleccionando todos los puntos donde se introduce carga, se muestra en las figuras 5.4.8. y 5.4.9.

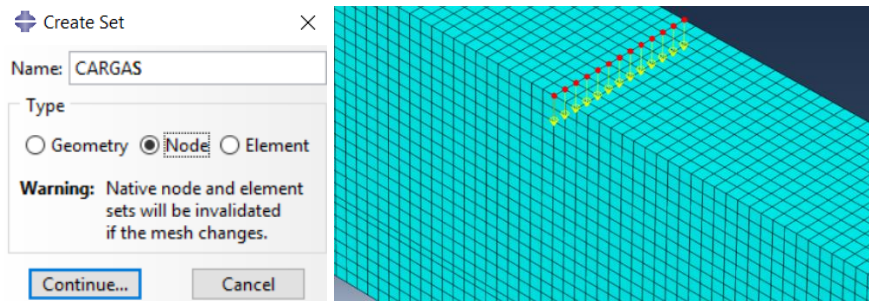


Figura 5.4.8. Proceso de crear los Set para introducir la carga.

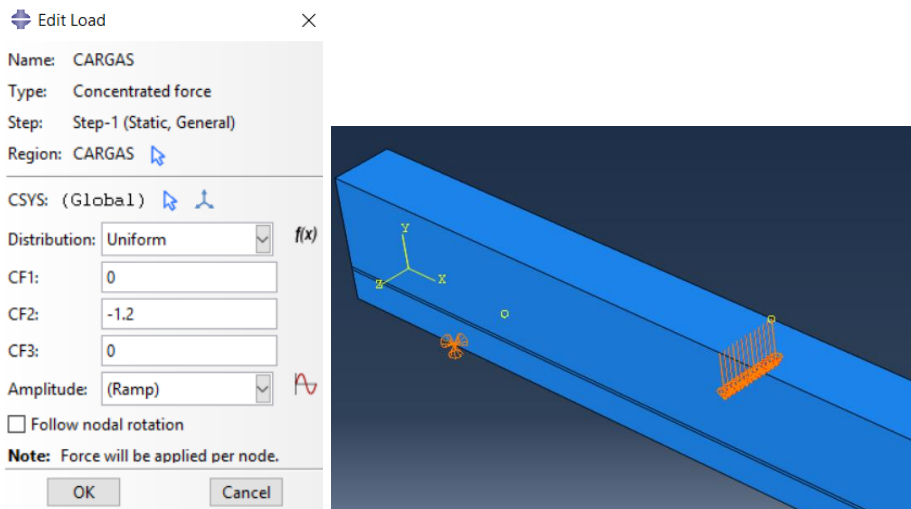


Figura 5.4.9. Detalle de la carga.

La viga esta biapoyada, es decir, se impide el movimiento vertical en la dirección de la carga. Aunque no exista ninguna carga en otra dirección, el modelo entiende que se puede mover libremente en el espacio. En los dos apoyos se permite el giro libremente como se muestra en la figura 5.4.10.

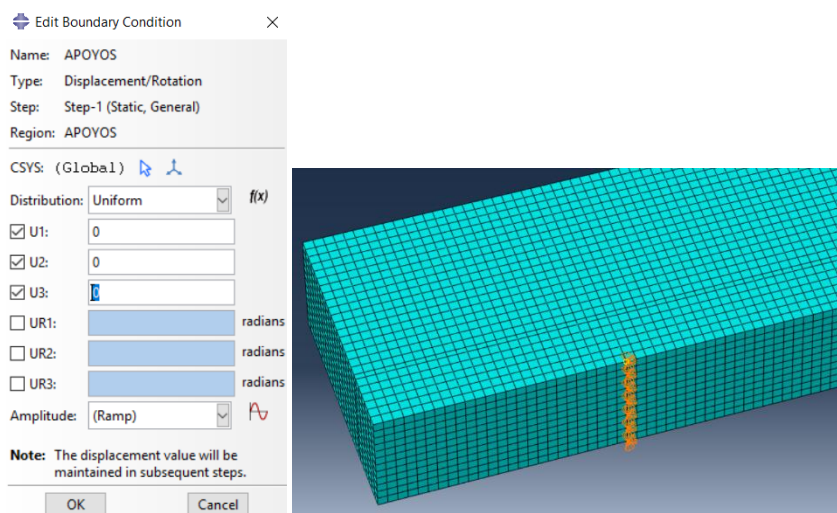


Figura 5.4.10. Condiciones de contorno.

5.4.1.4 Tipos de elementos utilizados en la modelización

Los elementos utilizados para modelizar la viga compuesta son iguales para las tres capas. Cada parte de la viga está modelada en 3D como un sólido deformable extrusionado como se detalla en la figura 5.4.11.

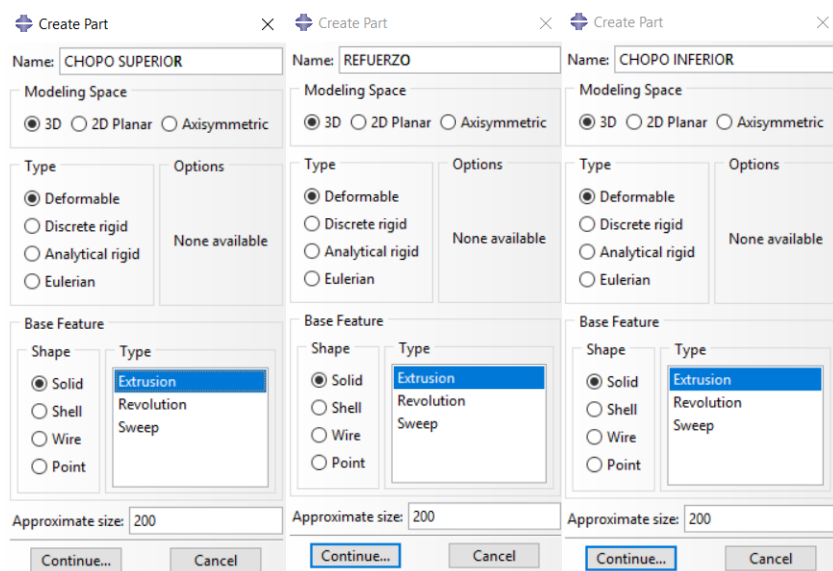


Figura 5.4.11. Tipo de elementos utilizados en la modelización.

En la malla se ha utilizado el elemento C3D8R, es decir, un elemento continuo (cúbico) con tres grados de libertad y 8 nodos. Este elemento utiliza interpolación lineal. Es el elemento de uso general en el caso de calcular sólidos. En la figura 5.4.12. se muestra la elección del elemento y su descripción geométrica en el manual del programa utilizado.

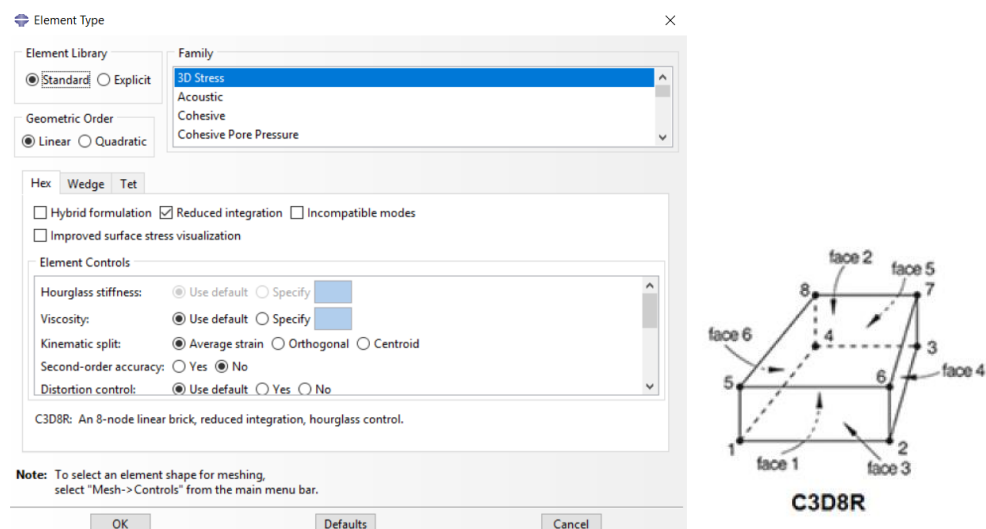


Figura 5.4.12. Tipo de elemento de la malla.

La malla definida tiene 75.000 elementos lineales hexaédricos del tipo C3D8R y 91.364 nodos. La dimensión de los elementos es de 5 mm en cada dirección, excepto los de la capa de refuerzo que tienen la altura de la capa. Con esta densidad se consigue una línea de nodos en cada línea de cargas y de apoyos y un tiempo de cálculo asequible. La figura 5.4.13. muestra el proceso de mallado y la malla final.

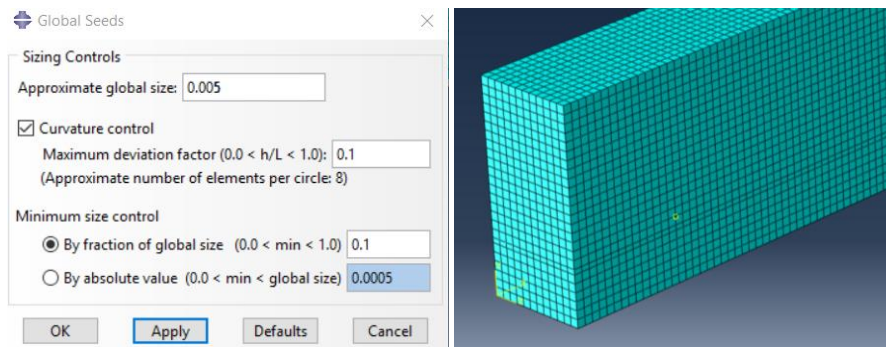
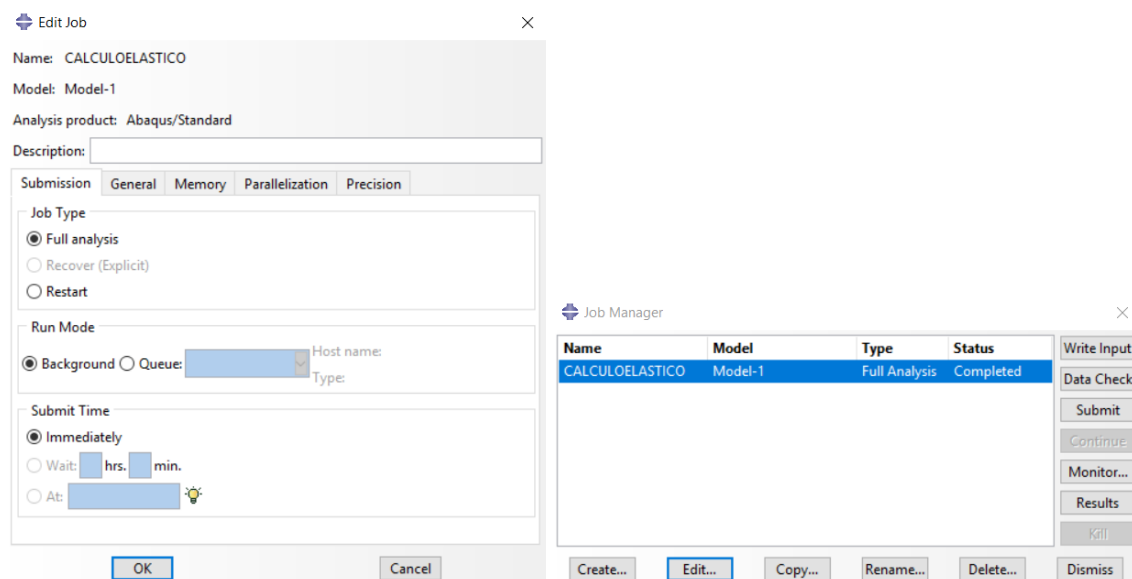


Figura 5.4.13. Geometría de la malla.

5.4.1.5 Cálculo

El proceso de cálculo se realiza en el *Modulo: Job*, en él se crea un trabajo (*Job*), con las opciones de cálculo que se requieran. En este caso se han utilizado las definidas por defecto. Una vez creado, se comprueban los datos (*Data Check*) en el que aparecen si hay errores, que impidan el cálculo, o avisos que también pueden influir, o ser superfluos. Si no hay errores, y los avisos se pueden ignorar se lanza el cálculo (*Submit*).

En la figura 5.4.14. se puede seguir el proceso realizado en el programa.



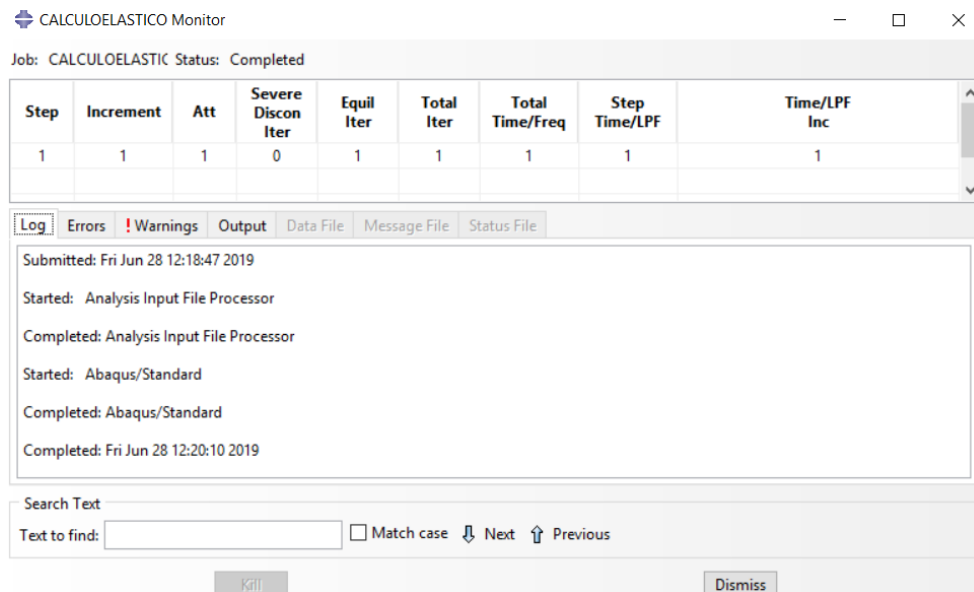


Figura 5.4.14. Proceso de lanzar el cálculo.

5.4.2 VIGA REFORZADA (PINO + REFUERZO + CHOPO)

La viga reforzada está compuesta con pino, FRP y chopo. Las vigas son de cuatro tipos según el material FRP: pueden estar reforzadas por chopo (sin FRP), por tejido unidireccional de carbono, por tejido unidireccional de basalto y por laminado de carbono. Las vigas simuladas se comparan con las vigas de las mismas características ensayadas. Se calculó un elemento estructural sencillo, una viga biapoyada compuesta por tres capas.

Los cuatro tipos de vigas, cada una con un material de refuerzo, se estudiaron con un comportamiento elástico y con un comportamiento elastoplástico.

5.4.2.1 Preproceso

Se calcula una viga compuesta de 1250 mm de largo y de sección 60 mm x 123mm o 124 mm, biapoyada a 125 mm de cada extremo y sometida a dos cargas puntuales, tal y como se muestra en la figura 5.4.15.

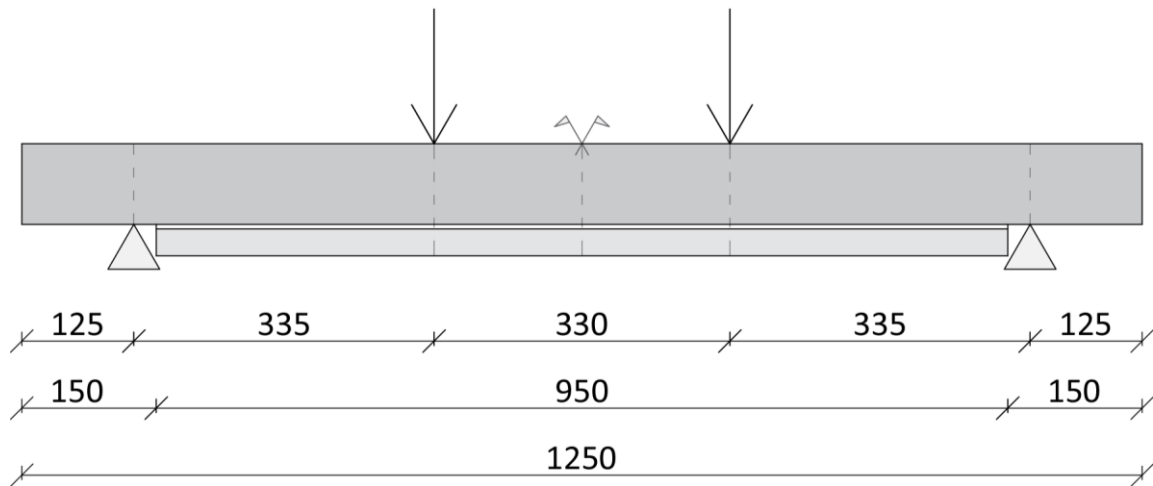


Figura 5.4.15. Geometría de la viga reforzada, posición de las cargas y los apoyos.

La capa superior es de 90 mm de espesor de pino, el refuerzo de FRP tiene un espesor de 3 mm si es tejido y 4 mm si es laminado y la capa inferior de chopo tiene un espesor de 30 mm. La capa intermedia e inferior son más cortas, ya que se mantienen 150 mm libres en los extremos que corresponderían a los pilares. Las capas están unidas mediante una resina que no se ha tenido en cuenta en esta simulación.

El proceso seguido es similar al caso de la viga compuesta chopo+FRP+chopo. El modelo se ha creado también como tres partes sólidas independientes, nombradas según el material que lo forme como *PINO*, *REFUERZO* y *CHOPO*. Todas las capas se deben unir y crear un solo elemento, denominado *VIGA REFORZADA*, siguiendo el proceso explicado en el apartado 5.4.1.1. Preproceso. La figura 5.4.16. muestra el proceso de creación del *Assembly*.

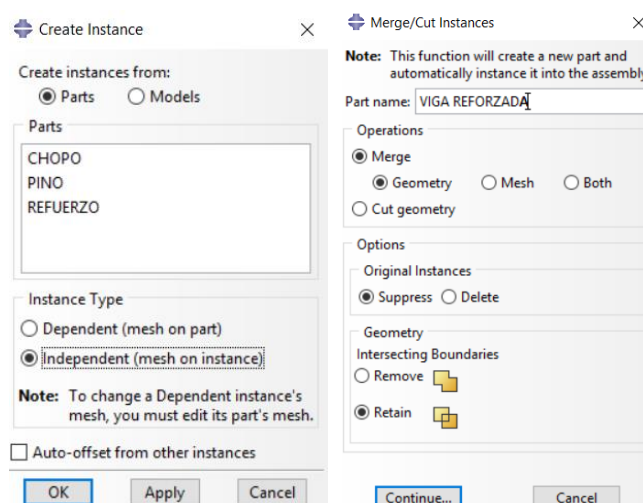


Figura 5.4.16. Proceso de crear un elemento a partir de las partes.

5.4.2.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales están explicadas detalladamente en el apartado 5.3. Características mecánicas. La tabla 5.4.1. resume las propiedades utilizadas en la simulación de este tipo de vigas.

Materiales	Módulo elástico	Límite elástico	Coefficiente de Poisson	Resistencia
Pino	$8,29 \cdot 10^6$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	0,3	$3,6 \cdot 10^4$ kN/m ²
Chopo	$8,818 \cdot 10^6$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	0,37	$3,8 \cdot 10^4$ kN/m ²
Tejido unidireccional de carbono	$2,3 \cdot 10^8$ kN/m ²	$3 \cdot 10^6$ kN/m ²	0,3	$4,83 \cdot 10^7$ kN/m ²
Tejido unidireccional de basalto	$8,9 \cdot 10^7$ kN/m ²	$2 \cdot 10^6$ kN/m ²	0,3	$4,84 \cdot 10^7$ kN/m ²
Laminado de carbono	$1,65 \cdot 10^7$ kN/m ²	$2,5 \cdot 10^6$ kN/m ²	0,3	$2,6 \cdot 10^7$ kN/m ²

Tabla 5.4.1. Propiedades de los materiales utilizados en las vigas compuestas.

Las propiedades serán elastoplásticas sin endurecimiento, como se ha explicado anteriormente. Las figuras 5.4.17., 5.4.18., 5.4.19., 5.4.20., y 5.4.21. muestran el proceso de entrada en el programa.

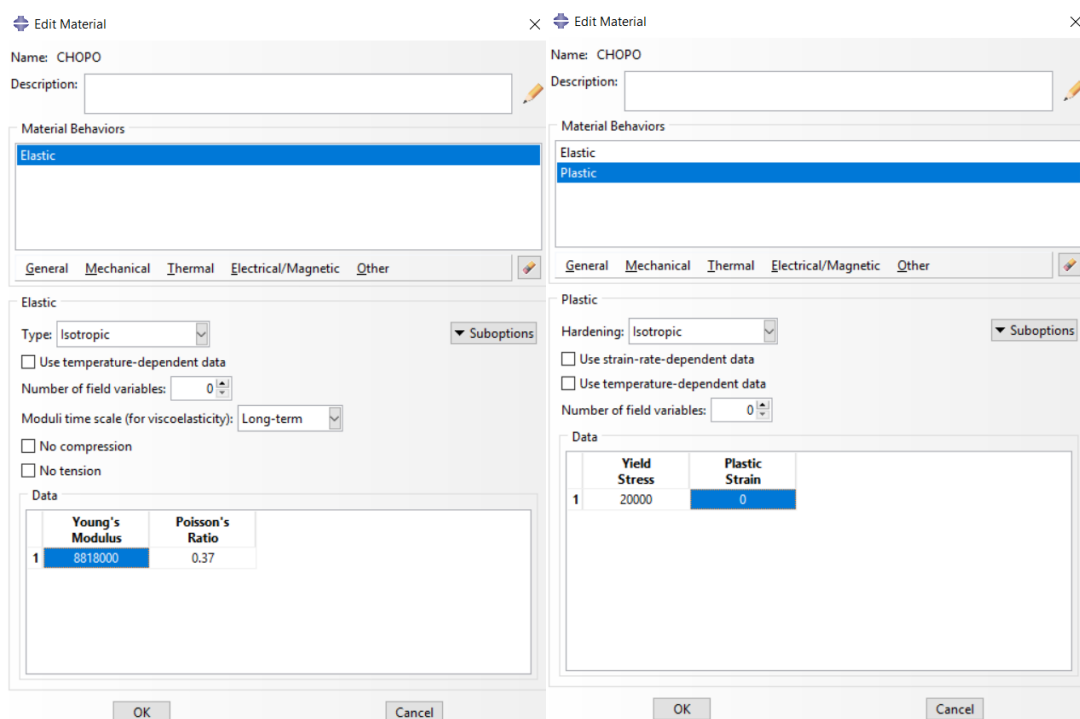


Figura 5.4.17. Propiedades elásticas y plásticas del chopo.

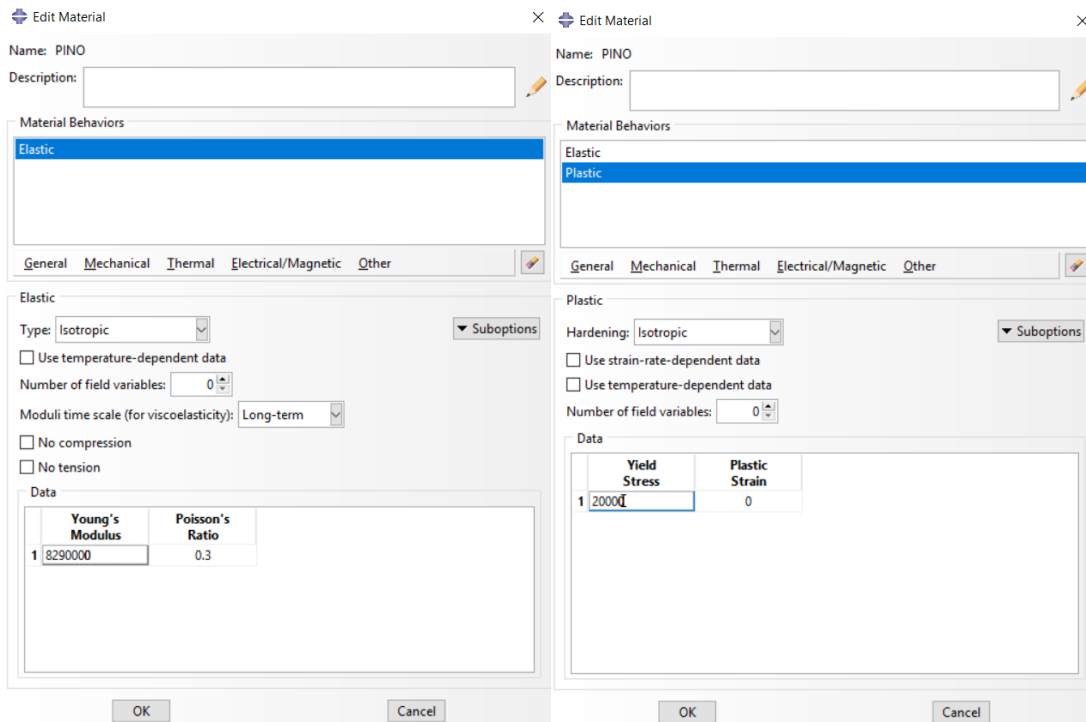


Figura 5.4.18. Propiedades elásticas y plásticas del pino.

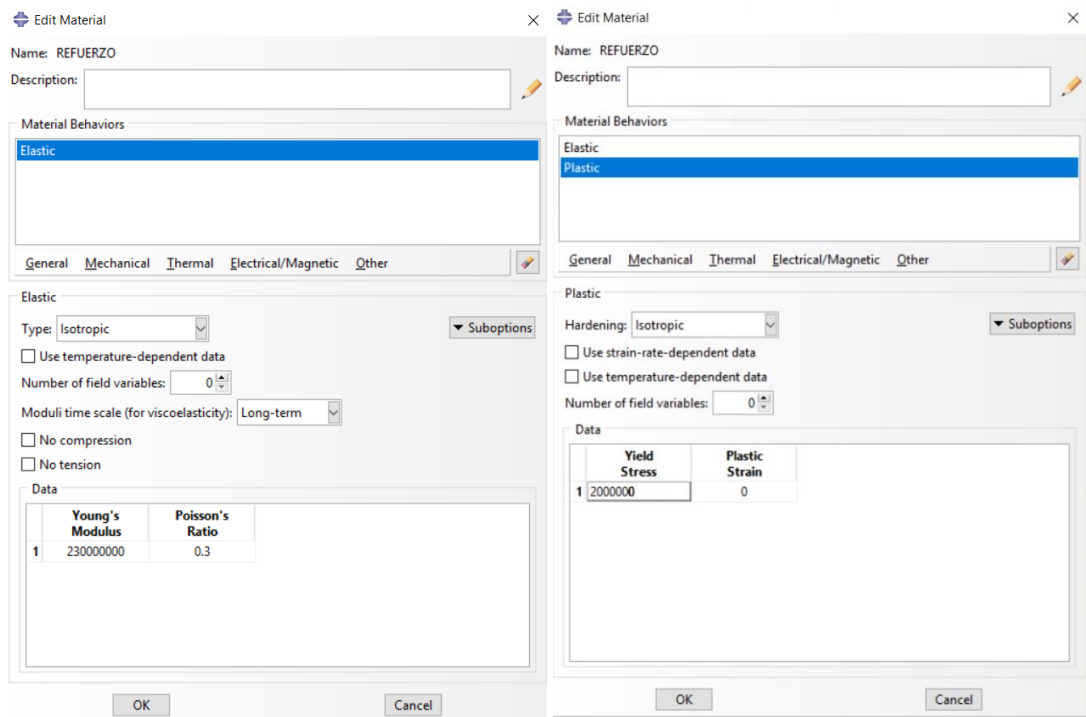


Figura 5.4.19. Propiedades elásticas y plásticas del tejido unidireccional de carbono.

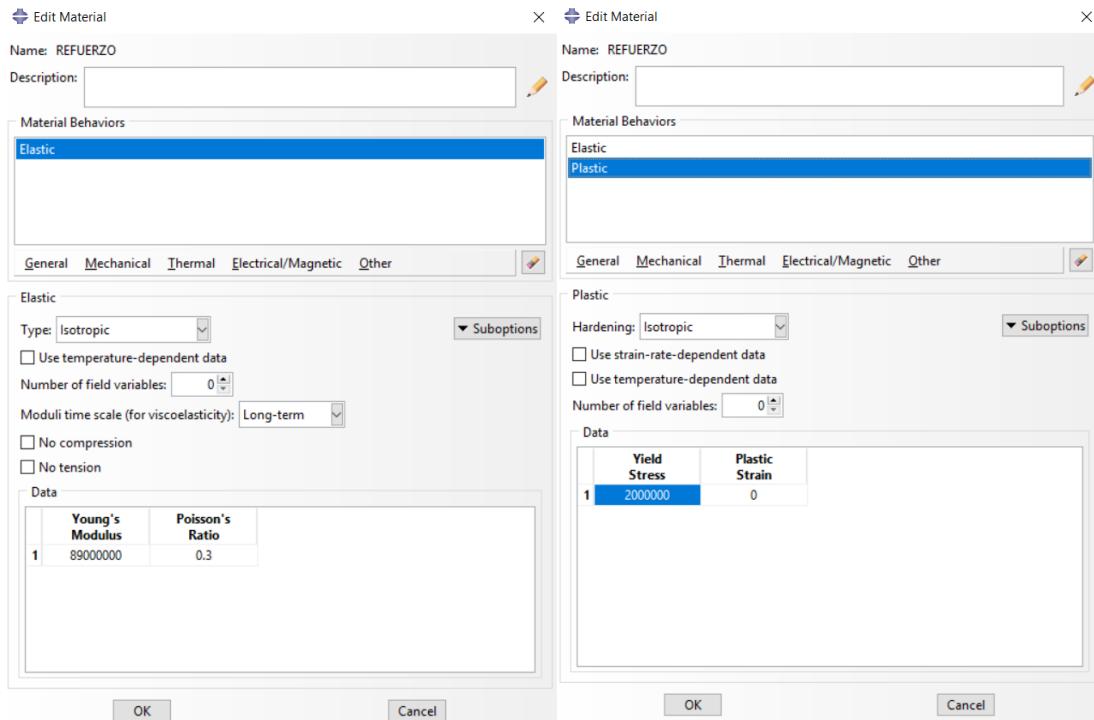


Figura 5.4.20. Propiedades elásticas y plásticas del tejido unidireccional de basalto.

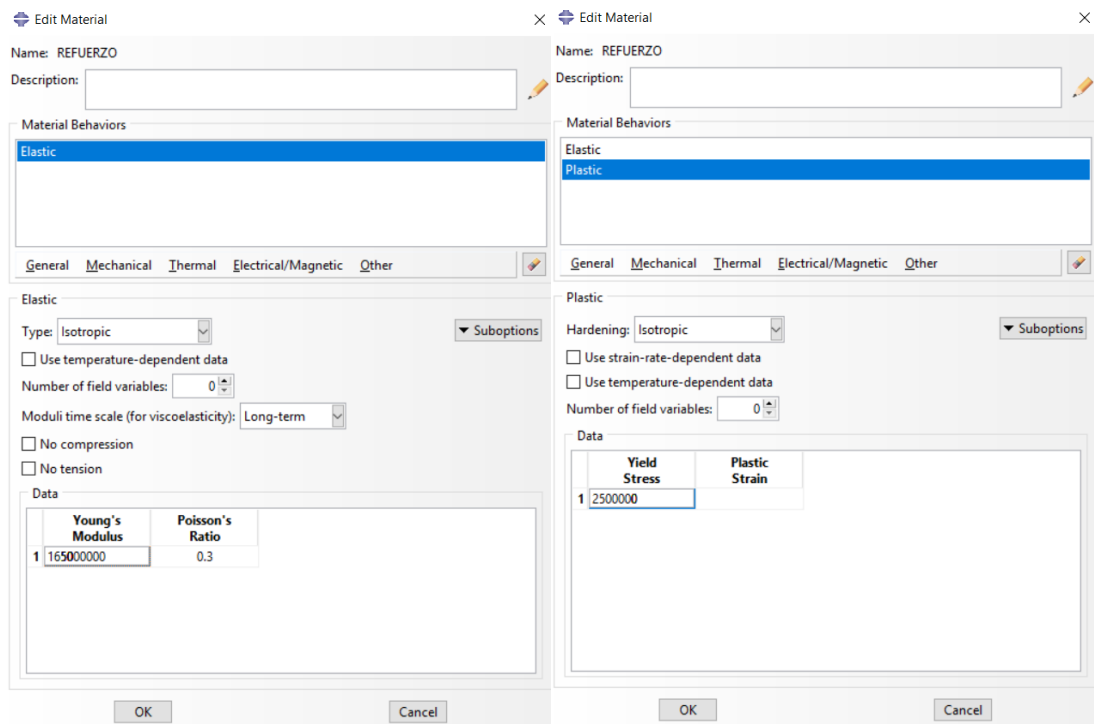


Figura 5.4.21. Propiedades elásticas y plásticas del laminado de carbono.

El proceso de entrada de datos de tipo de sección y material se muestra en la figura 5.4.22. El proceso es análogo al caso de la viga compuesta y se repite cuatro veces, una vez con cada tipo de refuerzo FRP.

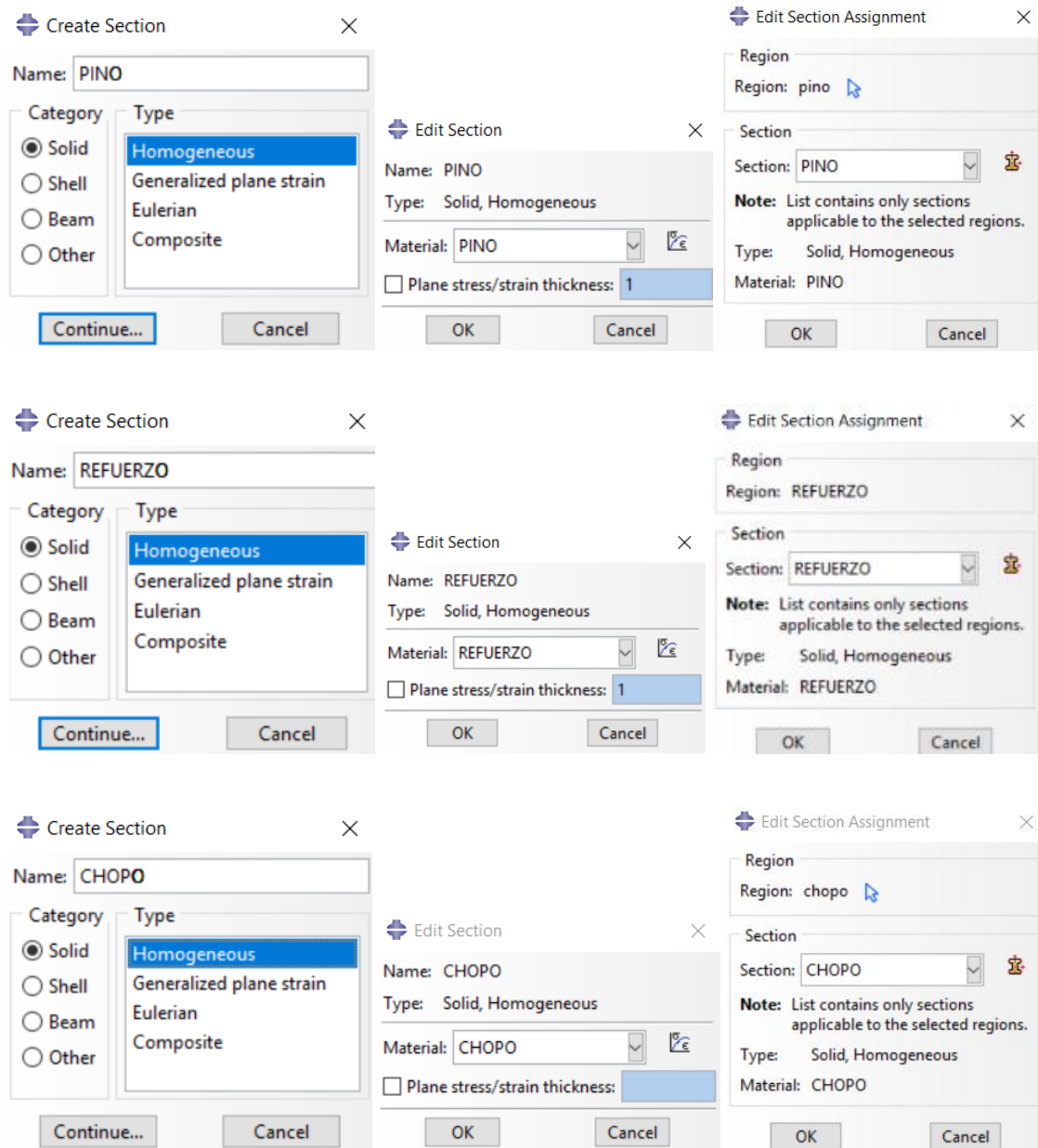


Figura 5.4.22. Creación y asignación de las secciones.

5.4.2.3 Acciones y condiciones de contorno

La viga está sometida a dos cargas lineales iguales y tiene las condiciones de contorno especificadas en el apartado 5.4.2.1. Preproceso. Las condiciones de contorno y carga son análogas a lo detallado en la norma UNE-EN 408:2011 para determinar algunas propiedades mecánicas a partir de un ensayo a flexión a cuatro puntos. Estas condiciones son iguales a las de la viga compuesta chopo+FRP+chopo.

La carga total se introduce como carga puntual en cada uno de los nodos de la línea en que va colocada la carga lineal, creando un conjunto (*set*). La carga final es de 3,12 t, 1,2 kN en cada uno de los nodos de la línea de carga.

El proceso de entrada de datos en el programa, creando los *set* en la malla y seleccionando todos los puntos donde se introduce carga, se muestra en las figuras 5.4.23. y 5.4.24.

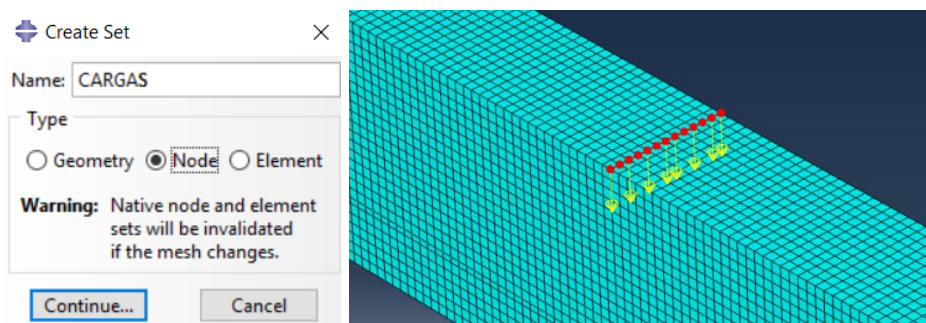


Figura 5.4.23. Proceso de crear los Set para introducir la carga.

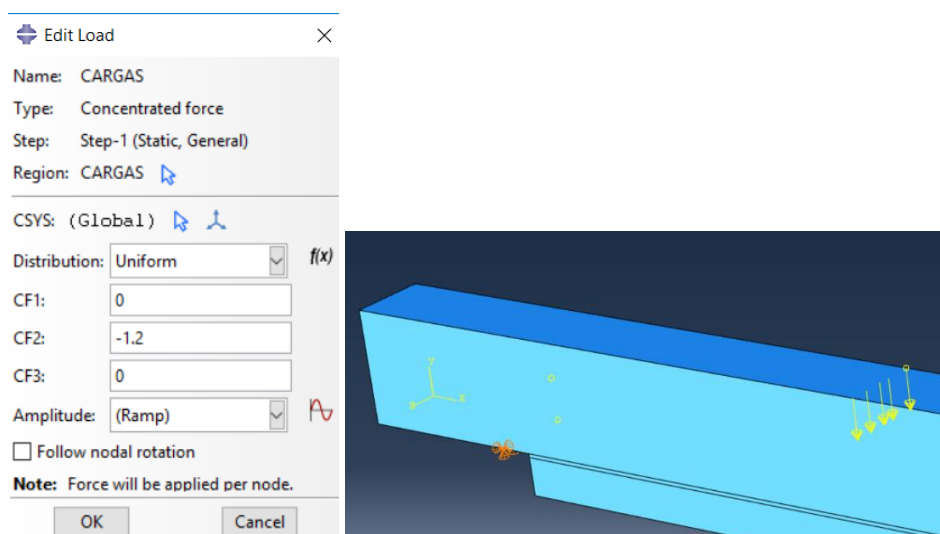


Figura 5.4.24. Detalle de la carga.

La viga esté biapoyada y se calcula impidiendo el movimiento en las tres direcciones del espacio pero permitiendo el giro libre en las dos líneas de apoyo, como se muestra en la figura 5.4.25.

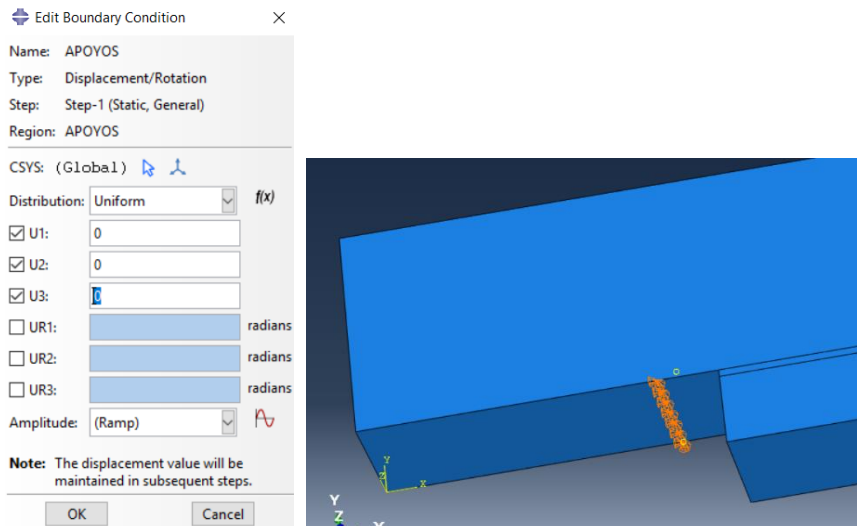


Figura 5.4.25. Condiciones de contorno.

5.4.2.4 Tipos de elementos utilizados en la modelización

Los elementos utilizados para modelar la viga compuesta son iguales para las tres capas, idénticos a los utilizados en la viga compuesta chopo+FRP+chopo. Cada parte de la viga está modelada en 3D como un sólido deformable extrusionado, como se ve en la figura 5.4.26.

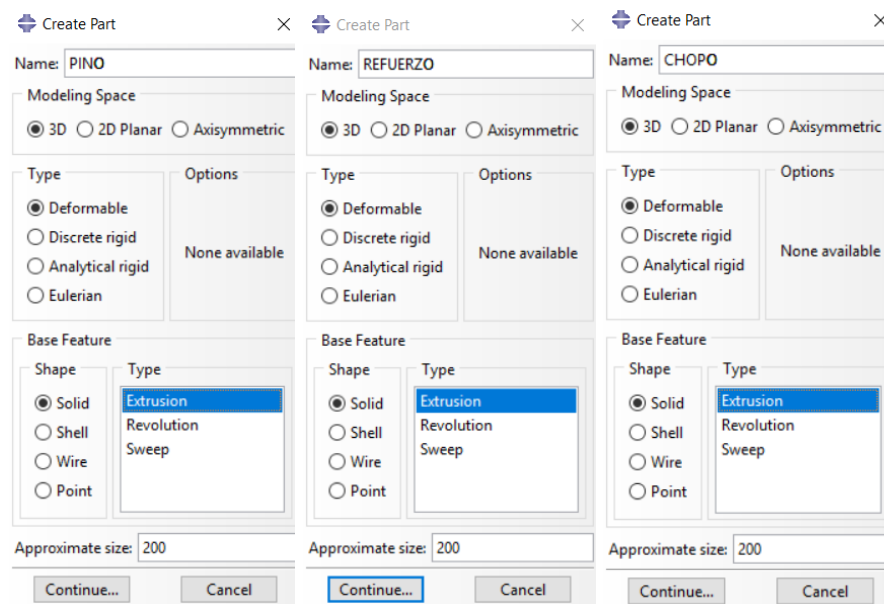


Figura 5.4.26. Tipo de elementos utilizados en la modelización.

En la malla se ha utilizado el elemento C3D8R, explicado en la viga compuesta chopo+FRP+chopo, ya que es el mismo. La figura 5.4.27. muestra la elección del elemento.

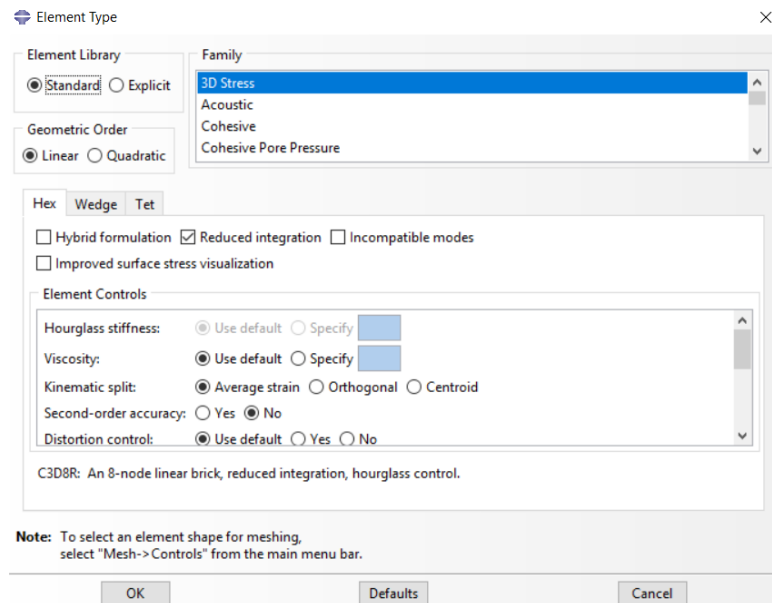


Figura 5.4.27. Tipo de elemento de la malla.

La malla definida tiene 69.960 elementos lineales hexaédricos del tipo C3D8R y 79.378 nodos. La dimensión de los elementos es de 5 mm en cada dirección, excepto los de la capa de refuerzo que tienen la altura de la capa. Con esta densidad se consigue una línea de nodos en cada línea de cargas y de apoyos y un tiempo de cálculo asequible. La figura 5.4.28. muestra el proceso de mallado y la malla final.

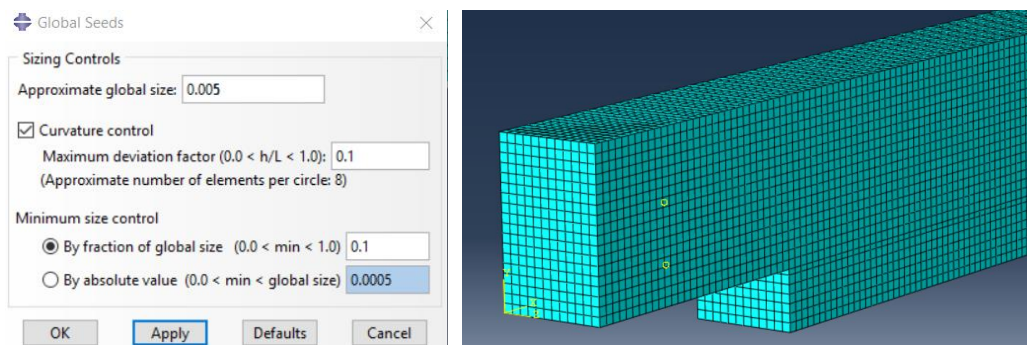


Figura 5.4.28. Geometría de la malla.

5.4.2.5 Cálculo

El proceso de cálculo se realiza en el *Modulo: Job*, siguiendo el mismo proceso que en la viga compuesta chopo+FRP+chopo, explicado en el apartado 5.4.1.5. Cálculo. La figura 5.4.29. detalla el proceso realizado en el programa.

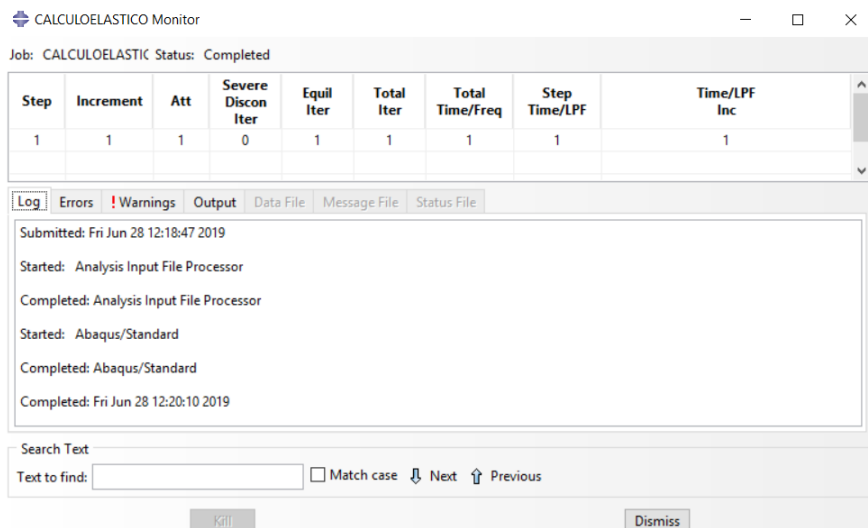
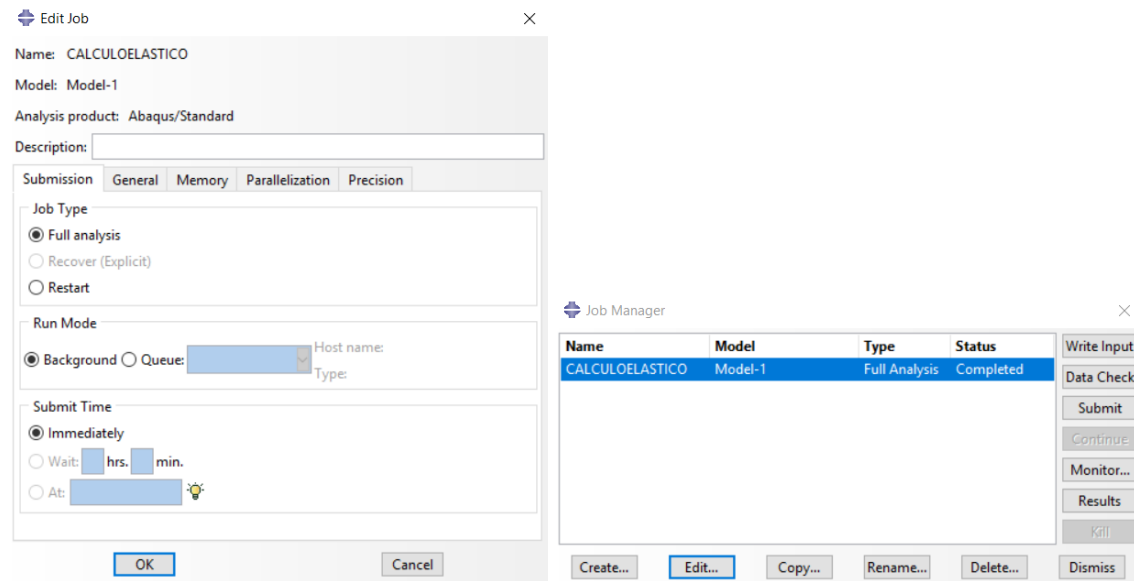


Figura 5.4.29. Proceso de lanzar el cálculo.

5.5 RESULTADOS

Los resultados obtenidos son de dos tipos para cada viga, uno para cada clase de cálculo, los cuales se presentan por separado. El cálculo elástico se realiza como comprobación de las zonas plastificadas, por tanto, debe ser previo.

Las tensiones son mayores en el cálculo elástico debido al comportamiento de los materiales a flexión, elastoplásticos sin endurecimiento. Esto se debe a que una vez alcanzado el límite elástico en el cálculo plástico, las tensiones ya no pueden aumentar, solo pueden hacerlo las deformaciones. Las deformaciones aumentan de manera notable durante el cálculo plástico.

5.5.1 VIGA COMPUESTA (CHOPO + FRP + CHOPO)

5.5.1.1 Cálculo elástico

En este tipo de cálculo se muestran y analizan las tensiones, deformaciones y desplazamientos. Se pueden apreciar para cada tipo de viga, desde la figura 5.5.1. hasta la figura 5.5.27.

Las tensiones de este tipo de cálculo son mayores, como se comentó anteriormente. Se puede apreciar que se concentran principalmente en los apoyos y en la zona central de la parte superior, cerca de los puntos de carga de la viga, y en la zona del refuerzo FRP. Las tensiones no se reparten de manera uniforme en la madera y el tejido, ya que el refuerzo de FRP está sometido a una tensión el doble que el chopo.

Las mayores deformaciones se producen en los apoyos. Las deformaciones están escaladas para poder apreciarlas de una mejor manera. La máxima deformación se produce, si obviamos los apoyos, en el centro de la viga en la parte inferior y superior. Fuera de estas zonas la viga no sufre casi deformaciones. Las compresiones se encuentran en la zona superior y las tensiones en la zona inferior.

El desplazamiento máximo de la viga, la flecha, se produce en el centro del vano. El comportamiento de las tres capas debe ser el mismo, ya que sino las capas se separarían y en esta simulación se ha supuesto que eso no es posible al no tener en cuenta la resina. La viga trabaja como un único sólido que se desplaza de forma conjunta.

VIGA COMPUESTA POR TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE CARBONO

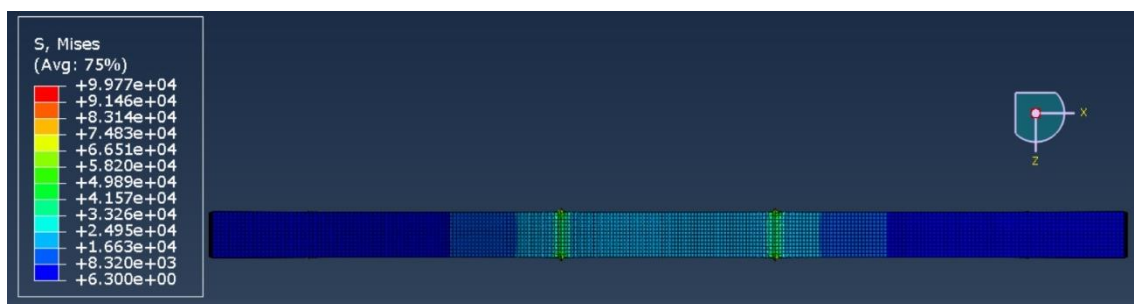


Figura 5.5.1. Tensiones en la cara superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

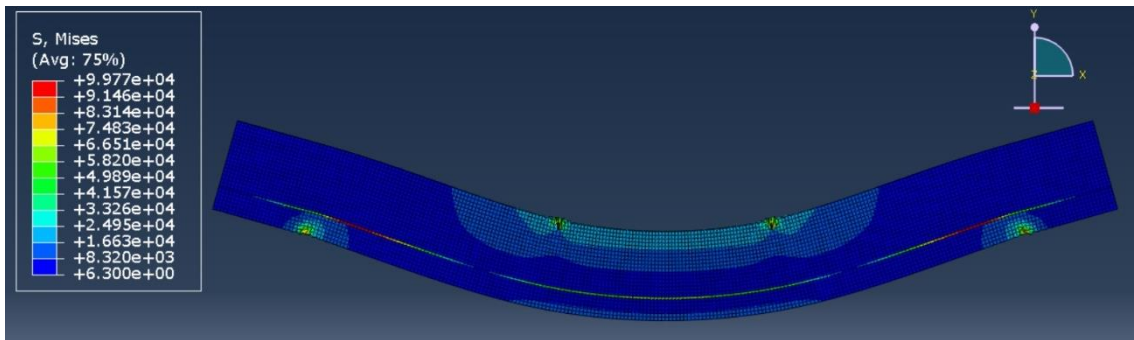


Figura 5.5.2. Tensiones en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono.

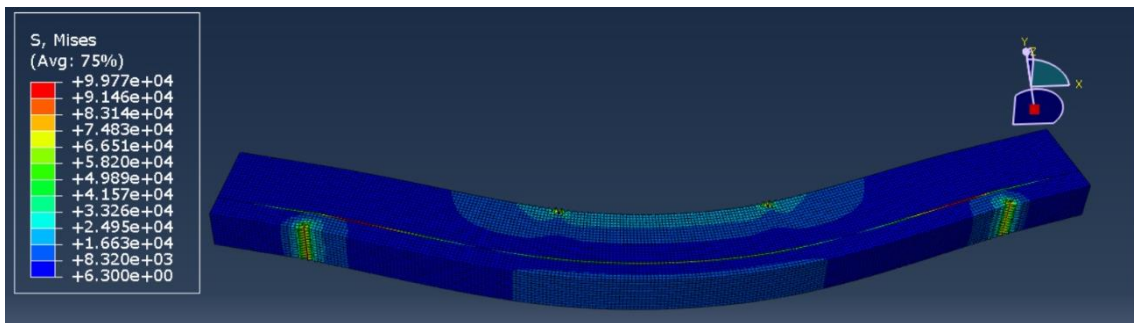


Figura 5.5.3. Tensiones en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.

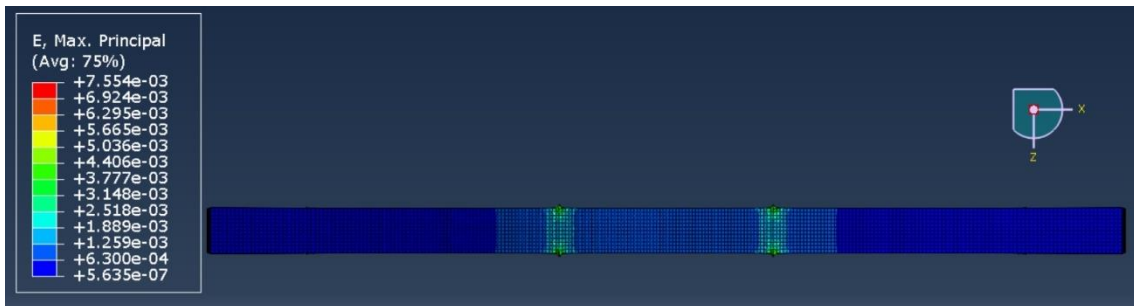


Figura 5.5.4. Deformaciones en la cara superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

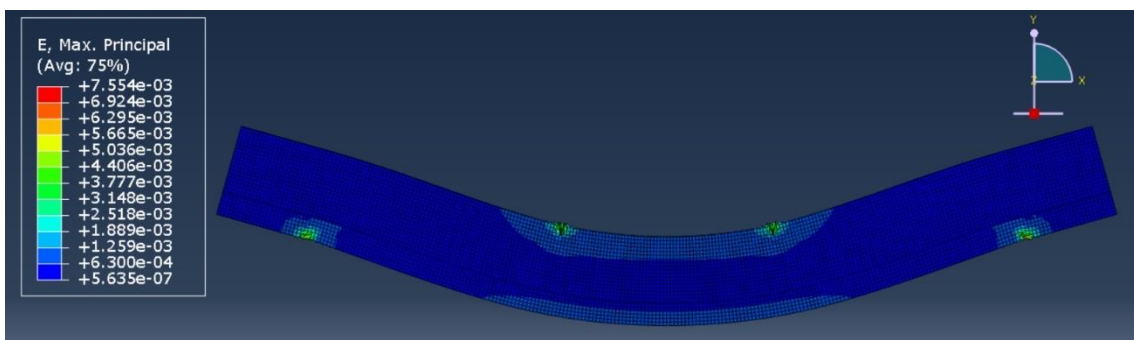


Figura 5.5.5. Deformaciones en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono.

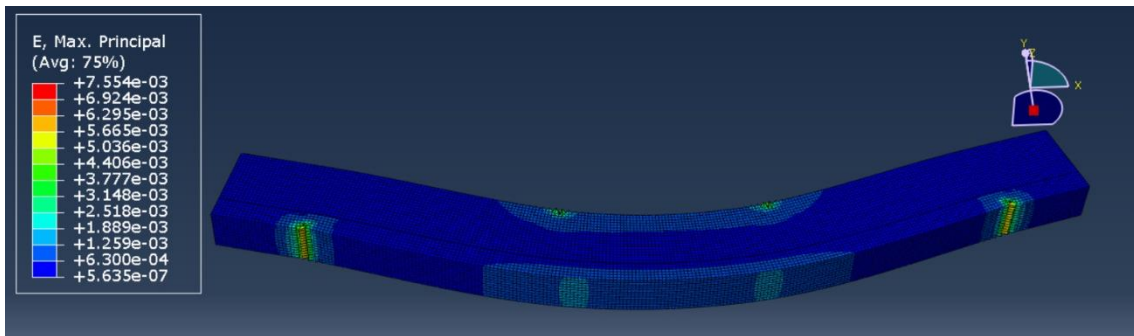


Figura 5.5.6. Deformaciones en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.



Figura 5.5.7. Desplazamientos en la cara superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

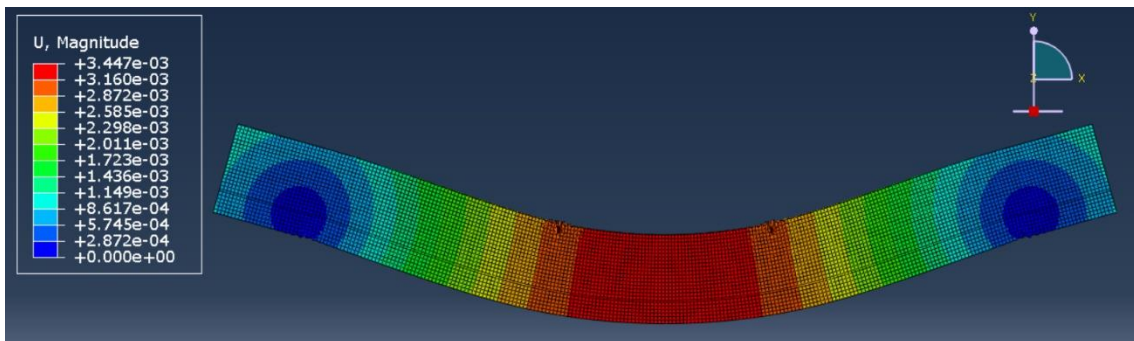


Figura 5.5.8. Desplazamientos en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono.

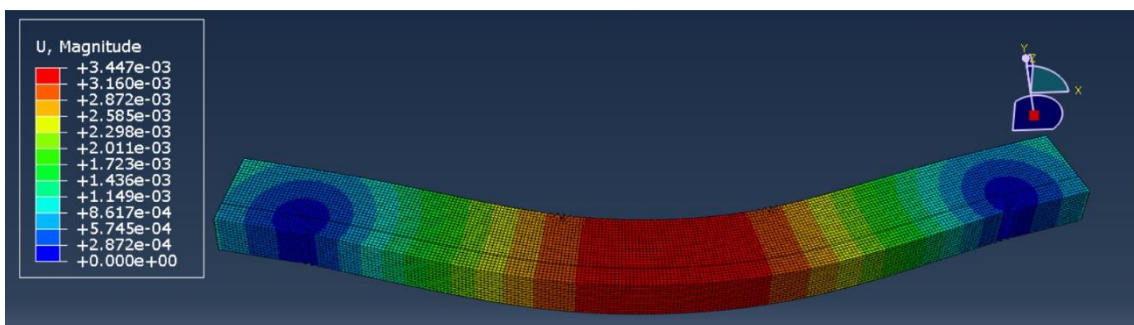


Figura 5.5.9. Desplazamientos en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.

VIGA COMPUESTA POR TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE BASALTO

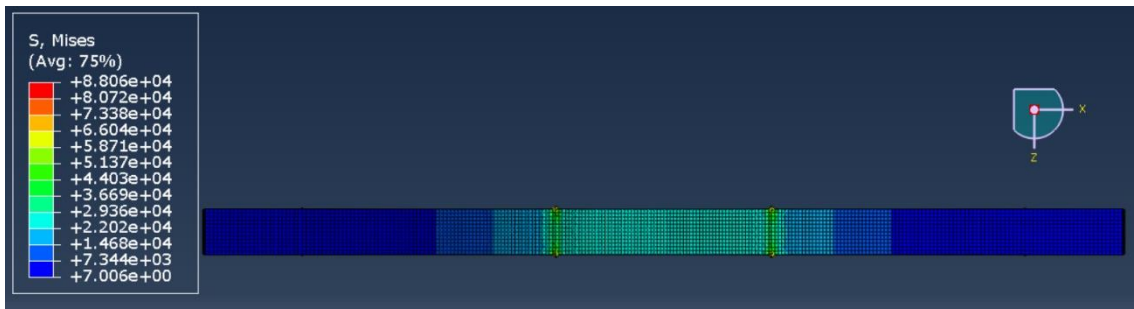


Figura 5.5.10. Tensiones en la cara superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

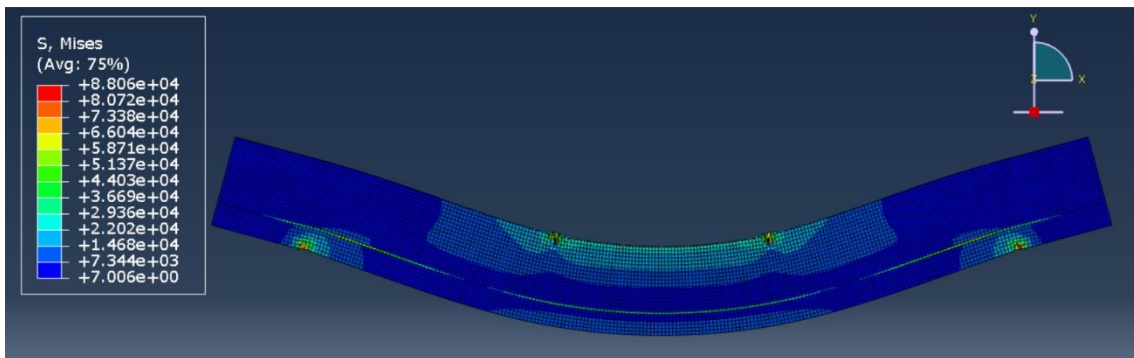


Figura 5.5.11. Tensiones en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto.

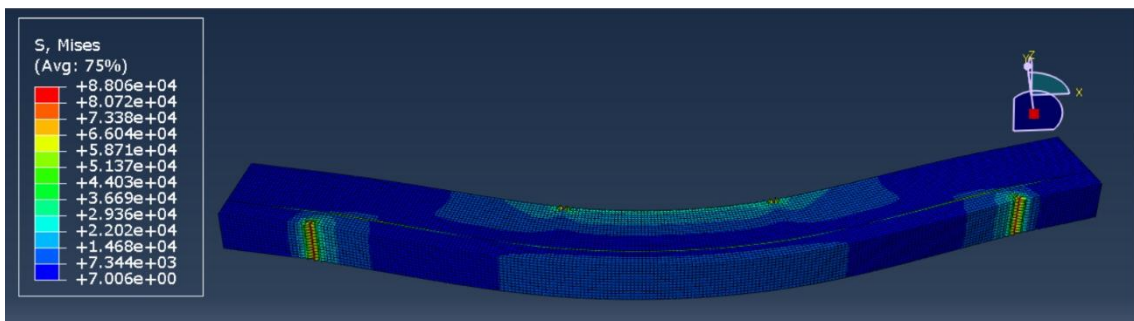


Figura 5.5.12. Tensiones en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

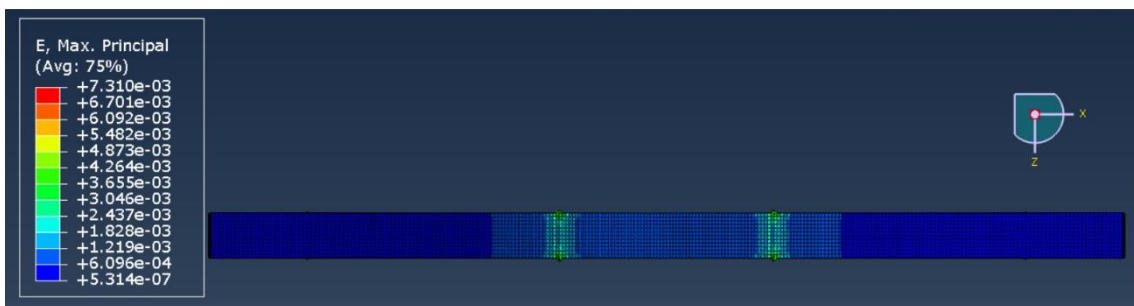


Figura 5.5.13. Deformaciones en la cara superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

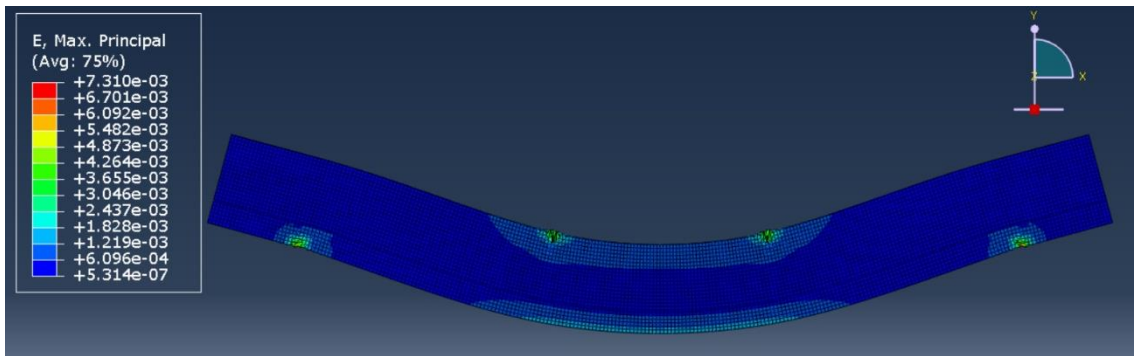


Figura 5.5.14. Deformaciones en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto.

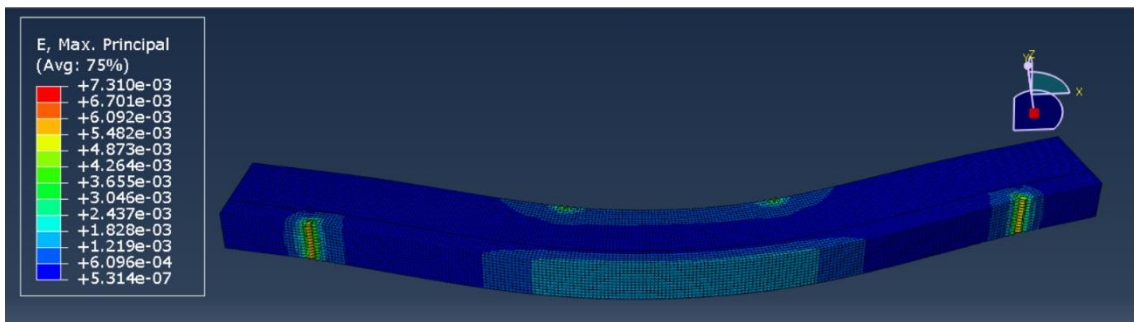


Figura 5.5.15. Deformaciones en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

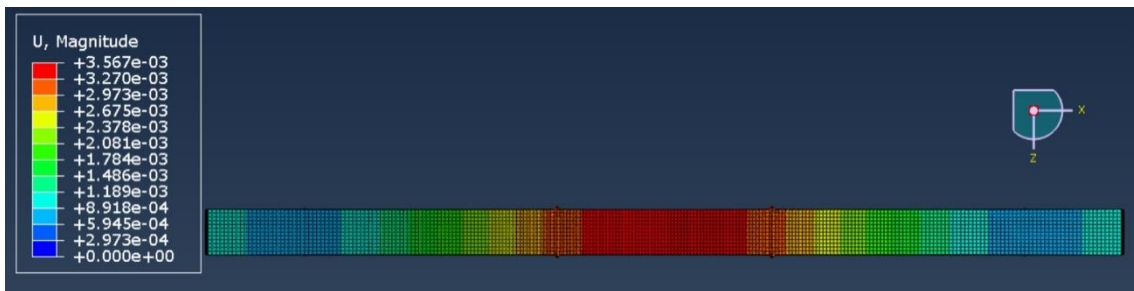


Figura 5.5.16. Desplazamientos en la cara superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

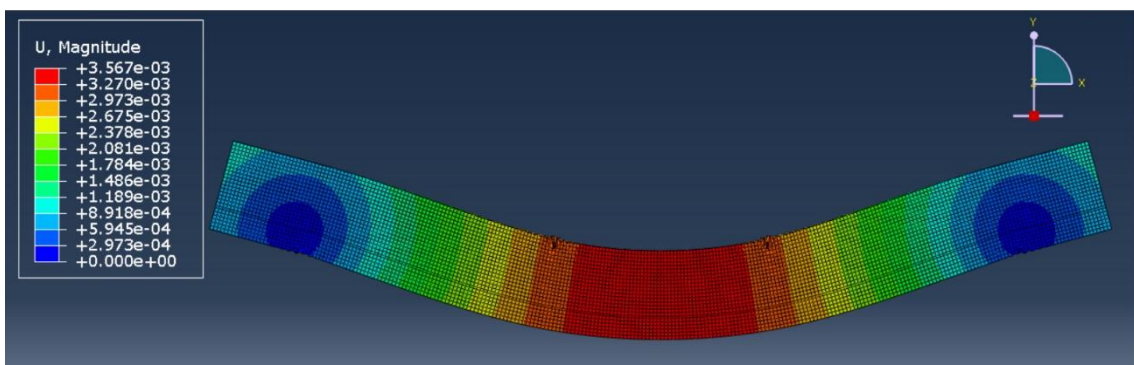


Figura 5.5.17. Desplazamientos en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto.

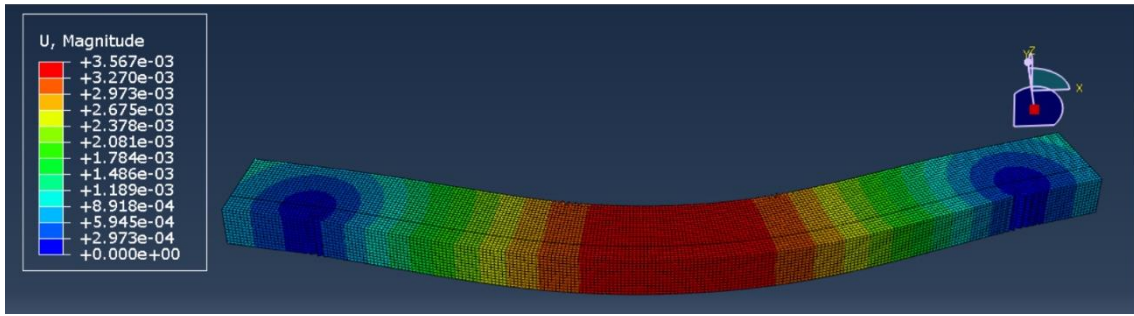


Figura 5.5.18. Desplazamientos en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

VIGA COMPUESTA POR LAMINADO DE CARBONO

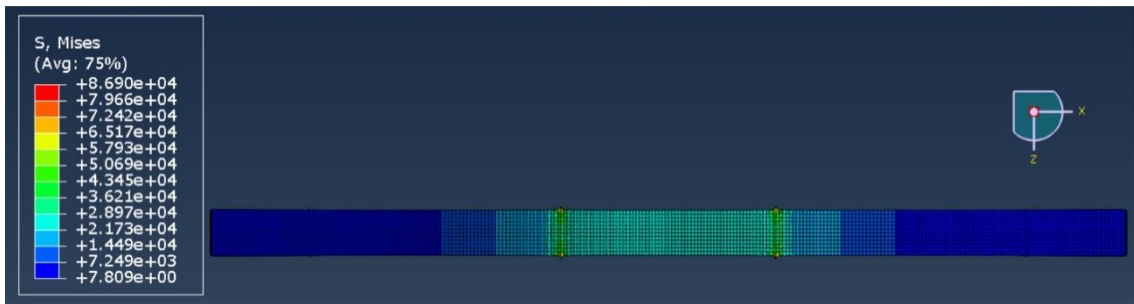


Figura 5.5.19. Tensiones en la cara superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

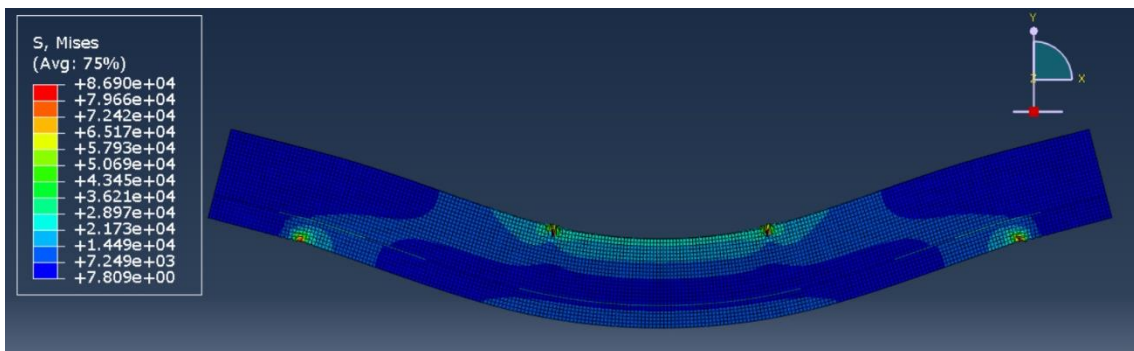


Figura 5.5.20. Tensiones en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono.

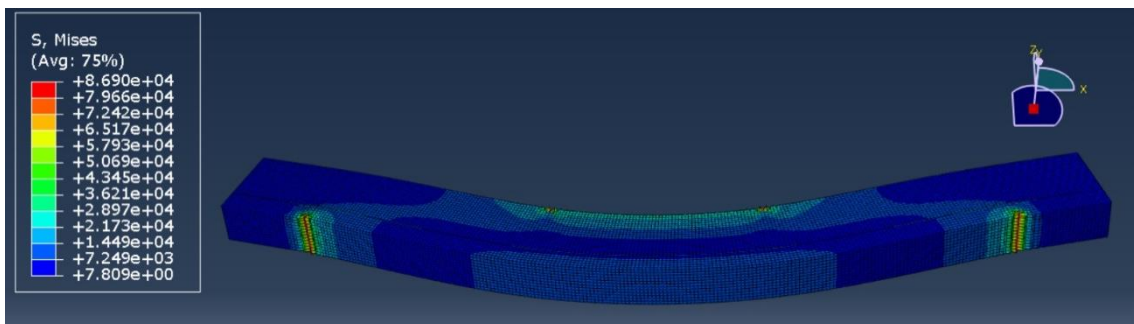


Figura 5.5.21. Tensiones en la cara inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

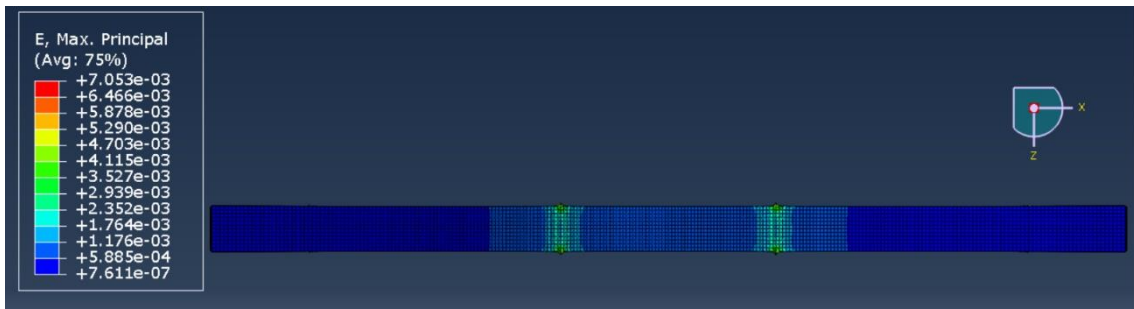


Figura 5.5.22. Deformaciones en la cara superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

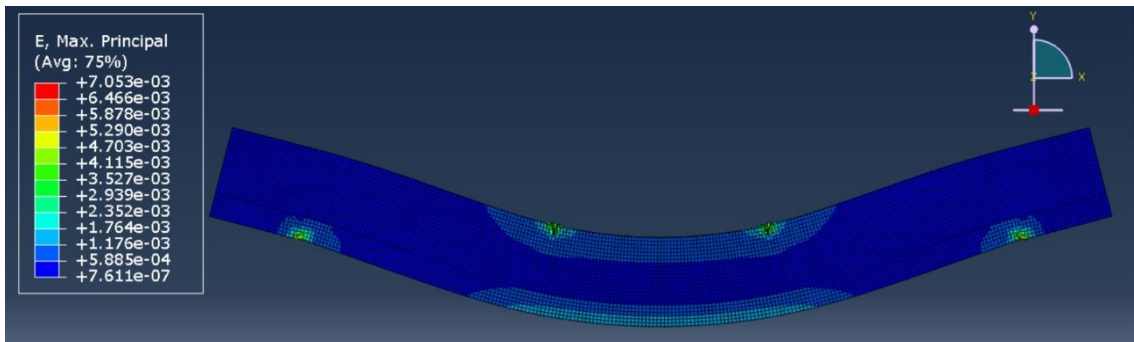


Figura 5.5.23. Deformaciones en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono.

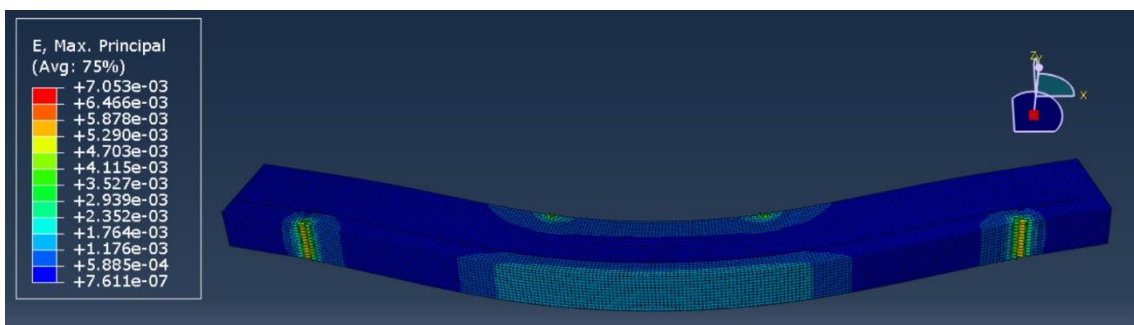


Figura 5.5.24. Deformaciones en la cara inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

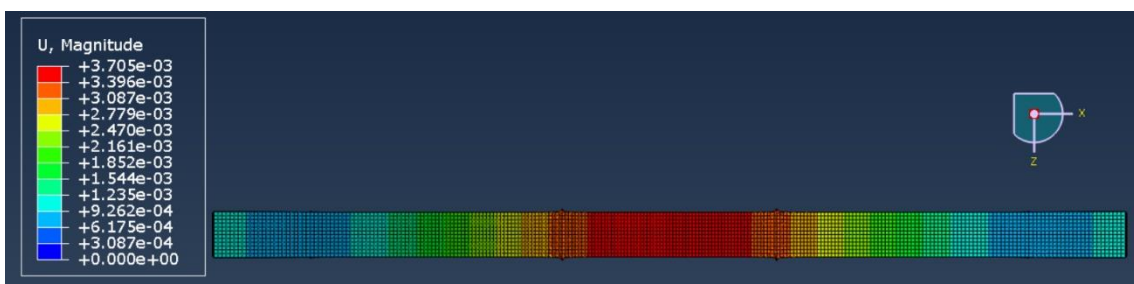


Figura 5.5.25. Desplazamientos en la cara superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

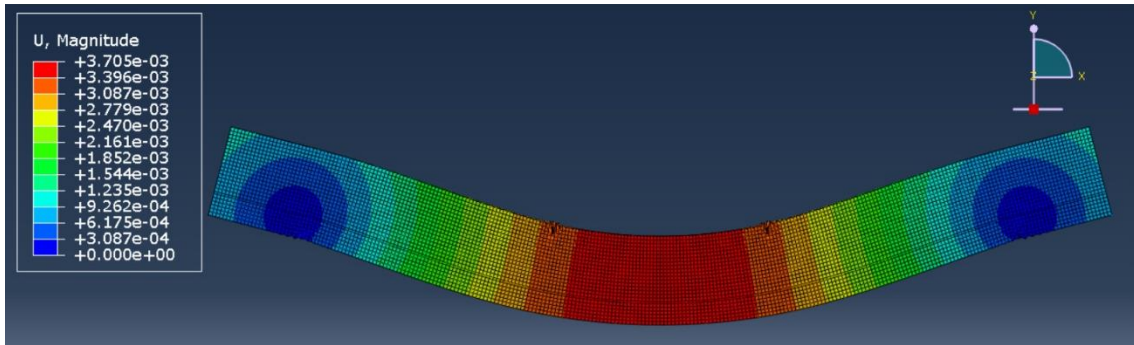


Figura 5.5.26. Desplazamientos en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono.

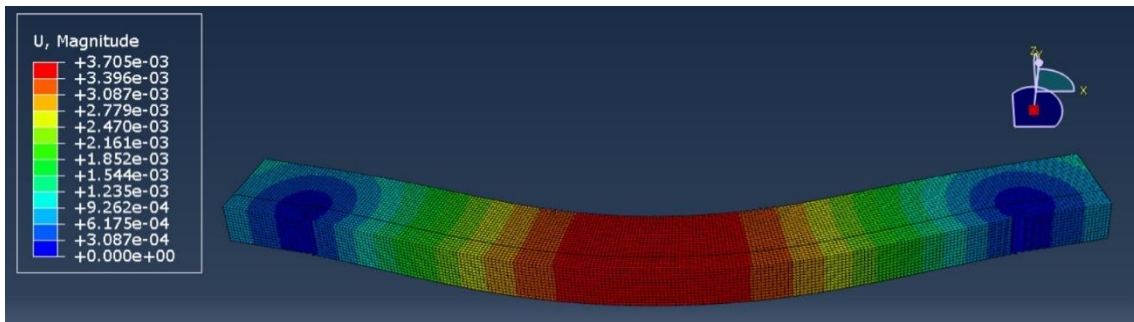


Figura 5.5.27. Desplazamientos en la cara inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

La tabla 5.5.1 muestra una comparativa entre las distintas magnitudes mecánicas en cada tipo de vigas. Se observa que las tres vigas tienen un comportamiento similar, aunque la viga de tejido de carbono tiene unas deformaciones y un desplazamiento ligeramente inferiores.

ESFUERZO		VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE CARBONO	VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE BASALTO	VIGA COMPUESTA POR LAMINADO DE CARBONO
TENSIÓN	Cara superior	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2,6 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2,6 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
	Refuerzo	$6 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2,6 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	10^4 kN/m^2
	Cara inferior	$1,2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	10^4 kN/m^2	10^4 kN/m^2
DEFORMACIÓN	Cara superior	10^{-3}	10^{-3}	$8 \cdot 10^{-4}$
	Cara inferior	10^{-3}	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
DESPLAZAMIENTO		$3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Tabla 5.5.1. Comparativa de los resultados de la simulación numérica de las vigas compuestas.

5.5.1.2 *Cálculo plástico*

Las tensiones, desplazamientos, las zonas plastificadas y el comportamiento de los materiales se analizan en este tipo de cálculo. Se pueden apreciar para cada tipo de viga de las figuras 5.5.28. a la 5.5.72.

Las tensiones en el caso del cálculo elastoplástico también son distintas en cada material. En estos casos la diferencia es más acusada, ya que en la zona central, la zona que plastifica, las tensiones han alcanzado el límite elástico. En la zona central de cada la capa superior de chopo, se aprecia un área sometida a menor tensión debida a la redistribución plástica de tensiones que veremos al estudiar la plastificación.

El desplazamiento en este cálculo sigue un patrón similar en todas las vigas al seguido en el cálculo elástico. El desplazamiento máximo se produce en el centro del vano, pero en este caso el valor es muy superior debido al comportamiento plástico de los materiales.

Las gráficas, figuras 5.5.35., 5.5.50. y 5.5.65., ilustran el desplazamiento de la viga (la flecha) a lo largo del tiempo. En este caso con la magnitud del tiempo se refiere al aumento de la carga, es decir, en el tiempo 0,0 la viga no está sometida a ninguna carga y en el 0,5 la viga está a la mitad de la carga introducida para el cálculo.

El desplazamiento y la carga no están relacionados de forma lineal. Las vigas tienen dos comportamientos claramente diferenciados, este fenómeno se aprecia especialmente en la viga reforzada con laminado de carbono (figura 5.5.65.). en la primera parte, el desplazamiento aumenta con la carga de forma lenta debido a la rigidez de la viga, es decir, para aumentar la flecha se necesita un valor alto de carga. En el segundo caso ocurre lo contrario, aumentando levemente la carga se consiguen grandes flechas. La razón por la que ocurre esto es el cambio de comportamiento con la plastificación de los materiales.

La plastificación se produce cuando la tensión a la que esta sometido un elemento supera el límite elástico. En las figuras de cada viga, se puede ver cuatro fases del proceso de plastificación, sin carga, con aproximadamente la mitad, tres cuartos y la

carga total. Los elementos que primero plastifican son aquellos que están sometidos a una tensión superior. La plastificación comienza en la zona central de la viga en la cara superior e inferior y en los apoyos, desde donde se extiende sin llegar a plastificar el refuerzo en ningún caso. La zona plastificada aumenta con la carga. Pueden producirse cambios en las zonas plastificadas, esto se debe a la redistribución plástica, las zonas cargadas en exceso transmiten parte de su tensión a las zonas adyacentes, provocando una descarga e incluso pudiendo volver al comportamiento elástico.

La evolución de la tensión de tres elementos de la zona central, uno de cada material, se representan en las figuras 5.5.40., 5.5.41. y 5.5.42. para la viga reforzada con tejido de carbono, las 5.5.55., 5.5.56. y 5.5.57. para la reforzada con basalto y las 5.5.70., 5.5.71. y 5.5.72. para la reforzada con laminado de carbono.

VIGA COMPUESTA POR TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE CARBONO

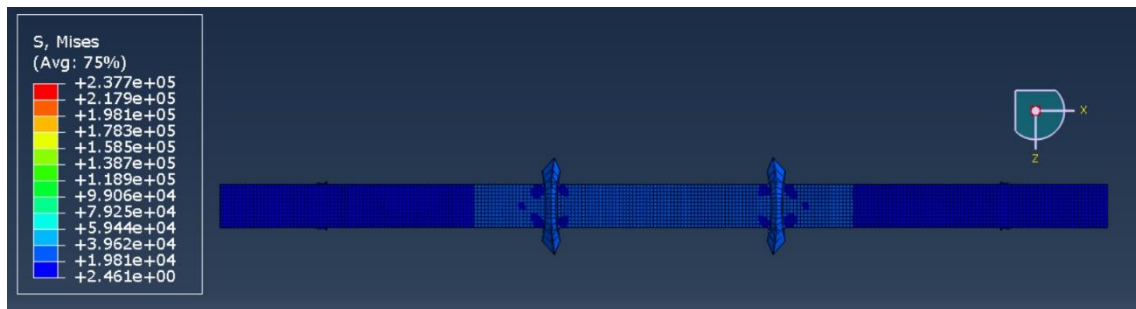


Figura 5.5.28. Tensión en la cara superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

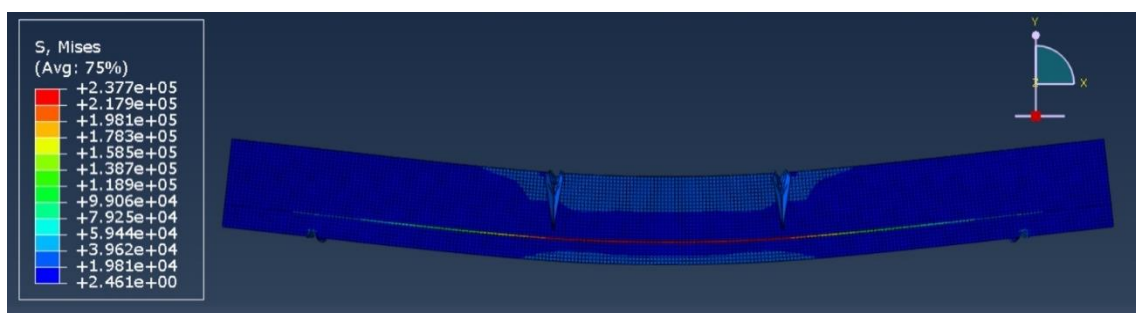


Figura 5.5.29. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono.

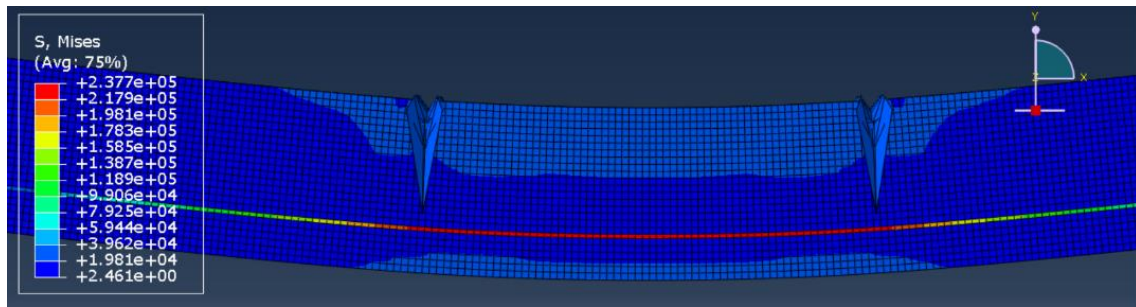


Figura 5.5.30. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono, zona ampliada.

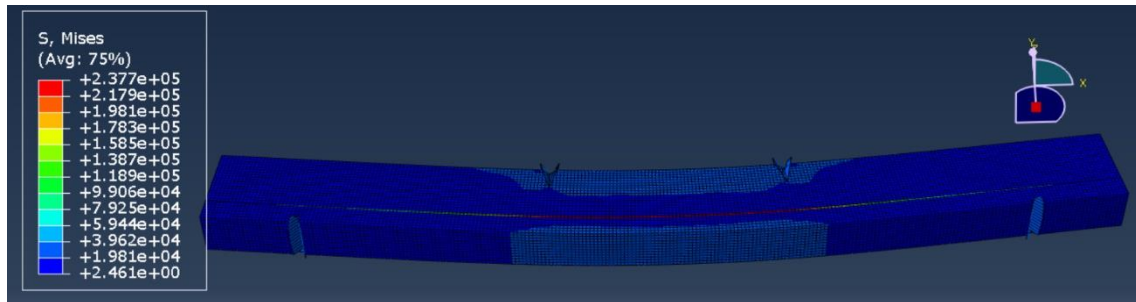


Figura 5.5.31. Tensión en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.

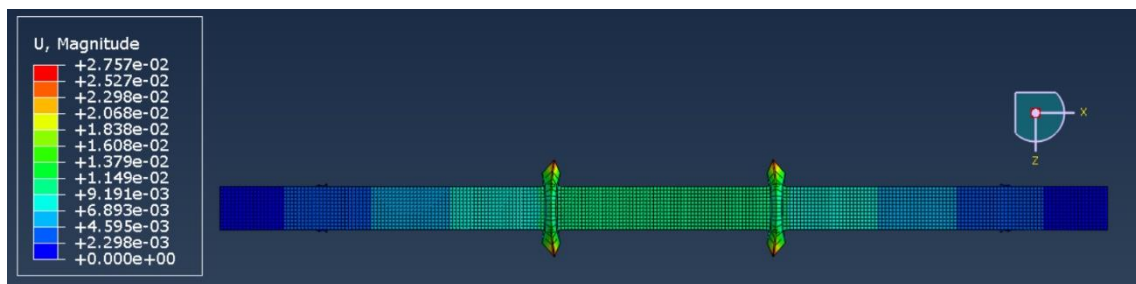


Figura 5.5.32. Desplazamiento en la cara superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

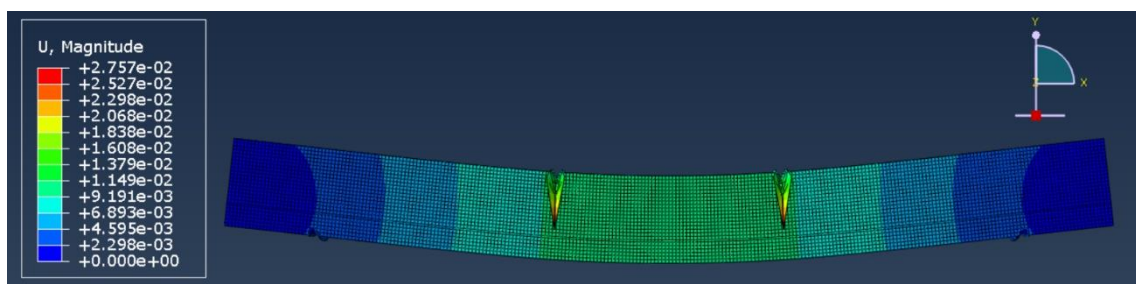


Figura 5.5.33. Desplazamiento en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de carbono.

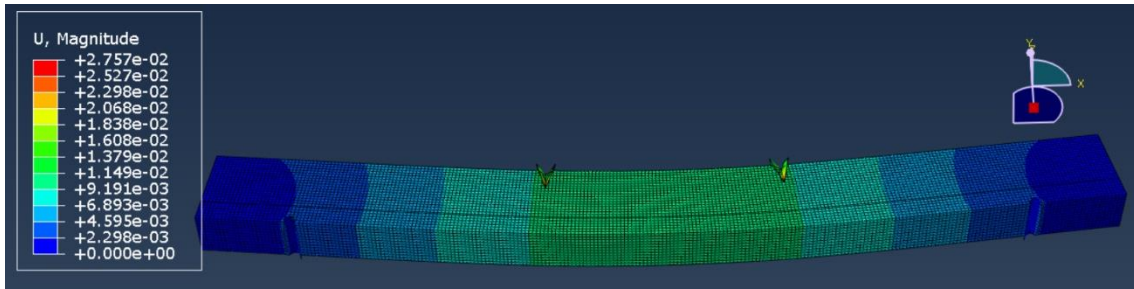


Figura 5.5.34. Desplazamiento en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.

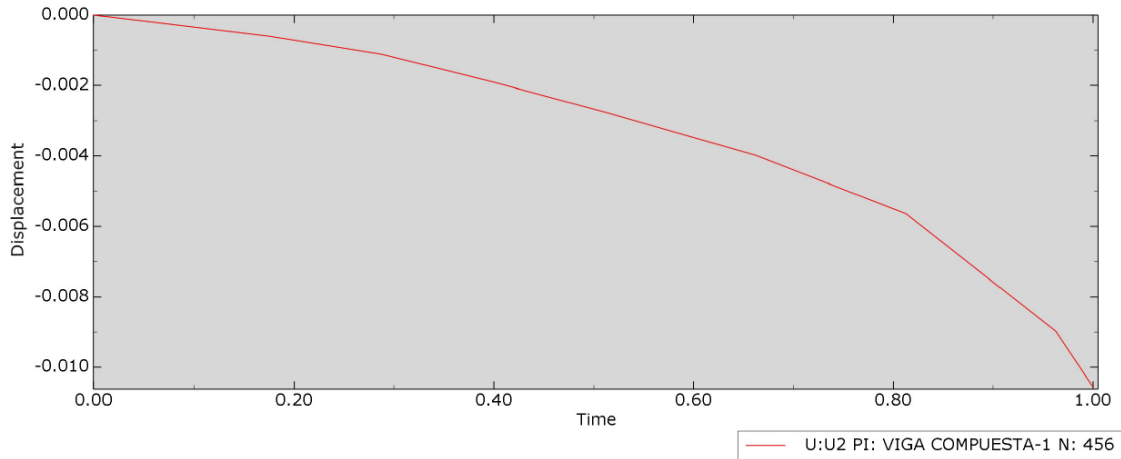


Figura 5.5.35. Desplazamiento-carga de la viga compuesta con tejido de carbono.

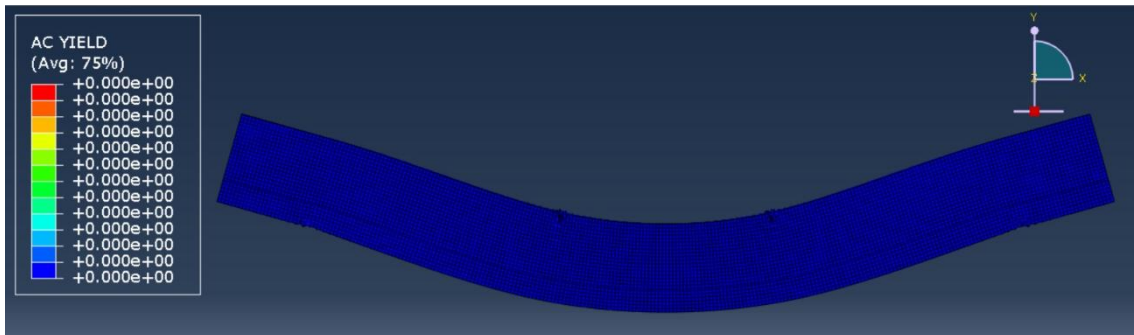


Figura 5.5.36. Plastificación de la viga compuesta con tejido de carbono, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

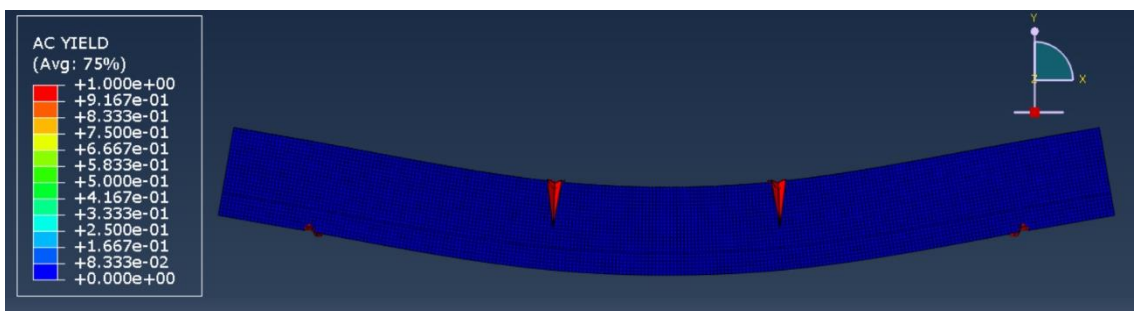


Figura 5.5.37. Plastificación de la viga compuesta con tejido de carbono, sexto paso: incremento 0,5125.

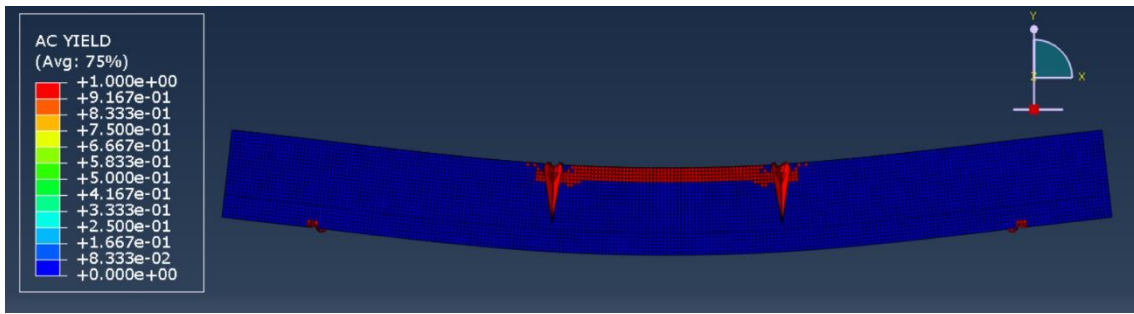


Figura 5.5.38. Plastificación de la viga compuesta con tejido de carbono, octavo paso: incremento 0,8125.

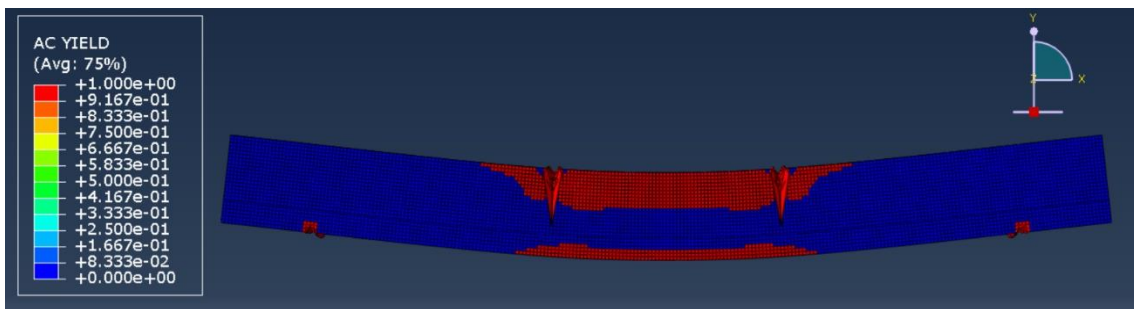


Figura 5.5.39. Plastificación de la viga compuesta con tejido de carbono, decimo paso: incremento 1.

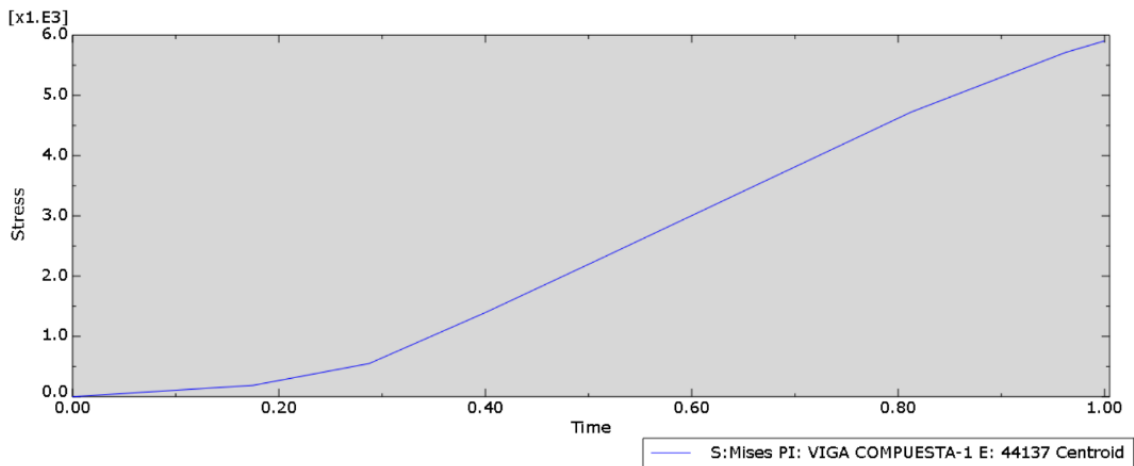


Figura 5.5.40. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la capa superior de la viga compuesta con tejido de carbono.

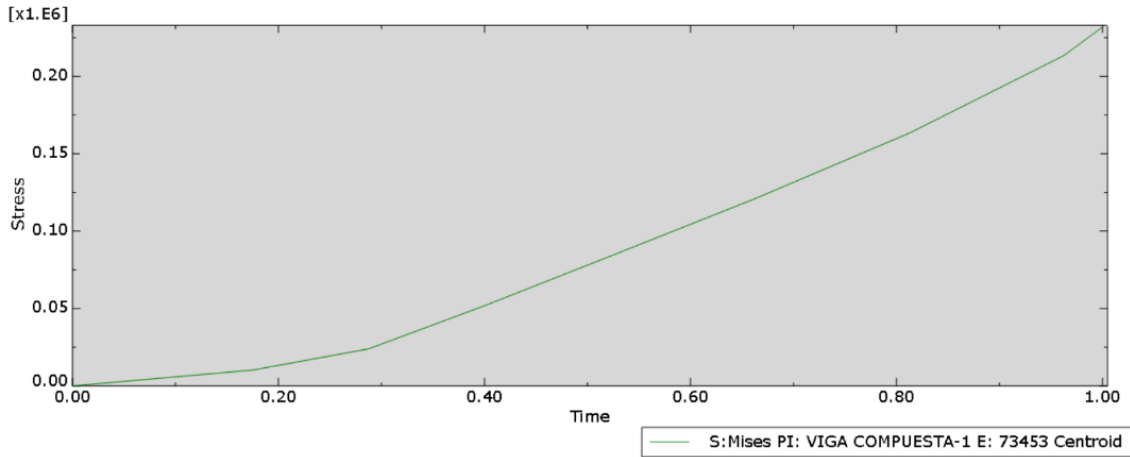


Figura 5.5.41. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de tejido de carbono.

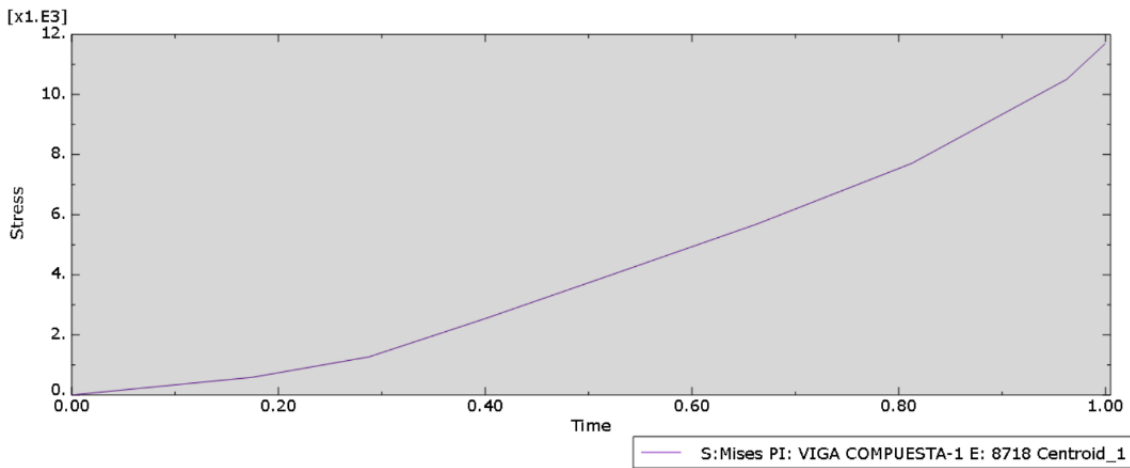


Figura 5.5.42. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la capa inferior de la viga compuesta con tejido de carbono.

VIGA COMPUESTA POR TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE BASALTO

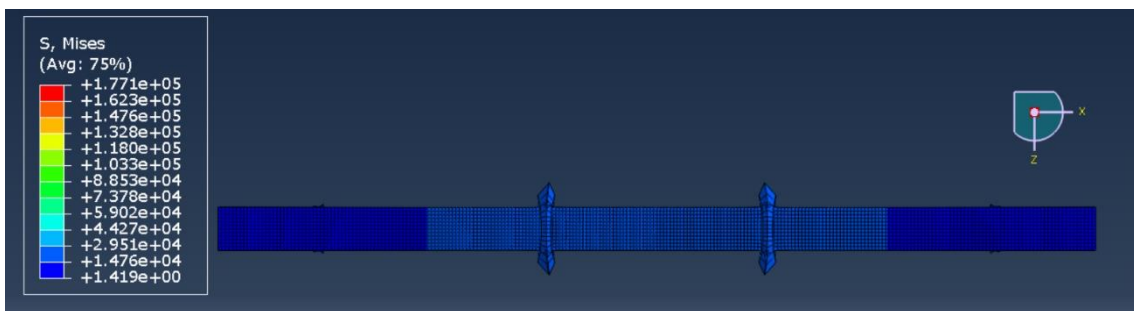


Figura 5.5.43. Tensión en la cara superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

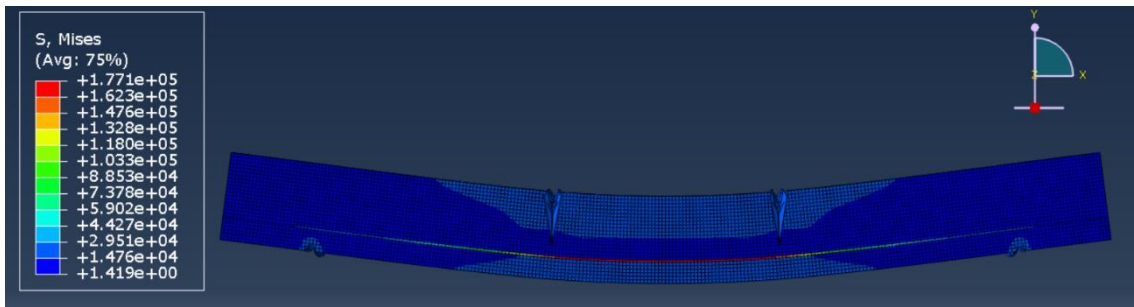


Figura 5.5.44. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto.

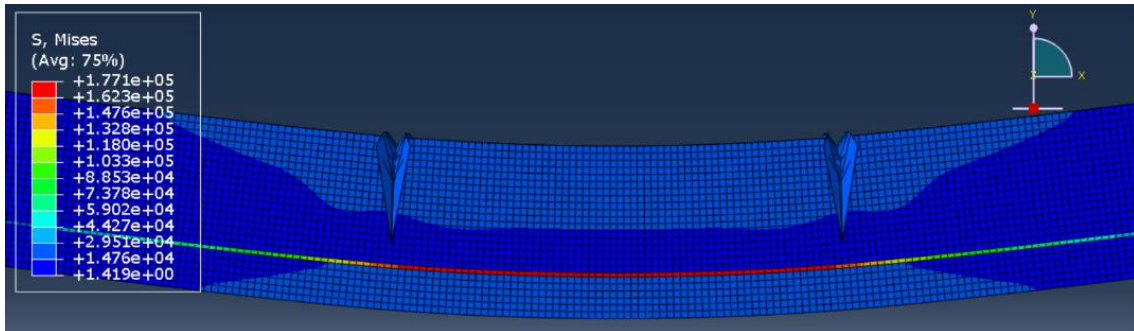


Figura 5.5.45. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto, zona ampliada.

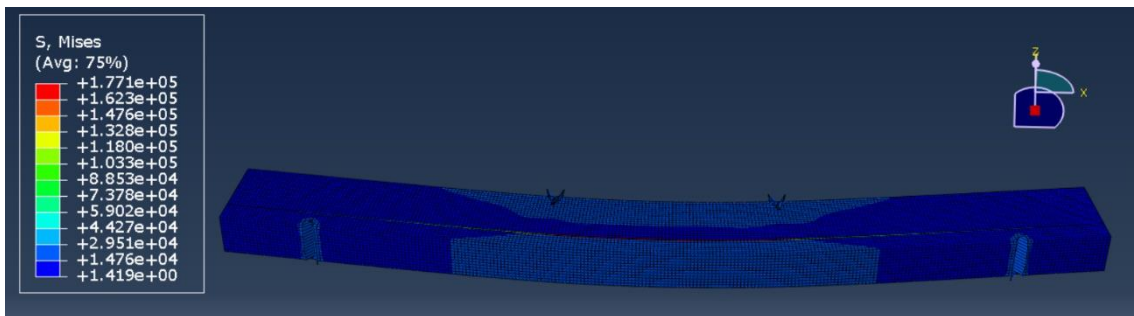


Figura 5.5.46. Tensión en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

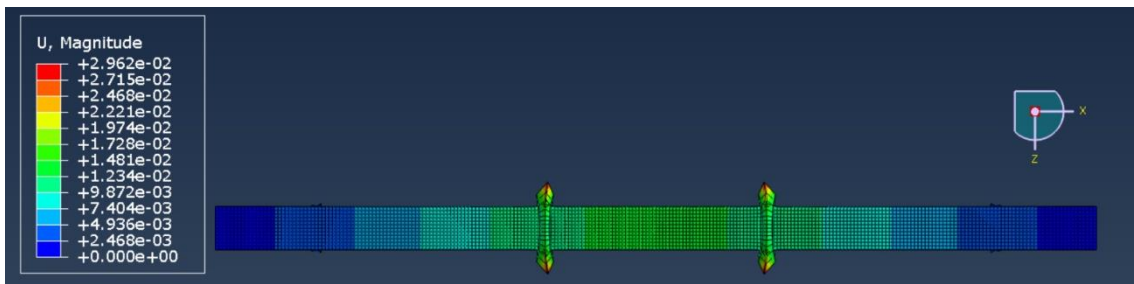


Figura 5.5.47. Desplazamiento en la cara superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

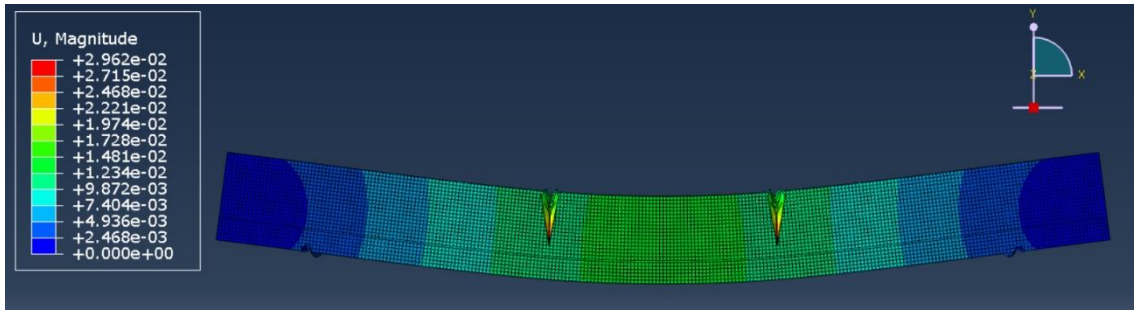


Figura 5.5.48. Desplazamiento en la cara frontal de la viga compuesta con tejido de basalto.

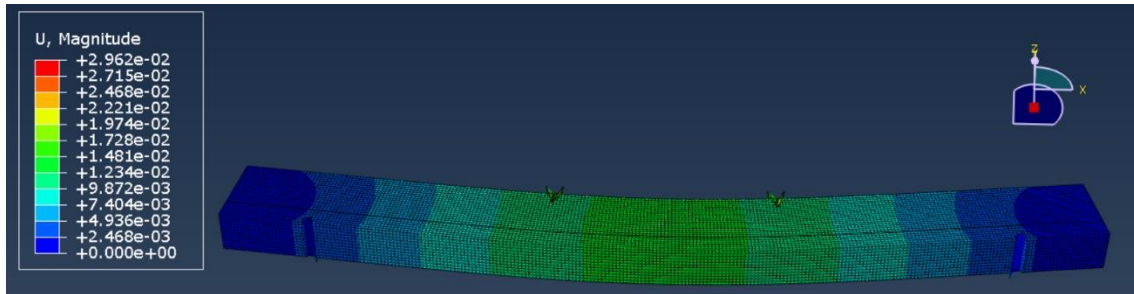


Figura 5.5.49. Desplazamiento en la cara inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

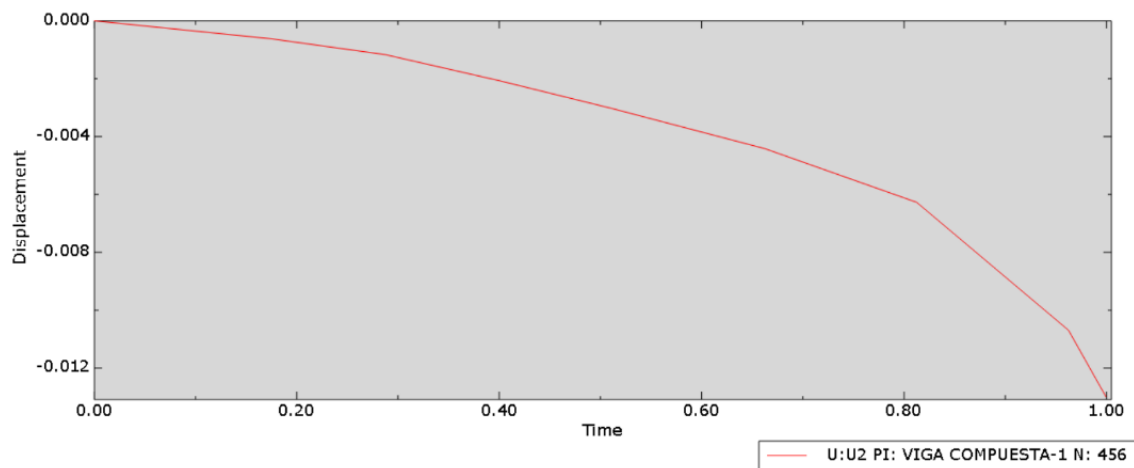


Figura 5.5.50. Desplazamiento-carga de la viga compuesta con tejido de basalto.

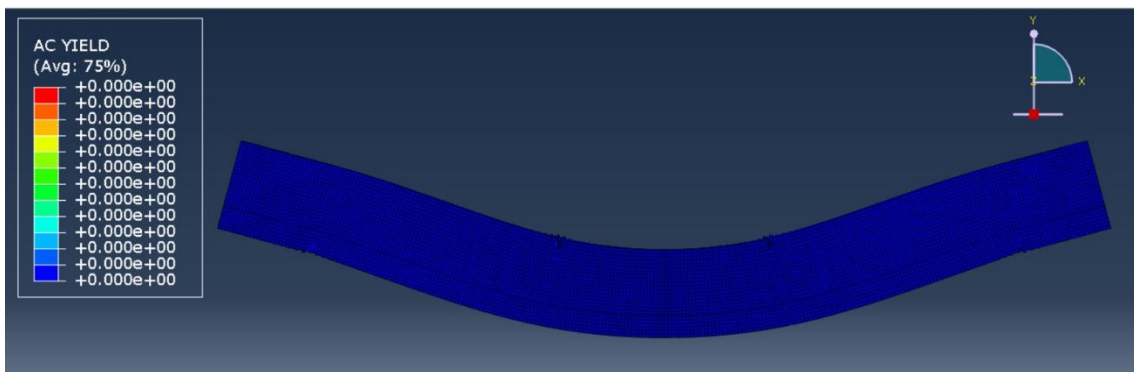


Figura 5.5.51. Plastificación de la viga compuesta con tejido de basalto, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

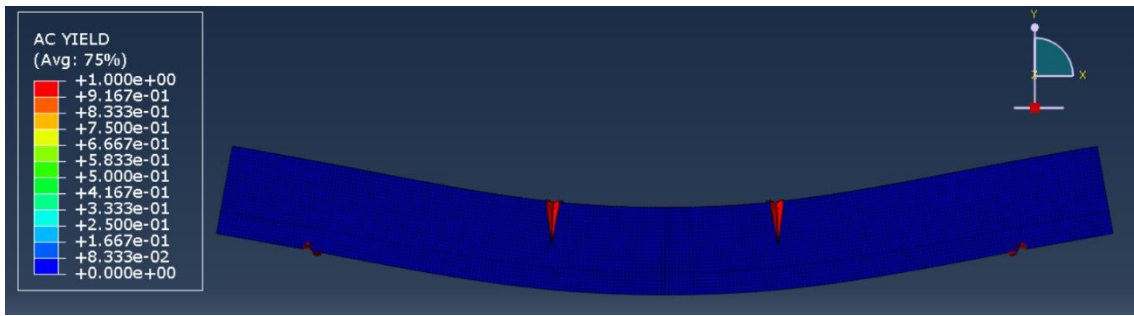


Figura 5.5.52. Plastificación de la viga compuesta con tejido de basalto, sexto paso: incremento 0,5125.

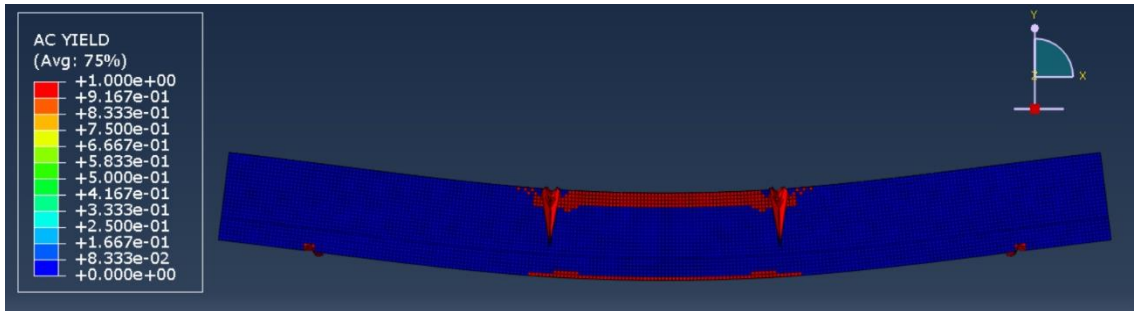


Figura 5.5.53. Plastificación de la viga compuesta con tejido de basalto, octavo paso: incremento 0,8125.

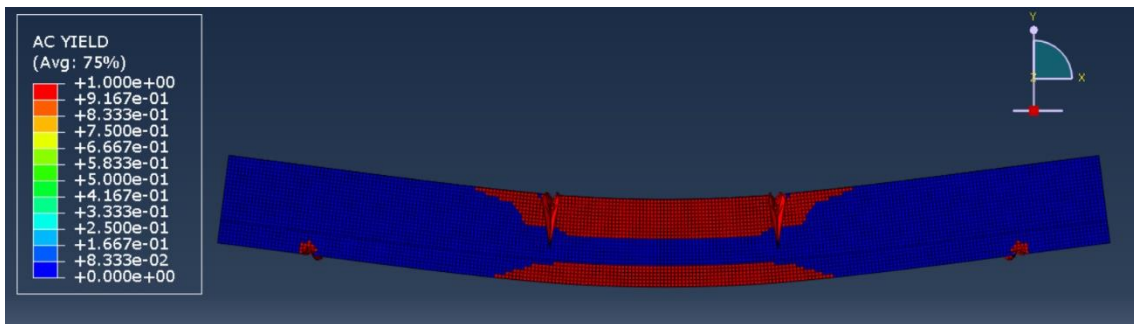


Figura 5.5.54. Plastificación de la viga compuesta con tejido de basalto, decimo paso: incremento 1.

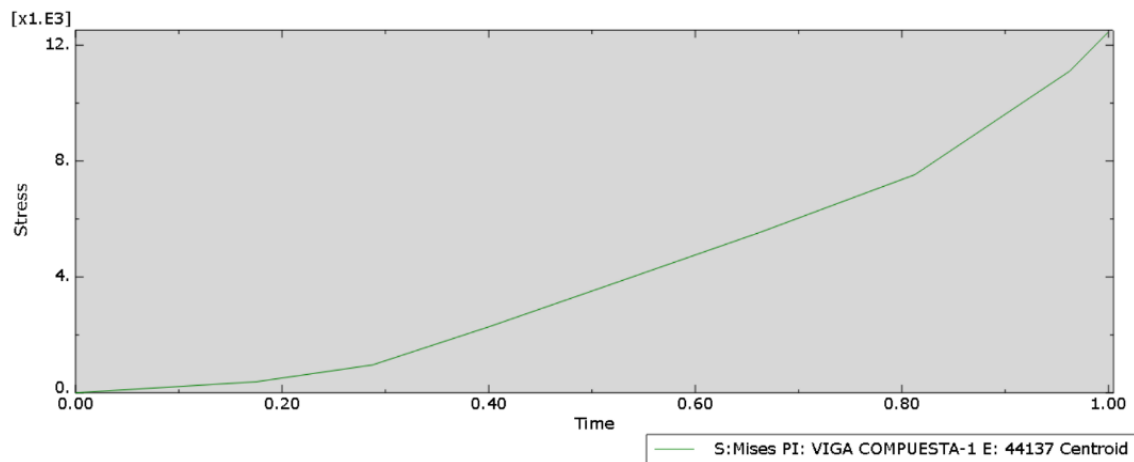


Figura 5.5.55. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chocho de la capa superior de la viga compuesta con tejido de basalto.

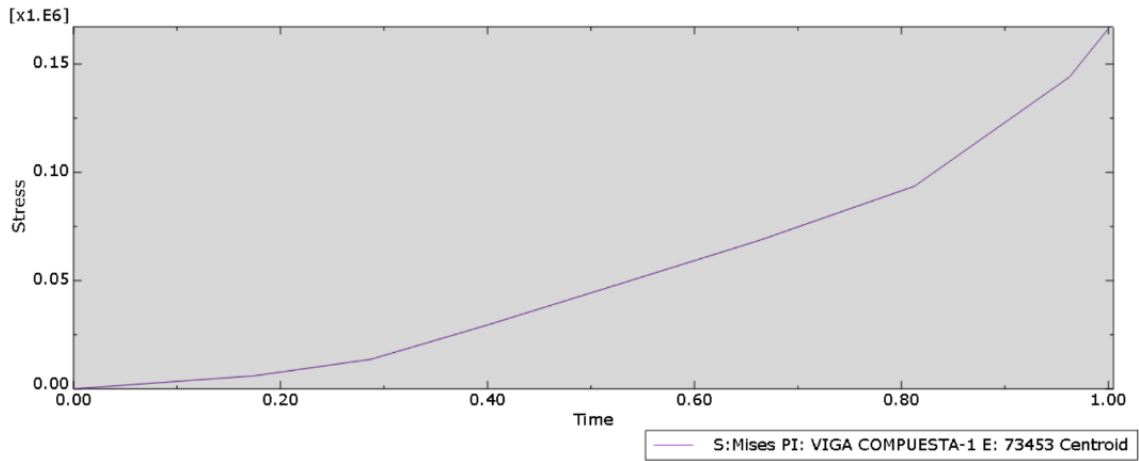


Figura 5.56. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de tejido de basalto.

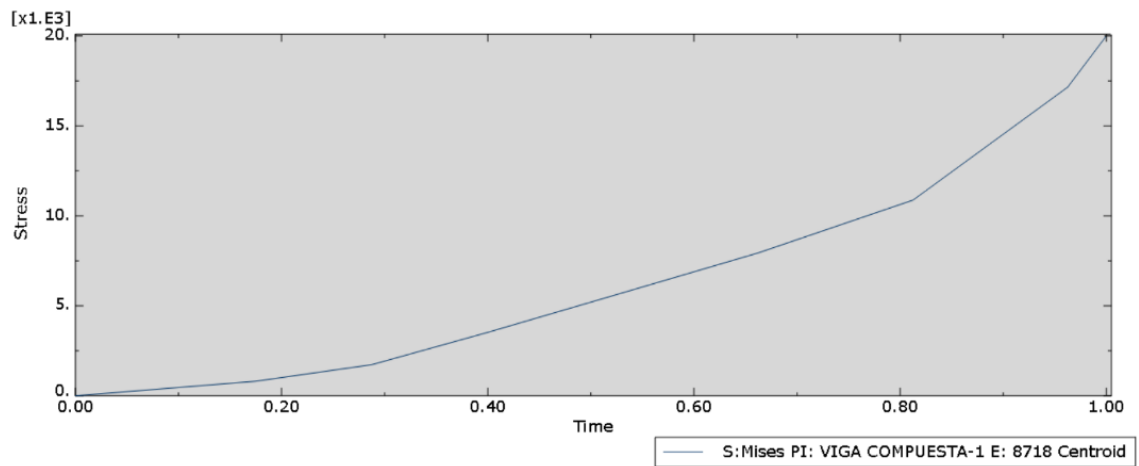


Figura 5.57. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la capa inferior de la viga compuesta con tejido de basalto.

VIGA COMPUESTA POR LAMINADO DE CARBONO

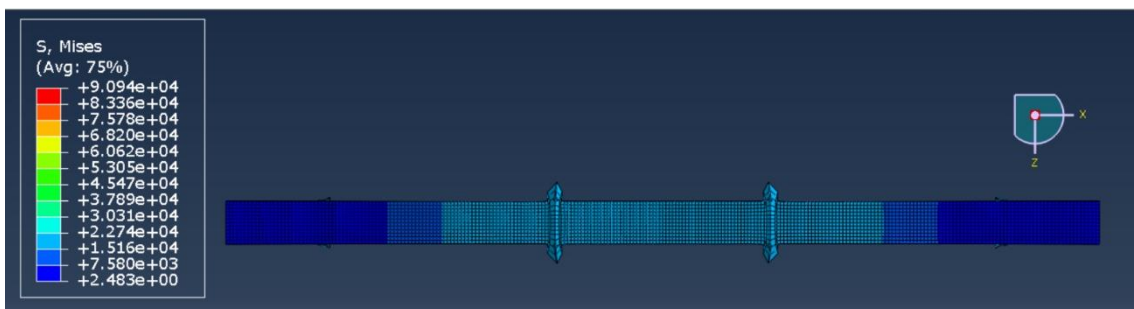


Figura 5.58. Tensión en la cara superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

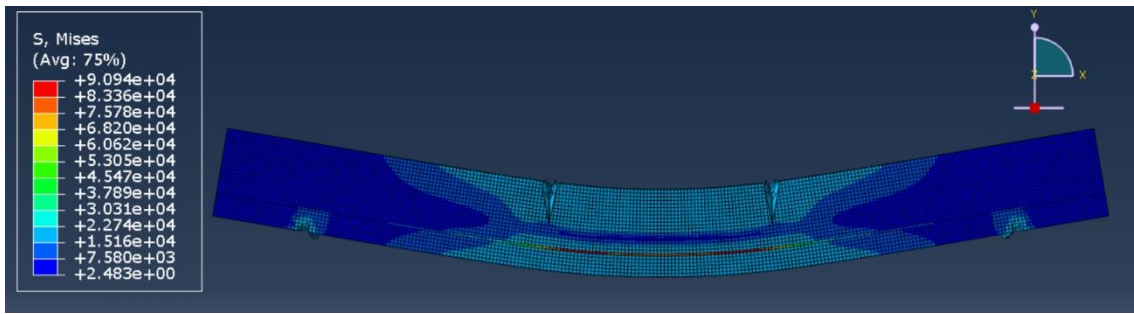


Figura 5.5.59. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono.

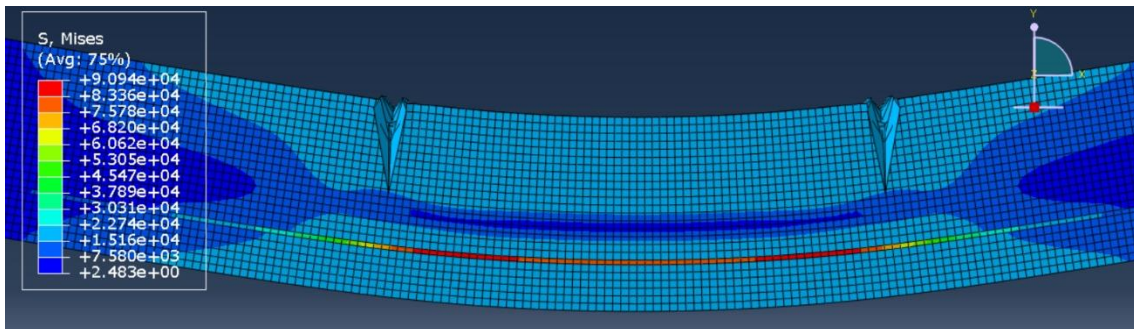


Figura 5.5.60. Tensión en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono, zona ampliada.

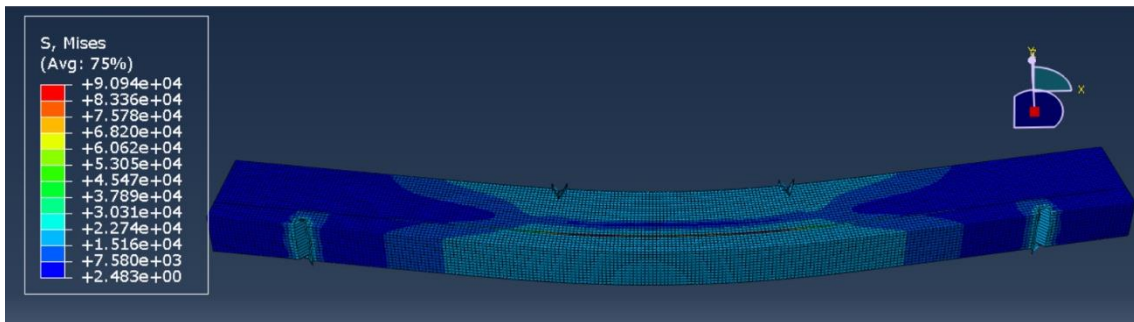


Figura 5.5.61. Tensión en la cara inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

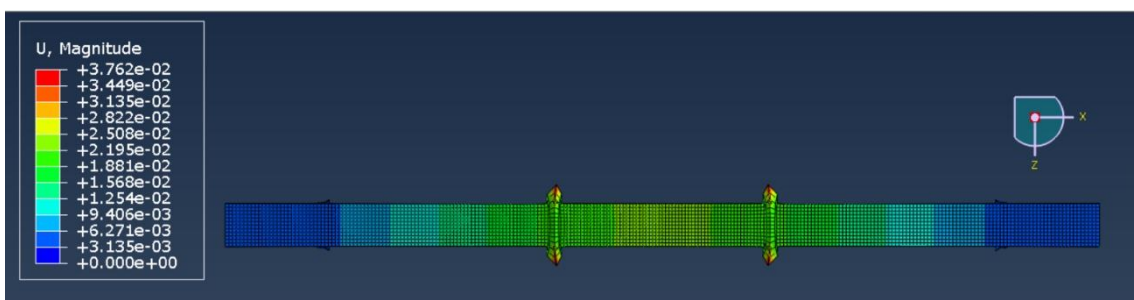


Figura 5.5.62. Desplazamiento en la cara superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

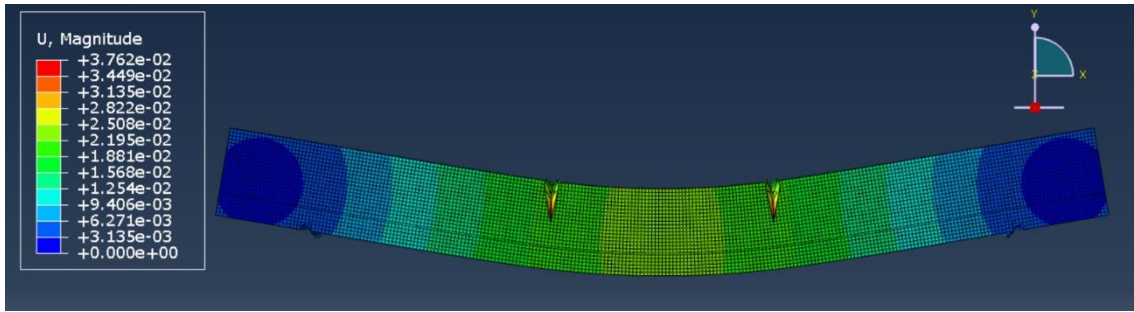


Figura 5.5.63. Desplazamiento en la cara frontal de la viga compuesta con laminado de carbono.

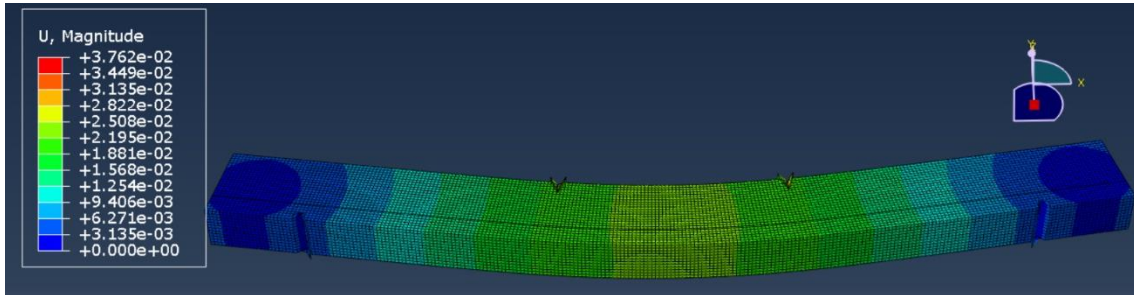


Figura 5.5.64. Desplazamiento en la cara inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

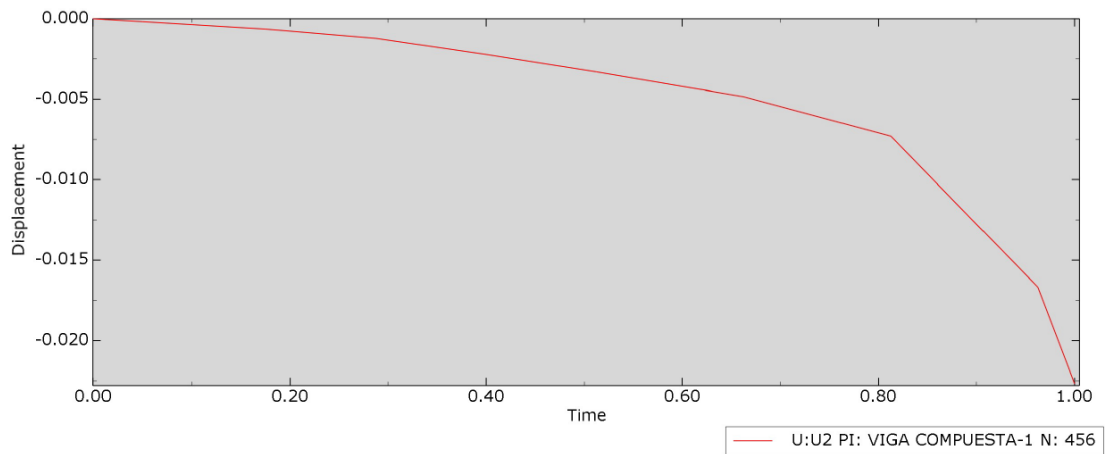


Figura 5.5.65. Desplazamiento-carga de la viga compuesta con laminado de carbono.

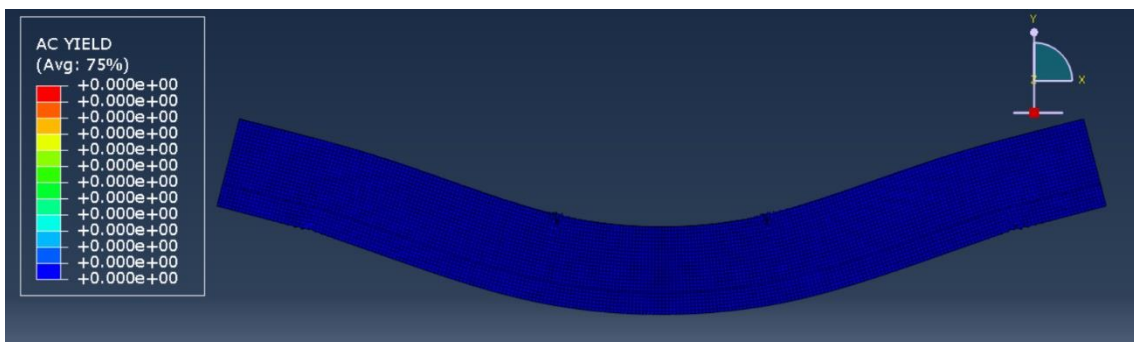


Figura 5.5.66. Plastificación de la viga compuesta con laminado de carbono, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

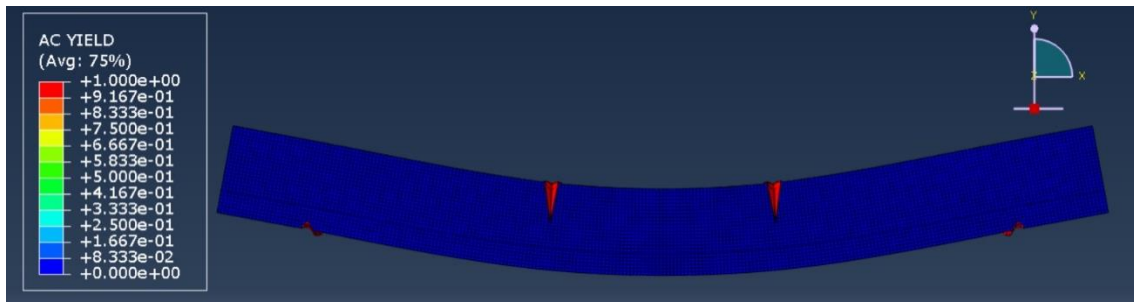


Figura 5.5.67. Plastificación de la viga compuesta con laminado de carbono, sexto paso: incremento 0,5125.

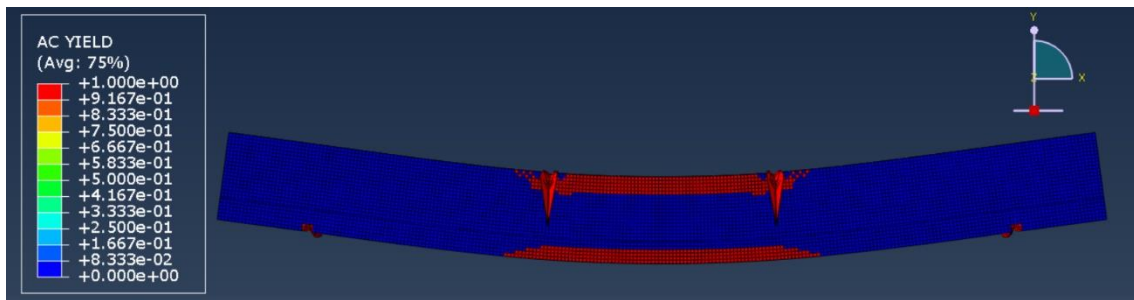


Figura 5.5.68. Plastificación de la viga compuesta con laminado de carbono, octavo paso: incremento 0,8125.

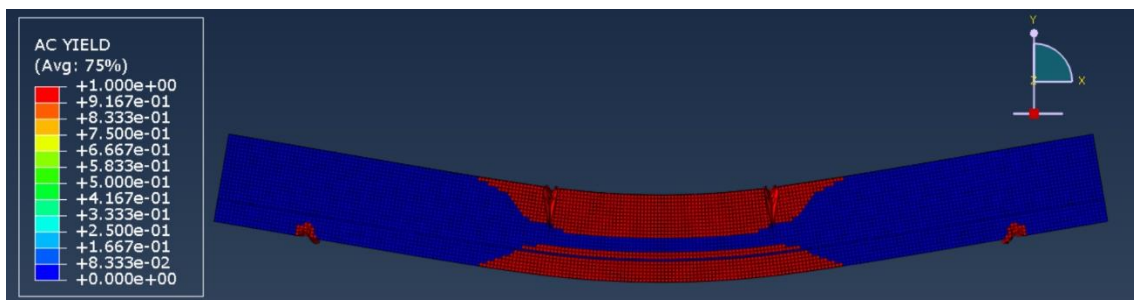


Figura 5.5.69. Plastificación de la viga compuesta con laminado de carbono, decimo paso: incremento 1.

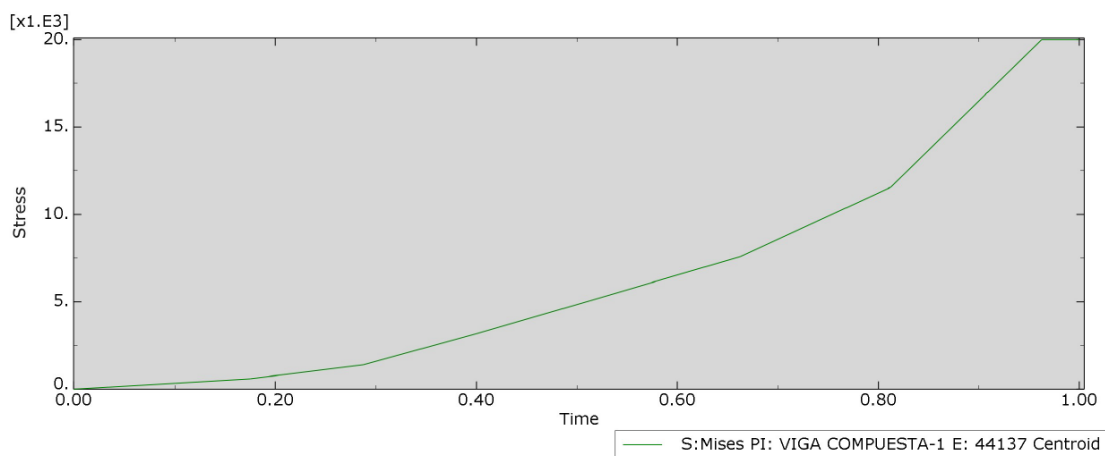


Figura 5.5.70. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la capa superior de la viga compuesta con laminado de carbono.

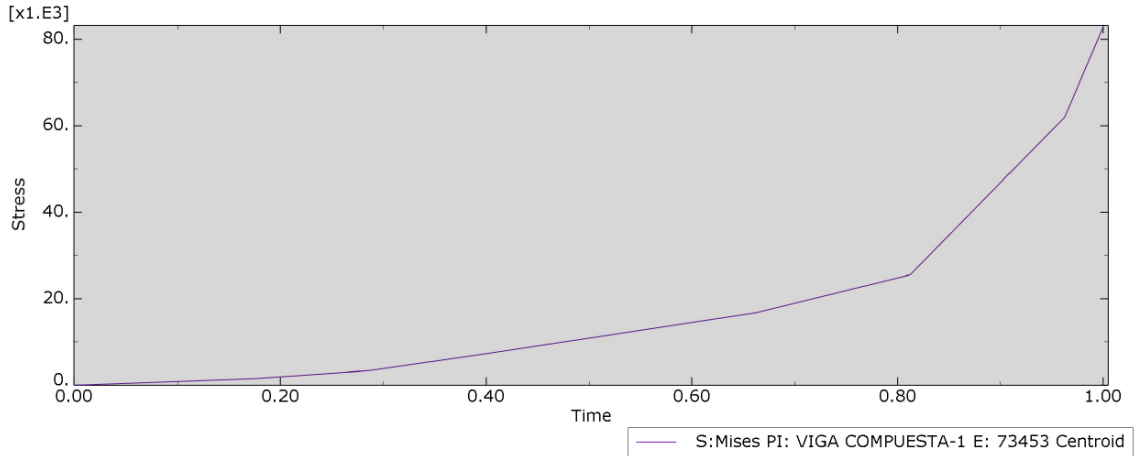


Figura 5.5.71. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de laminado de carbono.

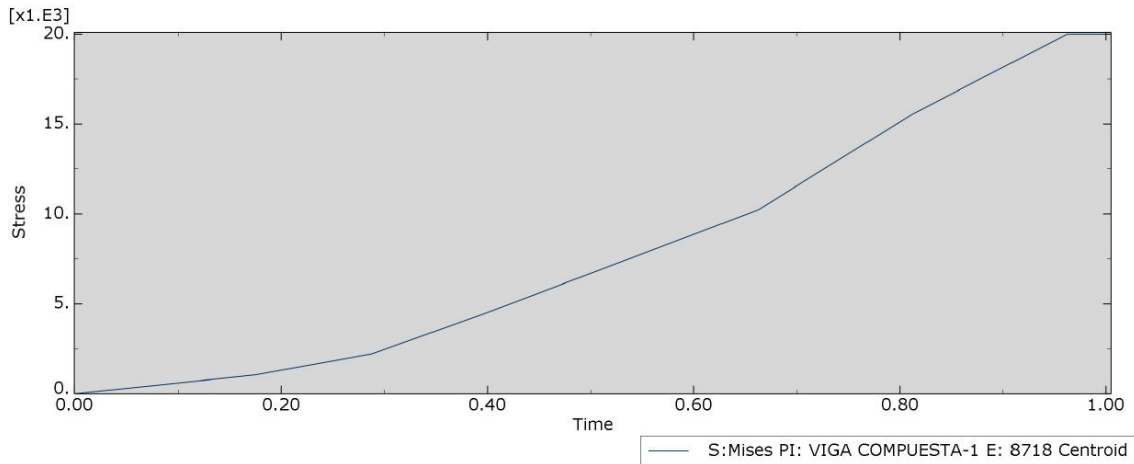


Figura 5.5.72. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la capa inferior de la viga compuesta con laminado de carbono.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica de las tres tipologías de refuerzo se comparan en la tabla 5.5.2. El comportamiento es similar en los tres casos, con una tensión algo superior en el refuerzo de tejido de carbono y un desplazamiento menor en esa misma viga.

ESFUERZO		VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE CARBONO	VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE BASALTO	VIGA COMPUESTA POR LAMINADO DE CARBONO
TENSIÓN	Cara superior	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²
	Refuerzo	$2,3 \cdot 10^5$ kN/m ²	$1,7 \cdot 10^5$ kN/m ²	$8 \cdot 10^4$ kN/m ²
	Cara inferior	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²
DESPLAZAMIENTO		$1 \cdot 10^{-2}$ m	$1,3 \cdot 10^{-2}$ m	$2,3 \cdot 10^{-2}$ m

Tabla 5.5.2. Comparativa de los resultados del cálculo plástico de la simulación numérica de las vigas compuestas.

El módulo elástico del chopo de las vigas compuestas varía según el refuerzo. Los datos se han obtenido en la cara inferior de la viga, de la zona central, donde va situada la galga extensiométrica. Se ha obtenido la flecha y con ella el MOE. El chopo tenía originalmente un módulo elástico de 8818 MPa, en todas las vigas reforzadas es superior. La tabla 5.5.3. muestra el MOE de las tres vigas en la misma posición.

VIGA	MOE
VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE CARBONO	11.060,55 MPa
VIGA COMPUESTA POR TEJIDO DE BASALTO	10.065.05 MPa
VIGA COMPUESTA POR LAMINADO DE CARBONO	9.014,17 MPa

Tabla 5.5.3. Comparativa de módulo elástico del chopo inferior obtenido de la simulación.

5.5.2 VIGA REFORZADA (PINO + REFUERZO + CHOPO)

5.5.2.1 Cálculo elástico

Las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos son los esfuerzos estudiados en este tipo de cálculo. Los esfuerzos se pueden apreciar agrupados para cada tipo de esfuerzo de la figura 5.5.74. a la figura 5.5.109.

Las tensiones en el cálculo elástico siguen el patrón mostrado en las tres primeras figuras de cada tipo de viga. Se observa que se encuentran principalmente concentradas en los apoyos, así como en las caras externas de la zona central. Las vigas reforzadas con FRP acumulan altas tensiones en la zona central del mismo. Esto se debe a la

redistribución de tensiones, ya que el FRP es el material con mayor capacidad para soporta tensiones.

Las deformaciones siguen un patrón similar en todos los modelos de vigas estudiados. Se concentran en los apoyos, ya que en el ensayo a flexión son las zonas que más sufren. Las mayores deformaciones ocurren en la zona central, especialmente en las caras superior e inferior. El refuerzo tiene mucho menor impacto en las deformaciones del que tiene al analizar las tensiones. La cara superior e inferior sufren una deformación ligeramente menor, el refuerzo trabaja de forma similar a las zonas adyacentes de la madera.

Los mayores desplazamientos se producen en las zonas más alejadas de los apoyos, en este caso coincide con el centro de la viga.

VIGA REFORZADA SOLO CON CHOPO

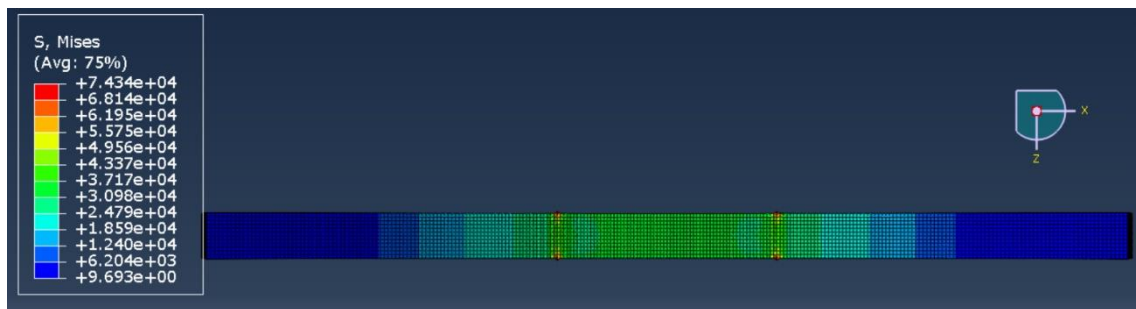


Figura 5.5.73. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con chopo.

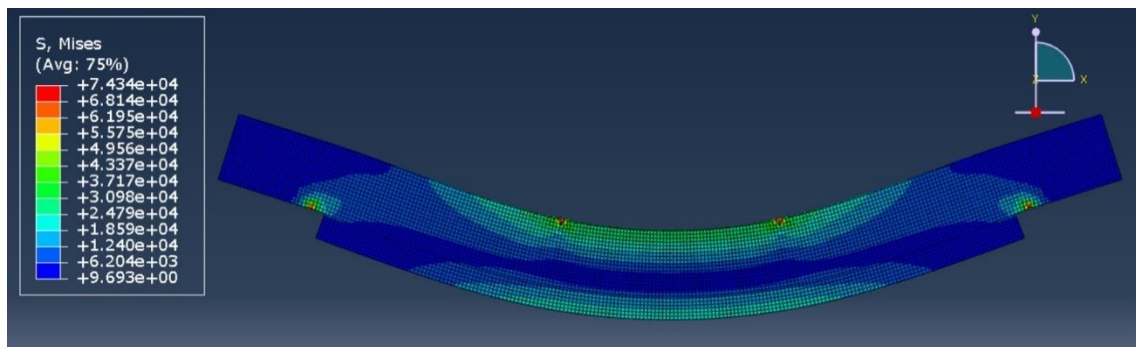


Figura 5.5.74. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con chopo.

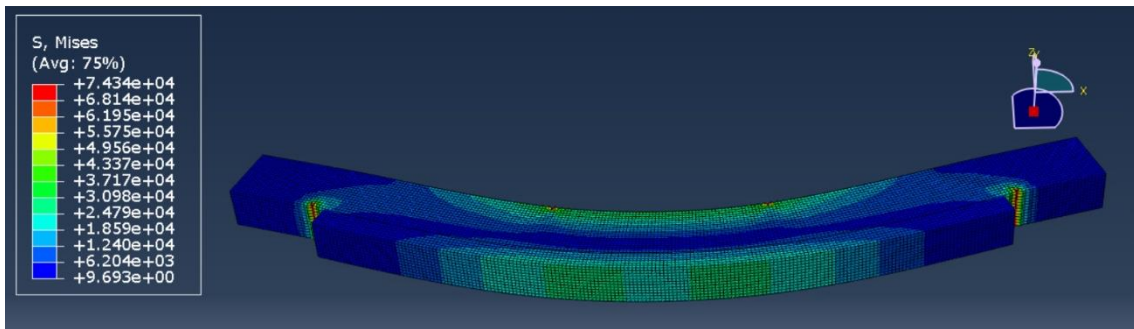


Figura 5.5.75. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con chopo.

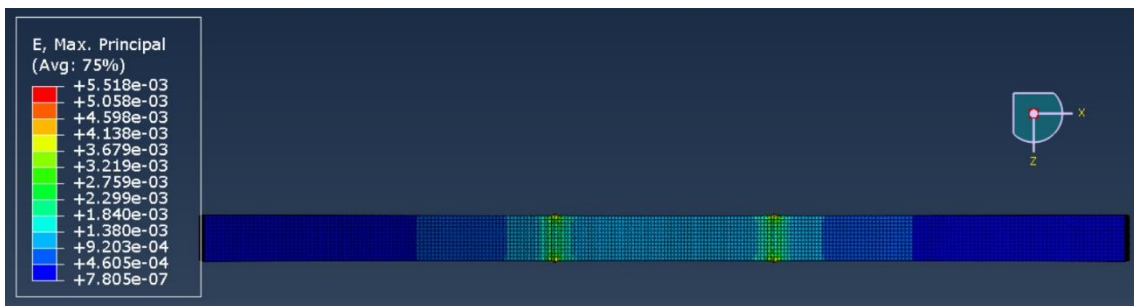


Figura 5.5.76. Deformaciones en la cara superior de la viga reforzada con chopo.

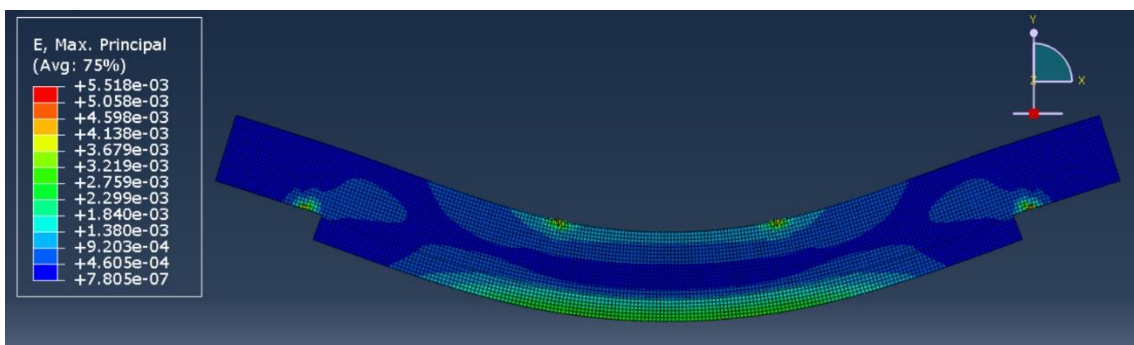


Figura 5.5.77. Deformaciones en la cara frontal de la viga reforzada con chopo.

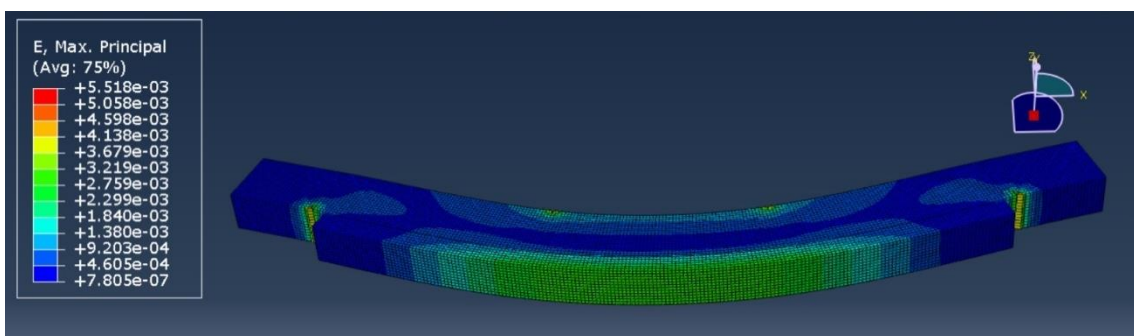


Figura 5.5.78. Deformaciones en la cara inferior de la viga reforzada con chopo.



Figura 5.5.79. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con chopo.

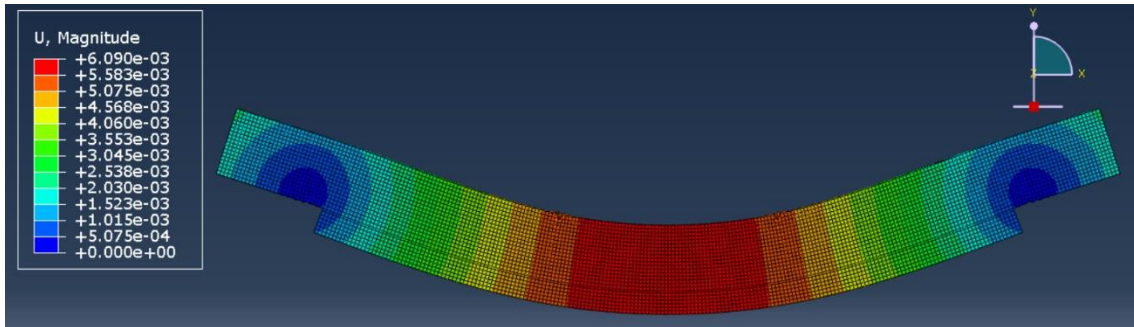


Figura 5.5.80. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con chopo.

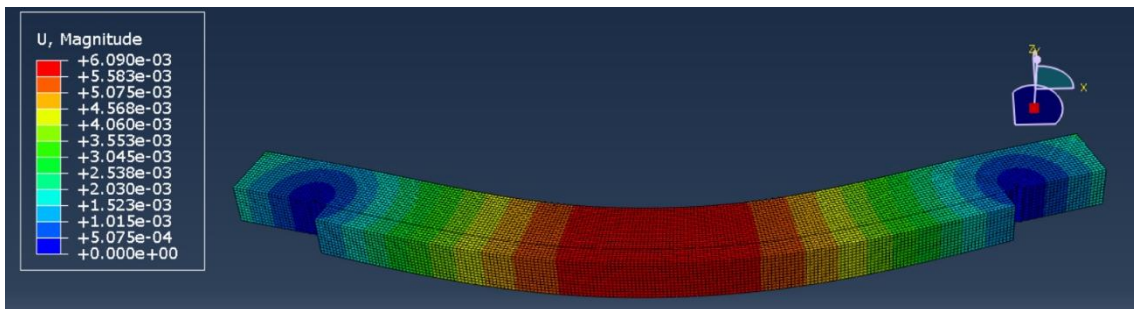


Figura 5.5.81. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con chopo.

VIGA REFORZADA CON TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE CARBONO

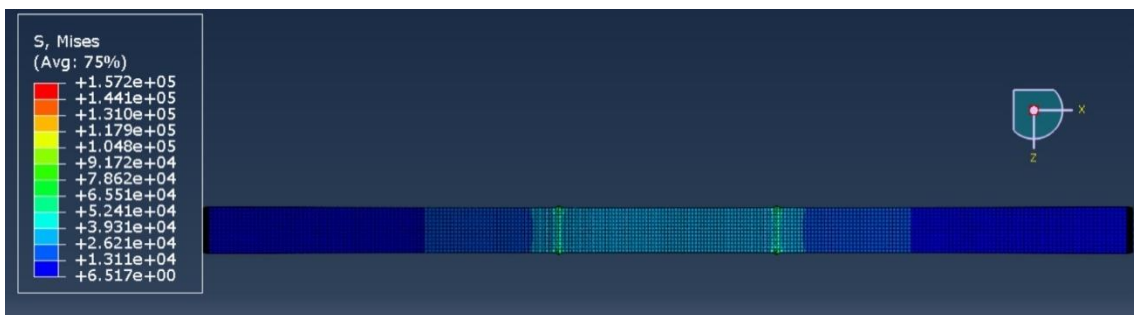


Figura 5.5.82. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de carbono.

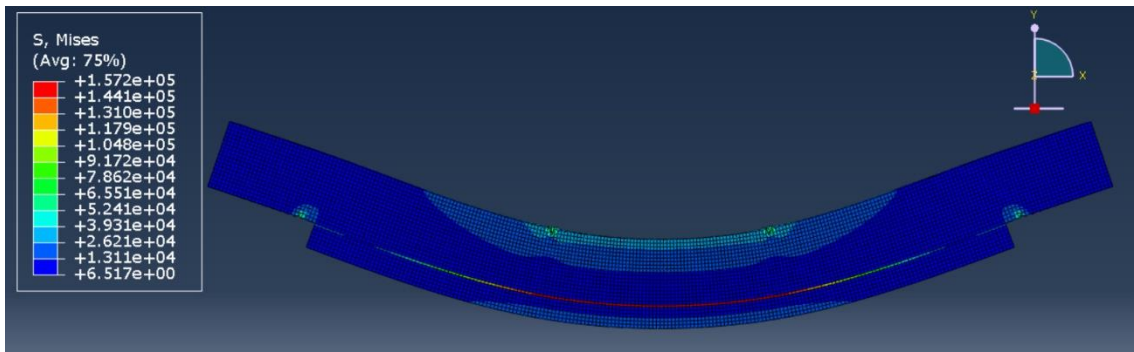


Figura 5.5.83. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono.

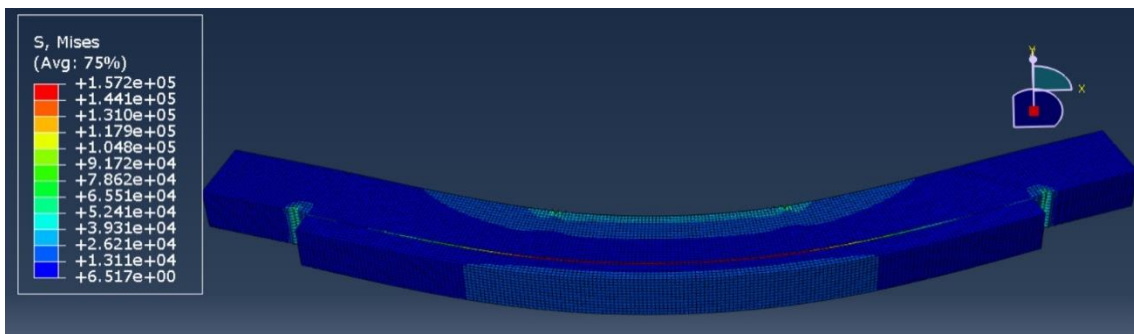


Figura 5.5.84. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de carbono.

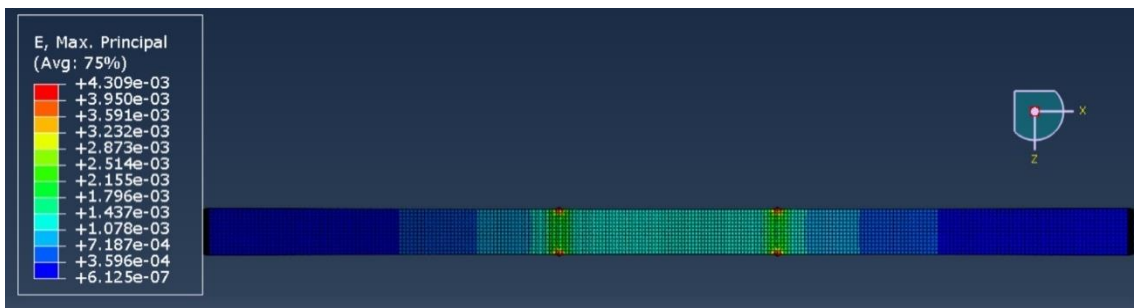


Figura 5.5.85. Deformaciones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de carbono.

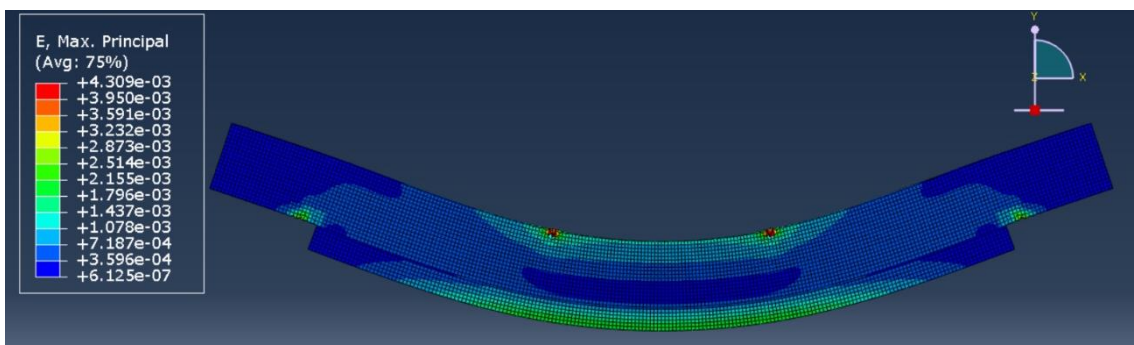


Figura 5.5.86. Deformaciones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono.

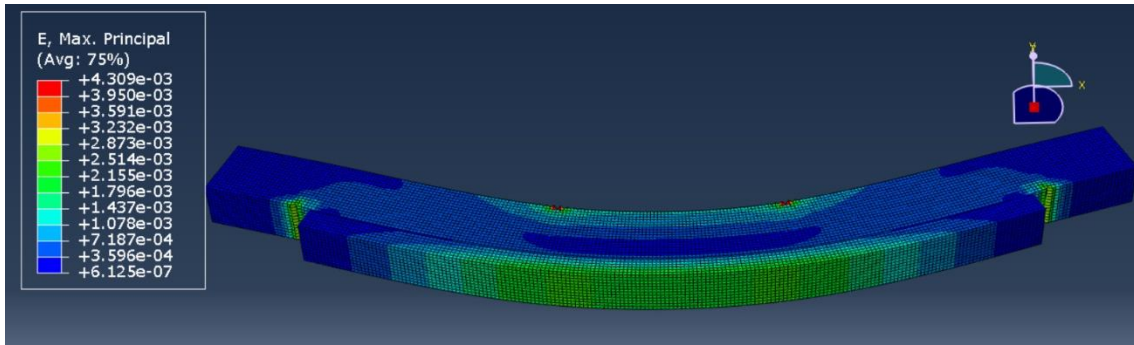


Figura 5.5.87. Deformaciones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de carbono.

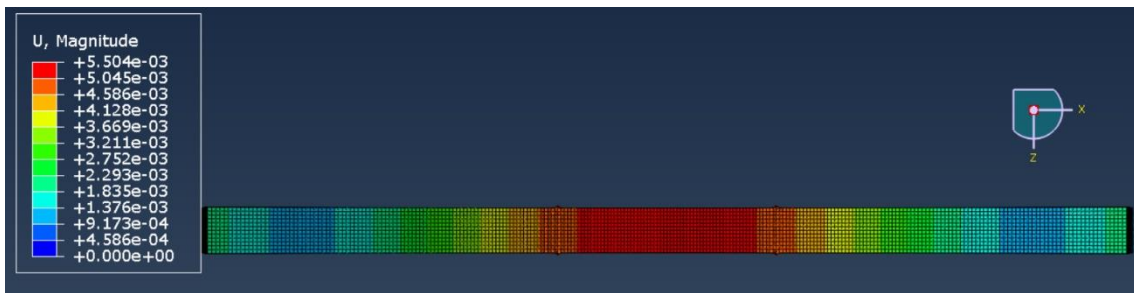


Figura 5.5.88. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con tejido de carbono.

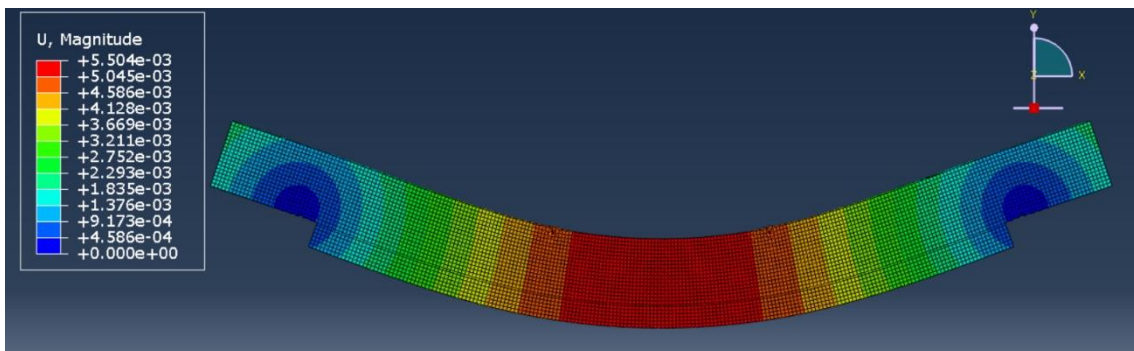


Figura 5.5.89. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono.

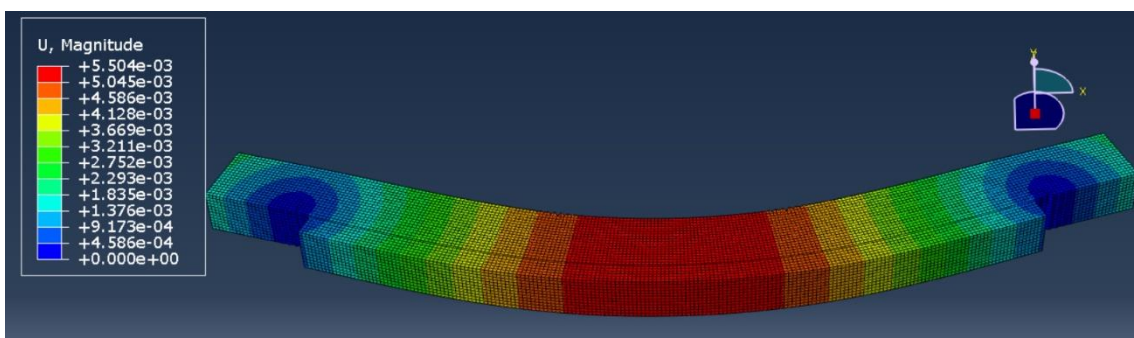


Figura 5.5.90. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de carbono.

VIGA REFORZADA CON TEJIDO UNIDIRECCIONAL DE BASALTO

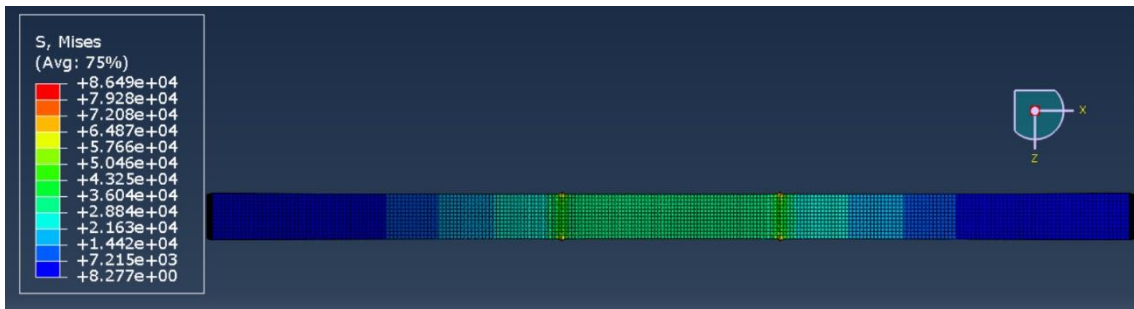


Figura 5.5.91. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

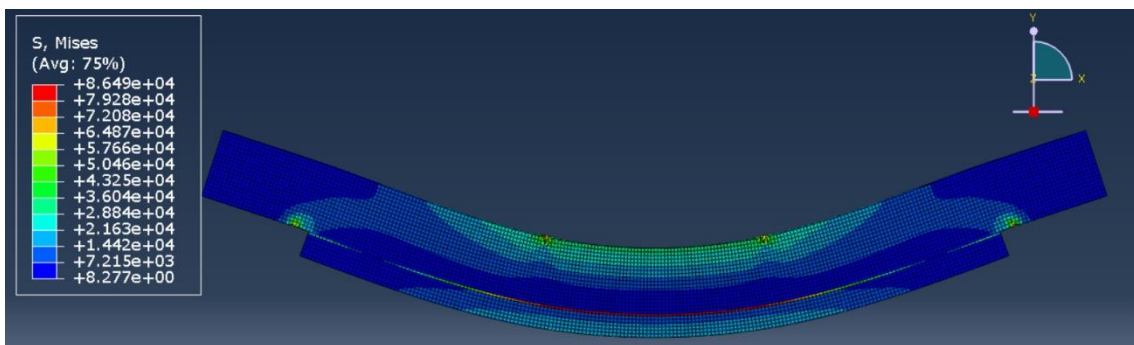


Figura 5.5.92. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto.

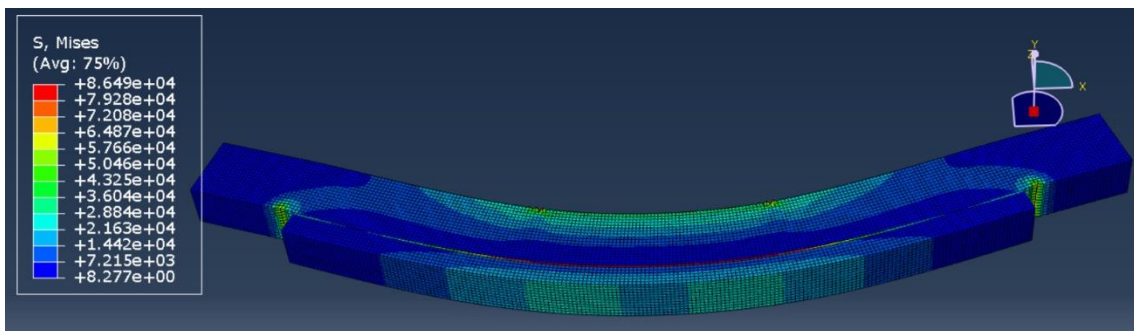


Figura 5.5.93. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de basalto.

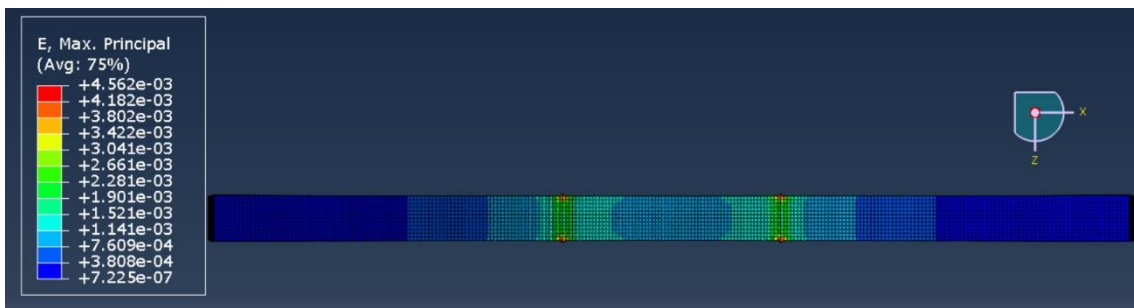


Figura 5.5.94. Deformaciones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

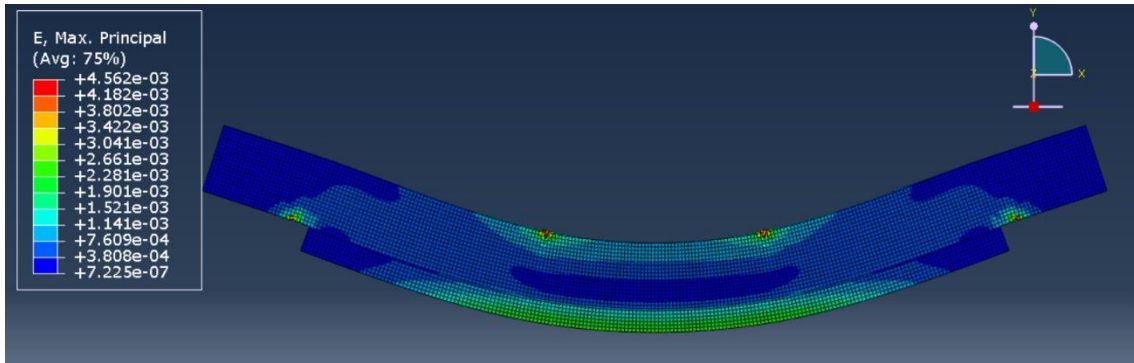


Figura 5.5.95. Deformaciones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto.

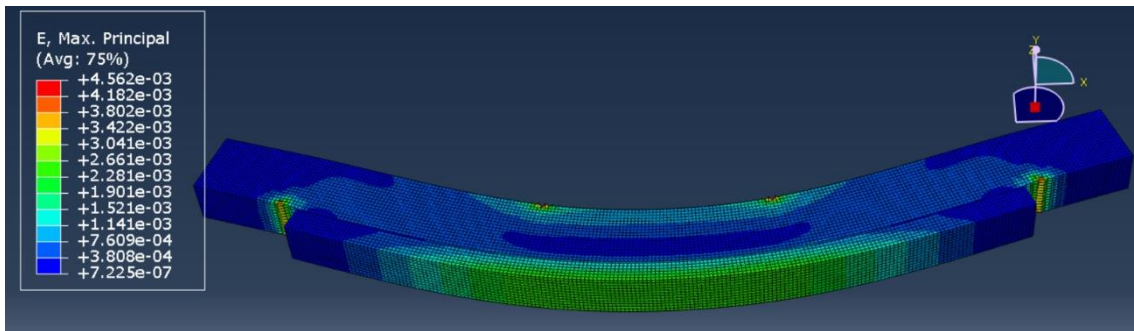


Figura 5.5.96. Deformaciones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de basalto.



Figura 5.5.97. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

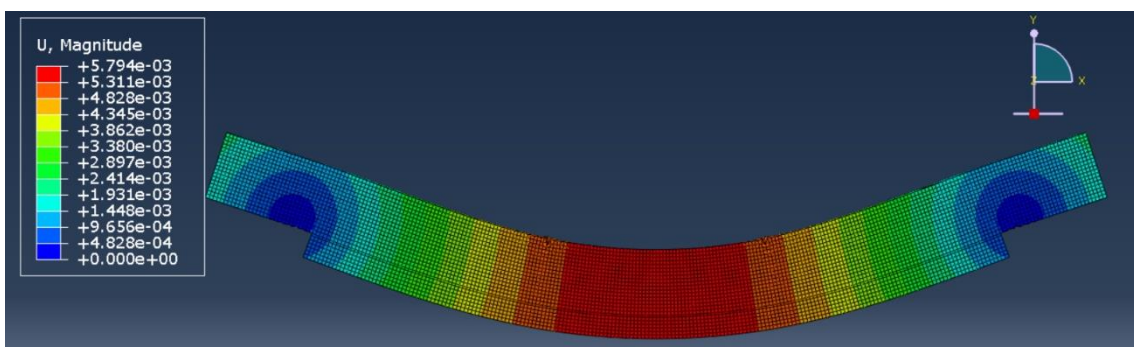


Figura 5.5.98. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto.

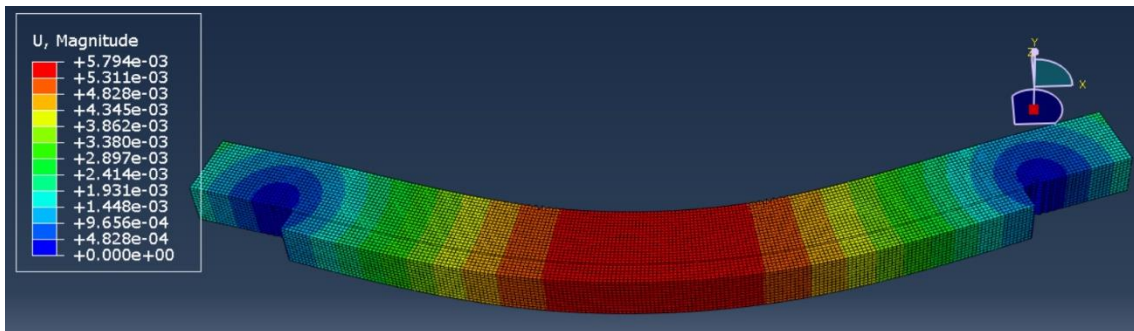


Figura 5.5.99. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de basalto.

VIGA REFORZADA CON LAMINADO DE CARBONO

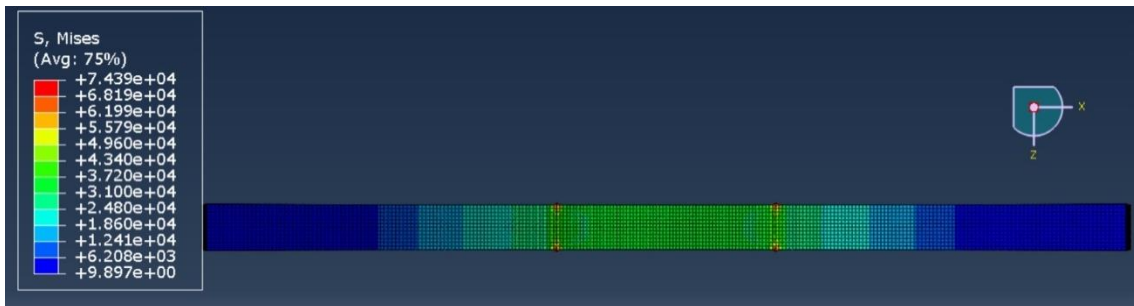


Figura 5.5.100. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con laminado de carbono.

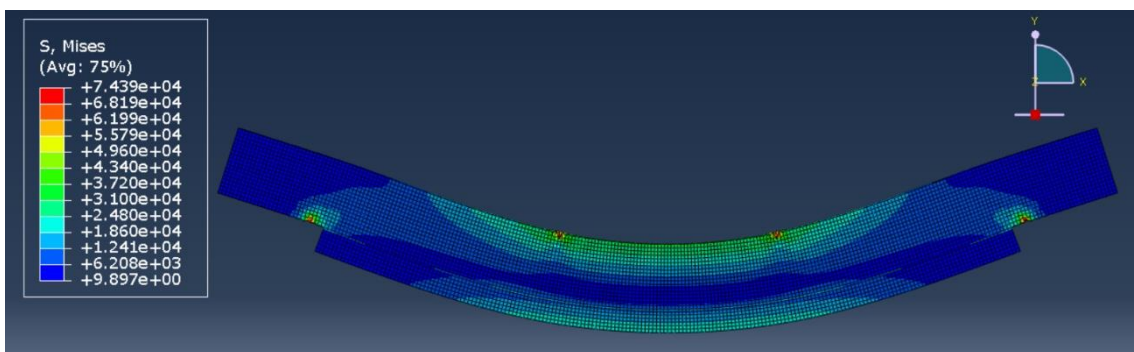


Figura 5.5.101. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono.

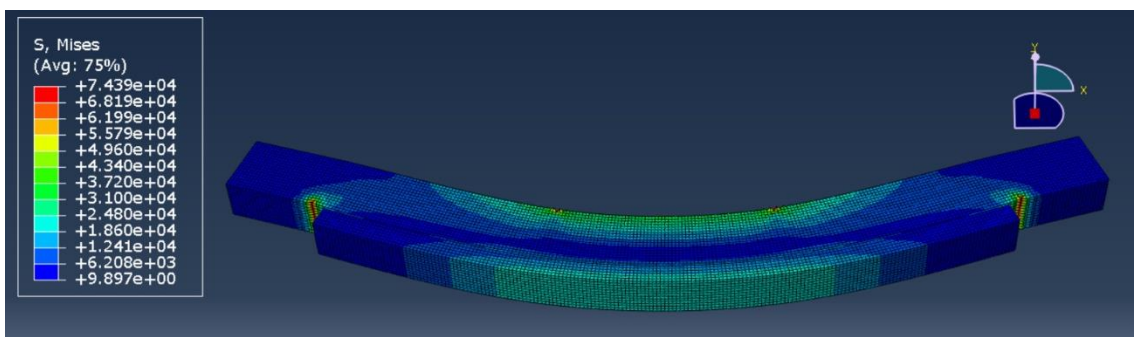


Figura 5.5.102. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con laminado de carbono.

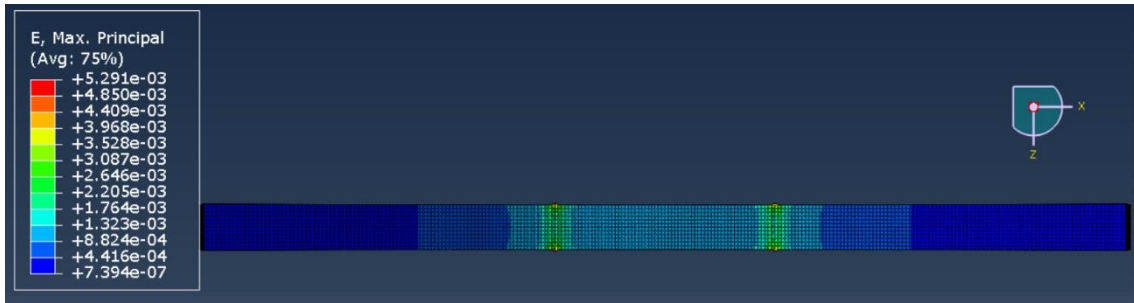


Figura 5.5.103. Deformaciones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

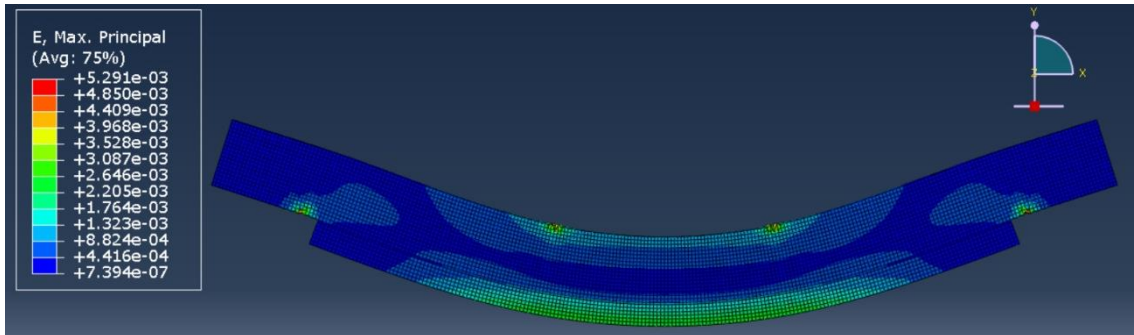


Figura 5.5.104. Deformaciones en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono.

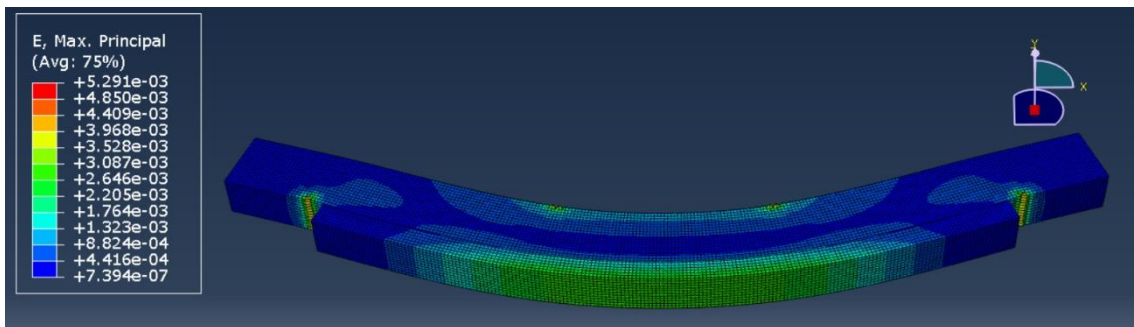


Figura 5.5.105. Deformaciones en la cara inferior de la viga reforzada con laminado de carbono.



Figura 5.5.106. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con laminado de carbono.

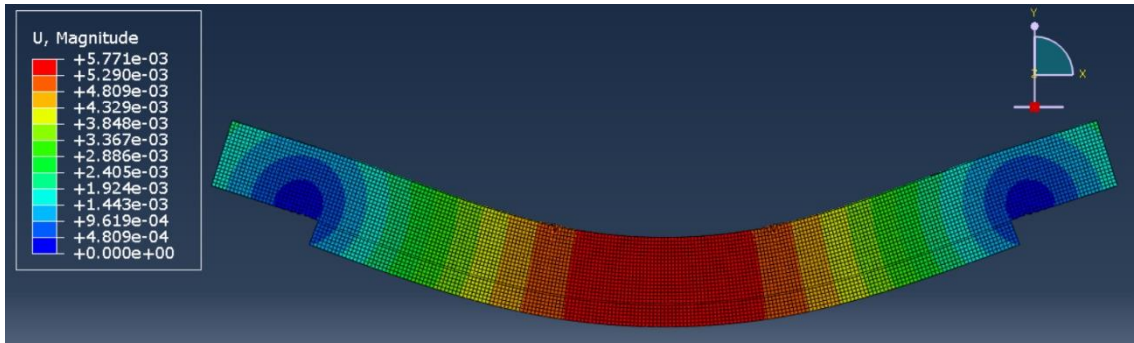


Figura 5.5.107. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono.

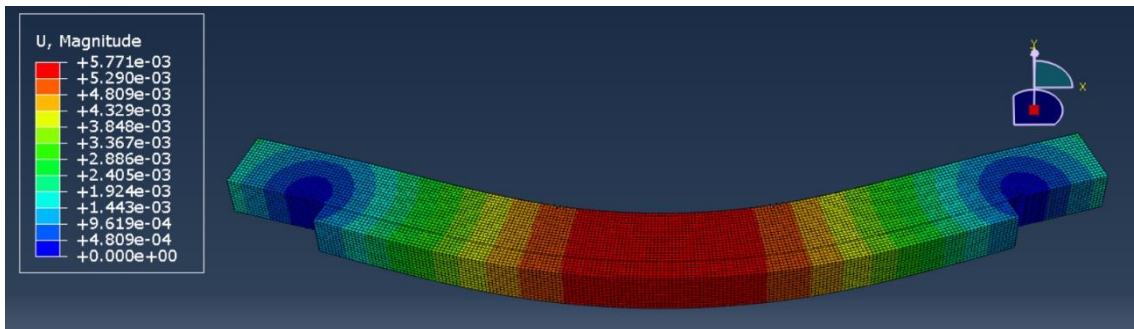


Figura 5.5.108. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con laminado de carbono.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica de las cuatro tipologías de vigas se comparan en la tabla 5.5.4. El comportamiento es similar, especialmente entre las tres tipologías con FRP. La diferencia radica principalmente en la capa de pino, ya que al añadir el FRP, sus tensiones y deformaciones son menores.

ESFUERZO		VIGA REFORZADA CON CHOPO	VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE CARBONO	VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE BASALTO	VIGA REFORZADA CON LAMINADO DE CARBONO
TENSIÓN	Cara superior	$2,7 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$3 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$3 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$3,5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
	Refuerzo	-	$1,5 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$	$8,6 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
	Cara inferior	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$1,3 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	$2 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
DEFORMACIÓN	Cara superior	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-3}
	Cara inferior	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
DESPLAZAMIENTO		$6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Tabla 5.5.4. Comparativa de los resultados del cálculo elástico la simulación numérica de las vigas reforzadas.

5.5.2.2 *Cálculo plástico*

En este tipo de cálculo se muestran y analizan las tensiones, desplazamientos, zonas plastificadas y el comportamiento de los materiales. Se pueden apreciar para cada tipo de viga de las figuras 5.5.110. a la 5.5.168.

Las tensiones siguen el mismo patrón que en el caso elástico, siendo distintas en cada material. La diferencia de tensiones es mayor, ya que la zona central plastifica, las tensiones han alcanzado el límite elástico. La zona central del pino, cercana al refuerzo, está sometido a una tensión menor.

El desplazamiento máximo ocurre en el centro del vano, tal y como ocurre en el resto de casos. El valor es mayor que en el cálculo elástico debido al comportamiento plástico de los materiales, especialmente en la viga reforzada solo con chopo, ya que plastifica prácticamente toda la sección.

La flecha de la viga a lo largo del tiempo, el desplazamiento vertical, se ilustran en las gráficas 5.5.117., 5.5.131., 5.5.146. y 5.5.161. La magnitud de tiempo se refiere al aumento de la carga, es decir, con el valor de tiempo se refiere a la fracción de la carga a la que está sometida la viga. El desplazamiento y la carga no están relacionados de forma lineal. Existen dos tipos de comportamiento diferenciado en las vigas. Este hecho se aprecia especialmente en la viga solo reforzada con chopo (figura 5.5.117.), en la que la flecha aumenta levemente hasta el 0,85 de la carga y a partir de ese valor la flecha aumenta rápidamente con pequeñas variaciones de la carga. Este cambio de comportamiento se debe a la plastificación de los materiales.

La plastificación ocurre cuándo la tensión supera el límite elástico en un elemento. El proceso de plastificación se puede seguir para cada viga en cuatro fases, sin carga, con aproximadamente la mitad y tres cuartos de la carga y con la carga total. Los elementos que primero plastifican son aquellos que están sometidos a una tensión superior. La plastificación comienza en los apoyos y en la zona central de las caras superior e inferior desde donde se extiende. La zona plastificada en ningún caso se llega a extender por toda la sección, nunca llega a plastificar entera y en ningún caso se plastifica el composite. El aumento de carga provoca que se aumente la zona

plastificada. Las zonas plastificadas pueden sufrir cambios, debido a la redistribución plástica, las zonas más cargadas transmiten parte de su tensión a las zonas adyacentes, provocando una descarga.

La evolución de la tensión estudiada para cada material de cada viga a través de un elemento de la zona central se representa en las figuras 5.5.122., 5.5.123. y 5.5.124. para la viga reforzada solo con chopo. Las figuras 5.5.126., 5.5.137. y 5.5.138. representan la evolución para la reforzada con tejido de carbono. La evolución de la tensión para la viga reforzada con tejido de basalto se puede observar en las figuras 5.5.151., 5.5.152. y 5.5.153., y las figuras 5.5.166., 5.5.167. y 5.5.168. representan la evolución para las reforzadas con laminado de carbono.

VIGA REFORZADA SOLO CON CHOPO

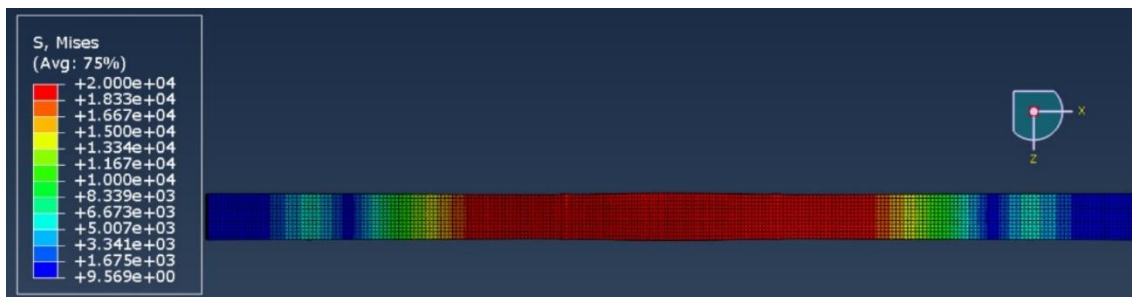


Figura 5.5.109. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con chopo.

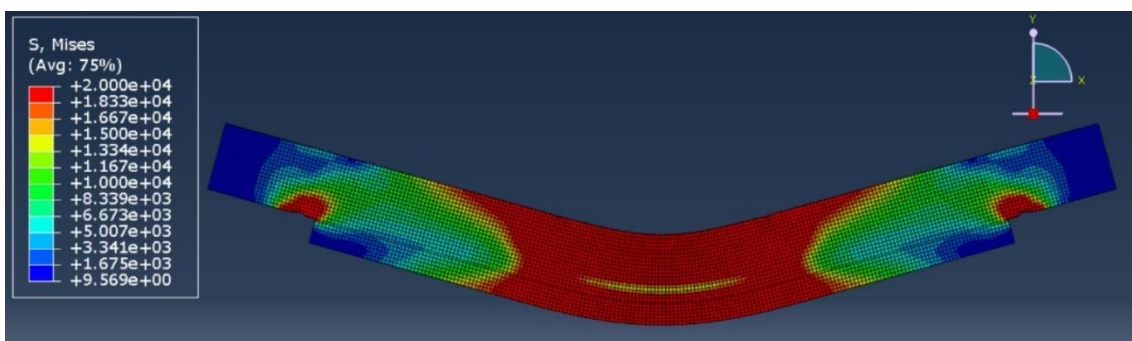


Figura 5.5.110. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con chopo.

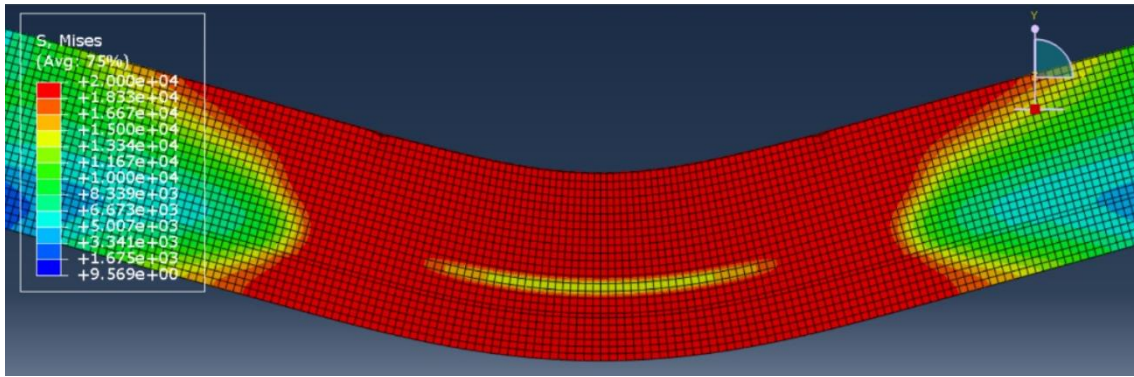


Figura 5.5.111. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con chopo, zona ampliada.

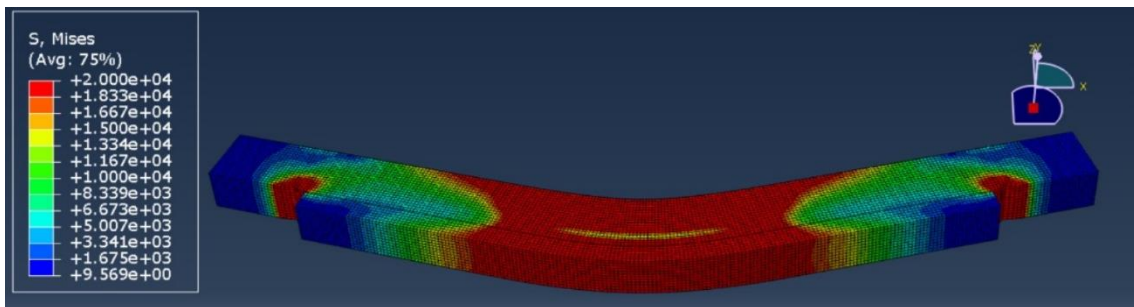


Figura 5.5.112. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con chopo.

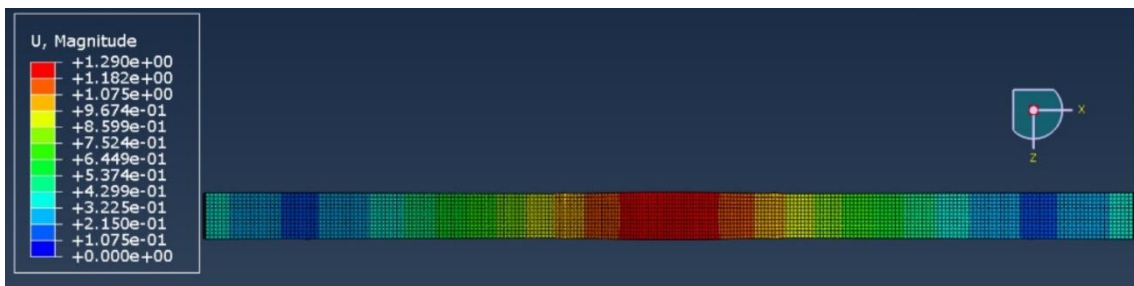


Figura 5.5.113. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con chopo.

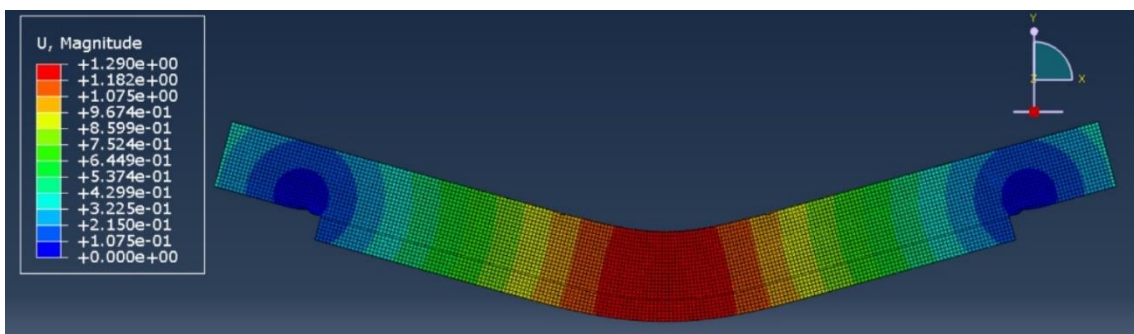


Figura 5.5.114. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con chopo.

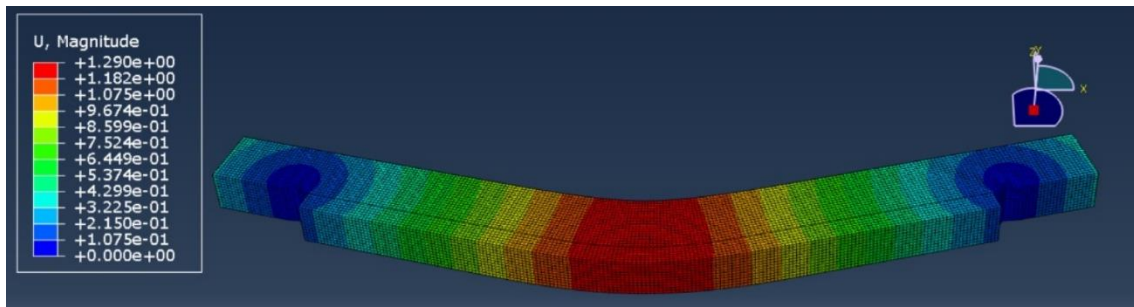


Figura 5.5.115. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con chopo.

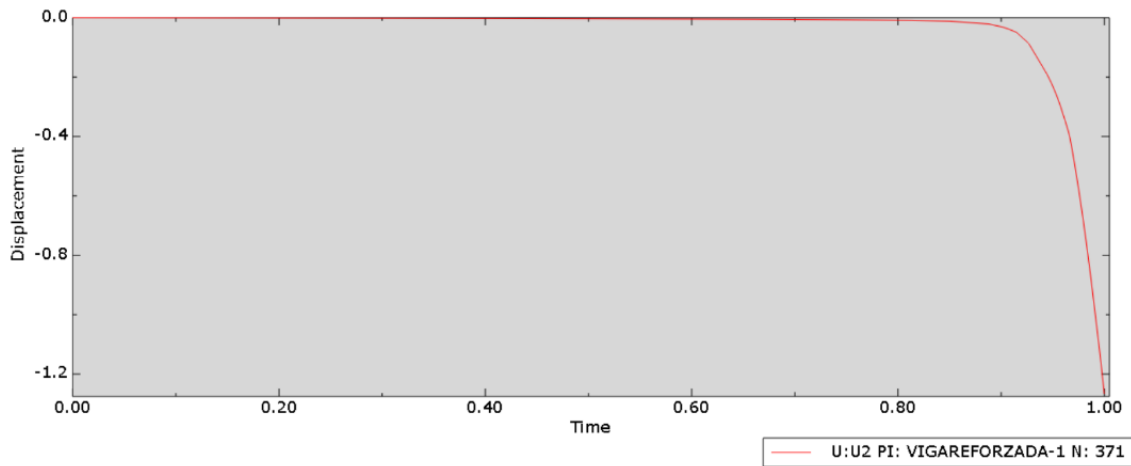


Figura 5.5.116. Desplazamiento-carga de la viga reforzada con chopo.

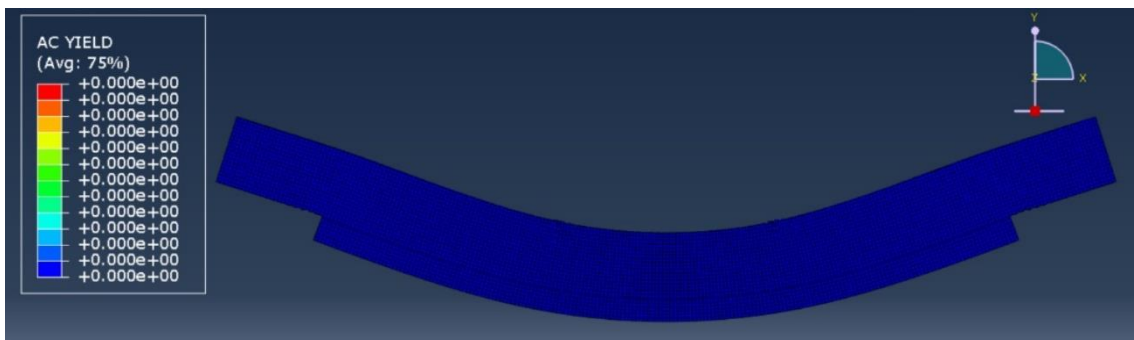


Figura 5.5.117. Plastificación de la viga reforzada con chopo, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

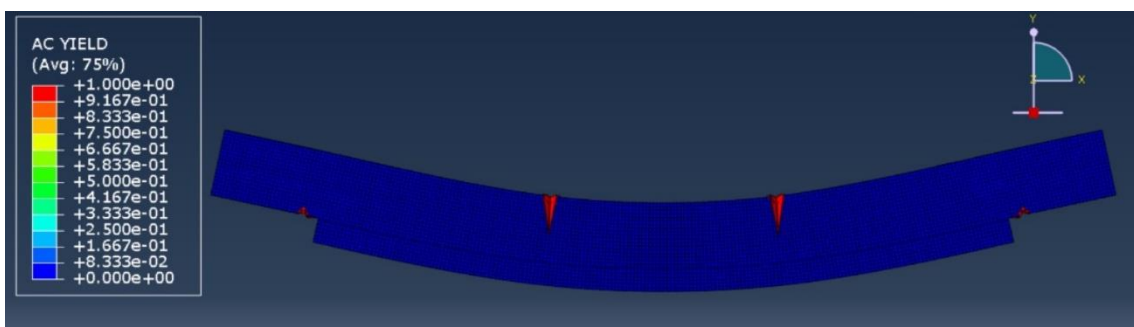


Figura 5.5.118. Plastificación de la viga reforzada con chopo, sexto paso: incremento 0,5125.

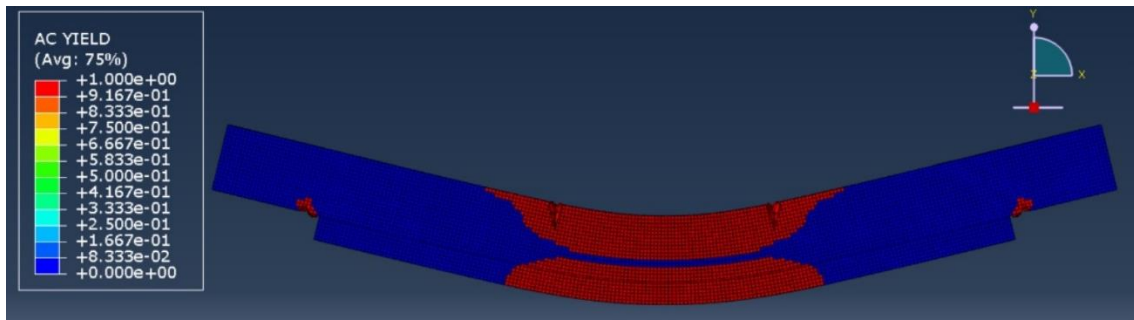


Figura 5.5.119. Plastificación de la viga reforzada con chopo, doceavo paso: incremento 0,9068.

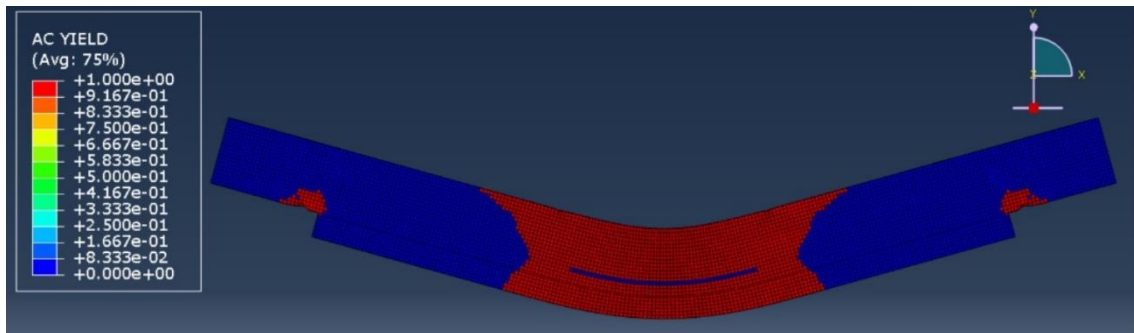


Figura 5.5.120. Plastificación de la viga reforzada con chopo, trigésimo tercer paso: incremento 1.

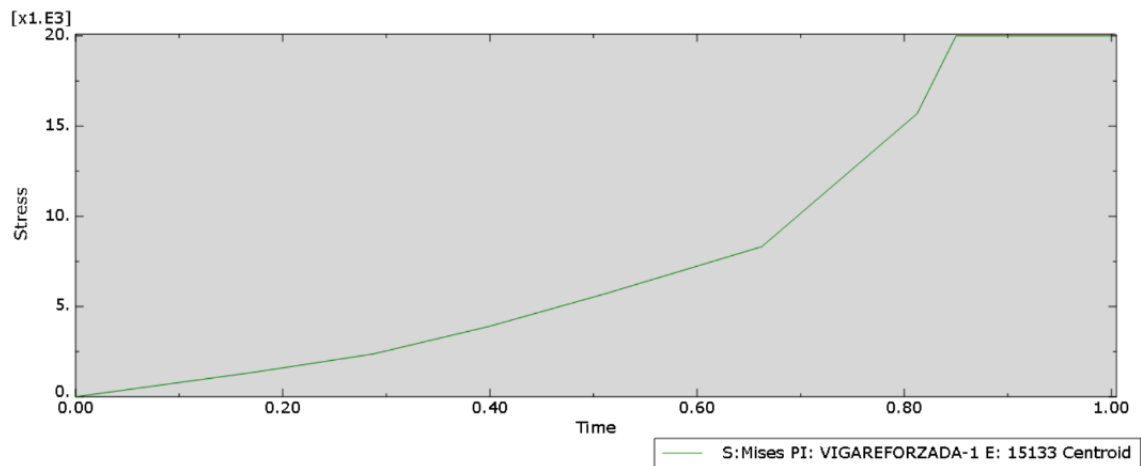


Figura 5.5.121. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de pino de la viga reforzada con chopo.

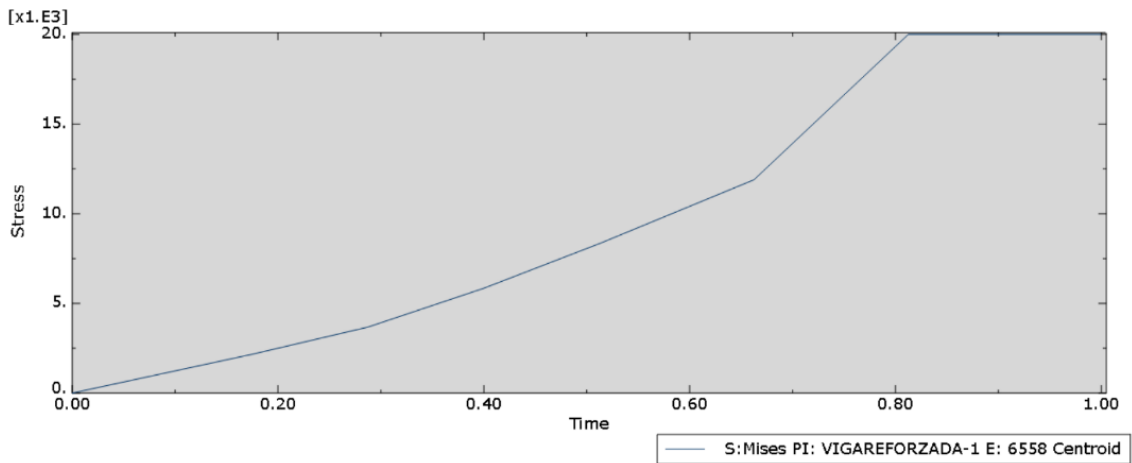


Figura 5.5.122. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la viga reforzada solo con chopo.

VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE CARBONO

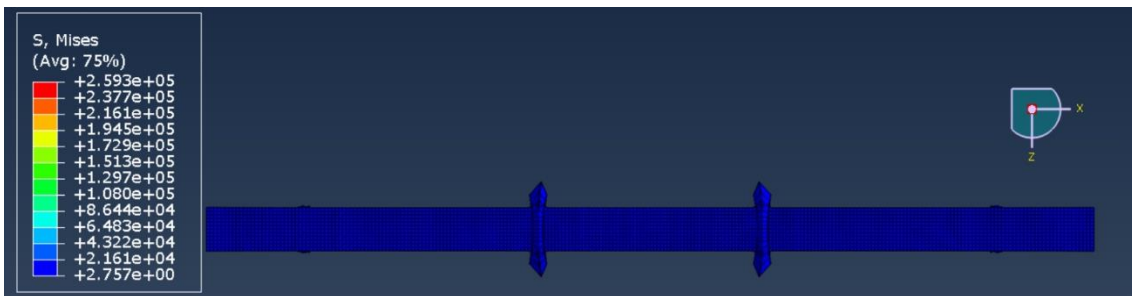


Figura 5.5.123. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de carbono.

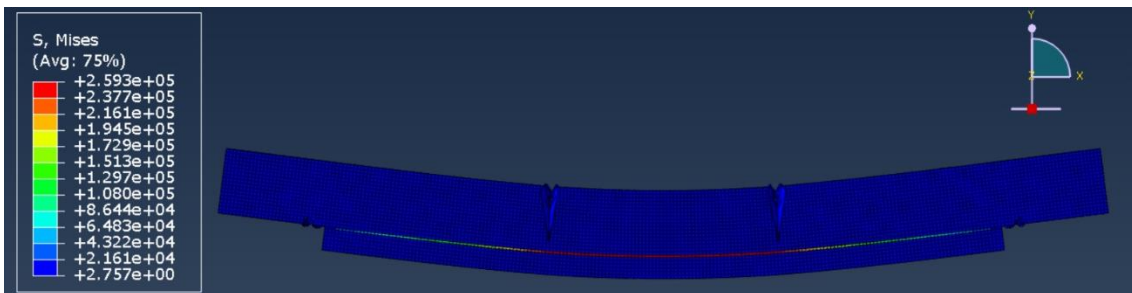


Figura 5.5.124. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono.

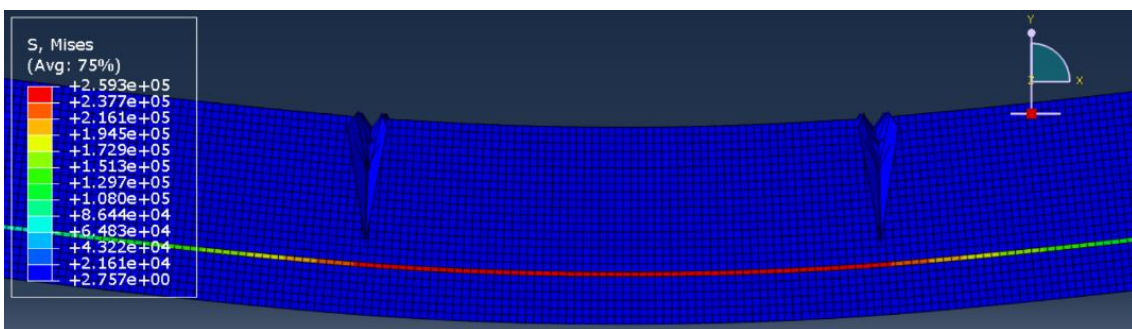


Figura 5.5.125. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono, zona ampliada.

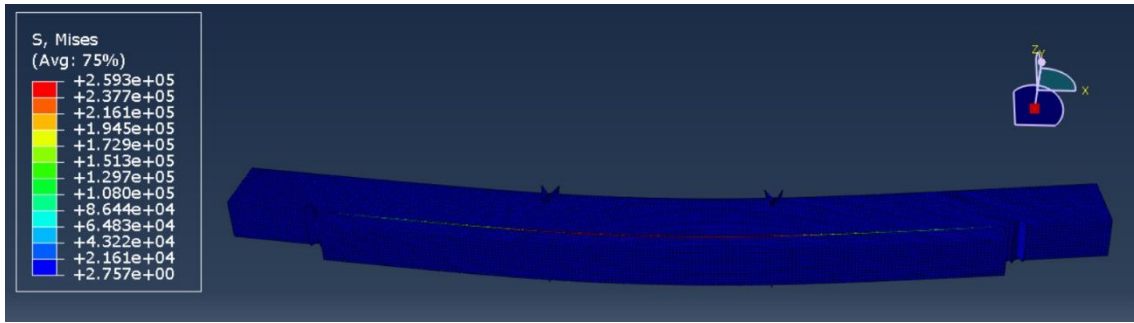


Figura 5.5.126. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de carbono.

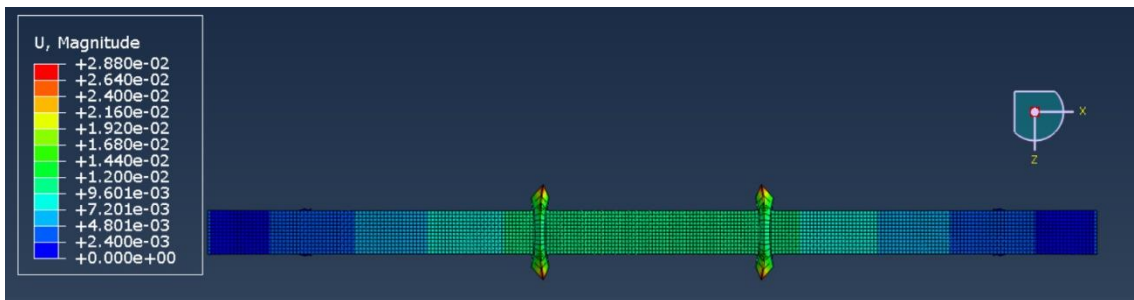


Figura 5.5.127. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con tejido de carbono.

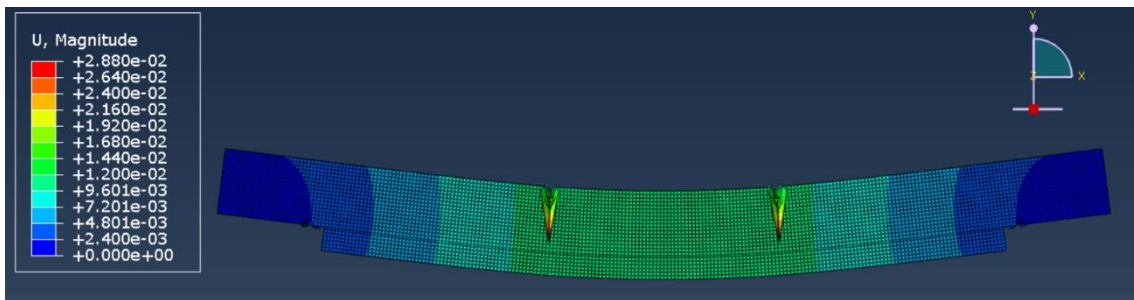


Figura 5.5.128. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de carbono.

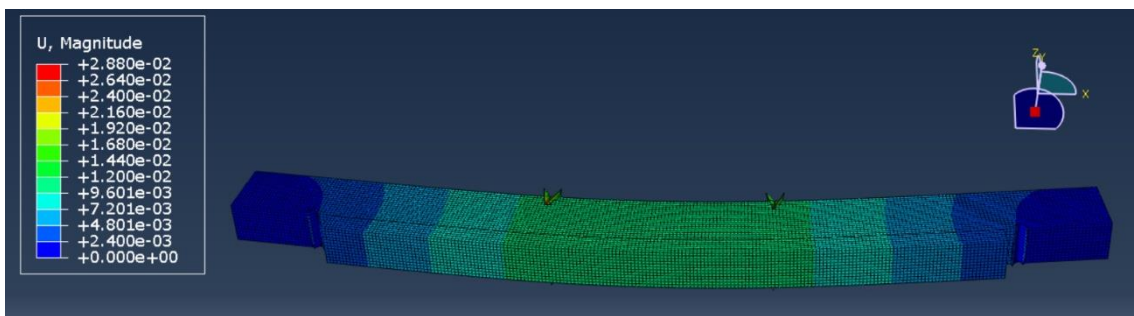


Figura 5.5.129. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de carbono.

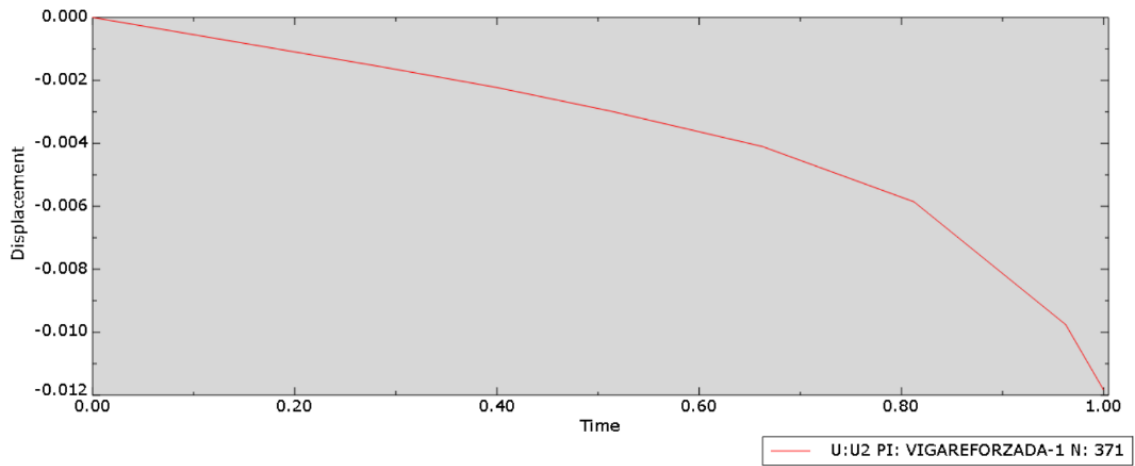


Figura 5.5.130. Desplazamiento-carga de la viga reforzada con tejido de carbono.

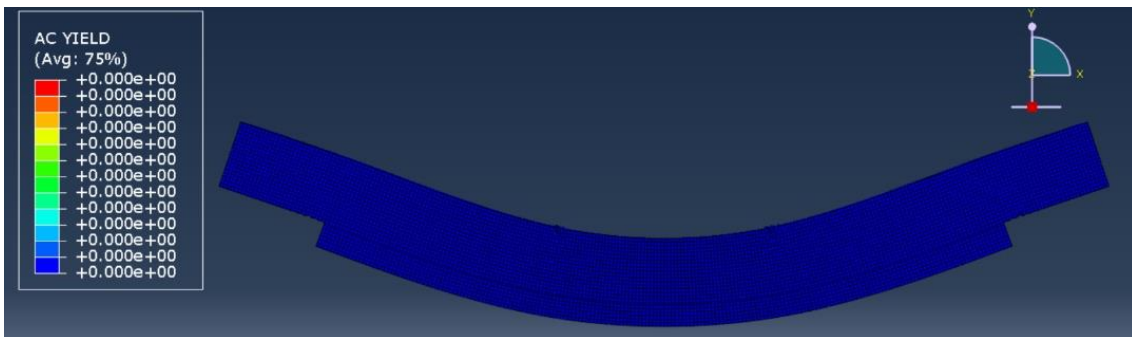


Figura 5.5.131. Plastificación de la viga reforzada con tejido de carbono, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

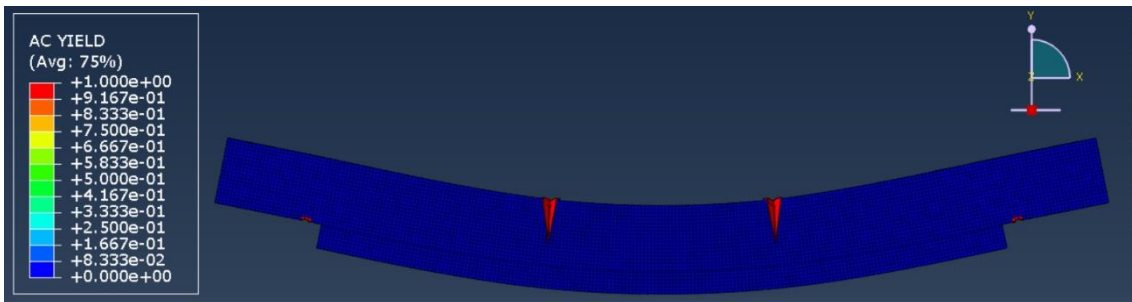


Figura 5.5.132. Plastificación de la viga reforzada con tejido de carbono, sexto paso: incremento 0,5125.

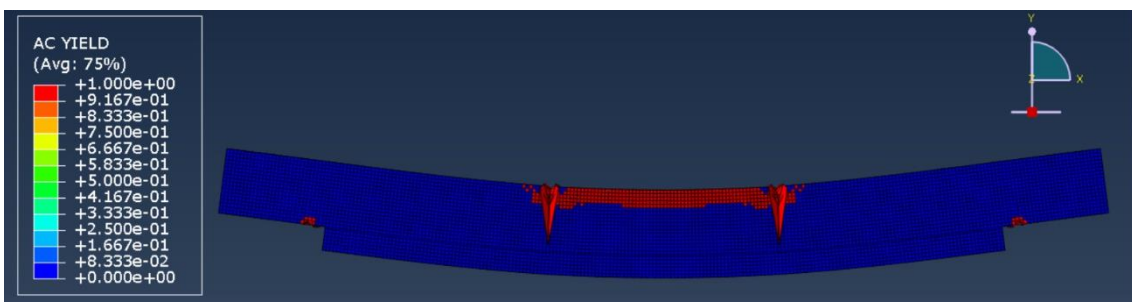


Figura 5.5.133. Plastificación de la viga reforzada con tejido de carbono, octavo paso: incremento 0,8125.

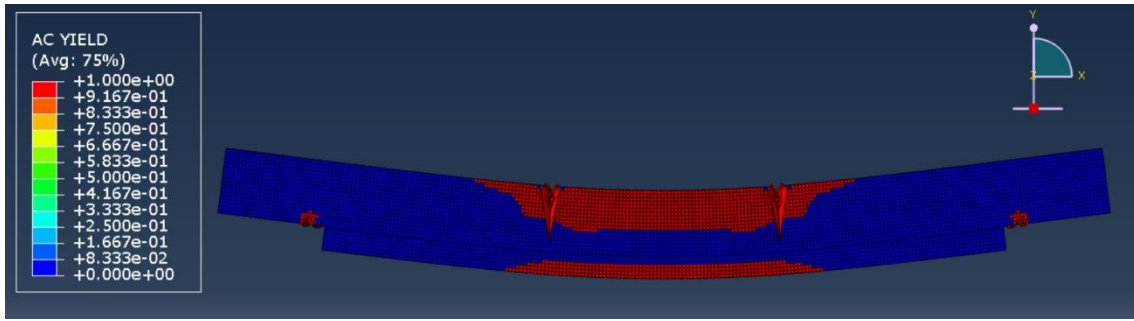


Figura 5.5.134. Plastificación de la viga reforzada con tejido de carbono, decimo paso: incremento 1.

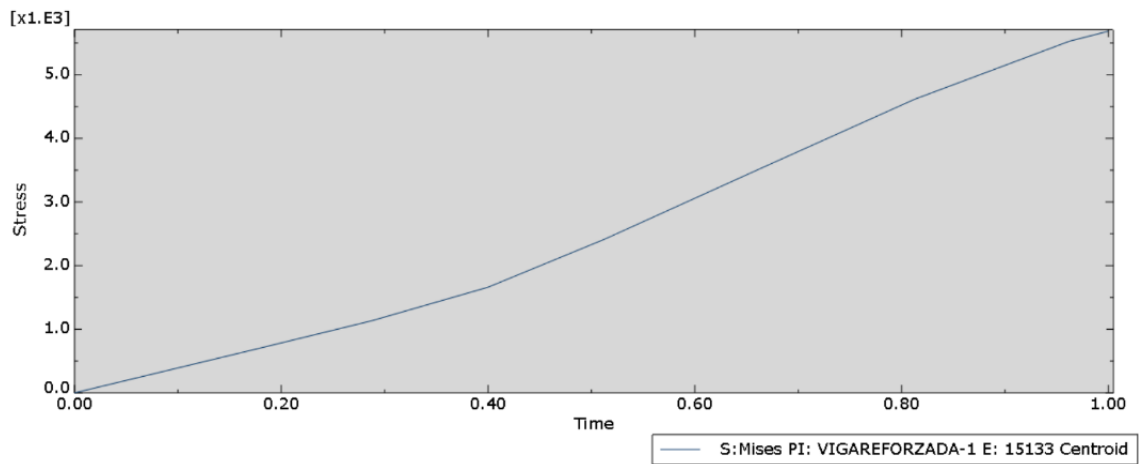


Figura 5.5.135. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de pino de la viga reforzada con tejido de carbono.

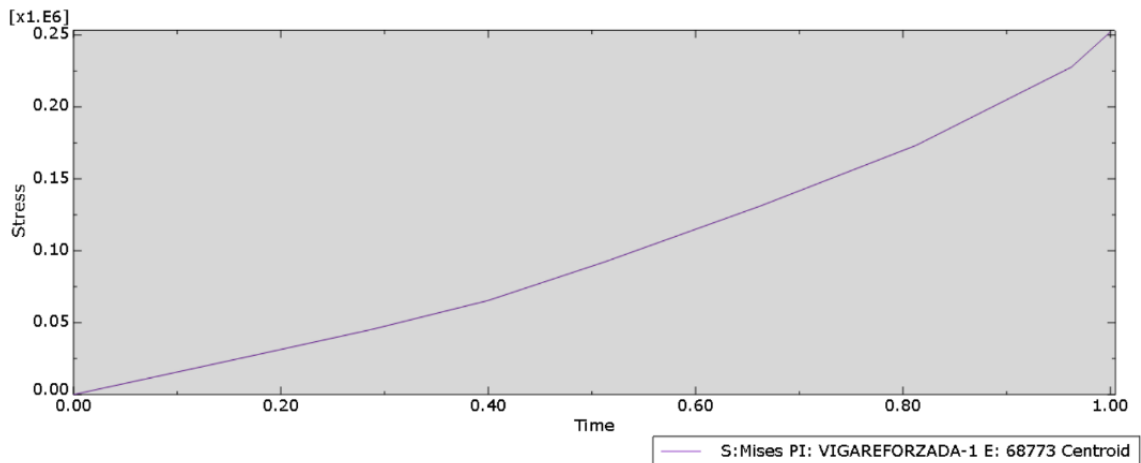


Figura 5.5.136. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de tejido de carbono.

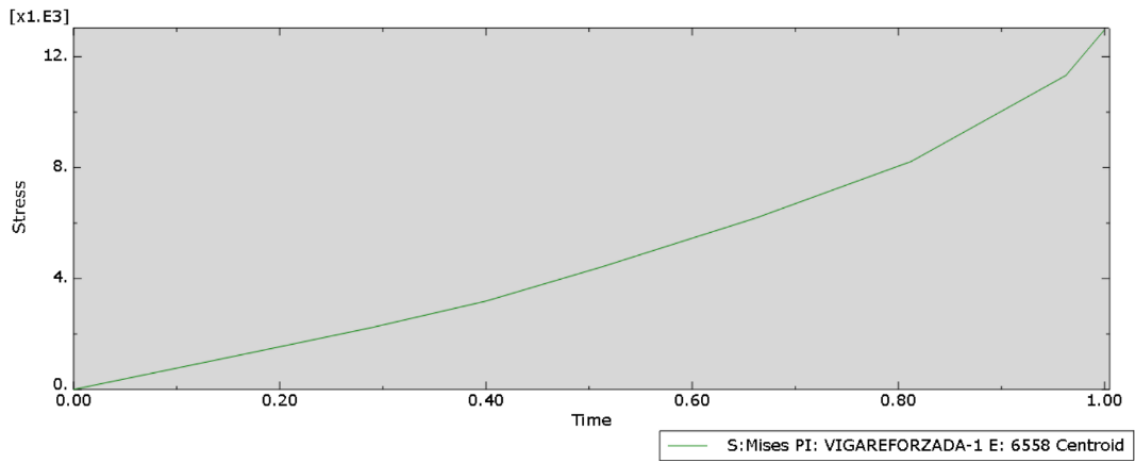


Figura 5.5.137. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo. de la viga reforzada con tejido de carbono

VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE BASALTO

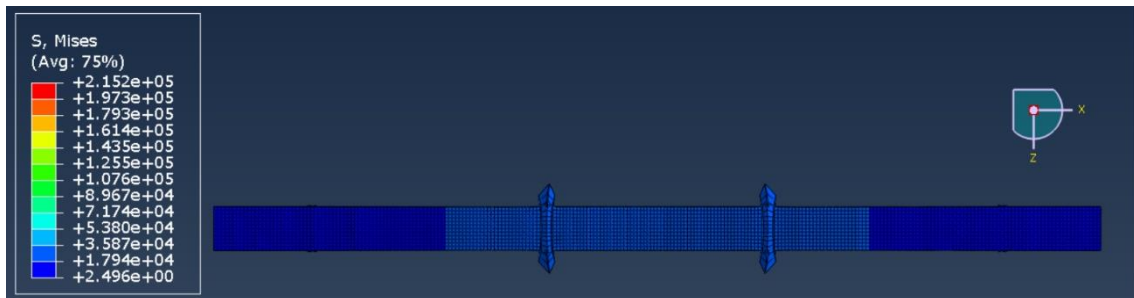


Figura 5.5.138. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

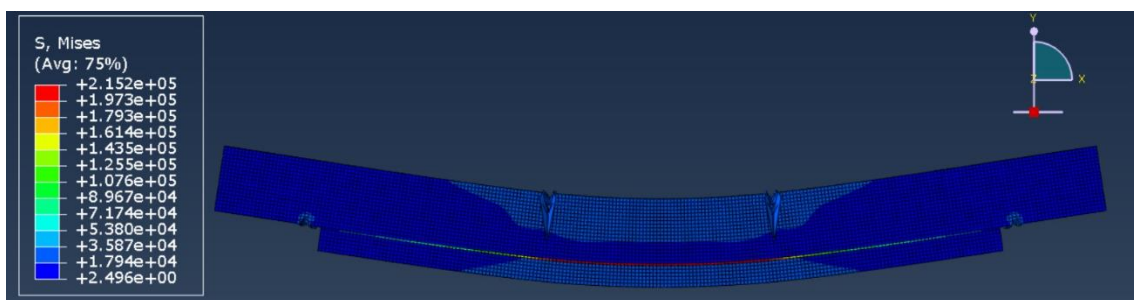


Figura 5.5.139. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto.

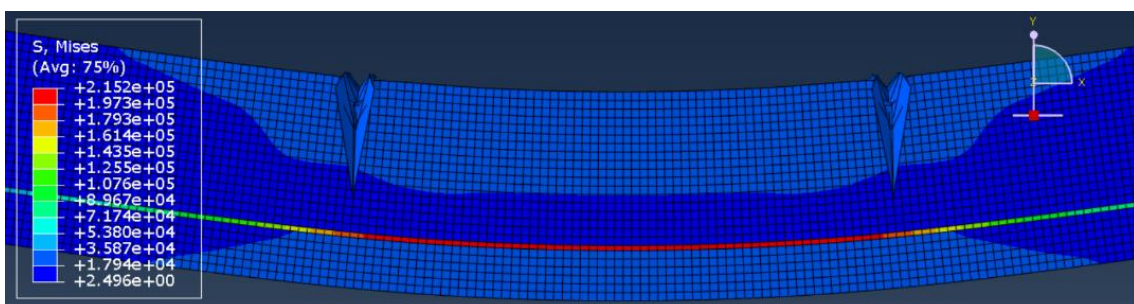


Figura 5.5.140. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto, zona ampliada.

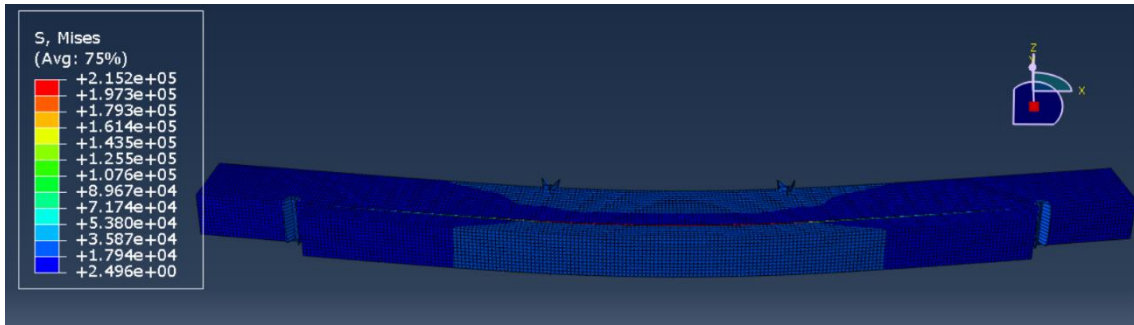


Figura 5.5.141. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de basalto.

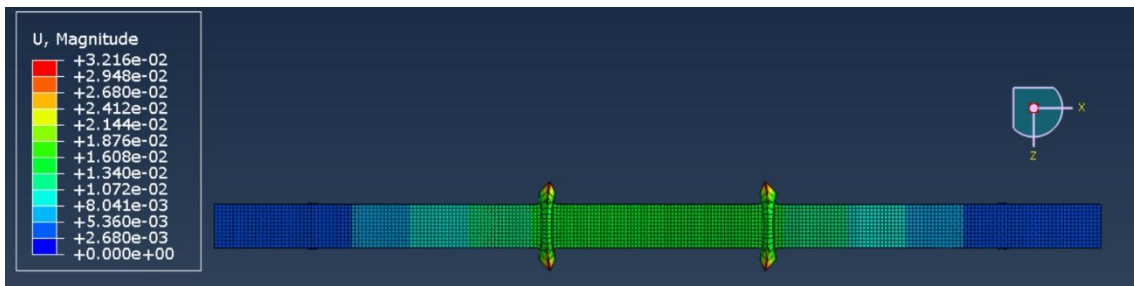


Figura 5.5.142. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con tejido de basalto.

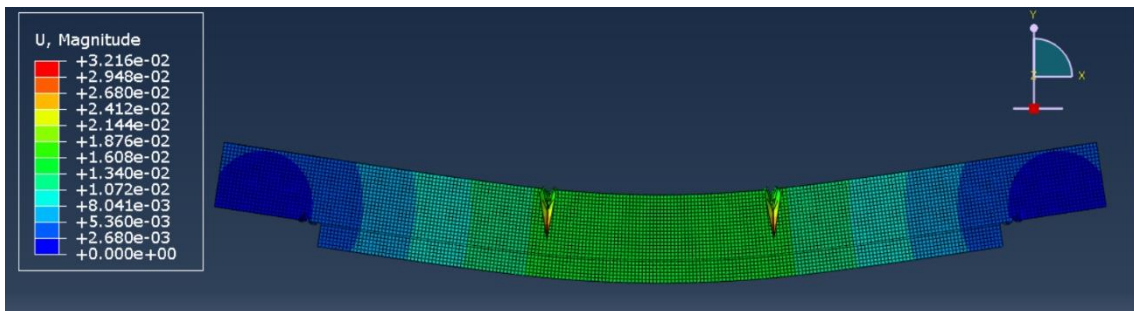


Figura 5.5.143. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con tejido de basalto.

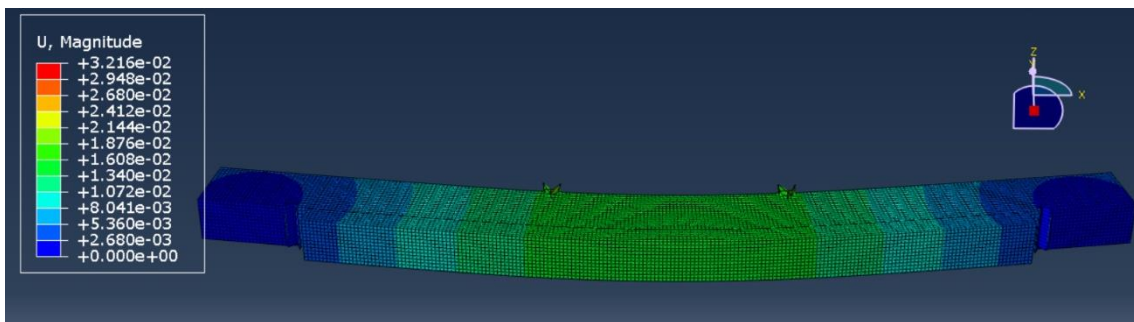


Figura 5.5.144. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con tejido de basalto.

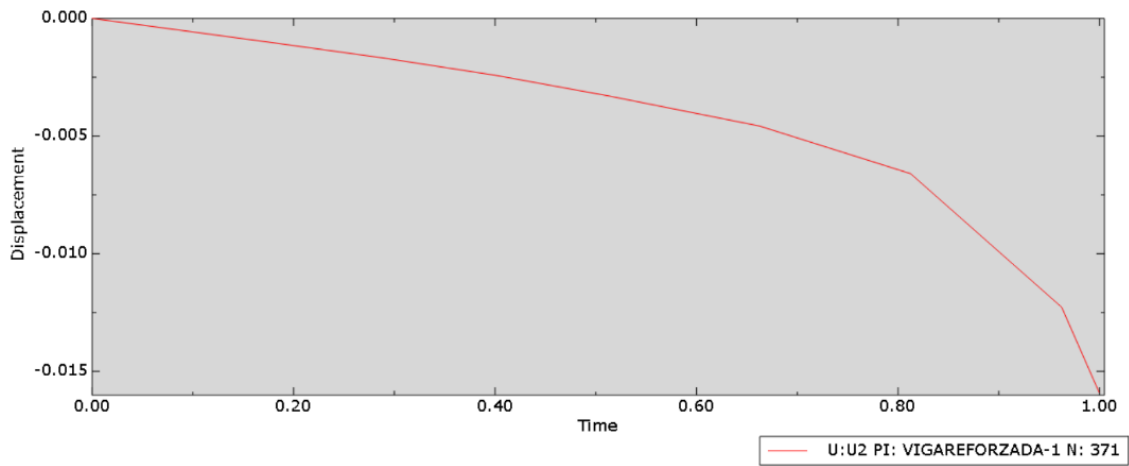


Figura 5.5.145. Desplazamiento-carga de la viga reforzada con tejido de basalto.

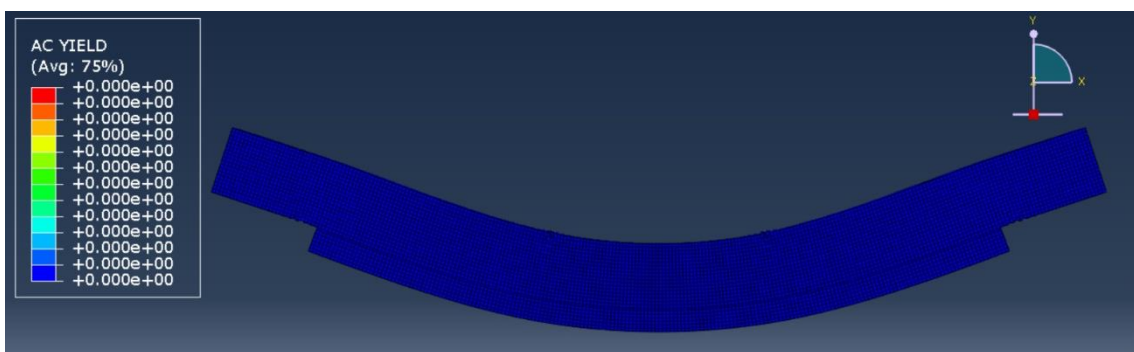


Figura 5.5.146. Plastificación de la viga reforzada con tejido de basalto, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

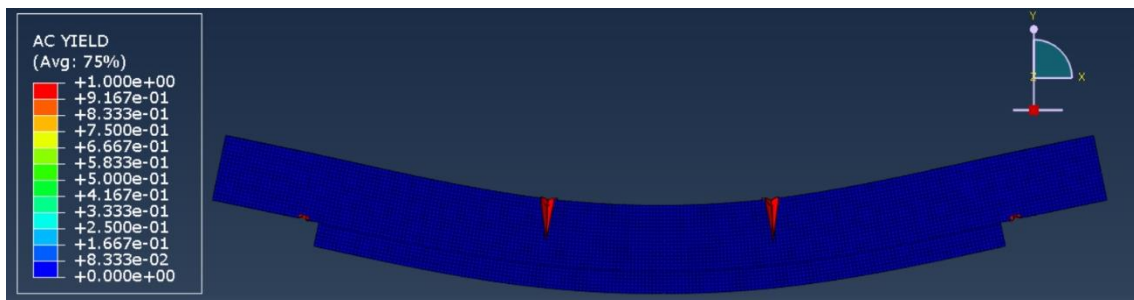


Figura 5.5.147. Plastificación de la viga reforzada con tejido de basalto, sexto paso: incremento 0,5125.

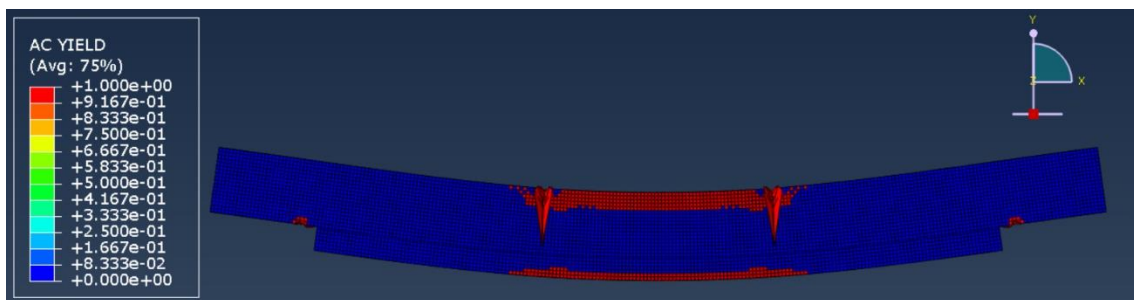


Figura 5.5.148. Plastificación de la viga reforzada con tejido de basalto, octavo paso: incremento 0,8125.

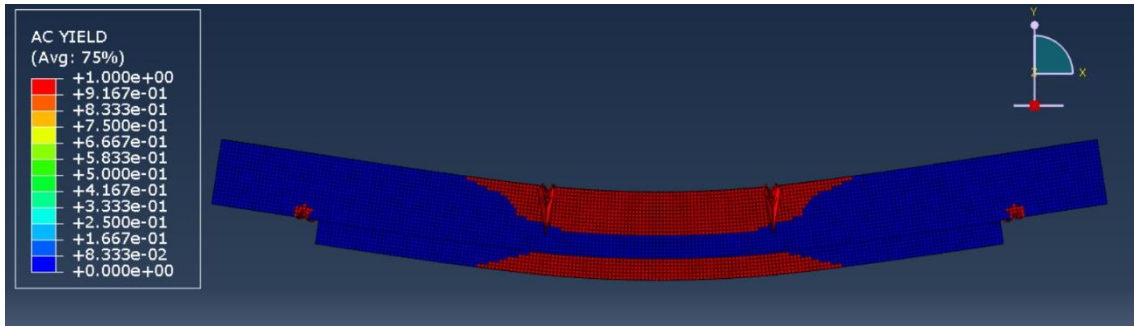


Figura 5.5.149. Plastificación de la viga reforzada con tejido de basalto, decimo paso: incremento 1.

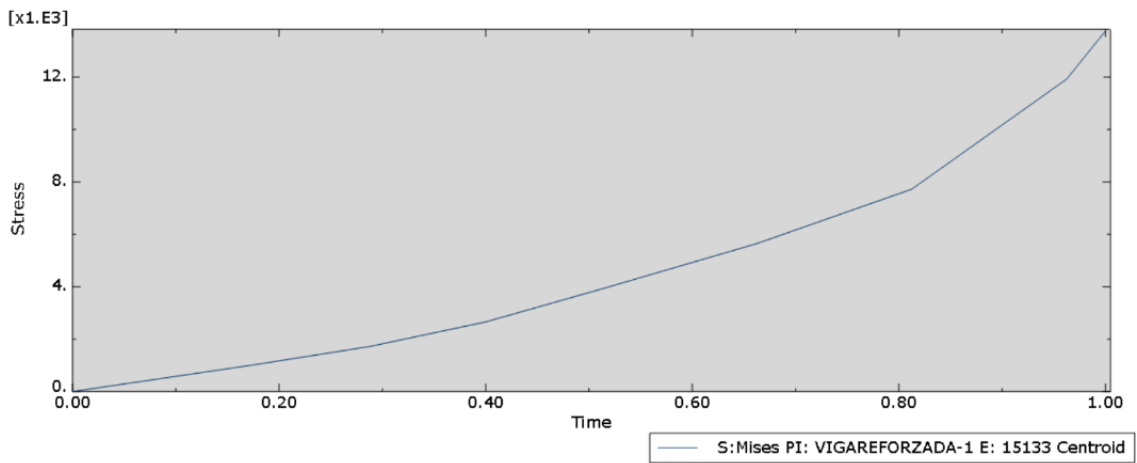


Figura 5.5.150. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de pino de la viga reforzada con tejido de basalto.

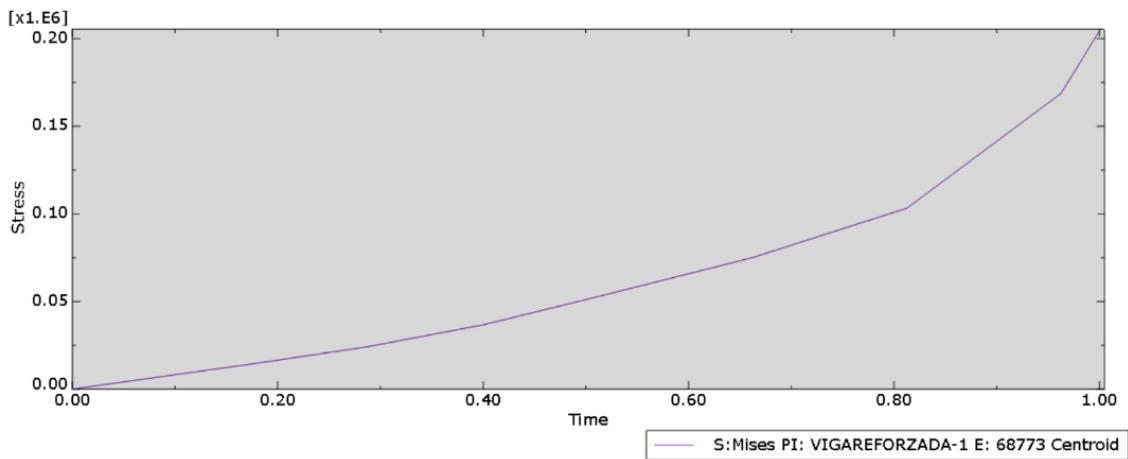


Figura 5.5.151. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de tejido de basalto de la viga reforzada con tejido de basalto.

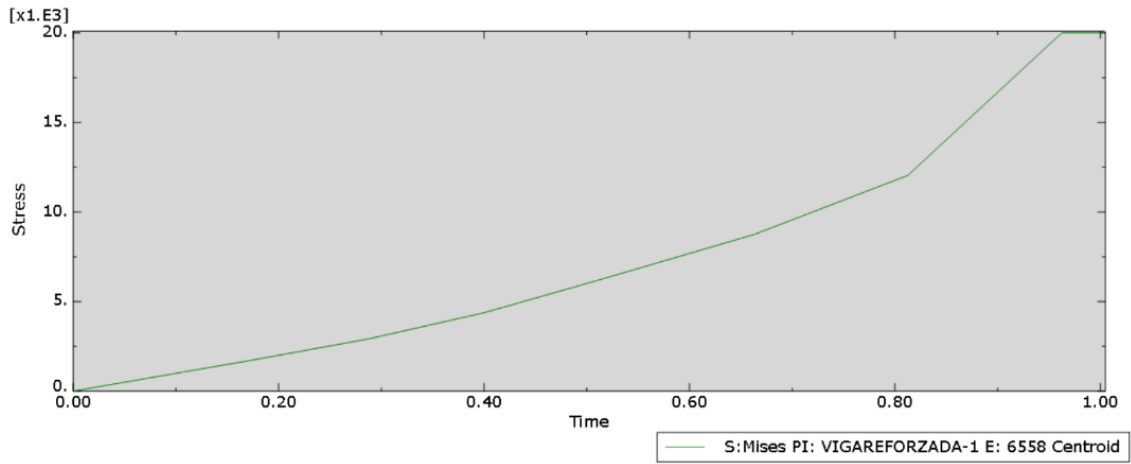


Figura 5.5.152. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chopo de la viga reforzada con tejido de basalto.

VIGA REFORZADA CON LAMINADO DE CARBONO

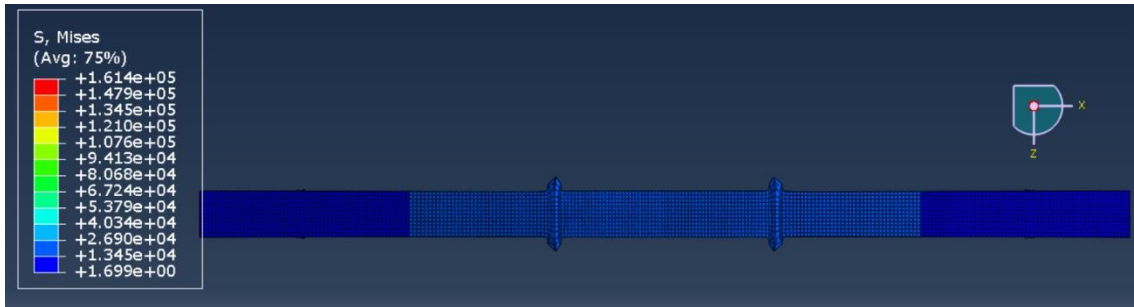


Figura 5.5.153. Tensiones en la cara superior de la viga reforzada con laminado de carbono.

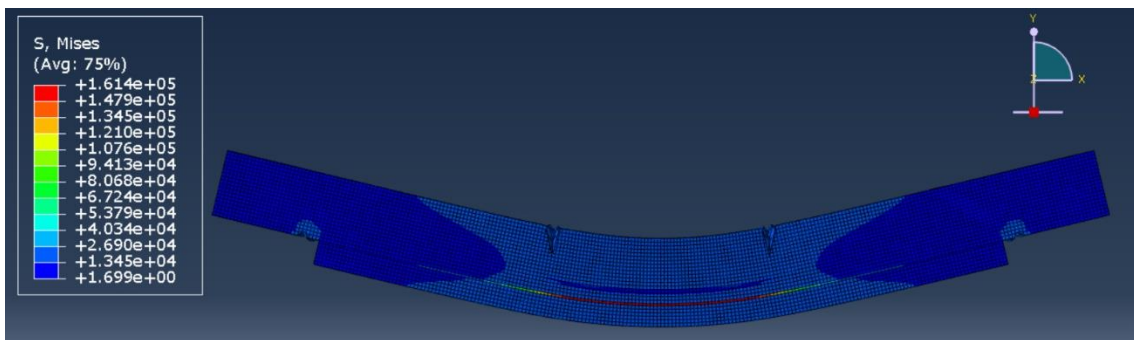


Figura 5.5.154. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono.

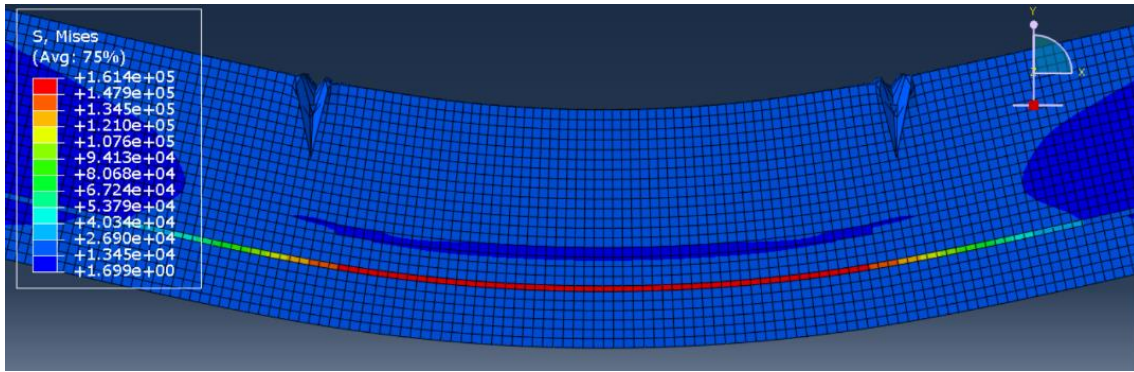


Figura 5.5.155. Tensiones en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono, zona ampliada.

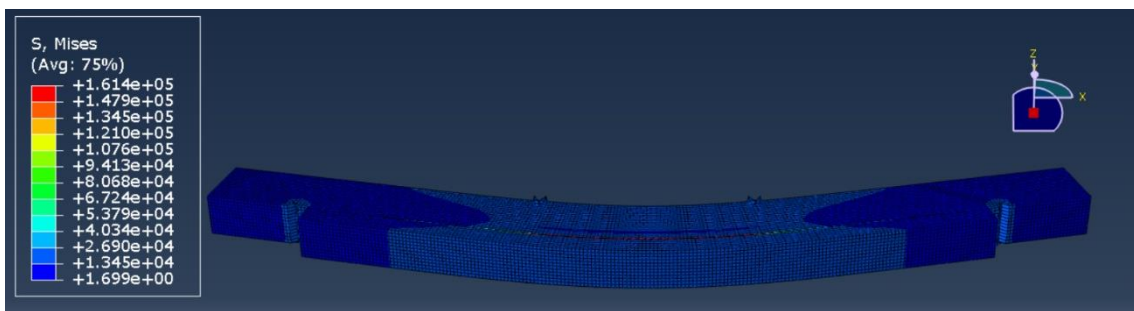


Figura 5.5.156. Tensiones en la cara inferior de la viga reforzada con laminado de carbono.

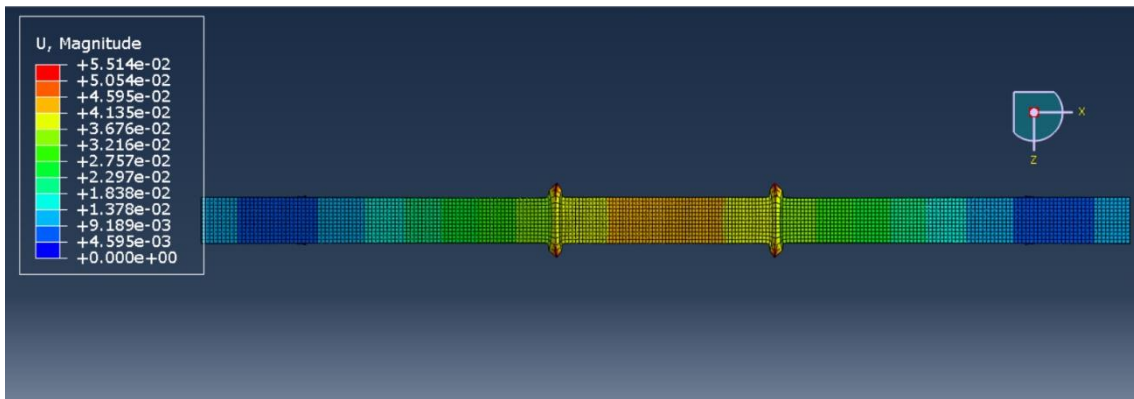


Figura 5.5.157. Desplazamiento en la cara superior de la viga reforzada con laminado de carbono.

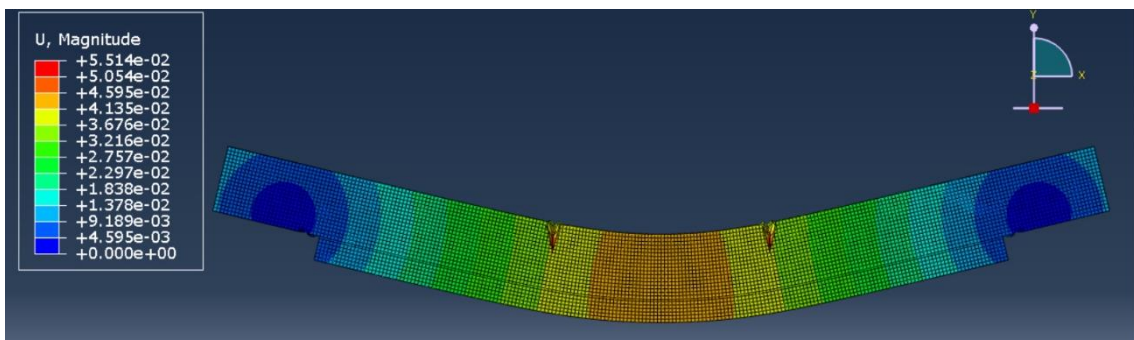


Figura 5.5.158. Desplazamiento en la cara frontal de la viga reforzada con laminado de carbono.

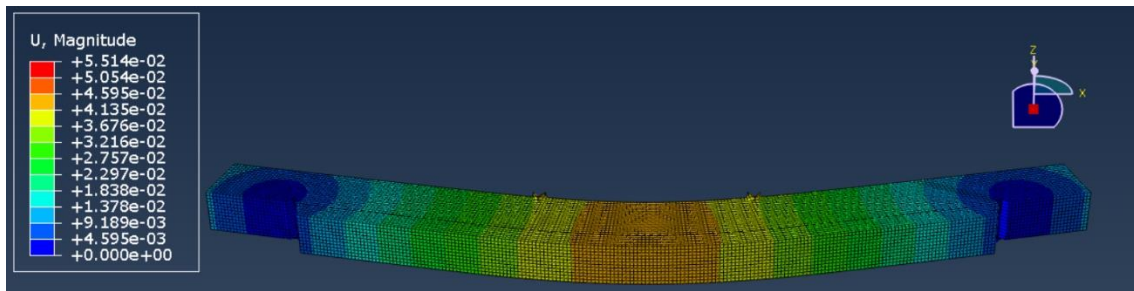


Figura 5.5.159. Desplazamiento en la cara inferior de la viga reforzada con laminado de carbono.

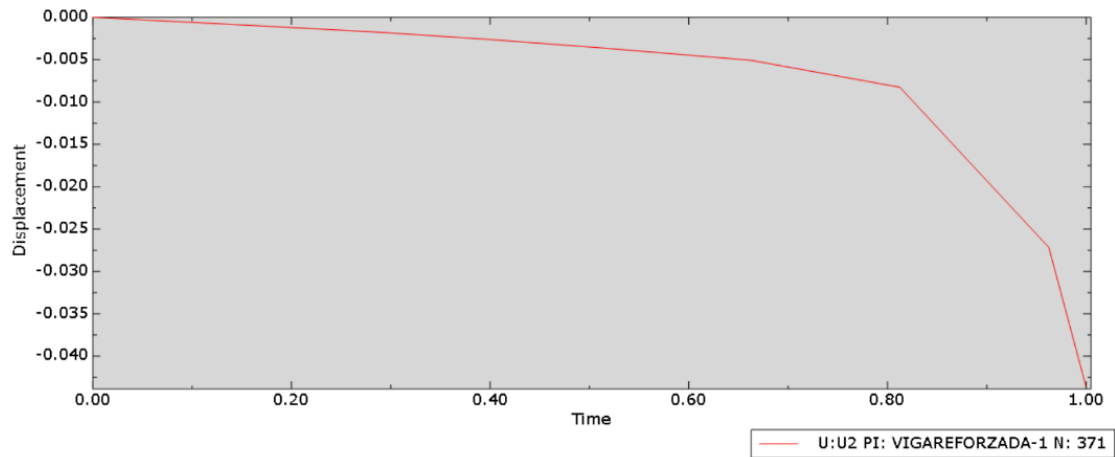


Figura 5.5.160. Desplazamiento-carga de la viga reforzada con laminado de carbono.

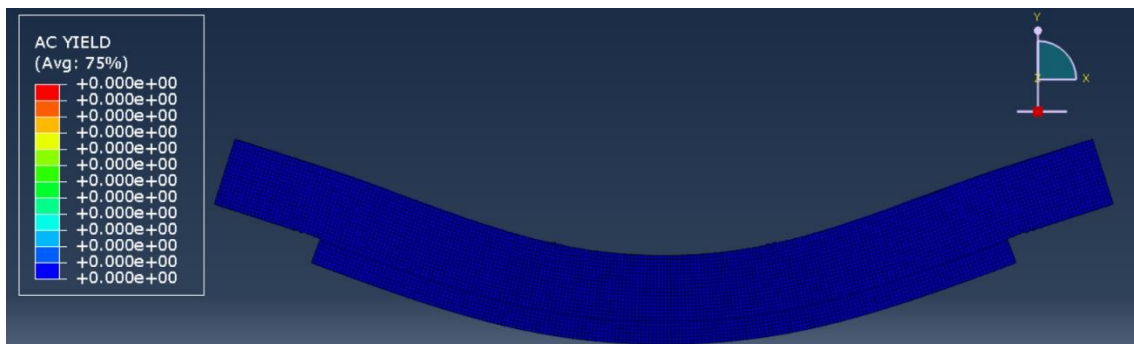


Figura 5.5.161. Plastificación de la viga reforzada con laminado de carbono, primer paso: sin incremento, por tanto, sin carga.

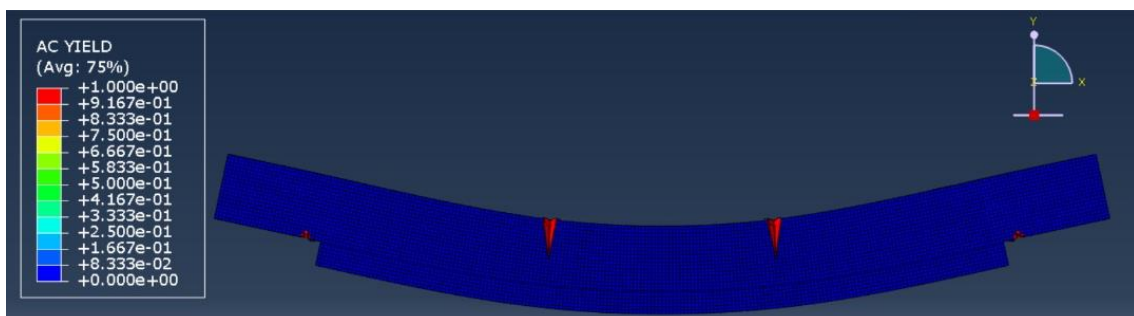


Figura 5.5.162. Plastificación de la viga reforzada con laminado de carbono, sexto paso: incremento 0,5125.

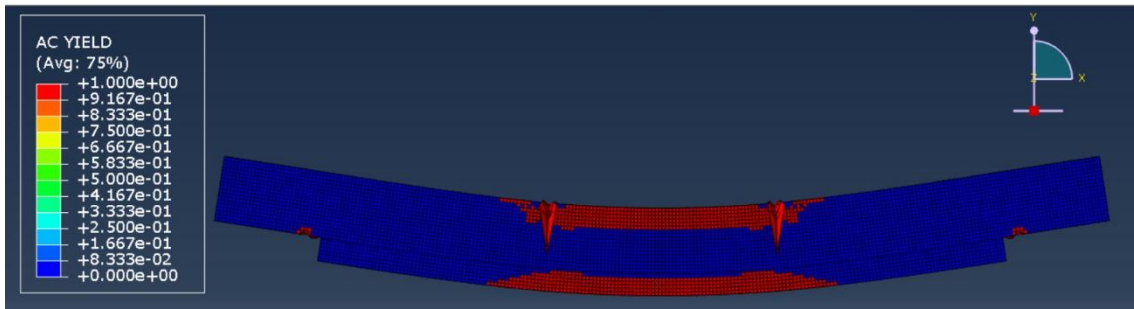


Figura 5.5.163. Plastificación de la viga reforzada con laminado de carbono, octavo paso: incremento 0,8125.

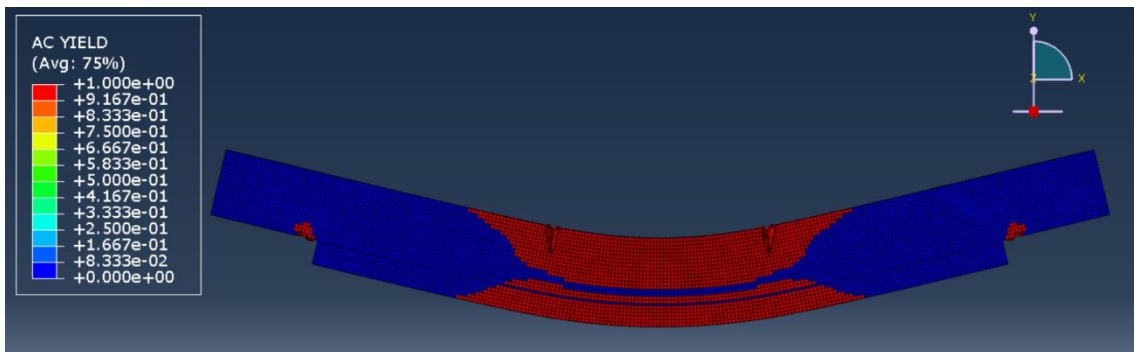


Figura 5.5.164. Plastificación de la viga reforzada con laminado de carbono, decimo paso: incremento 1.

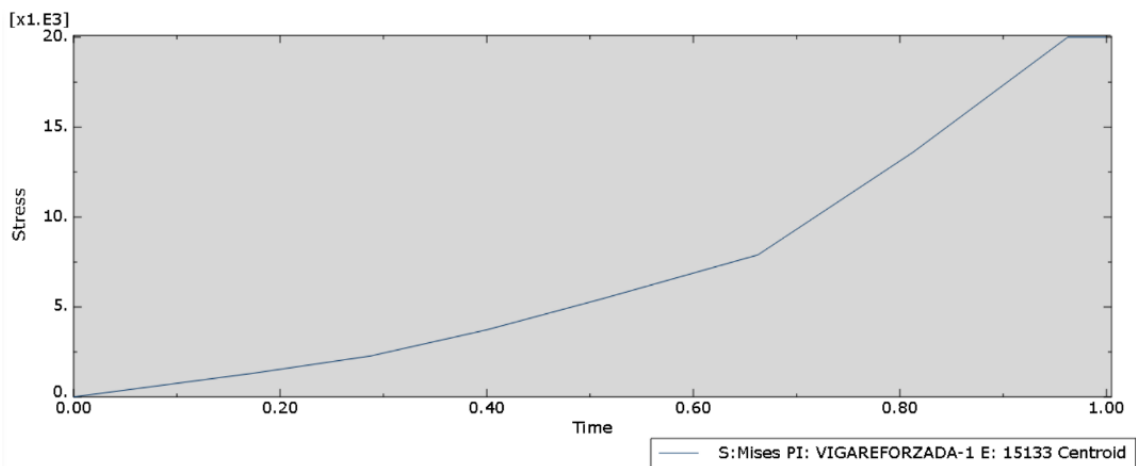


Figura 5.5.165. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de pino de la viga reforzada con laminado de carbono.

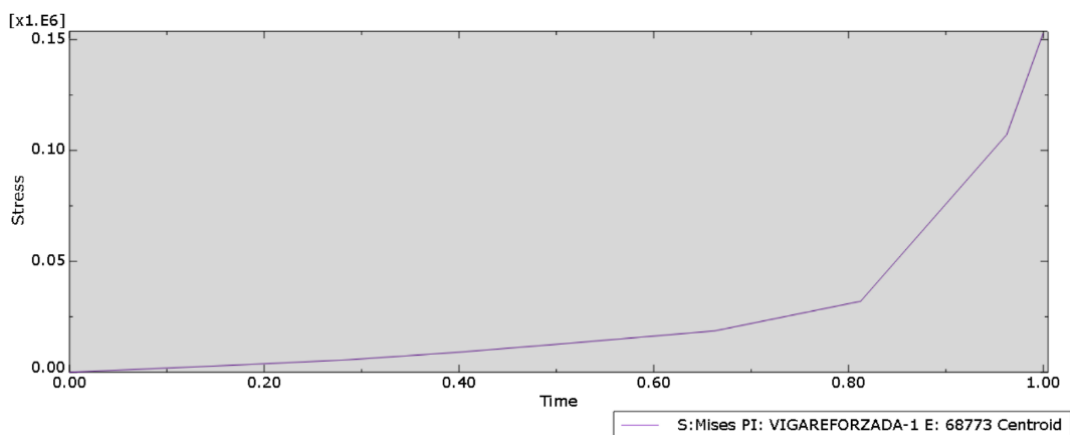


Figura 5.5.166. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de laminado de carbono.

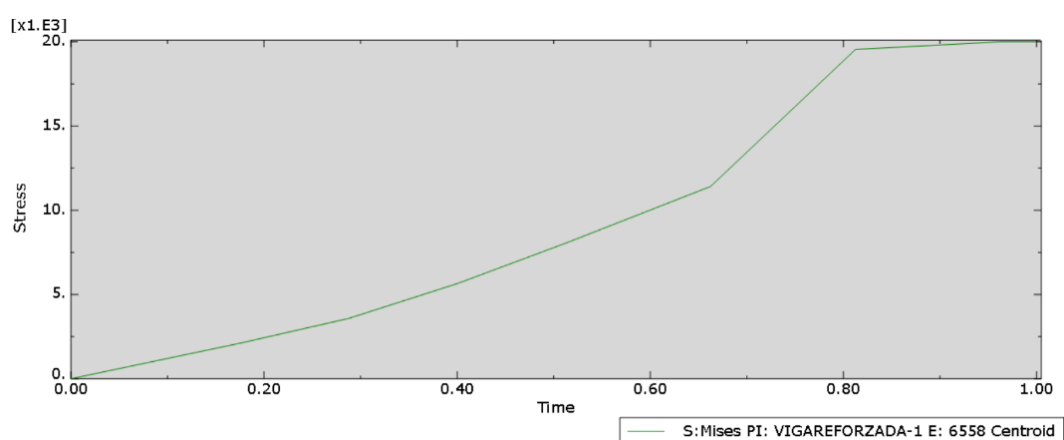


Figura 5.5.167. Evolución de la tensión con la carga de un elemento de chocho de la viga reforzada con laminado de carbono.

La tabla 5.5.5. recoge los resultados obtenidos en la simulación numérica de la viga reforzada. Las propiedades mecánicas de los cuatro tipos de vigas son similares, excepto en el caso que carece de composite. La viga reforzada solo con chocho plastifica prácticamente toda la zona central y por tanto los desplazamientos son desmesurados, más de lo posible en la realidad.

ESFUERZO		VIGA REFORZADA CON CHOPO	VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE CARBONO	VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE BASALTO	VIGA REFORZADA CON LAMINADO DE CARBONO
TENSIÓN	Cara superior	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²
	Refuerzo	-	$2,5 \cdot 10^5$ kN/m ²	$2,1 \cdot 10^5$ kN/m ²	$1,6 \cdot 10^5$ kN/m ²
	Cara inferior	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²	$2 \cdot 10^4$ kN/m ²
DESPLAZAMIENTO		1,2 m	10^{-2} m	$1,5 \cdot 10^{-2}$ m	$4,5 \cdot 10^{-2}$ m

Tabla 5.5.5. Comparativa de los resultados del cálculo plástico de la simulación numérica de las vigas reforzadas.

La tabla 5.5.6. muestra el módulo elástico del chopo de las cuatro vigas reforzadas. El MOE varía respecto al chopo y el pino debido al refuerzo, en todos los casos es superior, pero la diferencia es especialmente acusada en las vigas reforzadas con tejido.

VIGA	MOE
VIGA REFORZADA CON CHOPO	8.974,75 MPa
VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE CARBONO	10.711,88 MPa
VIGA REFORZADA CON TEJIDO DE BASALTO	9.870,58 MPa
VIGA REFORZADA CON LAMINADO DE CARBONO	8.865,04 MPa

Tabla 5.5.6. Comparativa de módulo elástico del chopo inferior obtenido de la simulación.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo se centra en dos aspectos relacionados con el chopo, por un lado en la caracterización mecánica de madera de chopo del clon I-214, y por otro, en la mejora de la capacidad resistente de vigas añadiendo chopo y un composite. Las conclusiones, lógicamente, se encuentran agrupadas según pertenezcan a una u otra parte.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MADERA DE CHOPO DEL CLON I-214

- Las podas son muy importantes durante el crecimiento, una buena gestión de las plantaciones asegura la calidad de la madera. En este caso el número de rechazos obtenidos rondaba el 5% según la clasificación visual, siendo de ningún rechazo según las propiedades mecánicas obtenidas con el ensayo a flexión.
- Las normas de clasificación visual utilizadas no son adecuadas, sobre estima la clase resistente en la mayoría de casos. Según la clasificación visual más del 64% eran C24, mientras que según el ensayo a flexión solo eran el 3%.
- La propiedad mecánica obtenida con el ensayo destructivo más restrictiva es la rigidez (MOE), es quien condiciona la clase resistente en el 87% de los casos. La clase resistente obtenida según la resistencia varía entre C27 y C50, mientras que la obtenida según la rigidez lo hace entre C14 y C35.
- El ensayo de vibraciones infraclasifica las vigas ligeramente, el $MOE_{dinámico}$ obtenido con el ensayo no destructivo es menor que el $MOE_{estático}$ obtenido con el ensayo destructivo. Si comparamos la clase resistente obtenida según ambos MOE, el 44% de la vigas obtienen la misma clasificación.

MEJORA DE LA CAPACIDAD RESISTENTE

- Las vigas formadas por dos capas de madera y un refuerzo en medio, siendo indiferente si ambas capas son de chopo o una de pino y otra de chopo, tienen el mismo patrón de comportamiento. En todas las vigas los esfuerzos se reparten similarmente, el valor es el que depende de los materiales que la forman. Las tensiones no se reparten de manera uniforme entre las tres capas de la viga, el material que tiene más capacidad es el que más soporta. La deformación si se

reparte de manera más uniforme, la máxima se encuentra en los apoyos de la viga y en la zona central.

- El tejido de carbono es el que tiene mejor comportamiento tanto en las vigas compuestas como reforzadas, sigue el mismo comportamiento que los otros, pero tiene un módulo de rigidez superior.
- Existe una gran diferencia entre las vigas reforzadas con composite y la viga reforzada solo con chopo. El impacto del FRP es muy alto, si nos fijamos en el cálculo plástico con la misma carga, la viga reforzada solo con chopo tendría una flecha superior a un metro (algo imposible), mientras que en el caso de las reforzadas rondarían los 15 cm.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Basterra, L.A.; Acuña, L.; Morillas, L.M.; Balmori, J.A.; López, G.; Díez, R.; Hermoso, E.; Ramón, G.; Casado, M. En *Vigas dúo de madera de Populus reforzadas*, II Simposio del chopo, **2018**, 275-284.
- Basterra, L.A.; Balmori, J.A.; Morillas, L.; Acuña, L.; Casado, M. Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. *Construction and Building Materials*. **2017**, *154*, 914-920.
- Casado, M.; Acuña, L.; Basterra, A.; Ramón, G.; Vecilla, D. Grading of structural timber of *Populus x euramericana* clone "I-214". *Holzforschung*. **2012**, *66*, 633-638.
- Casado, M.; Acuña, L.; Relea, E.; Basterra, A.; Ramón, G.; López, G. Structural timber classification of *Populus x euramericana* "I-214". *ResearchGate*. **2009**.
- Castro, C. Aplicaciones del chopo en la construcción. *ASORA*. **2008**.
- De la Cruz Calleja, A. Dinámica de nutrientes en parcelas experimentales de *Populus x euramericana* (Dode) Guiner "I-214". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Agrónomos, **2005**.
- Fiorelli, J.; Alves Dias, A. Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. *Materials Research*. **2003**, *6*, 193-202.
- García, I. In *Consumo de chopo por la industria en España: evolución y necesidades futuras*, II Simposio del chopo, **2018**.
- Gianni, F. In *Bases de la populicultura mediterránea*, II Simposio del chopo, **2018**
- Raftery, G.M.; Harte, A.M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites: Part B*. **2011**, 724-735.
- Rescalvo, F.J. Refuerzo de fibra de carbono para rehabilitación de vigas de madera. Modelos analíticos, ensayos experimentales y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, E.T.S. de Ingeniería de Edificación, **2018**.
- Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*. **2018**, 29-38.

- Rodríguez, F.; Blanco, R. In *Comparación de curvas de crecimiento en tres clones de chopo*, 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa, **2003**.
- Rueda, J.; García Caballero, J.L. In *Clones de chopos para el valle del Ebro en Navarra*, Jornada Forestal El Chopo, Junta de Castilla y León. **2017**.
- Rueda, J.; Pradó, A.; Grau, J.M.; Sixto, H.; Villar, C.; García Caballero, J.L.; Martínez Sierra, F. Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base, *Junta de Castilla y León*. **2016**.
- Subhani, M.; Globa, A.; Al-Ameri, R.; Moloney, J. Flexural strengthening of LVL beam using CFRP. *Construction and Building Materials*. **2017**, *150*, 480-489.