

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Estudio comparativo del comportamiento a cortante de una viga de hormigón armado reforzada con fibras incluyendo su comportamiento plástico.

Autor: Ana Carmona Arrebola

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

**Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Estudio comparativo del comportamiento a cortante de una viga de hormigón armado reforzada con fibras incluyendo su comportamiento plástico.

Autor:

Ana Carmona Arrebola

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor titular

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Estudio comparativo del comportamiento a cortante de una viga de hormigón armado reforzada con fibras incluyendo su comportamiento plástico.

Autor: Ana Carmona Arrebola

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El hormigón reforzado con fibra de acero es un material que se está desarrollando de manera considerable en los últimos años. Es necesario la obtención de modelos fiables que permitan obtener las leyes de comportamiento que rigen el material tanto a nivel microscópico como macroscópico.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una aplicación informática en un programa de elementos finitos que permita testear el comportamiento de piezas macroscópicas sin necesidad de realizar ensayo en el laboratorio. Para la definición de la misma, nos basamos en los resultados experimentales de ensayos realizados, comprobando la adecuación del material elegido para modelizar el comportamiento elastoplástico del hormigón reforzado con fibra. Posteriormente se desarrolla la herramienta correspondiente al modelo de estudio con los hormigones de alta resistencia ensayados en el Laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de La Universidad de Sevilla, obteniendo el comportamiento a cortante.

Índice

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
Índice de Gráficas	xvi
1 Introducción	1
2 Comportamiento del hormigón reforzado con fibra de acero	3
2.1. <i>Comportamiento en fractura</i>	4
2.1.1 Tracción	4
2.1.2 Compresión	5
2.2. <i>Concrete Damage Plasticity</i>	6
3 Modelo auxiliar	9
3.1 <i>Propiedades y geometría</i>	9
3.2 <i>Modelización de los elementos</i>	11
3.2.1 Viga	11
3.2.2 Armadura	15
3.2.3 Puntos de apoyo y aplicación de carga	17
3.3 <i>Definición de la malla y elementos de integración</i>	20
3.4 <i>Pasos de carga y variables a extraer</i>	20
3.5 <i>Ensayos a realizar</i>	22
3.6 <i>Conclusiones</i>	28

4	Aplicación de los hormigones ensayados	30
4.1	<i>Propiedades y geometría</i>	30
4.2	<i>Modelización de los elementos</i>	31
4.2.1	Armadura	35
4.2.2	Puntos de apoyo, aplicación de carga y mallado del modelo.	38
4.3	<i>Pasos de carga y variables a extraer</i>	40
4.4	<i>Ensayos a realizar</i>	40
4.4.1	Estudio sin armadura	40
4.4.2	Estudio con armadura	42
4.5	<i>Conclusiones</i>	43
5	Conclusiones	45
6	Estudios futuros	46
	Bibliografía	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón.	10
Tabla 2. Propiedades elásticas de HMP.	11
Tabla 3. Propiedades plásticas de HMP.	11
Tabla 4. Comportamiento a compresión de HMP.	13
Tabla 5. Comportamiento a tracción HMP.	14
Tabla 6. Comportamiento elástico y plástico del acero.	16
Tabla 7. Propiedades elásticas de HME	19
Tabla 8. Valores teóricos de cortante.	23
Tabla 9. Comportamiento a tracción con diferentes longitudes características.	24
Tabla 10. Resultados en carga del ensayo B25-10-450-50 con lc 77.159.	25
Tabla 11. Resultados en desplazamientos del ensayo B25-10-450 con lc 77.159.	25
Tabla 12. Resultados del refinamiento de la malla.	28
Tabla 13. Propiedades mecánicas de los hormigones DO, DL, DS, DSL.	30
Tabla 14. Propiedades elásticas de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	32
Tabla 15. Propiedades plásticas de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	32
Tabla 16. Comportamiento a compresión de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	33
Tabla 17. Comportamiento tracción - deformación de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	34
Tabla 18. Comportamiento elástico y plástico del acero empleado para los cercos.	36
Tabla 19. Comportamiento elástico y plástico de la armadura empleada para el armado longitudinal.	37
Tabla 20. Valores máximos de cortante del ensayo DX-0-0-50.	42
Tabla 21. Comparativa de valores máximos de cortante con diferentes leyes de comportamiento.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto cosido de las fibras.	4
Figura 2. Comportamiento a tracción del hormigón.	5
Figura 3. Comportamiento a compresión del hormigón.	6
Figura 4. Curvas uniaxiales tensión- deformación plástica: a) tensión; b) compresión	7
Figura 5. Curva tensión – apertura de grieta utilizada por Abaqus en tracción.	7
Figura 6. Curva tensión – deformación plástica utilizada por Abaqus en compresión.	8
Figura 7. Ley de comportamiento a compresión.	8
Figura 8. Ley de comportamiento a tracción.	8
Figura 9. Dimensiones de la viga modelo auxiliar.	10
Figura 10. Geometría de la viga con condición de simetría.	11
Figura 11. Condición de simetría en la viga.	15
Figura 12. Disposición de la armadura en el modelo auxiliar.	16
Figura 13. Condición de simetría en el armado.	17
Figura 14. Apoyos del modelo auxiliar.	18
Figura 15. Condición de apoyo y desplazamiento.	18
Figura 16. Aplicación del control en desplazamiento.	19
Figura 17. Interacción viga – armadura – apoyos.	19
Figura 18. Mallado del modelo.	20
Figura 19. Condiciones de contorno en el paso inicial.	21
Figura 20. Condiciones de contorno del paso final.	21
Figura 21. . Listado de variables a extraer.	22
Figura 22. Ley de comportamiento a cortante del artículo.	22
Figura 23. Deformaciones plásticas del modelo auxiliar.	28
Figura 24. Geometría de la viga.	31
Figura 25. Geometría de la viga modelada en abaqus.	31
Figura 26. Viga del modelo con condiciones de contorno aplicadas.	35
Figura 27. Armadura del modelo.	35
Figura 28. Condición de interacción armadura – viga aplicada a la armadura.	37
Figura 29. Condición de simetría aplicada a la armadura.	38
Figura 30. Geometría de los apoyos.	38

Figura 31. Restricciones de interacción viga – apoyos.	39
Figura 32. Mallado del modelo con malla 50 x 50.	39

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.	Comportamiento compresión – deformación inelástica HMP.	13
Gráfica 2.	Comportamiento tracción – apertura de grieta HMP	15
Gráfica 3.	Comportamiento tracción – deformación inelástica del acero.	17
Gráfica 4.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 1 mm.	23
Gráfica 5.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 1, 10,100, 1000 mm.	25
Gráfica 6.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 77.159 mm.	26
Gráfica 7.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 10, 77.159, 100 mm.	26
Gráfica 8.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 77.159 mm. Comparado con datos del artículo de referencia.	27
Gráfica 9.	Comportamiento cortante – desplazamiento máximo modelos B-25-10-450, B-25-6-450.	27
Gráfica 10.	Comportamiento compresión – deformación inelastica de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	33
Gráfica 11.	Comportamiento tracción – deformación inelastica de los hormigones DO, DS, DL, DSL.	34
Gráfica 12.	Comportamiento tracción – deformación inelástica del acero empleado para los cercos.	36
Gráfica 13.	Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-0-0-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.	41
Gráfica 14.	Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-0-0-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.	41
Gráfica 15.	Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-10-450-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.	42
Gráfica 16.	Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-10-450-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.	43
Gráfica 17.	Comparación de la ley de comportamiento a cortante con leyes de comportamiento σ - ϵ y energía de fractura para los modelos DX-0-0-50-60.	47
Gráfica 18.	Comparación de la ley de comportamiento a cortante con leyes de comportamiento σ - ϵ y energía de fractura para los modelos DX-0-0-50-60.	47

1 INTRODUCCIÓN

EL objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta numérica mediante un programa de elementos finitos que sea capaz de testear el comportamiento macroscópico de un determinado material. Son numerosos los materiales que se desarrollan a nivel experimental mediante el ensayo de probetas de tamaño reducido. A través del desarrollo de esta herramienta, se plantea un avance tanto a nivel económico y de tiempo, haciendo posible obtener el comportamiento en piezas de gran tamaño sin necesidad de hacer un ensayo previo en el laboratorio. En este caso se busca definir el comportamiento a cortante de una viga de hormigón armado reforzado con fibra de acero de dimensiones $7 \times 1 \times 0.2$ m.

Son numerosos los ensayos a los que se someten los materiales para determinar sus características mecánicas. La definición de un nuevo material se realiza a través del ensayo de probetas normalizadas. Sin embargo, en materiales no homogéneos, como el hormigón, existen determinadas propiedades y comportamientos que no se pueden cuantificar en las probetas de tamaño reducido. Estas propiedades pueden cuantificarse al ensayar en el laboratorio piezas de mayor tamaño. Uno de los esfuerzos que sufre mayor variación según el tamaño de la geometría de la pieza es el cortante. Sin embargo, el ensayo de estas piezas puede resultar bastante laborioso a nivel de montaje como a nivel económico y requiere un gran tiempo para la elaboración de la viga de ensayo, tiempo de fraguado, etc. Por tanto, resultaría de gran interés el desarrollo de una herramienta informática que permitiera obtener la ley de comportamiento del material para una determinada geometría de mayor tamaño.

Para la definición de la herramienta se propone utilizar el programa de elementos finitos Abaqus. Se elige este programa por ser de propósito general y por su elevada comercialización en el ámbito ingenieril. Abaqus permite resolver problemas de mecánica del sólido, lineal y no lineal, tanto en régimen estático y dinámico. Además cuenta con una amplia librería de elementos que permiten modelizar el comportamiento elastoplástico de los materiales. También permite el estudio de la influencia de la temperatura, análisis piezoeléctrico, de transmisión de calor, de fluidos.

En primer lugar, se tratará de implementar en Abaqus los resultados de un artículo [1] publicado por la Universidad de Nueva Gales del Sur, de Australia, publicado en el "Fib Bulletin 79". El artículo presenta los resultados obtenidos en el ensayo de una viga de dimensiones similares a la viga bajo estudio. Se ha realizado un ensayo a cortante en dos puntos en el laboratorio. Posteriormente se realizan los cálculos del ensayo en el programa Atena, programa de elementos finitos, de manera que se obtiene la ley de comportamiento a cortante experimental y en elementos finitos. El objetivo de reproducir este modelo en Abaqus, buscando obtener una ley de comportamiento lo más parecida posible, es verificar la adecuación del material que se utilice para modelizar el hormigón reforzado con fibra. El material a utilizar es Concrete Damaged Plasticity.

Una vez verificada la adecuación del material, se procede al ensayo del modelo bajo estudio, implementando las características mecánicas de los hormigones de alta resistencia desarrollados en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Las propiedades vienen definidas en el artículo [2] “Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography” publicado por José D. Ríos, Carlos Leiva, M.P. Ariza, Stanislav Seitl y Héctor Cifuentes. Se aplica un ensayo a cortante a una viga de dimensiones 7 x 1 x 0.2m. Una vez obtenida la ley de comportamiento a cortante, quedará definida la herramienta informática.

2 COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE ACERO

EL hormigón como elemento estructural ha sido utilizado desde la antigüedad, por ser un material que resiste bien las compresiones, sin embargo, su escasa resistencia a tracción ha hecho que la mezcla sea susceptible de reforzar su comportamiento a tracción con cualquier material. Tradicionalmente se ha utilizado la armadura de barras de acero para conseguir este fin.

En los últimos años, la evolución tecnológica en este ámbito es destacable. Se buscan nuevos métodos para mejorar la resistencia a tracción reduciendo el canto de las secciones de diseño. Para ello, son numerosos los tipos de fibra que se utilizan para obtener un mejor comportamiento a tracción. Las más utilizadas son: fibras de acero, fibras de vidrio, fibras de polipropileno... Las fibras se pueden añadir a hormigones en masa, armados o pretensados.

Las fibras de acero son las más utilizadas para proporcionar mayor resistencia al hormigón. Además, también presentan beneficio económico. Los beneficios que se obtienen al introducir las fibras en la masa de hormigón se mencionan a continuación:

Aumenta la ductilidad del hormigón permitiendo la aparición de mayores deformaciones. La resistencia a compresión del hormigón no se ve alterada por la presencia de fibras. Las fibras comienzan a sufrir esfuerzos una vez se ha fisurado el hormigón. Al estar las fibras repartidas por toda la matriz, el efecto cosido mejora notablemente. El aumento de la resistencia a tracción se debe a esta mejora en el efecto cosido. También mejora el comportamiento frente a fisuración. Aumenta la tenacidad. Se reduce la deformación bajo cargas permanentes...

La mejora de estos factores mecánicos depende de la densidad de fibra en el hormigón (kg/m³). También cambiará el comportamiento en función del tipo de fibra, su forma, su longitud, orientación.

La clasificación de las fibras viene recogida en la EHE, y se establece en función de su longitud y diámetro. Se define también la longitud crítica de fibra y el tamaño mínimo de la misma.

Las fibras de acero se caracterizan por la esbeltez. La forma de las fibras influye en adherencia de estas a la masa de hormigón. Por último, la fibra viene determinada por la resistencia a tracción del acero. Fibras con elevada resistencia a tracción serán empleadas en el desarrollo de hormigones de alta resistencia.

2.1. Comportamiento en fractura

El uso de este material es bastante ventajoso. Para su correcta aplicación es importante conocer las leyes de comportamiento que rigen el material. Se debe definir su comportamiento a tracción y a compresión, así como elegir un modelo adecuado para reproducir este comportamiento en Abaqus.

Se han desarrollado numerosos modelos para el estudio del comportamiento en fractura del hormigón [3] [5]. El modelo desarrollado por Hillerborg en 1976 implicó un gran avance en este ámbito. Se introdujeron los conceptos de trabajo bajo fractura y longitud característica del material.

El modelo de grieta discreta supuso un avance para el desarrollo posterior del comportamiento de estos materiales en elementos finitos.

2.1.1 Tracción

Para el estudio del comportamiento **en tracción** se tiene en cuenta el ablandamiento que se produce una vez superado el valor de resistencia a tracción y el material se fisura. Al superarse dicho valor, la resistencia a tracción varía con el valor de apertura de grieta. La zona en la que se desarrolla el ablandamiento es la zona de proceso de fractura.

El ablandamiento del material se modela con la ley tensión – apertura de grieta. La importancia de tener en cuenta el comportamiento en fractura del material reside en el efecto cosido que ejercen los áridos en las micro fisuras generadas. Se desarrollan unas fuerzas cohesivas en la zona de proceso de fractura que favorecen el cierre de las microfisuras que se producen. Éste efecto se ve mejorado notablemente con la adición de fibras de acero.

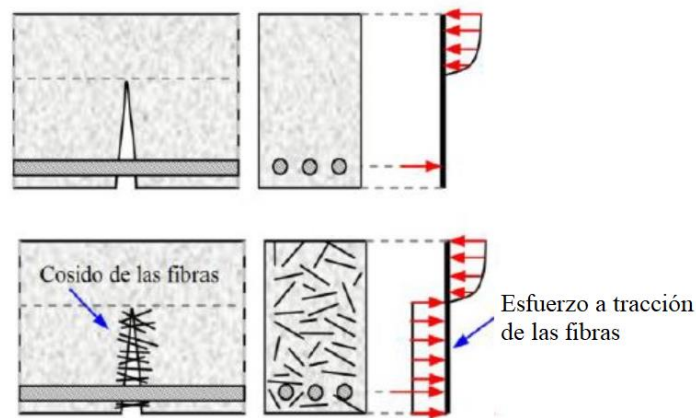


Figura 1. Efecto cosido de las fibras.

Considerando esta ley constitutiva del material se puede predecir el inicio de fisuración del material. El área bajo la curva corresponde a la energía de fractura del material.

El comportamiento en tracción estaría definido por una curva de las siguientes características:

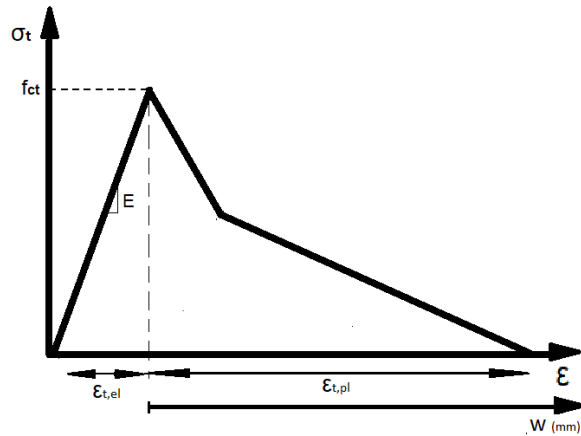


Figura 2. Comportamiento a tracción del hormigón.

El comportamiento a tracción tiene una primera parte elástica lineal hasta alcanzar f_{ct} . En este tramo las deformaciones producidas son elásticas. Una vez superado la resistencia a tracción se produce el fenómeno de ablandamiento descrito anteriormente. En este tramo las deformaciones producidas son inelásticas y están relacionadas con la apertura de grieta. Esta zona se modela con un comportamiento bilineal. La determinación de la misma se realiza mediante ensayos con control en desplazamiento.

2.1.2 Compresión

En el comportamiento a **compresión** del material se distinguen tres zonas diferentes:

- Zona de crecimiento de tensión (Tramo OB), denominada zona elasto-plástica con endurecimiento.
- Zona plástica perfecta o zona sin endurecimiento (Tramo CD)
- Zona plástica con ablandamiento (Tramo DE).

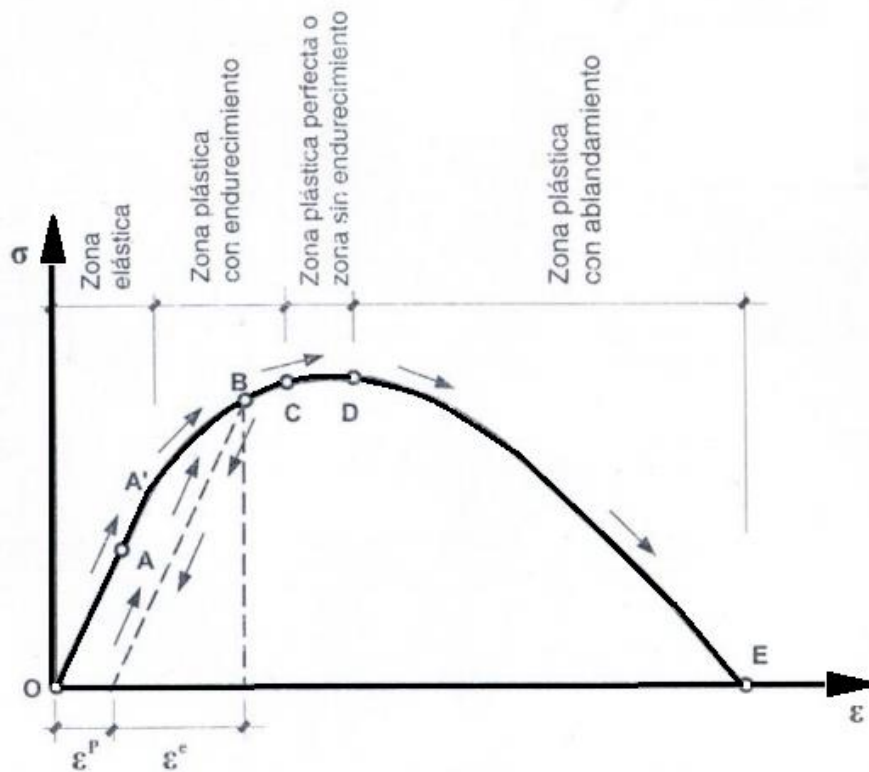


Figura 3. Comportamiento a compresión del hormigón.

2.2. Concrete Damaged Plasticity

El modelo CDP sigue el criterio de daño plástico, basado en la mecánica de los medios continuos [3] [4]. Se define la variable daño, que cuantifica la influencia de la fisuración en el material, con valores entre 0 y 1, donde un valor nulo de dicha variable indica la no presencia de daño, y el valor 1 indica a degradación del material. La formulación de esta variable depende del comportamiento plástico del material.

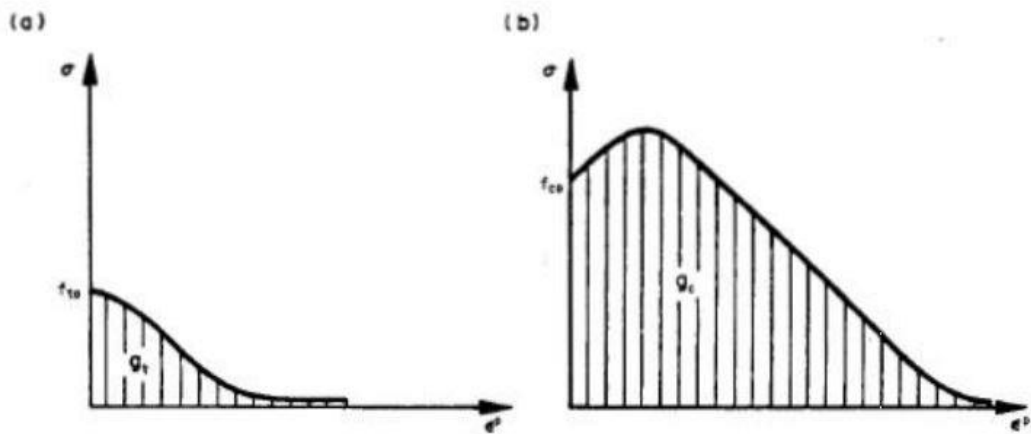


Figura 4. Curvas uniaxiales tensión- deformación plástica: a) tensión; b) compresión

En abaqus la curva que se debe introducir es la correspondiente a la zona de ablandamiento del material. Para ello deben introducirse los pares de puntos tensión de tracción- deformación inelástica. La curva que se obtiene en el ensayo corresponde a los pares tensión de tracción – apertura de grieta. La relación entre la apertura de grieta y la deformación inelástica correspondiente se establece mediante la longitud de grieta característica. Los puntos por definir son los característicos para el comportamiento bilineal. Para cada material se definen los puntos que aparecen a continuación

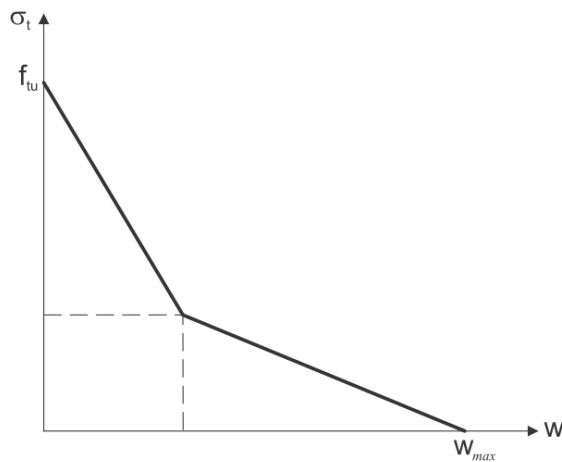


Figura 5. Curva tensión – apertura de grieta utilizada por Abaqus en tracción.

De manera análoga al comportamiento en tracción, para definir el comportamiento en compresión del material, se define el nivel tensional para diferentes valores de deformación plástica que alcanza el material.

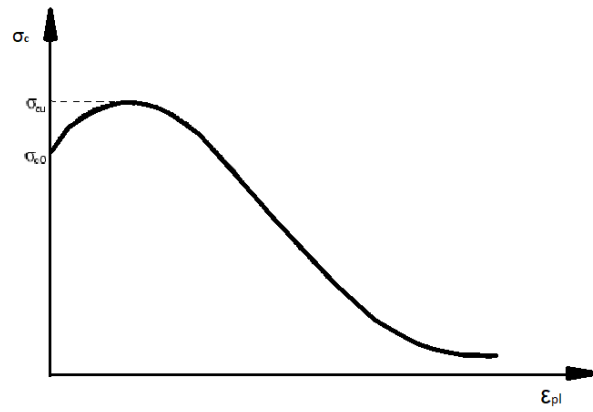


Figura 6. Curva tensión – deformación plástica utilizada por Abaqus en compresión.

En función de esta formulación, el programa genera las curvas de comportamiento a tracción y compresión mediante el uso de una serie de variables que se definen para el material.

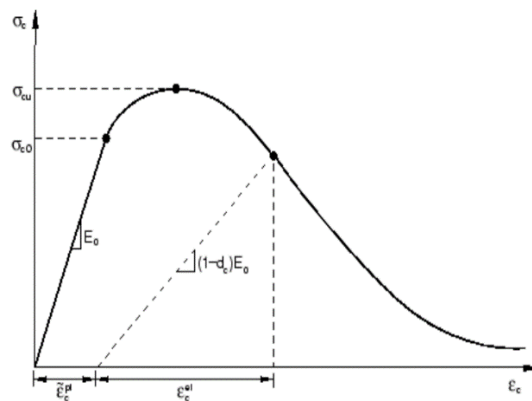


Figura 7. Ley de comportamiento a compresión.

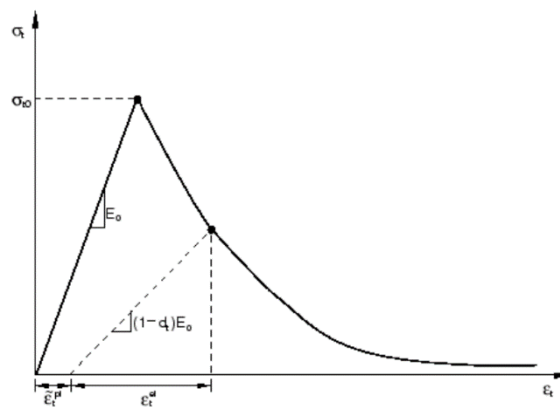


Figura 8. Ley de comportamiento a tracción.

3 MODELO AUXILIAR

La aplicación del MEF a un modelo concreto, requiere un riguroso conocimiento de los elementos de aplicación, materiales que se utilizan para reproducir la realidad... Para ello, en primer lugar, se realiza un estudio previo sobre la validez de material que se ha elegido en Abaqus para modelar el hormigón de alta resistencia bajo estudio. En este caso se elige el material “Concrete Damage Plasticity” para reproducir el comportamiento en fractura del hormigón de alta resistencia reforzado con fibra. El modelo bajo estudio corresponde a un estudio realizado por la Universidad de Nueva Gales del Sur, de Australia. [1], mediante un ensayo experimental y un cálculo en el programa de elementos finitos Antena 2D. La finalidad de este capítulo es reproducir el comportamiento definido en el artículo anterior en Abaqus, corroborando la adecuación del material elegido.

3.1 Propiedades y geometría

La viga de hormigón bajo estudio es una viga biapoyada de dimensiones 5 x 0.3 x 0.7 m sometida a cortante de valor 2V. Está compuesta de hormigón reforzado con fibra de acero, en una cantidad de 25 kg/m³. La viga cuenta con un armado longitudinal inferior de 6 barras de diámetro 28 mm dispuestas en dos capas y armado superior de barras 2 barras de diámetro 20 mm. El armado transversal dispuesto varía según el ensayo, se colocan barras del 6 y del 10. La nomenclatura para utilizar será la siguiente:

BX-Y-Z , donde

X: cantidad de fibras (kg/m³)

Y: diámetro del armado transversal (mm)

Z: distancia entre barras transversales (mm)

Los ensayos que se realizan son:

B25-10-450

B25-6-450

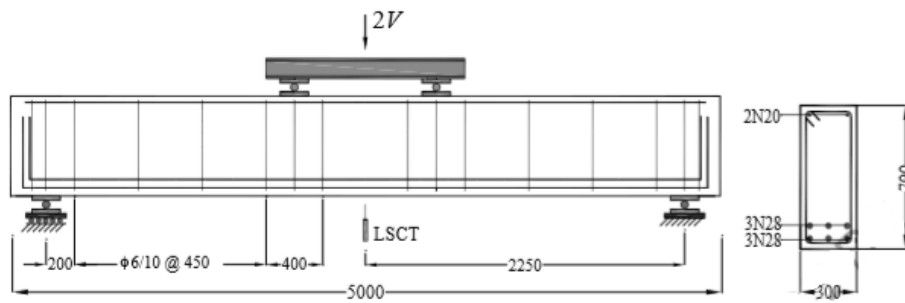


Figura 9. Dimensiones de la viga modelo auxiliar.

Las barras longitudinales son de acero laminado en caliente de 500 MPa, con límite elástico de 540 MPa. Las barras de diámetro 10 tienen un límite elástico de 450 MPa mientras que las de diámetro 6 tiene un límite de 540 MPa.

El hormigón reforzado con fibra consta de un módulo de Young de 28 GPa, tensión máxima de compresión de 34 MPa y tensión máxima de tracción de 2.45 MPa.

f_{cm}	34 MPa
E_c	28 GPa
f_{ct}	2.45 MPa

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón.

Debido a la simetría que presenta el modelo, tanto en carga como en geometría, a la hora de definirlo en Abaqus, se aplica condición de simetría tanto en la viga como en las barras.

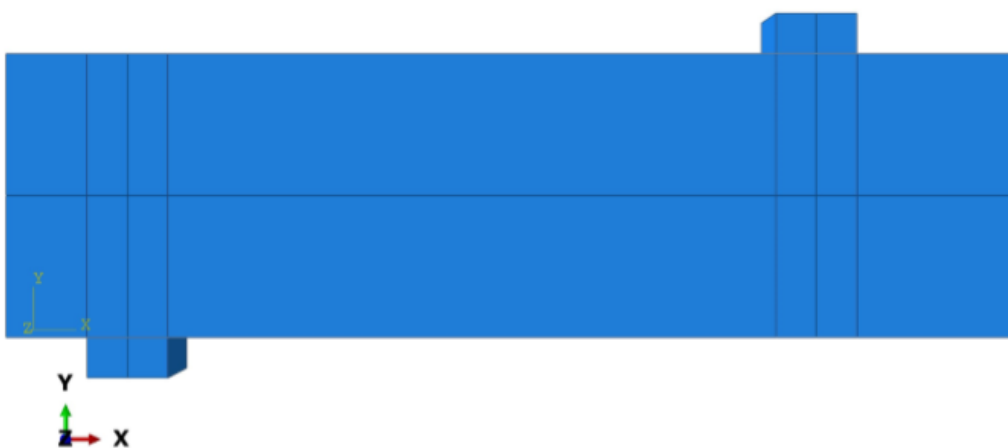


Figura 10. Geometría de la viga con condición de simetría.

3.2 Modelización de los elementos

3.2.1 Viga

En primer lugar, se define en el módulo parte la geometría de la viga, con las dimensiones descritas en el artículo.

El material empleado para asignar a esta parte es HMP. Consta de dos tipos de comportamiento. El comportamiento elástico viene definido por un material elástico lineal. Las propiedades asociadas a este comportamiento son:

Comportamiento elástico	Ec	28 GPa
	v	0.3

Tabla 2. Propiedades elásticas de HMP.

El comportamiento plástico del hormigón se define con “Concrete Damage Plasticity”. Para la definición del mismo, debemos conocer la ley de comportamiento de material en compresión y en tracción, así como otra serie de parámetros que se especifican a continuación.

Comportamiento Plástico	Excentricidad	0.1
	Ángulo de dilatancia	36
	fb0/fc0	1.16
	k	0.67
	Viscosidad	1.00E-05

Tabla 3. Propiedades plásticas de HMP.

El artículo de referencia proporciona las gráficas de las leyes de comportamiento sin los valores numéricos. Para la obtención de estas se ha realizado un estudio de las ecuaciones proporcionadas por el autor, así como las propiedades del material.

La definición del comportamiento a compresión se realiza con éxito según las ecuaciones proporcionadas por el artículo. En este caso conocemos la expresión de la tensión de compresión para una determinada deformación según la expresión:

$$\sigma_c(\varepsilon) = \frac{f_{cm} (E_c/E_o - \varepsilon/\varepsilon_c) \varepsilon}{\varepsilon_c + (E_c/E_o - 2) \varepsilon}$$

Donde

f_{cm}	34 MPa
E_c	28 GPa
E_o	14 GPa
ε_c	0.0002

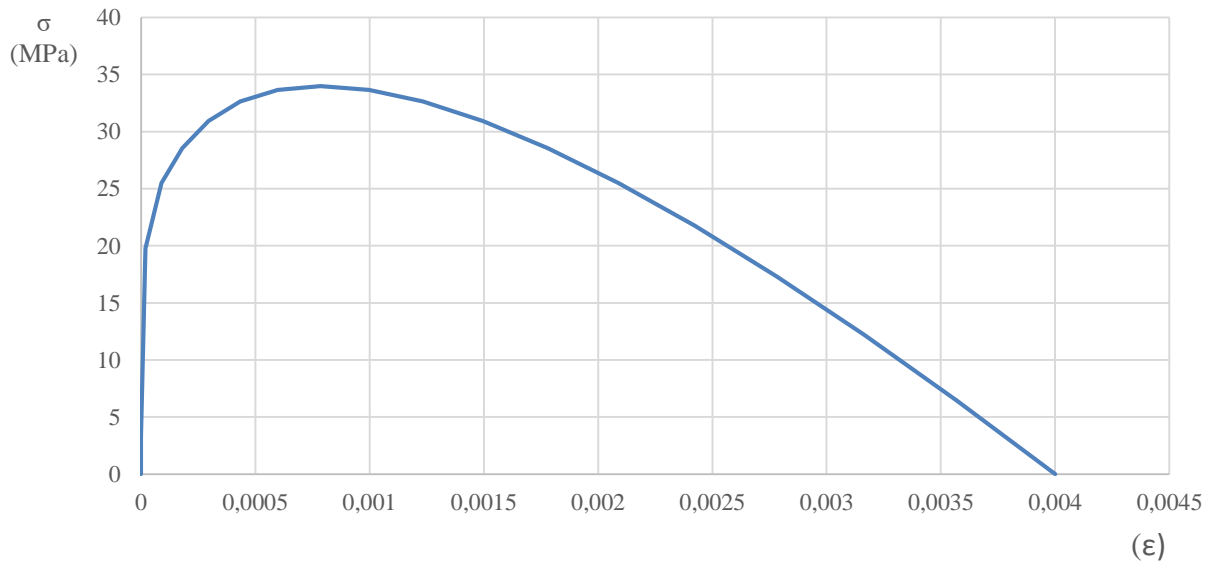
Se asume una deformación a compresión del 2 ‰.

Con esta hipótesis y estos valores de las propiedades se calcula la tensión para determinados valores de deformación que se imponen. Además, se debe calcular la deformación inelástica, ya que el par de valores que se deben definir para el comportamiento de material son los correspondientes a tensión- deformación inelástica. La deformación inelástica será la deformación impuesta menos el valor de la tensión dividido entre el módulo de elasticidad. Según estos cálculos se genera la siguiente tabla que recoge el comportamiento a compresión que define el material.

Resistencia a compresión	Deformación	Deformación inelástica
Mpa	ϵ	ϵ_{in}
0	0	0
3.315	0.0001	-1.83929E-05
19.765	0.000705882	0
25.5	0.001	8.92857E-05
31.875	0.0015	0.000361607
34	0.002	0.000785714
31.875	0.0025	0.001361607
25.5	0.003	0.002089286
14.875	0.0035	0.00296875
0	0.004	0.004

Tabla 4. Comportamiento a compresión de HMP.

Resistencia a compresión - deformación inelástica



Gráfica 1. Comportamiento compresión – deformación inelástica HMP.

El comportamiento a tracción debe definirse con el par de valores tensión-deformación inelástica. Sin embargo, el comportamiento a tracción viene definido por el tamaño de apertura de grieta y no por la deformación alcanzada en el punto.

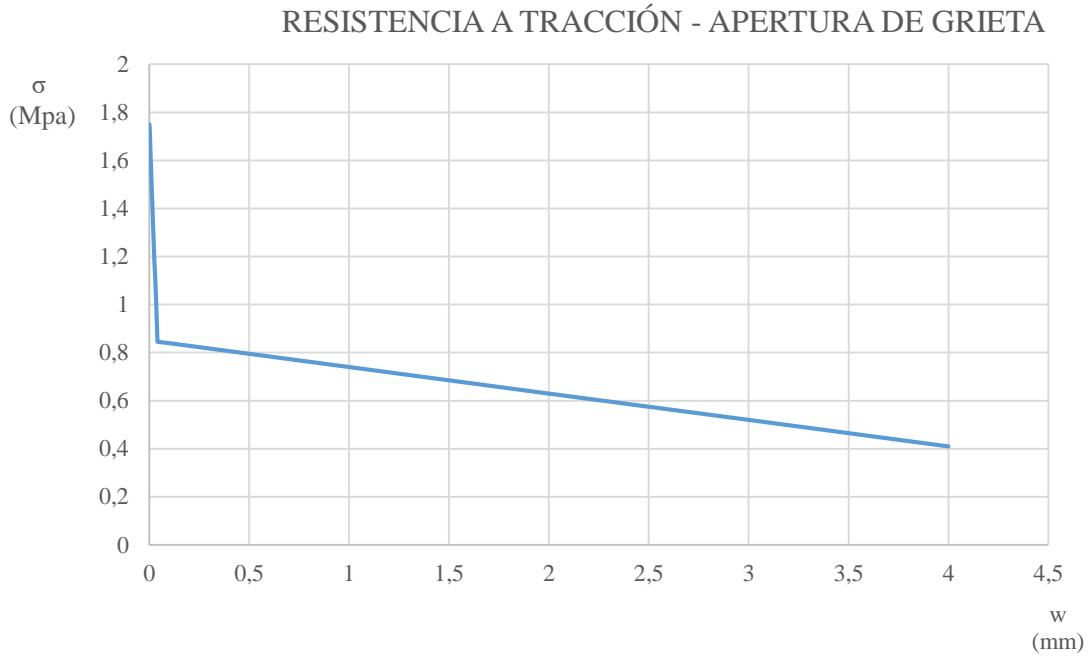
$$f_t = \begin{cases} E_c \varepsilon & \text{pre cracking} \\ 1.75 - 22.4w & \text{post cracking, } w < 0.04\text{mm} \\ 0.85 - 0.11w & \text{post cracking, } w \geq 0.04\text{mm} \end{cases}$$

Para obtener el valor de deformación, se debe dividir el tamaño de grieta entre la longitud característica. Este valor no viene definido por el autor del artículo, por lo que deberán hacerse diferentes ensayos para calcular el valor de dicha magnitud. En una primera aproximación se calcula el comportamiento a tracción con longitud característica de 1 mm. Posteriormente se calcula el valor exacto del mismo, llegando a una longitud característica de 77.159 mm.

Considerando la ley de comportamiento a tracción previamente definida, se obtienen los siguientes valores, que se utilizan para definir el comportamiento en Abaqus.

Resistencia a tracción	Apertura de grieta	Deformación inelástica
σ (Mpa)	w (mm)	ε_{in}
1.75	0	0
0.8456	0.04	0.04
3E-05	7.727	7.727

Tabla 5. Comportamiento a tracción HMP.



Gráfica 2. Comportamiento tracción – apertura de grieta HMP

Como se ha comentado previamente, para reducir el coste computacional, se aplica simetría a la viga en la cara lateral.

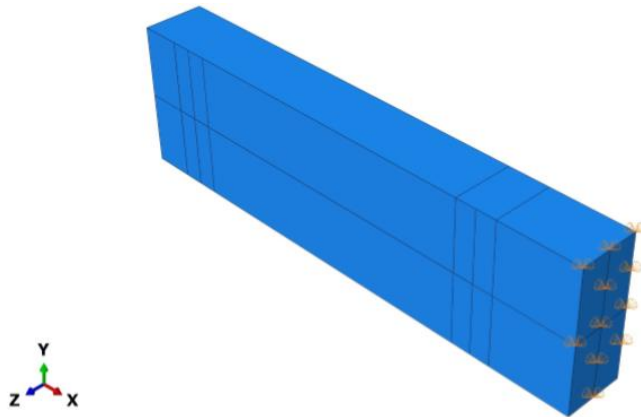


Figura 11. Condición de simetría en la viga.

3.2.2 Armadura

La armadura del modelo se define en el módulo parte. Para facilitar la disposición de la misma y la asignación de las propiedades, se definen tres partes diferentes: armadura inferior, armadura superior y cercos. A cada parte se le asigna una sección, que a su vez ésta tiene asignado el material correspondiente, según el tipo de acero que sea.

Las propiedades de los materiales varían según el tipo de armadura que estemos modelando. Se crean los materiales acero450 y acero540. Ambos materiales tienen comportamiento elástico y plástico.

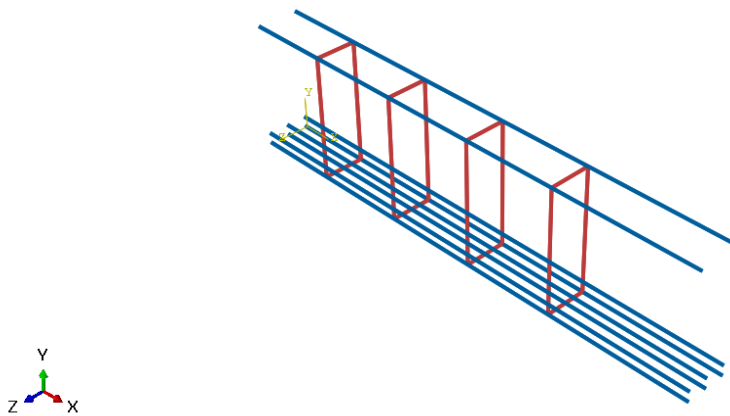


Figura 12. Disposición de la armadura en el modelo auxiliar.

El comportamiento elástico viene definido por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. El comportamiento plástico se define con el par límite de fluencia- deformación plástica. En este caso, para estar del lado de la seguridad no se considera endurecimiento por deformación en la ley tensión deformación.

Comportamiento elástico	E_c	200 GPa
	ν	0.3
Comportamiento Plástico	Resistencia a tracción	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	ϵ_{in}
	450	0
	450	5
	450	10

Tabla 6. Comportamiento elástico y plástico del acero.



Gráfica 3. Comportamiento tracción – deformación inelástica del acero.

La condición de contorno de simetría se aplica al extremo de la armadura longitudinal.

Dado que no se trata de un análisis aislado de la armadura, se debe asegurar una correcta unión entre el armado y la viga se aplica a la armadura la restricción de región embebida, en el apartado “constraints”.

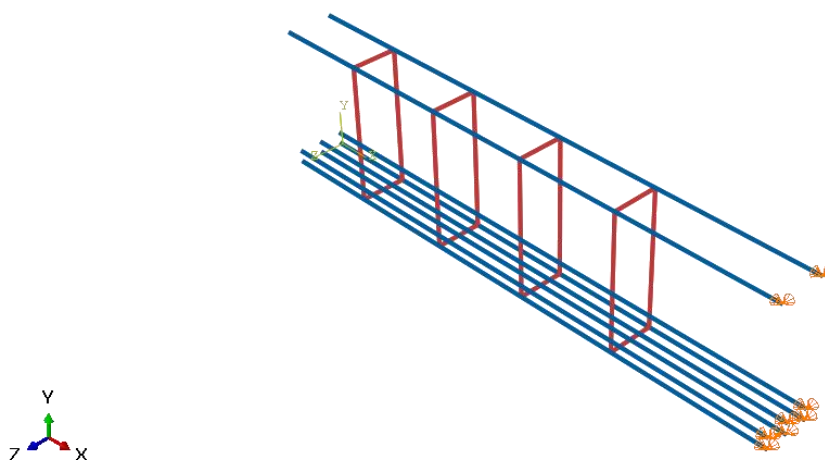


Figura 13. Condición de simetría en el armado.

3.2.3 Puntos de apoyo y aplicación de carga

La aplicación de cargas puntuales y condiciones de contorno asociadas a un punto requiere una rigurosa modelización. Para evitar que se produzca fallo en el punto de aplicación que impida obtener el valor real de las tensiones y deformaciones que se alcanzarían en la estructura, se aplica sobre una zona de material con comportamiento elástico.

Siguiendo este criterio se definen dos bloques de geometría 0.2 x 0.3 x 0.1 m situados a 0.2 y 1.9 metros del extremo. En el primero se aplica la condición de contorno de apoyo y en el segundo la carga puntual de valor V. Dado que el valor de V se desconoce, se aplica en su lugar control en desplazamiento en el punto de aplicación. En este caso se aplica un desplazamiento impuesto de 30 mm.

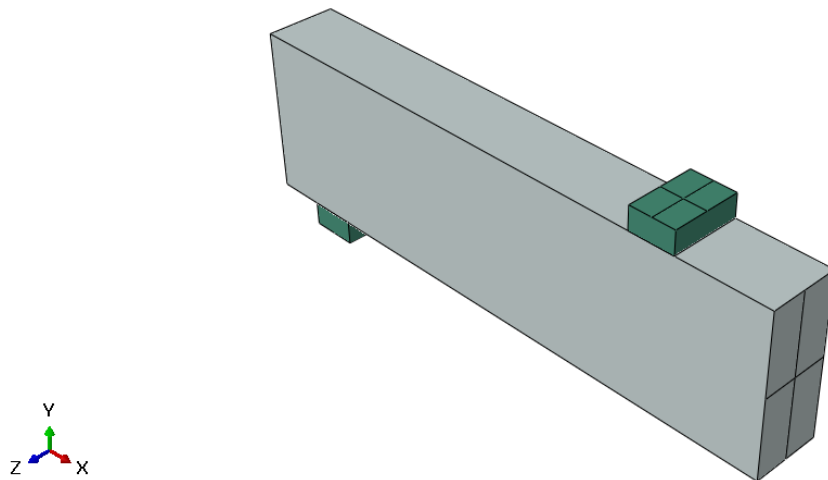


Figura 14. Apoyos del modelo auxiliar.



Figura 15. Condición de apoyo y desplazamiento.

Se define el material HME. Este material tiene propiedades elásticas únicamente y son las asociadas al material definido para la viga.

Comportamiento elástico	E_c	28 Gpa
	ν	0.3

Tabla 7. Propiedades elásticas de HME

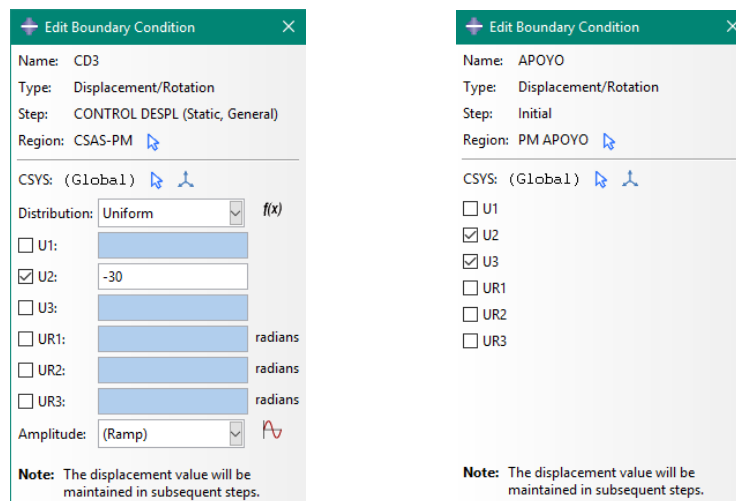


Figura 16. Aplicación del control en desplazamiento.

La continuidad entre la viga y los puntos de aplicación de la carga y el control de desplazamiento se asegura mediante la restricción tipo 'tie' que se define entre la cara superior del apoyo y la cara inferior de la viga y entre la cara inferior de la carga y la cara superior de la viga.

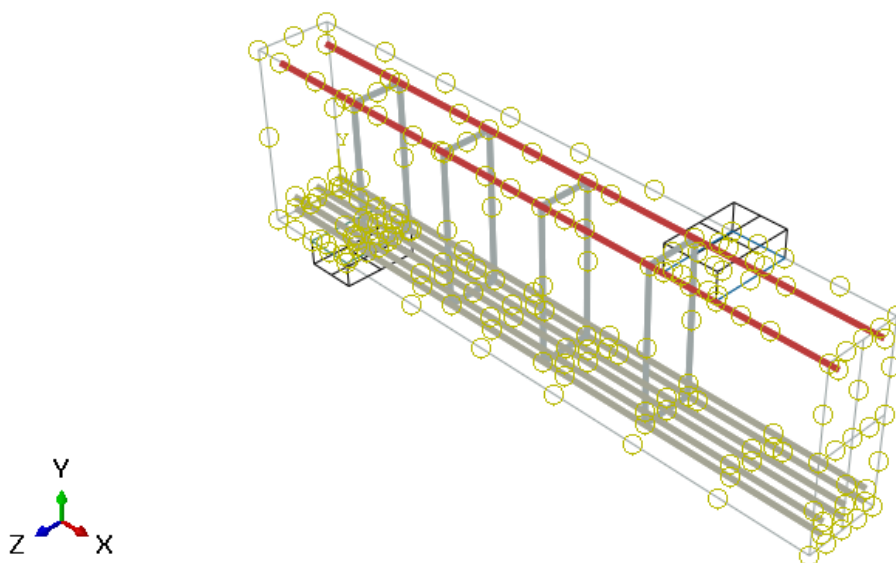


Figura 17. Interacción viga – armadura – apoyos.

3.3 Definición de la malla y elementos de integración

En el análisis de elementos finitos es de especial relevancia la definición de la malla y los elementos de integración que se definen para cada uno de los elementos a analizar.

Para simular el hormigón se han empleado elementos denominados C3D8R y que representan elementos 3D de 8 nodos.

Para la simulación de las barras de armado longitudinal y transversal, se emplearon elementos lineales 3D lineales tipo “truss” (T3D2) de una longitud de 25mm.

Se utiliza una malla de 50x50 para el modelo siguiendo el criterio empleado por el artículo de referencia.

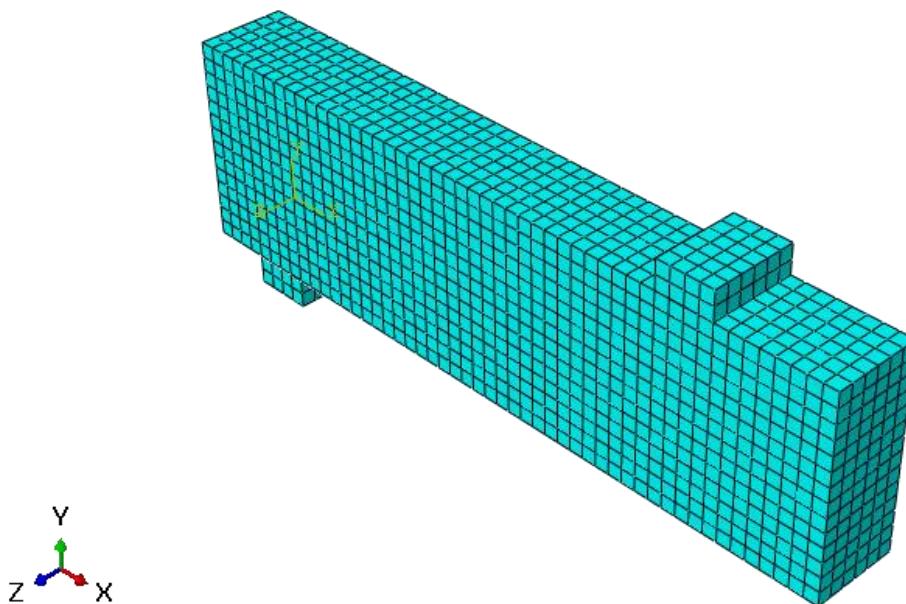


Figura 18. Mallado del modelo.

3.4 Pasos de carga y variables a extraer

La aplicación del MEF requiere la definición de los diferentes estados de carga entre los cuales se aplica la integración de los elementos. Se deben definir de manera adecuada las condiciones de contorno y de carga en cada paso.

La estructura bajo estudio se encuentra sometida a una carga vertical de valor V , desconocida. Dado que se

pretende obtener la curva cortante-deformación, se sustituye la carga de valor V por una condición de desplazamiento impuesto, definida en el step CD.

En el paso inicial se define la condición de apoyo de la viga y la condición de simetría de la armadura longitudinal.

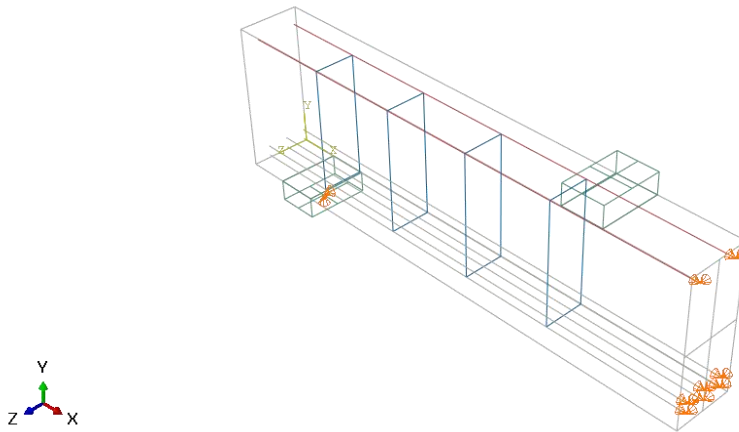


Figura 19. Condiciones de contorno en el paso inicial.

En el paso Control en Desplazamiento se propagan las condiciones anteriores y se define la simetría de la cara y el control del desplazamiento en el punto de aplicación de carga. Es un paso de tipo estático, con un número máximo de incrementos de 100000. El paso inicial es de valor 0.001. Se establece el rango de incrementos en $(1e-15, 0.005)$. Ha sido necesario establecer estos rangos para conseguir precisión en los resultados. Se realizaron ensayos previos con rangos menores que no conseguían resultados similares a los reales.

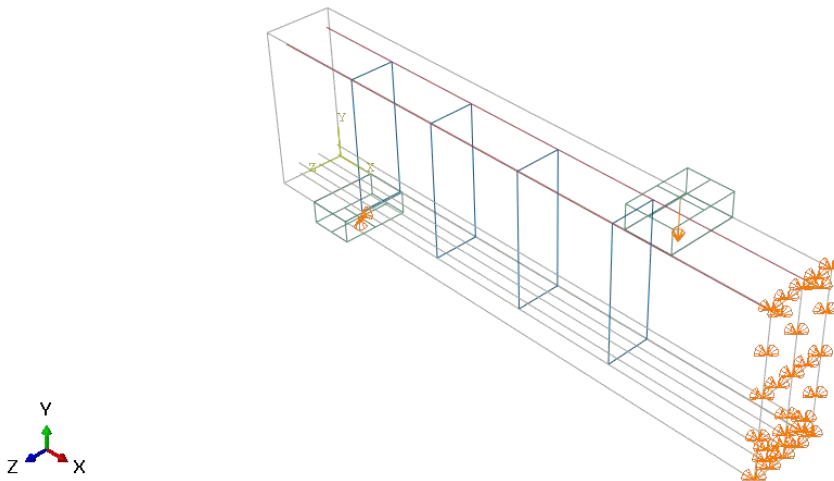


Figura 20. Condiciones de contorno del paso final.

Debido al gran número de pasos de integración que se van a dar en cada análisis, es preciso hacer una buena selección de las variables a guardar. Para obtener la curva cortante-desplazamiento, se genera una variable histórica que almacene la información correspondiente al valor de la reacción en el punto de apoyo. El valor se

almacenará cada 0.001 unidades de tiempo.

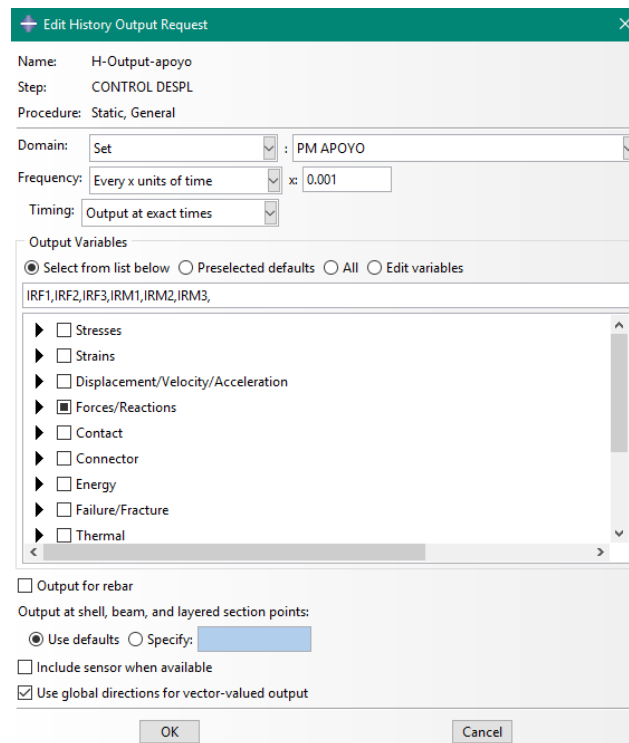


Figura 21. . Listado de variables a extraer.

3.5 Ensayos a realizar

La finalidad de este estudio previo es la comprobación de la adecuación del concrete damaged plasticity para modelar el material bajo estudio. Para ello se busca obtener la curva cortante-desplazamiento. El análisis de los resultados se centra en el modelo B25-10-450. Los resultados proporcionados por el artículo de referencia son los siguientes.

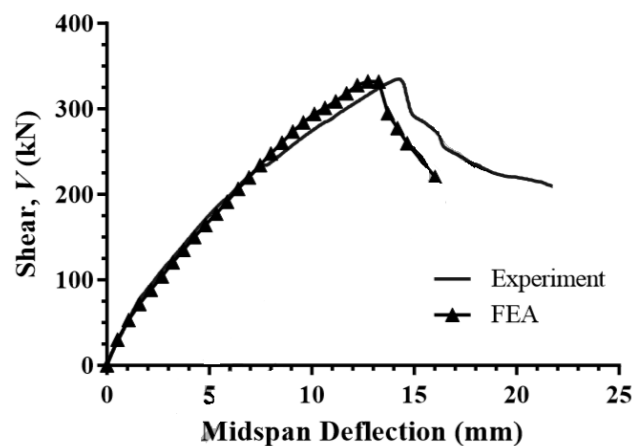
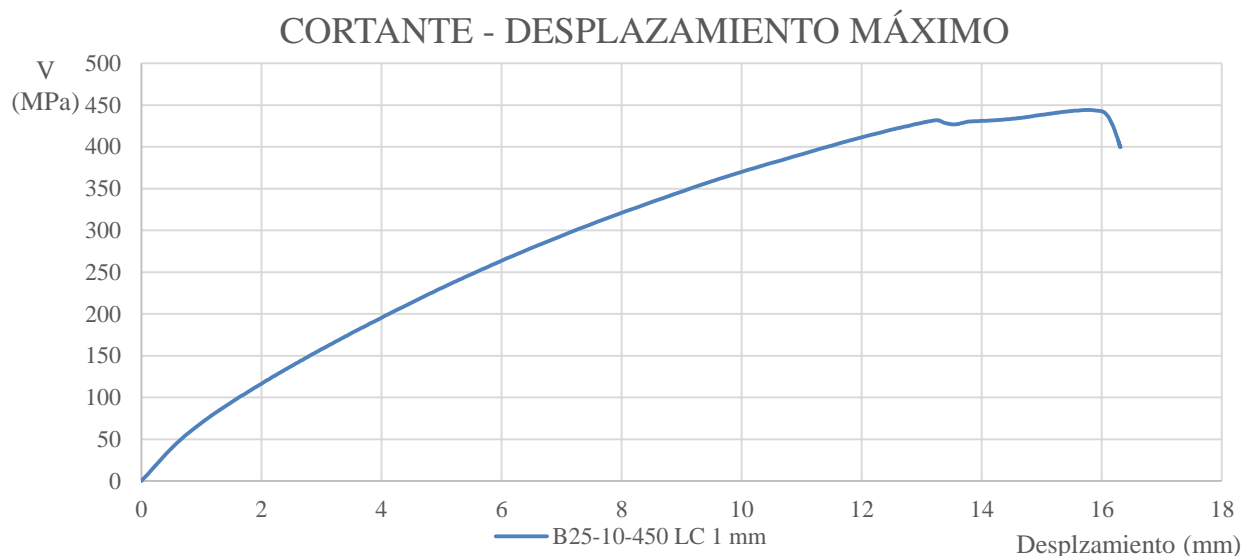


Figura 22. Ley de comportamiento a cortante del artículo.

	V_u , MEF	V_u , EXPERIMENTAL
B25-10-450	332 KN	334 KN

Tabla 8. Valores teóricos de cortante.

Las características del modelo bajo estudio corresponden a una viga de hormigón reforzado con fibras en una cantidad de 25 kg/m³, armadura longitudinal descrita en el apartado 3.2.1, y cercos de diámetro 10 a una distancia de 450 mm. Tras la creación del modelo, se asigna a los cercos las propiedades correspondientes a las barras de acero de diámetro 10. A continuación se aplica el análisis y se extraen los resultados. La gráfica obtenida es la siguiente.



Gráfica 4. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 1 mm.

Esta primera aproximación se realiza con una longitud de grieta característica de 1mm. Como se comentaba en apartaos anteriores, este es uno de los parámetros que se deben determinar. Para ello, se repite el análisis al modelo con diferentes longitudes características, modificando la ley de comportamiento en tracción.

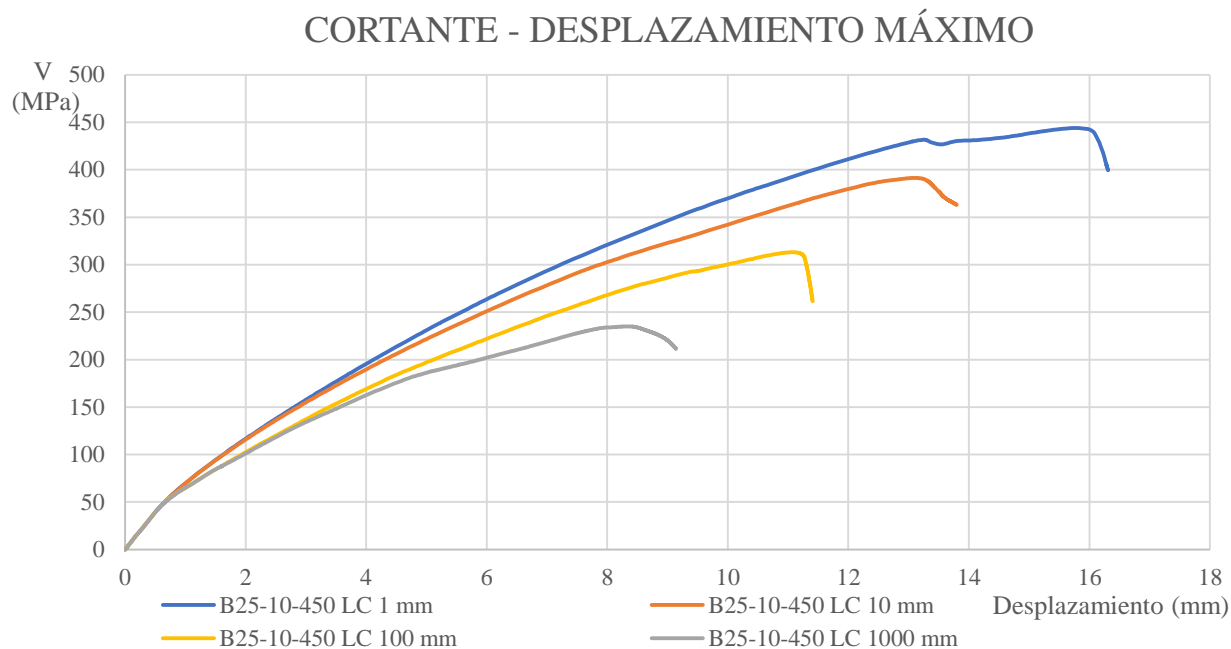
Lc= 10	Resistencia a tracción	Apertura de grieta	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	w (mm)	ϵ_{in}
	1.75	0	0
0.8456	0.04	0.004	
3E-05	7.727	0.7727	

Lc= 100	Resistencia a tracción	Apertura de grieta	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	w (mm)	ϵ_{in}
	1.75	0	0
0.8456	0.04	0.0004	
3E-05	7.727	0.07727	

Lc= 1000	Resistencia a tracción	Apertura de grieta	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	w (mm)	ϵ_{in}
	1.75	0	0
0.8456	0.04	0.00004	
3E-05	7.727	0.007727	

Tabla 9. Comportamiento a tracción con diferentes longitudes características.

Los resultados obtenidos son los siguientes



Gráfica 5. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 1, 10, 100, 1000 mm.

Tras un análisis de los resultados, se obtiene un valor de longitud característica de grieta de 77.159 mm. Con este parámetro se obtiene la Ley de comportamiento en tracción que rige el material. A continuación, se realiza un análisis con mayor precisión en los pasos de integración para obtener los datos correspondientes. Se obtiene una buena aproximación de los valores buscados, cometiendo un error en del 2%. El error en desplazamiento también es pequeño.

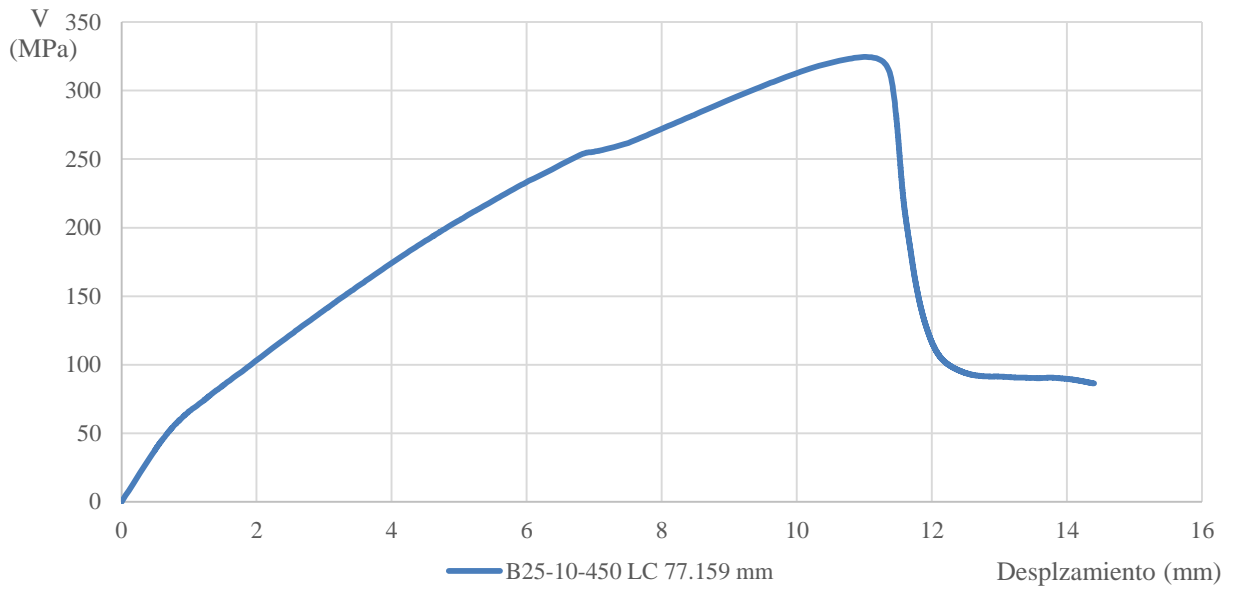
	V_u , MEF	V_u , EXPERIMENTAL	V_u , ABAQUS
B25-10-450	332 KN	334 KN	324,5 KN
ERROR (%)	2,41	2,84	

Tabla 10. Resultados en carga del ensayo B25-10-450-50 con lc 77.159.

	Desplz(V_u max) , MEF	Desplz(V_u max) , EXPERIMENTAL	Desplz(V_u max) , ABAQUS
B25-10-450	13 mm	14 mm	11,5 mm
ERROR (%)	11,53846154	17,85714286	

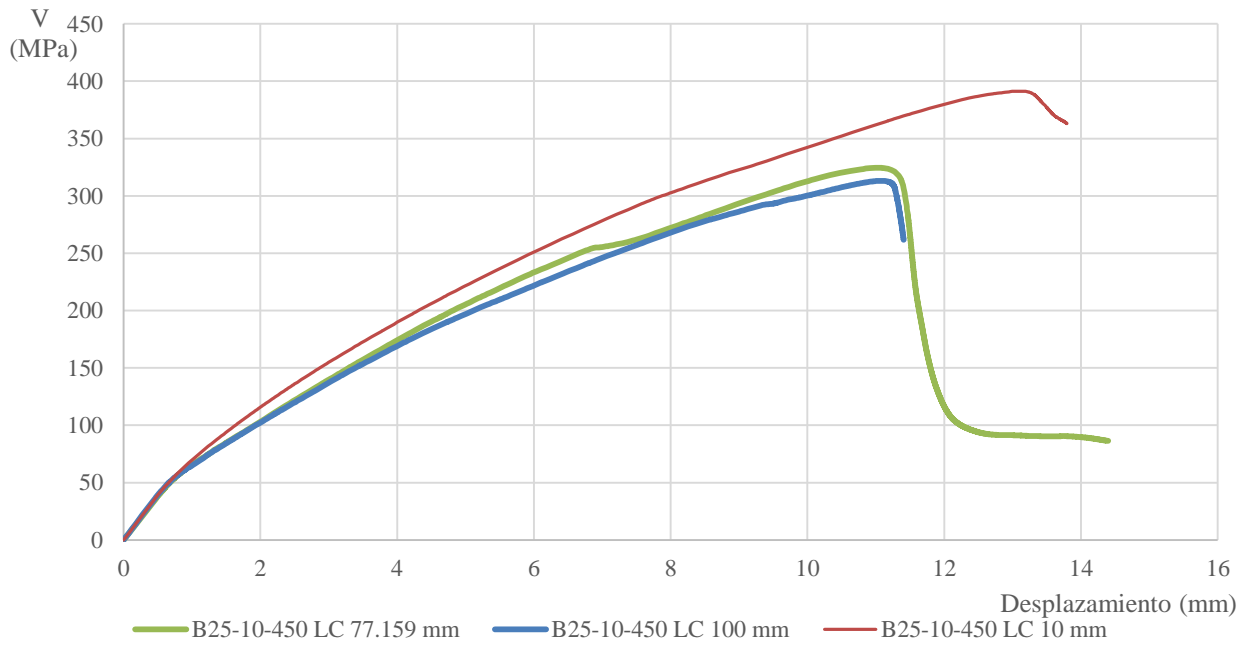
Tabla 11. Resultados en desplazamientos del ensayo B25-10-450 con lc 77.159.

CORTANTE - DESPLAZAMIENTO MÁXIMO

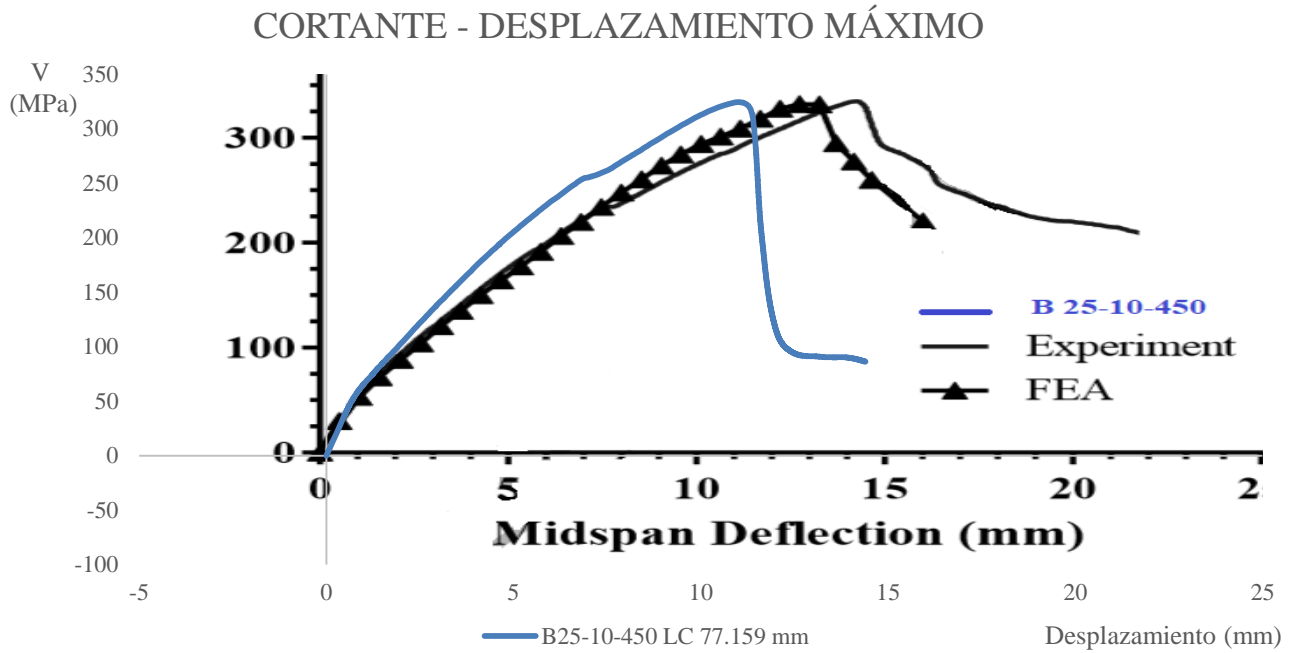


Gráfica 6. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 77.159 mm.

CORTANTE - DESPLAZAMIENTO MÁXIMO

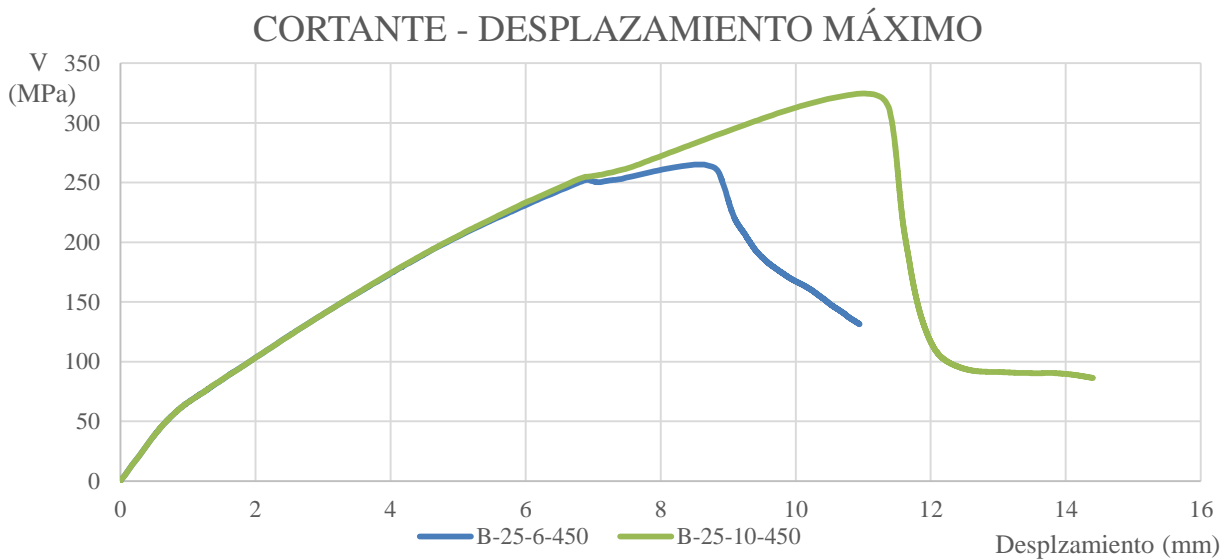


Gráfica 7. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 10, 77.159, 100 mm.



Gráfica 8. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo con longitud característica 77.159 mm. Comparado con datos del artículo de referencia.

Una vez definida la Ley de comportamiento, se realizan nuevos ensayos cambiando la armadura a cortante por cercos de diámetro 6 mm, correspondientes al modelo B25-6-450



Gráfica 9. Comportamiento cortante – desplazamiento máximo modelos B-25-10-450, B-25-6-450.

La deformaciones plásticas que se obtiene del modelo son las características de una viga de hormigón sometida a cortante.

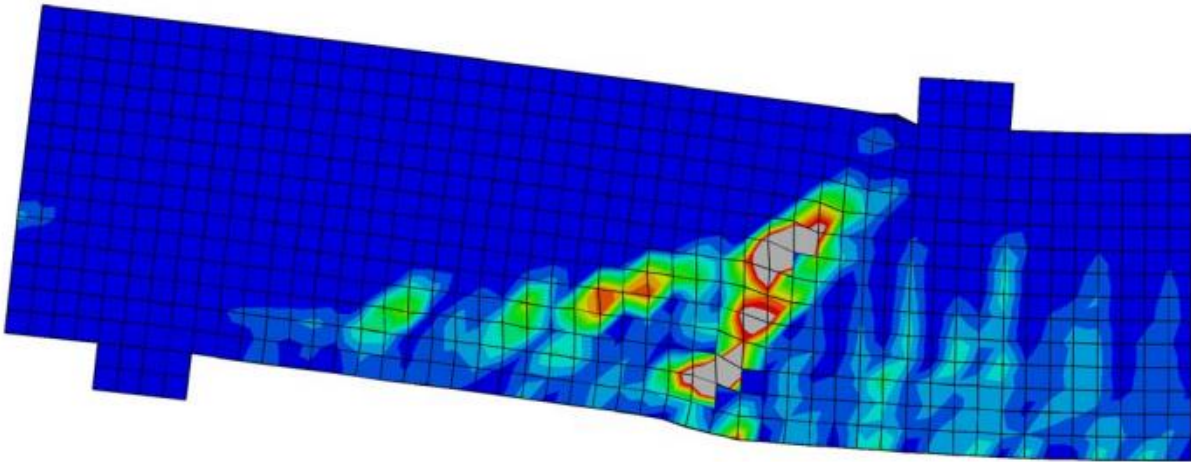


Figura 23. Deformaciones plásticas del modelo auxiliar.

Para verificar la convergencia de los resultados, aplicamos un refinamiento de la malla cambiando el tamaño de los elementos a 40 x 40. También se realiza un estudio con el tamaño de malla 60 x 60. Los resultados obtenidos con este refinamiento de la malla son favorables y el error va disminuyendo a medida que los elementos son menores,

B25-10-450	V_u , ABAQUS	V_u , MEF	Error (%)	V_u , EXPERIMENTAL	Error (%)
50 x 50	324,5 KN	332 KN	2,41	334 KN	2,99
60 x 60	321,63 KN	332 KN	3,31	334 KN	3,89
40 x 40	334,4 KN	332 KN	0,60	334 KN	0,12

Tabla 12. Resultados del refinamiento de la malla.

3.6 Conclusiones

Tras los análisis realizados, comparando los resultados con el modelo de referencia, se puede afirmar que el material “Concrete Damage Plasticity” reproduce de forma adecuada el comportamiento del Hormigón reforzado con fibra. Los errores podrían solventarse con un mayor refinamiento de la malla y disminuyendo los rangos de integración.

4 APLICACIÓN DE LOS HORMIGONES ENSAYADOS

UNA vez desarrollada la herramienta de elementos finitos que permite reproducir el comportamiento de una viga de hormigón reforzado con fibra, se utiliza para ensayar una serie de hormigones de altas prestaciones desarrollados el, obteniendo su resistencia a cortante. Los hormigones bajo estudio han sido ensayados en el Laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Los parámetros que definen el comportamiento del material están recogidos en el artículo “Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography” [2].

4.1 Propiedades y geometría

La viga de hormigón bajo estudio es una viga biapoyada de dimensiones 7 x 1 x 0.2 m sometida a cortante de valor V en dos puntos a 2 m de distancia de los apoyos.

La composición del hormigón reforzado con fibra varía según el tipo de material que se utilice. En este caso se van a utilizar tres mezclas distintas de hormigón con fibra, dando lugar a los hormigones DS, DL, DSL. Se realiza además un ensayo con hormigón sin fibra, D0, para poder determinar el efecto de la fibra. La composición y características de estos se especifica a continuación:

Propiedad	D0	DS	DL	DSL
Longitud de fibras (mm)	0	13	30	13 (50%) y 30 (50%)
Cantidad de fibra (kg/ m ³)	0	196	196	196
E _c (GPa)	44.5	43.4	49.2	47.8
f _c (MPa)	131.4	154.6	150.2	153.7
f _{ct} (MPa)	4.5	11.7	9.1	10.4
σ ₁ (MPa)	0.2046	2.9	3.1	3.6
w ₁ (mm)	0.0119	1.7	1.4	3
w _u (mm)	0.0694	6.2	12.1	9.9

Tabla 13. Propiedades mecánicas de los hormigones DO, DL, DS, DSL.

La viga consta de un armado longitudinal inferior de 6 barras de diámetro 25 mm dispuestas en dos capas y armado superior de barras 2 barras de diámetro 20 mm. Para el armado transversal se utilizan cercos de 10 mm de diámetro cada 450 mm de longitud.

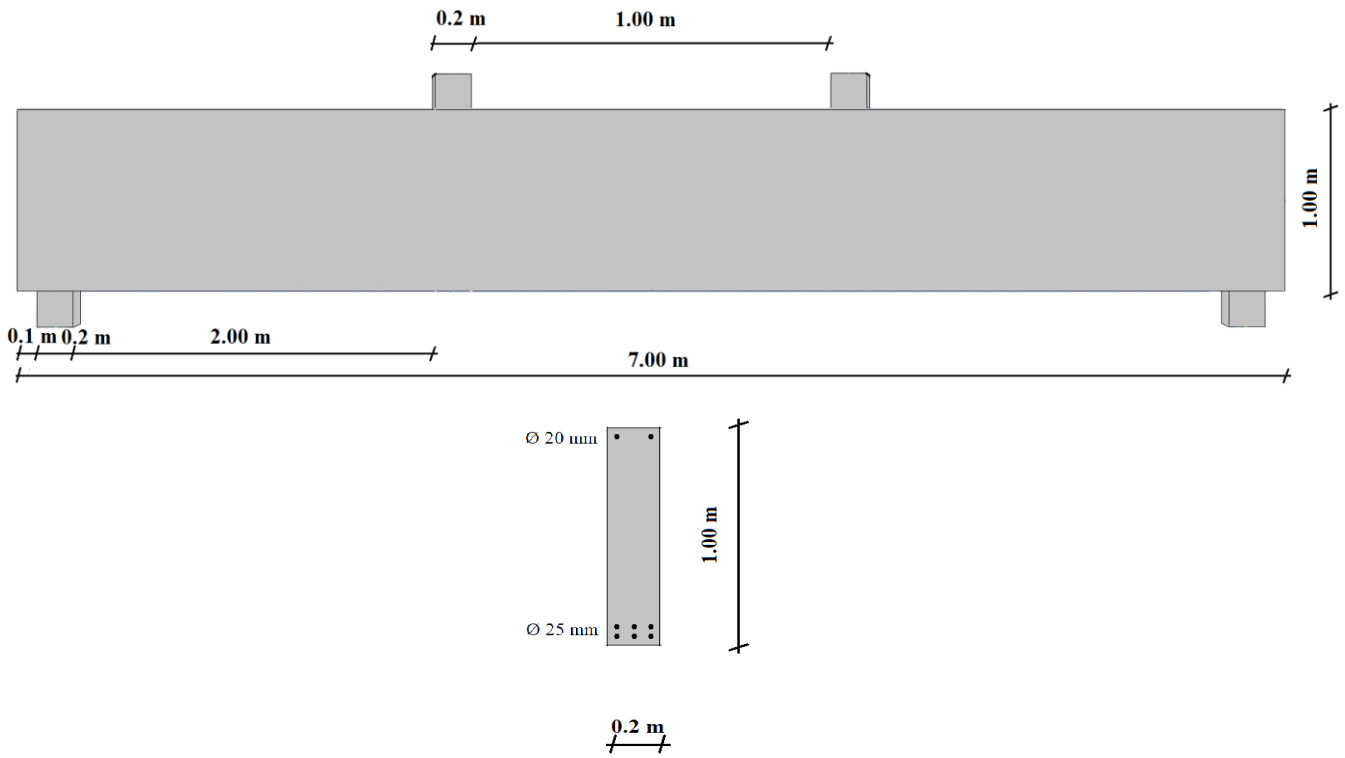


Figura 24. Geometría de la viga.

4.2 Modelización de los elementos

El modelo que representa la viga bajo estudio se realiza con el mismo criterio seguido por el modelo auxiliar. En este caso se generan más materiales para asignar a la viga, representando los distintos hormigones que se utilizan.

En primer lugar, se define en el módulo parte la geometría de la viga, con las dimensiones descritas previamente.

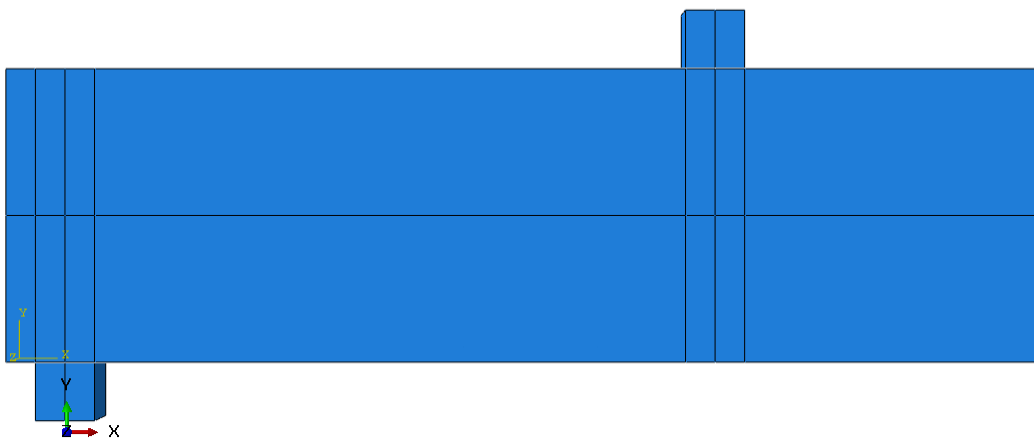


Figura 25. Geometría de la viga modelada en abaqus.

Se definen cuatro materiales diferentes para el ensayo. De manera análoga al modelo auxiliar, el hormigón tendrá comportamiento elástico y comportamiento plástico. Como se ha comentado previamente los materiales a definir son D0, DS, DL, DSL

Se detallan los valores que definen el comportamiento elástico y plástico de los materiales que se estudian.

Comportamiento elástico	Hormigón	D0	DS	DL	DSL
	E_c	44.5	43.4	49.2	47.8
	ν	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabla 14. Propiedades elásticas de los hormigones DO, DS, DL, DSL.

Comportamiento Plástico	Excentricidad	0.1
	Ángulo de dilatancia	40
	f_{b0}/f_{c0}	1.16
	k	0.67
	Viscosidad	1.00E-03

Tabla 15. Propiedades plásticas de los hormigones DO, DS, DL, DSL.

El comportamiento a compresión se define de manera análoga al modelo auxiliar. Para ello empleamos la expresión que aparece a continuación. Se vuelve a calcular la deformación inelástica para cada material y se incluyen los datos en Abaqus.

$$\sigma_c(\varepsilon) = \frac{f_{cm} (E_c/E_o - \varepsilon/\varepsilon_c) \varepsilon}{\varepsilon_c + (E_c/E_o - 2) \varepsilon}$$

Donde

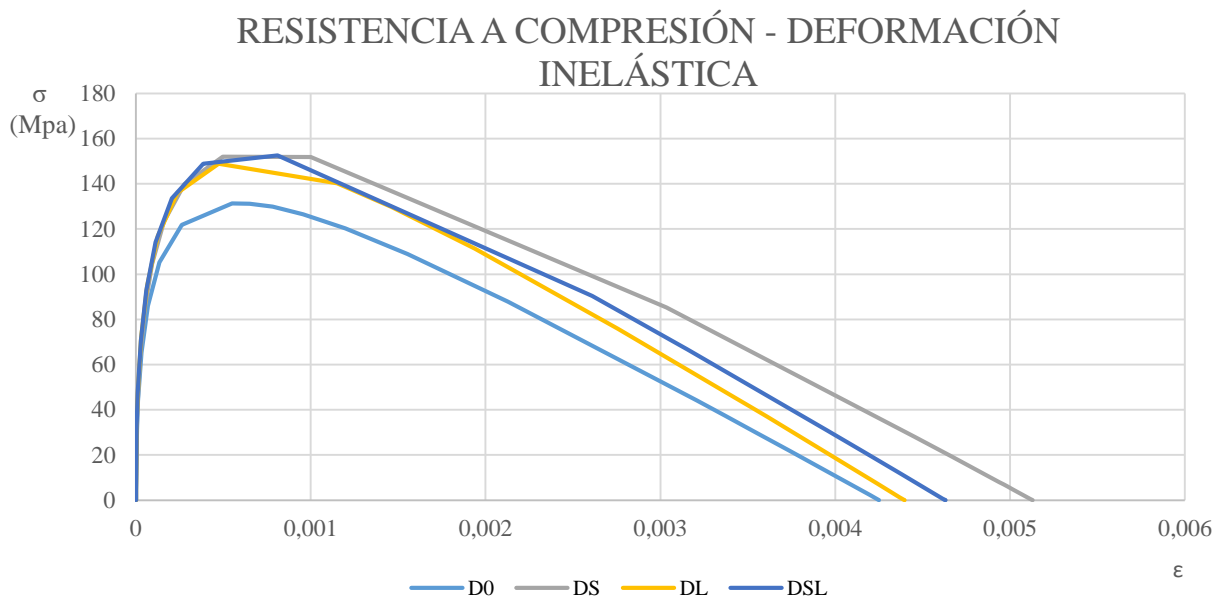
	D0	DS	DL	DSL
E_c (GPa)	44.5	43.4	49.2	47.8
f_c (MPa)	131.4	154.6	150.2	153.7
E_o (Gpa)	37.08	36.17	41.00	39.83
ε_c	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002

Se asume una deformación a compresión del 2 %.

Aplicando la expresión anterior a cada material, en distintos valores de deformación, se calcula la resistencia a compresión de los materiales y posteriormente la deformación inelástica. Se incluye una tabla con los valores representativos de la ley de comportamiento a compresión que se incluye en Abaqus.

DO		DS		DL		DSL	
Resistencia a compresión	Deformación inelástica	Resistencia a compresión	Deformación inelástica	Resistencia a compresión	Deformación inelástica	Resistencia a compresión	Deformación inelástica
MPa	ϵ_{in}	MPa	ϵ_{in}	MPa	ϵ_{in}	MPa	ϵ_{in}
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
31.16	5.57599E-06	30.44	4.47688E-06	34.47	5.35997E-06	33.50	5.04239E-06
43.96	1.21505E-05	64.04	2.4393E-05	72.30	3.04455E-05	70.35	2.82106E-05
65.33	3.20052E-05	104.53	9.1589E-05	95.22	6.46178E-05	114.14	0.000112093
105.24	0.000134986	152.06	0.000496284	135.92	0.000237452	148.86	0.000385738
131.31	0.0005493	85.32	0.003034116	148.93	0.000472928	152.49	0.000809826
126.55	0.00095622	19.39	0.004663182	140.18	0.001150877	90.32	0.002610437
108.88	0.001553229	7.94	0.004939139	129.82	0.001461429	31.08	0.003949734
44.21	0.003206618	4.87	0.005012877	75.83	0.002758697	21.85	0.004152973
12.51	0.003958844	0.63	0.00511441	36.79	0.003612317	11.65	0.004376254
0.05	0.004250877	0.00	0.005129579	0.00	0.004396096	0.00	0.004630288

Tabla 16. Comportamiento a compresión de los hormigones DO, DS, DL, DSL.



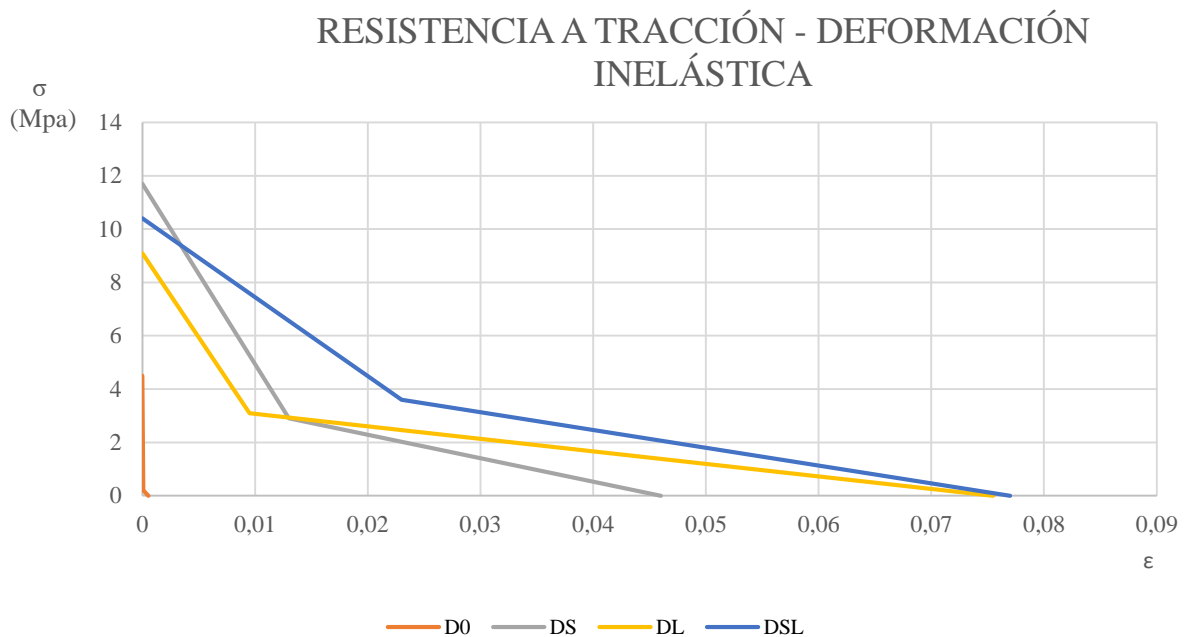
Gráfica 10. Comportamiento compresión – deformación inelastica de los hormigones DO, DS, DL, DSL.

El comportamiento a tracción queda totalmente definido con los valores que se han obtenido en el laboratorio. Este modelo se realiza la ley de comportamiento. Tensión – deformación inelástica (σ - ϵ).

Los datos que definen la ley de comportamiento quedan recogidos en las siguientes tablas y gráficas. Dichos valores serán incluidos posteriormente en Abaqus para definir cada material.

	Resistencia a tracción	Deformación	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	ϵ	ϵ_{in}
D0	4.5		0
	0.2046		9.29688E-05
	0		0.000542188
DS	11.7	0.008	0
	2.9	0.021	0.013
	0	0.054	0.046
DL	9.1	0.0055	0
	3.1	0.015	0.0095
	0	0.081	0.0755
DSL	10.4	0.006	0
	3.6	0.029	0.023
	0	0.083	0.077

Tabla 17. Comportamiento tracción - deformación de los hormigones DO, DS, DL, DSL.



Gráfica 11. Comportamiento tracción – deformación inelastica de los hormigones DO, DS, DL, DSL.

Como se ha comentado previamente, para reducir el coste computacional, se aplica simetría a la viga en la cara lateral.

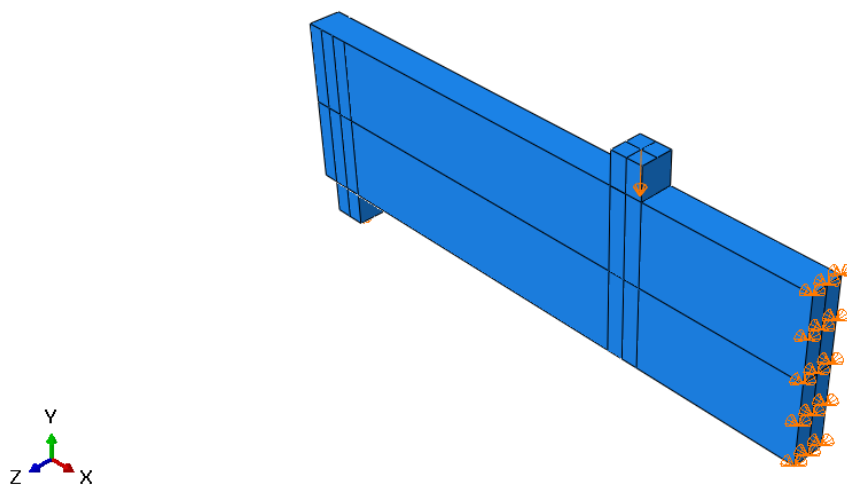


Figura 26. Viga del modelo con condiciones de contorno aplicadas.

4.2.1 Armadura

La definición de la armadura se realiza de manera análoga al modelo de prueba. En este caso, la armadura superior es de diámetro 20 y la armadura inferior de diámetro 25. Los cercos empleados son de diámetro 10.

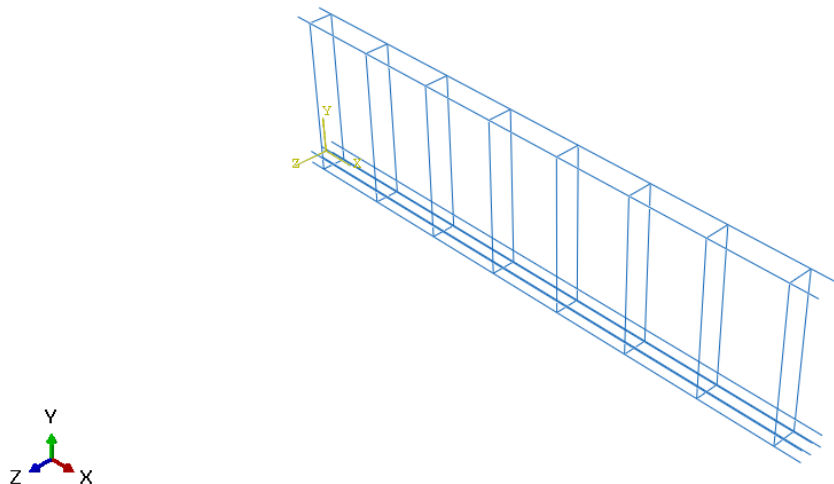


Figura 27. Armadura del modelo.

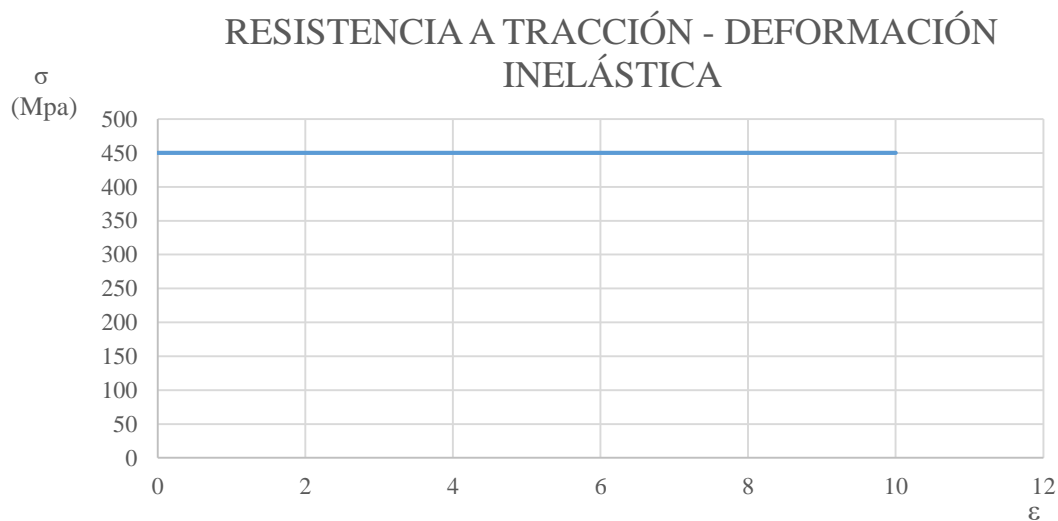
En primer lugar, se define la geometría de la armadura mediante diferentes líneas. Se define también la sección correspondiente indicando el área de la misma y se le asigna el material correspondiente, según sea armadura longitudinal o cercos. Los cercos de diámetro 10 mm están constituidos de acero de 450 MPa de límite elástico. Se define un comportamiento elástico y plástico del material.

El comportamiento elástico viene definido por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. El

comportamiento plástico se define con el par límite de fluencia- deformación plástica. En este caso, para estar del lado de la seguridad no se considera endurecimiento por deformación en la ley tensión deformación.

Comportamiento elástico	E_c	200 GPa
	ν	0.3
Comportamiento Plástico	Resistencia a tracción	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	ϵ_{in}
	450	0
	450	5
	450	10

Tabla 18. Comportamiento elástico y plástico del acero empleado para los cercos.



Gráfica 12. Comportamiento tracción – deformación inelástica del acero empleado para los cercos.

La armadura longitudinal está formada por acero de límite elástico 540 MPa, cuyo comportamiento se describe a continuación:

Comportamiento elástico	E_c	200 GPa
	ν	0.3
Comportamiento Plástico	Resistencia a tracción	Deformación inelástica
	σ (Mpa)	ϵ_{in}
	540	0
	540	5
	540	10

Tabla 19. Comportamiento elástico y plástico de la armadura empleada para el armado longitudinal.

La condición de contorno de simetría se aplica al extremo de la armadura longitudinal.

Dado que no se trata de un análisis aislado de la armadura, se debe asegurar una correcta unión entre el armado y la viga se aplica a la armadura la restricción de región embebida, en el apartado “constraints”.

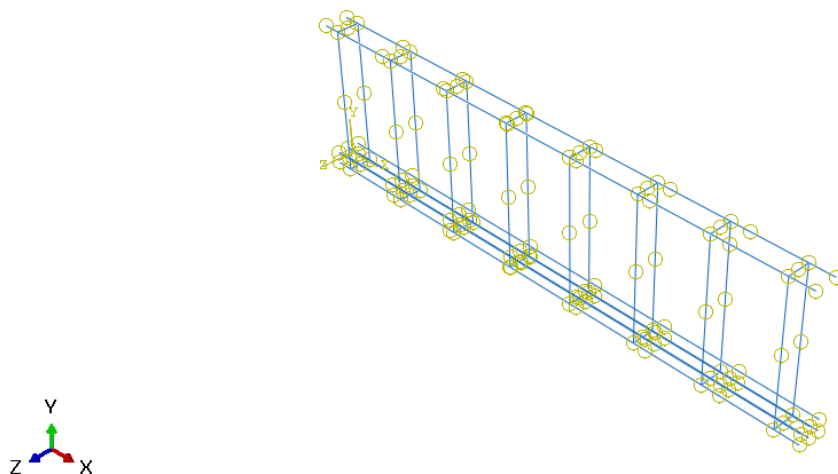


Figura 28. Condición de interacción armadura – viga aplicada a la armadura.

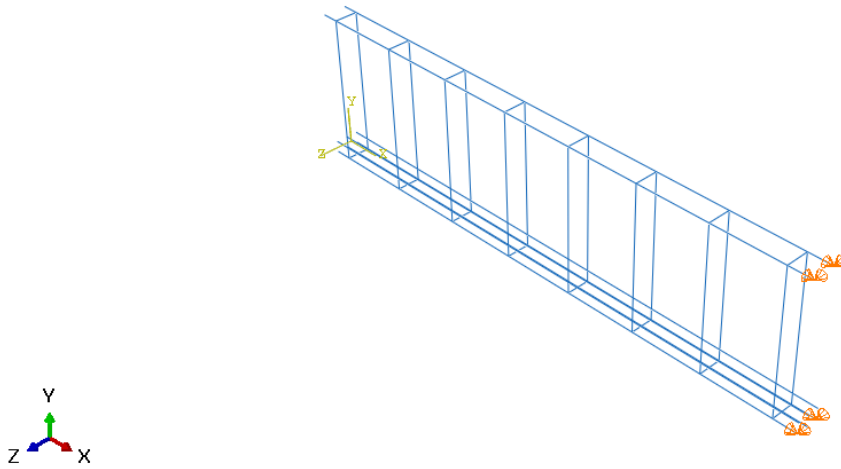


Figura 29. Condición de simetría aplicada a la armadura.

4.2.2 Puntos de apoyo, aplicación de carga y mallado del modelo.

La aplicación de cargas puntuales y condiciones de contorno asociadas a un punto requiere una rigurosa modelización. Para evitar que se produzca fallo en el punto de aplicación que impida obtener el valor real de las tensiones y deformaciones que se alcanzarían en la estructura, se aplica sobre una zona de material con comportamiento elástico.

Siguiendo este criterio se definen dos bloques de geometría $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ situados a 0.1 y 1.3 metros del extremo. En el primero se aplica la condición de contorno de apoyo y en el segundo la carga puntual de valor V . Se aplica control en desplazamiento en el punto central del apoyo superior. En este caso se aplica un desplazamiento impuesto de 30 mm, posteriormente se amplía a 60 mm.

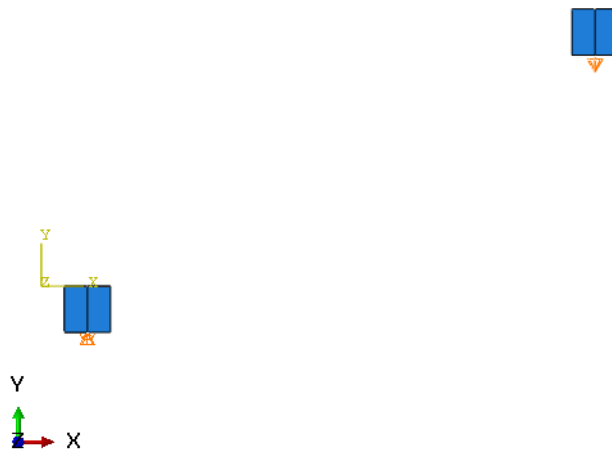


Figura 30. Geometría de los apoyos.

Se define un material con propiedades elásticas asociado a cada tipo de hormigón. Este es el material que se asocia a los apoyos. Los materiales definidos son: DOE, DSE, DEL, DSLE.

La continuidad entre la viga y los puntos de aplicación de la carga y el control de desplazamiento se asegura mediante la restricción tipo ‘tie’ que se define entre la cara superior del apoyo y la cara inferior de la viga y entre la cara inferior de la carga y la cara superior de la viga.

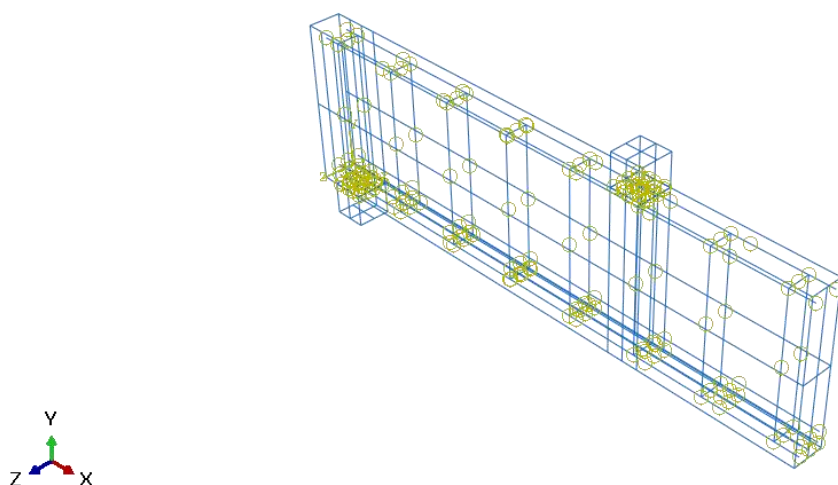


Figura 31. Restricciones de interacción viga – apoyos.

La malla que se emplea para el modelo es de tamaño 50 x 50 mm. El hormigón se simula con elementos C3D8R y para las barras se utilizan elementos tipo truss T3D2 de 25 mm de longitud.

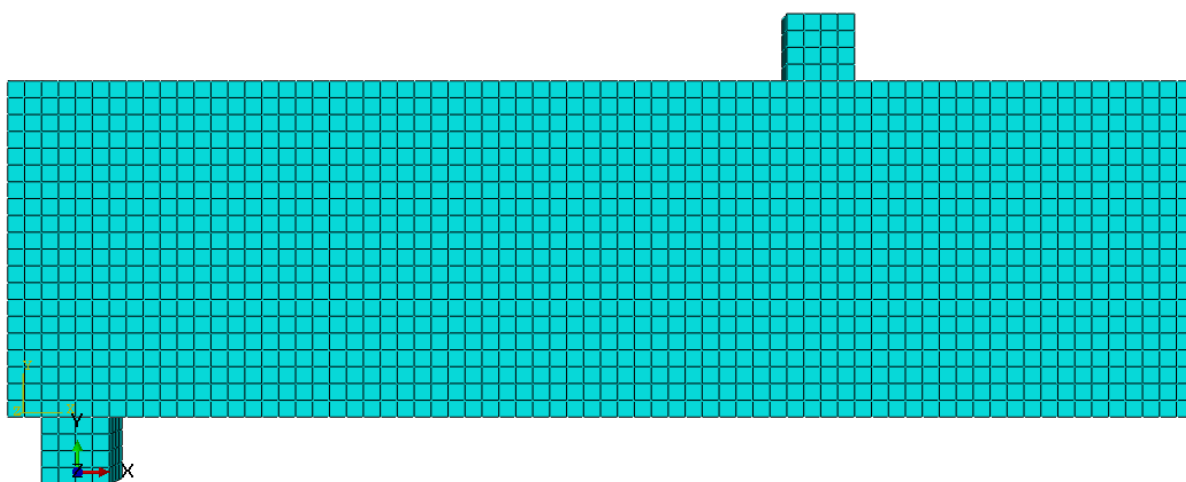


Figura 32. Mallado del modelo con malla 50 x 50.

4.3 Pasos de carga y variables a extraer

La finalidad del análisis es el estudio de la viga a esfuerzo cortante. Para ello se aplica un análisis en control de desplazamiento. Se realiza el análisis de la evolución de las variables en dos pasos de carga diferentes.

En el paso inicial se define la condición de apoyo de la viga y la condición de simetría de la armadura longitudinal.

En el paso Control en Desplazamiento se propagan las condiciones anteriores y se define la simetría de la cara y el control del desplazamiento en el punto de aplicación de carga. Es un paso de tipo estático, con un número máximo de incrementos de 100000. El paso inicial es de valor 0.001. Se establece el rango de incrementos en (1e-15 , 0.005).

Debido al gran número de pasos de integración que se van a dar en cada análisis, es preciso hacer una buena selección de las variables a guardar. Para obtener la curva cortante-desplazamiento, se genera una variable histórica que almacene la información correspondiente al valor de la reacción en el punto de apoyo. El valor se almacenará cada 0.001 unidades de tiempo.

4.4 Ensayos a realizar

La finalidad de este estudio es obtener la ley de comportamiento a cortante del hormigón reforzado con fibra de acero ensayado en el laboratorio de la ETSI, estableciendo comparaciones entre los distintos efectos de las fibras según su longitud y proporción.

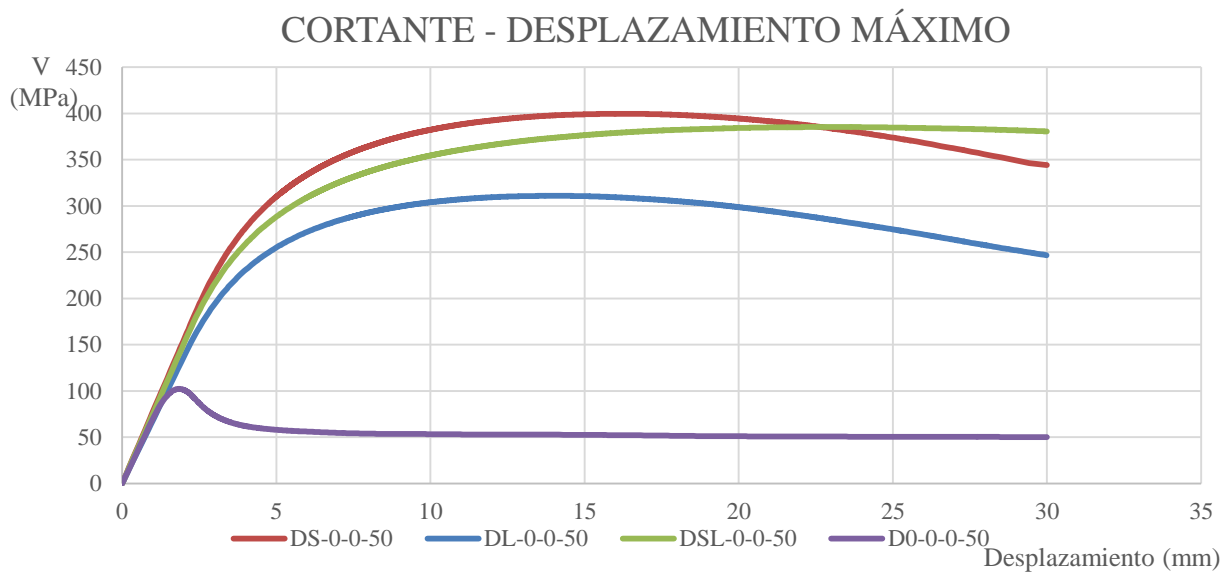
Como se ha comentado en capítulos, se realiza un análisis para cada tipo de hormigón, aplicándolo a una viga de hormigón sin armadura y a otra viga con armadura.

Al tener caracterizados los materiales con diferentes leyes de comportamiento, se realiza un ensayo con cada una de las leyes de comportamiento. (Tensión – deformación; tensión – apertura de grieta; energía de fractura)

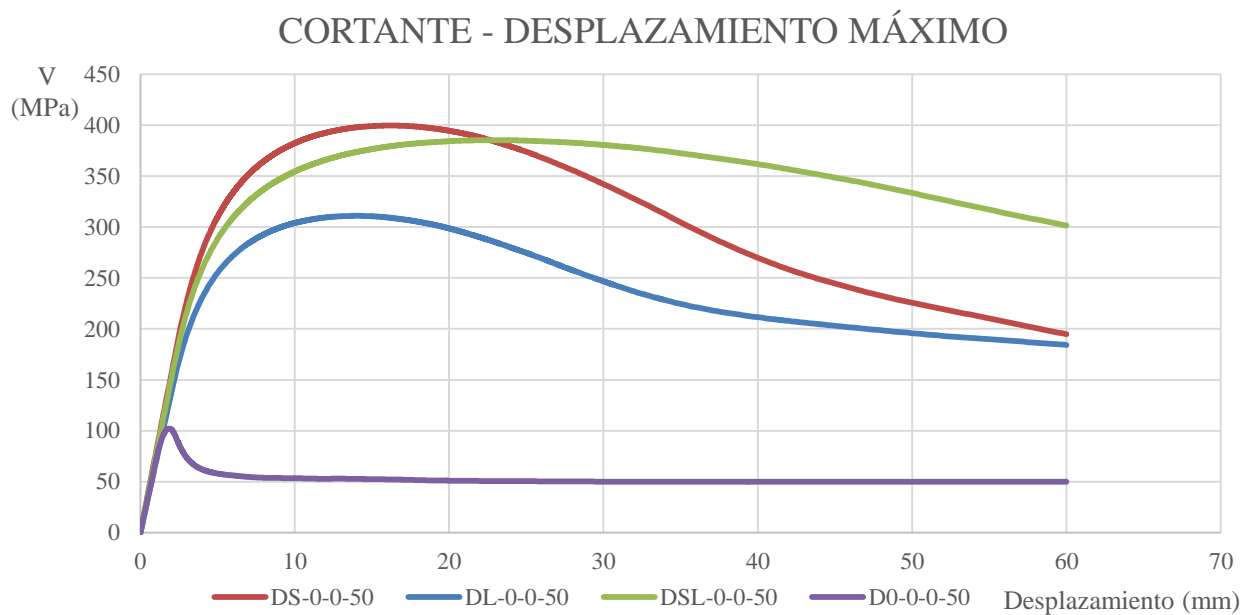
4.4.1 Estudio sin armadura

Para realizar una correcta caracterización de los hormigones bajo estudio, en primer lugar, se realiza un ensayo de la viga de las dimensiones descritas sometida a esfuerzo cortante sin armadura. La finalidad principal es corroborar el efecto cosido que aportan las fibras, así como la definición de la mezcla más resistente.

El desarrollo de este ensayo en abaqus se ha llevado a cabo con el fichero DX-0-0-50.cae. En un primer estudio se impuso un valor de desplazamiento de 30 mm en la zona de aplicación de carga. El hormigón sin fibra queda perfectamente caracterizado, sin embargo, las gráficas obtenidas de los hormigones reforzados resultaban dudosas. En una segunda aproximación se impuso un valor de desplazamiento de 60 mm. Aunque los valores máximos de cortante coincidían con los del ensayo de 30 mm, ha servido para corroborar a ley de comportamiento a cortante de los hormigones.



Gráfica 13. Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-0-0-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.



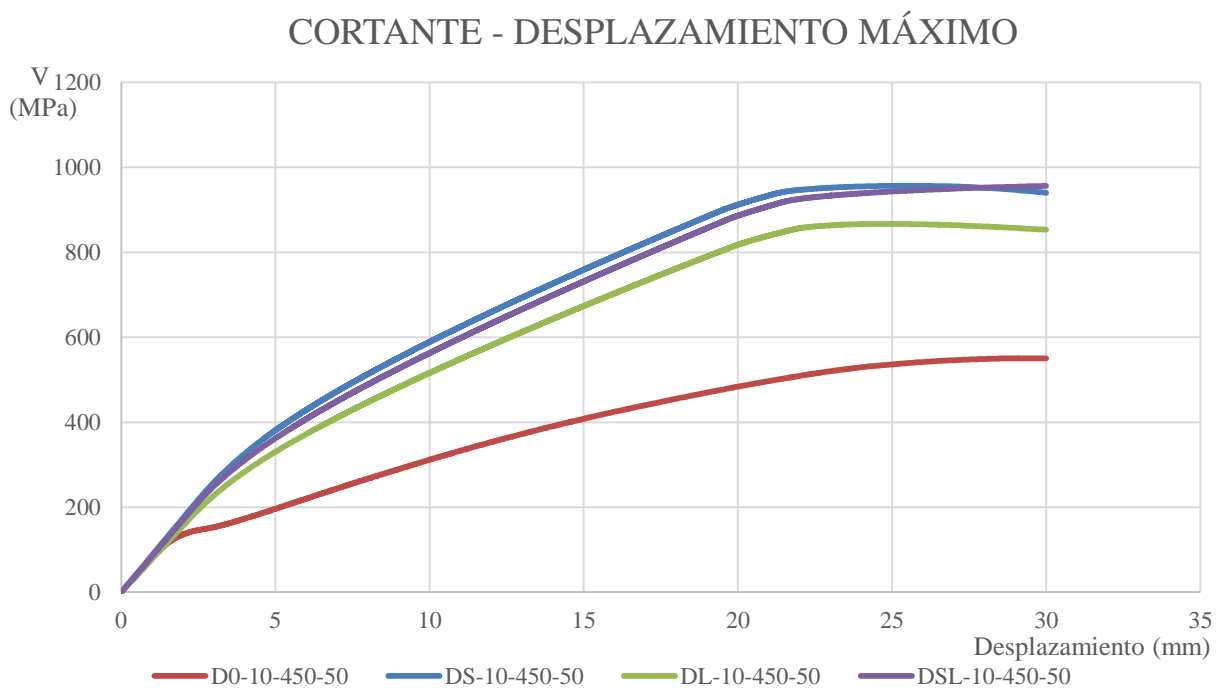
Gráfica 14. Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-0-0-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.

	U = 30 mm	U = 60 mm
	VMAX (MPa)	VMAX (MPa)
D0-0-0-50	102.163	102.163
DS-0-0-50	399.658	399.658
DL-0-0-50	310.972	310.972
DSL-0-0-50	385.369	385.369

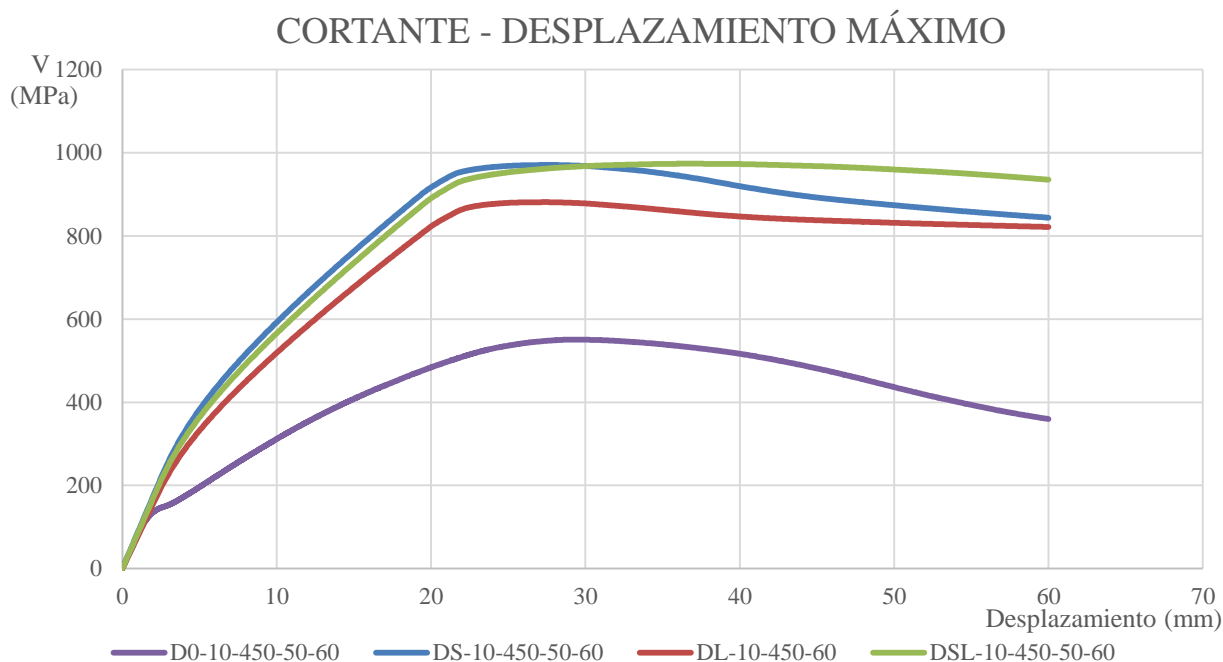
Tabla 20. Valores máximos de cortante del ensayo DX-0-0-50.

4.4.2 Estudio con armadura

El estudio con armadura corresponde al modelo descrito anteriormente. Para ello se genera el fichero DX-10-450-50. A este modelo se aplican los diferentes hormigones ensayados y se realizan los cálculos con Abaqus. En primera instancia, se realiza un estudio con desplazamiento impuesto de 30 mm. Sin embargo, al no ser del todo claras las leyes de comportamiento a cortante obtenidas, se realiza un segundo estudio con desplazamiento de 60 mm. A continuación se adjuntan los resultados obtenidos:



Gráfica 15. Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-10-450-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.



Gráfica 16. Comportamiento cortante – desplazamiento del modelo DX-10-450-50 con ley de comportamiento a tracción según la deformación inelástica y desplazamiento 30 mm.

	U = 30 mm	U = 60 mm
	VMAX (MPa)	VMAX (MPa)
D0-10-450-50	550.788	550.788
DS-10-450-50	956.789	970.653
DL-10-450-50	867.172	881.171
DSL-10-450-50	956.365	973.519

En este caso resulta importante el haber realizado un ensayo con desplazamiento de 60 mm ya que en los tres hormigones con fibra se alcanza el valor máximo de cortante en el intervalo 30-60 mm.

4.5 Conclusiones

Según los ensayos realizados se observa que la mezcla que aporta mayor resistencia a cortante es la de fibras cortas, llegando a un valor máximo cuatro veces mayor que el correspondiente al hormigón sin fibras. Al mezclar fibras largas y cortas, la resistencia alcanzada es similar a la de la mezcla de fibras cortas. En este caso el crecimiento del tamaño de la grieta se va propagando de forma mas lenta.

Al incluir la armadura en el modelo de estudio crece considerablemente el valor de cortante máximo alcanzado

en todos los casos. Este aumento es mayor en el hormigón sin fibra que en los hormigones con fibras.

Es evidente que la resistencia a cortante mejora notablemente mediante la adición de fibras de acero.

5 CONCLUSIONES

TRAS los análisis realizados, comparando los resultados con el modelo de referencia, se puede afirmar que el material “Concrete Damage Plasticity” reproduce de forma adecuada el comportamiento del Hormigón reforzado con fibra. Los errores podrían solventarse con un mayor refinamiento de la malla y disminuyendo los rangos de integración. Con este ensayo se elige dicho material para modelizar las diferentes mezclas de hormigón de alta Resistencia reforzado con fibras.

Una vez desarrollada la herramienta informática , según los ensayos realizados se observa que la mezcla que aporta mayor resistencia a cortante es la de fibras cortas, llegando a un valor máximo cuatro veces mayor que el correspondiente al hormigón sin fibras. Al mezclar fibras largas y cortas, la resistencia alcanzada es similar a la de la mezcla de fibras cortas. En este caso el crecimiento del tamaño de la grieta se va propagando de forma mas lenta.

Al incluir la armadura en el modelo de estudio crece considerablemente el valor de cortante máximo alcanzado en todos los casos. Este aumento es mayor en el hormigón sin fibra que en los hormigones con fibras.

Es evidente que la resistencia a cortante mejora notablemente mediante la adición de fibras de acero.

6 ESTUDIOS FUTUROS

UNA vez desarrollada la herramienta informática y habiendo analizado los resultados obtenidos, se presenta un amplio campo con el que se podría mejorar la funcionalidad de la misma. Los principales ámbitos en los que se podrían profundizar son:

- Obtención de la Ley de comportamiento para desplazamientos mayores.

Según el desplazamiento impuesto en los modelos anteriores se observa que la deformación admitida antes de rotura del material podría aumentar. Mediante el análisis con mayores desplazamientos se podría obtener una ley de comportamiento que defina mejor el material. Desde el punto de vista de los Estados Límite también adquiere gran interés el conocimiento de la deformación última del material.

- Comprobación de la plastificación de la armadura permitiendo obtener la ductilidad del modelo.

Para ello se debe medir la deformación alcanzada por la armadura, obteniendo la ley de comportamiento del acero, permitiendo obtener la ductilidad del modelo. .

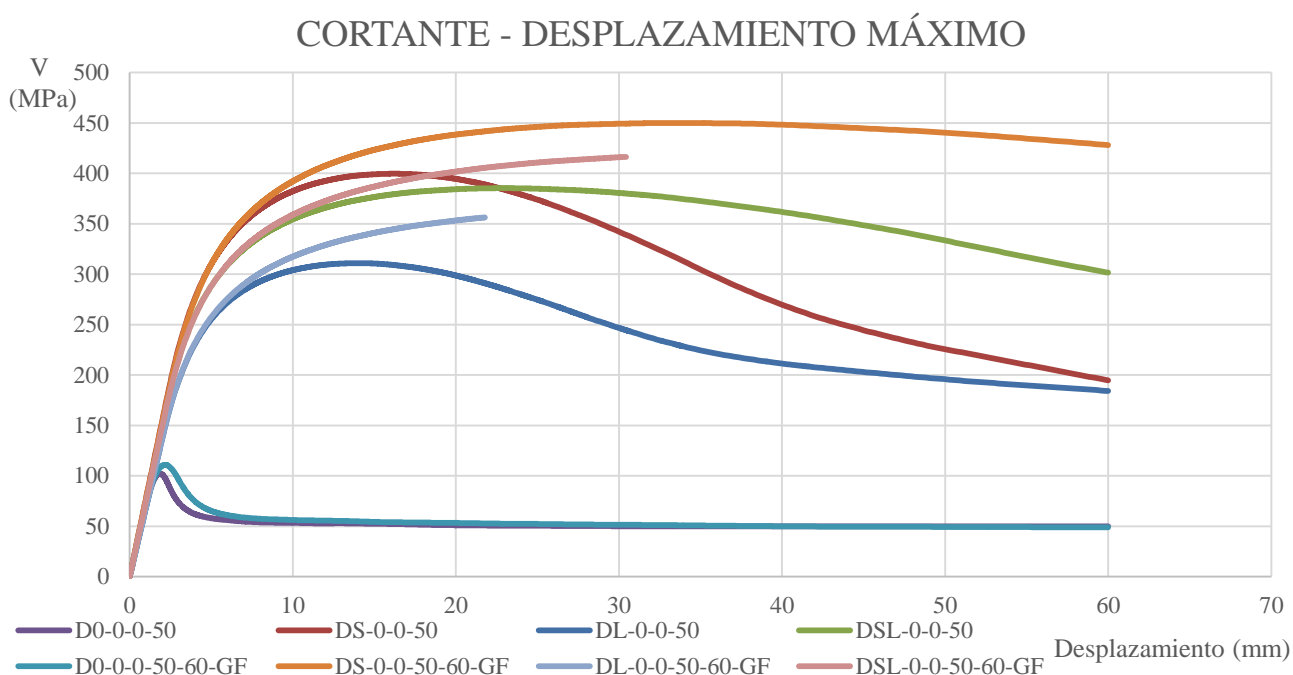
- Implementar el comportamiento del material mediante la energía de fractura y con la ley tensión – apertura de grieta.

Abaqus permite definir el comportamiento del material mediante diferentes leyes de comportamiento. Esto permitiría la comprobación de la convergencia de los resultados obtenidos para un determinado modelo.

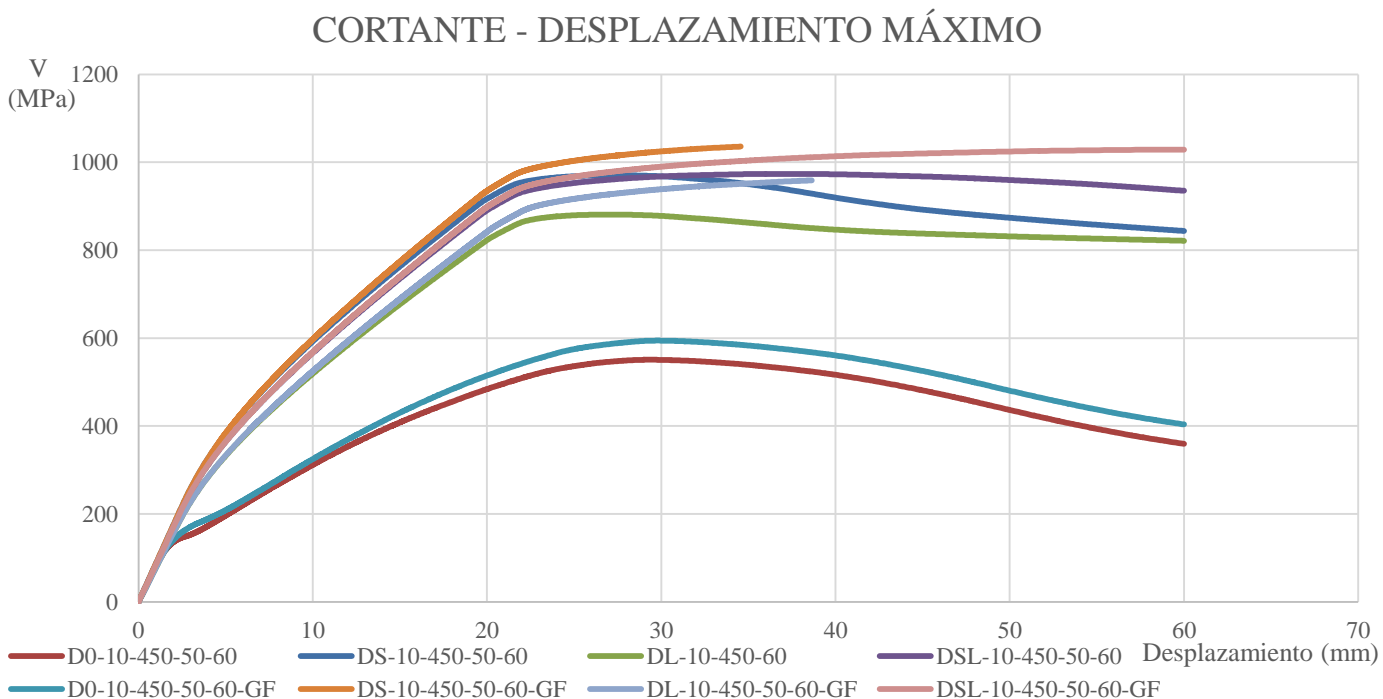
El estudio con la energía de fractura se ha sido realizado para todos los casos. Sin embargo, los resultados que se obtienen no son los deseables para todos los casos.

En el caso del hormigón reforzado sin fibra, se obtiene prácticamente el mismo resultado con la ley σ - ϵ que con la energía de fractura. De las gráficas restantes se puede concluir que el comportamiento elástico lineal coincide en ambas leyes de comportamiento, sin embargo en los ensayos con hormigón reforzado con fibra se produce un endurecimiento en la zona plástica.

Es por esta razón por la que habría que perfilar en los estudios futuros el estudio de la energía de fractura al aplicarla a la herramienta. También se debería incrementar el número de pasos de integración en este caso, ya que no se obtienen resultados para el desplazamiento impuesto de 60 mm.



Gráfica 17. Comparación de la ley de comportamiento a cortante con leyes de comportamiento σ - ϵ y energía de fractura para los modelos DX-0-0-50-60.



Gráfica 18. Comparación de la ley de comportamiento a cortante con leyes de comportamiento σ - ϵ y energía de fractura para los modelos DX-10-0-50-60.

	$\sigma - \epsilon$	Energía de fractura
	VMAX (MPa)	VMAX (MPa)
D0-0-0-50	102,163	111,02
DS-0-0-50	399,658	450,03
DL-0-0-50	310,972	356,27
DSL-0-0-50	385,369	416,43
D0-10-450-50	550,788	594,35
DS-10-450-50	970,653	1.035,78
DL-10-450-50	881,171	958,90
DSL-10-450-50	973,519	1.028,84

Tabla 21. Comparativa de valores máximos de cortante con diferentes leyes de comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1]. Ali Amin, Stephen J. Foster University of New South Wales, Sydney, Australia , Numerical modelling of large scale steel-fibre-reinforced reinforced concrete beams failing in shear. FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop Fibre-reinforced concrete: From design to structural applications. (2014).

[2]. José D. Ríos, Carlos Leiva, M.P. Ariza, Stanislav Seitl, Héctor Cifuentes. Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography. Materials & Design. (2019)

[3]. Cifuentes Bulté, H., Medina Encina, F. Mecánica de la fractura aplicada al hormigón. Conceptos, análisis experimental y modelos numéricos. (2013)

[4]. Dassault System, Abaqus Analysis User's Manual.

[5]. Álvaro Mira Blanco. Estudio Metodológico mediante Elementos Finitos del Comportamiento de las Rótulas Plásticas en Elementos de Hormigón Armado. PFC. (2016)