



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

**Modelización numérica de vigas
de hormigón armado reforzadas
a cortante con laminados FRP**

Treball realitzat per:

Diego Rey López

Dirigit per:

Eva Oller Ibars

Noemí Duarte Gómez

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, **12 de junio de 2018**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Modelización numérica de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con laminados FRP

Autor: Diego Rey López

Tutor: Eva Oller Ibars

Tutor externo: Noemí Duarte

Resumen

La necesidad de equipar y reparar estructuras de hormigón actualmente ha determinado un creciente interés hacia el desarrollo de soluciones efectivas e innovadoras de refuerzo con un coste muy eficiente. Se sabe bien que las estructuras de hormigón armado presentarán en un futuro problemas de durabilidad, los cuales deberán ser reparados. Aquí es donde se abren paso nuevos materiales, cada vez más comunes, como son las fibras sintéticas o FRP. Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. A pesar de haberse materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su coste, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales. Sin embargo, un campo donde estos nuevos materiales tienen un papel protagonista es la reparación de obras. En una reparación o rehabilitación, el uso de materiales compuestos permite mejorar las características de la misma en cuanto al comportamiento estructural ante las solicitaciones y ante elementos agresivos y en ciertos casos rebajar el coste del proyecto.

Entre las diferentes técnicas disponibles se encuentran la adopción de materiales de tipo composite, como los Polímeros Reforzados con Fibras (en inglés "Fiber Reinforced Polymers"), que han demostrado ser una de las soluciones más viables para el refuerzo de estructuras de hormigón armado, en este caso de vigas. Si bien poseen unas cualidades extraordinarias de resistencia y ligereza, cuando no son fijados correctamente puede producirse el prematuro desprendimiento del sustrato antes de alcanzarse la capacidad resistente, un tipo de fallo muy común en este sistema. Por esta razón, se han llevado a cabo varios ensayos experimentales y análisis numéricos que están disponibles en la literatura y que han clarificado y predicho el comportamiento de unión de los FRP adheridos en las vigas. En esta tesina, se estudiará una campaña experimental para después aplicar las técnicas propias y comparar los resultados con la anterior y probar su eficiencia en este campo de aplicación. Para ello, se hará uso del programa de análisis estructural MIDAS FEA especializado en vigas de hormigón armado y que nos dará una descripción detallada y precisa del comportamiento de las vigas ante una carga puntual aplicada que trataremos en este trabajo. Los resultados obtenidos se estudiarán según la carga aplicada, las tensiones, los desplazamientos y la fisuraciones producidas en las vigas y que serán comparados con los de la campaña experimental.

Numerical modeling of reinforced concrete beams strengthened in shear with FRP sheets

Author: Diego Rey López

Supervisor: Eva Oller Ibars

External supervisor: Noemí Duarte

Abstract

The need to equip and repair concrete structures has currently determined a growing interest towards the development of effective and innovative reinforcement solutions at a very efficient cost. It is well known that reinforced concrete structures will present problems of durability in the future, which must be repaired. This is where new materials, increasingly common, such as synthetic fibers or FRP, are opened. These materials arise from the need to obtain materials that combine the properties of ceramics, plastics and metals. Despite having materials with exceptional properties, the practical applications are reduced by some factors that greatly increase its cost, such as manufacturing difficulty or incompatibility between materials. However, a field where these new materials have a leading role is the repair of works. In a repair or rehabilitation, the use of composite materials allows to improve the characteristics of the same in terms of structural behavior under solicitations and aggressive elements and in certain cases lower the cost of the project.

Among the different techniques available are the adoption of composite materials, such as Fiber Reinforced Polymers (Fiber Reinforced Polymers), which have proved to be one of the most viable solutions for reinforcement of reinforced concrete structures, in this case of beams. Although they possess extraordinary qualities of strength and lightness, when they are not fixed correctly, premature detachment of the substrate can occur before reaching the resistant capacity, a type of failure very common in this system. For this reason, several experimental tests and numerical analyzes have been carried out that are available in the literature and that have clarified and predicted the binding behavior of the FRP adhered in the beams. In this thesis, an experimental campaign will be studied to then apply the own techniques and compare the results with the previous one and prove their efficiency in this field of application. For this purpose, the structural analysis program MIDAS FEA specialized in reinforced concrete beams will be used and it will give us a detailed and precise description of the behavior of the beams before an applied point load that we will deal with in this work. The results obtained will be studied according to the applied load, the tensions, the displacements and the fissures produced in the beams and that will be compared with those of the experimental campaign.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis tutoras, Eva Oller y Noemí Duarte, el apoyo y el esfuerzo necesarios para la realización de la presente tesina ya que, sin ellas, no habría sido posible la misma.

A mi familia y amigos por haber estado presente en todo y momento ya haber mostrado interés y preocupación sobre el desarrollo de la tesina.

A todos aquellos profesores que durante el curso me han ofrecido y transmitido todos los conocimientos necesarios para poder aplicarlos en el trabajo de investigación.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.2 OBJETIVOS DE LA TESINA	6
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESINA	7
2. CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP).....	8
2.1.1 FORMACIÓN Y PRODUCCIÓN DE LOS FRPS.....	9
2.1.2 PROPIEDADES COMUNES DE LOS FRPS.....	9
2.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FRP.....	13
2.1.4 APLICACIONES DE FRP EN REPARACIÓN Y REFUERZO.	14
2.1.5 LAMINADO FRP PRETENSADO.	18
2.1.6 TIPOS DE FALLO.....	21
3 CAPÍTULO 3. ANÁLISIS NUMÉRICO CON LÁMINAS FRP.....	24
3.1 MODELO DE VIGA DE FIBRAS.	24
3.1.1 MODELOS CONSTITUTIVOS.....	25
3.1.2 MODELO DE SECCIÓN.....	27
3.1.3 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO NO LINEAL.	31
3.2 COMPARACIONES CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	31
3.2.1 DESCRIPCIÓN.....	32
3.2.2 RESULTADOS DEL MODELO Y DISCUSIÓN.....	34
3.3 MODELIZACIÓN NUMÉRICA CON MIDAS FEA.....	39
3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	39
3.3.2 MODELOS DE FISURA DE HORMIGÓN.	39
3.3.3. MODELO <i>TOTAL STRAIN CRACK</i>	40
3.3.4 MODELOS DE COMPRESIÓN	43
3.3.5 MODELOS DE TENSIÓN.....	46
3.3.6 MODELOS DE CORTANTE.	50
3.3.7 INFLUENCIA LATERAL.....	50
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
3.4.1 VIGA DE CONTROL	53
3.4.2 VIGA W90S3.....	58
3.4.3 VIGA W90S5.....	64
CONCLUSIONES.....	70
REFERENCIAS.....	73
ANEJOS.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1. Tubos de fibra de carbono	8
Ilustración 2-2. Fibra de basalto.....	8
Ilustración 2-3. Proceso de producción de las fibras	9
Ilustración 2-4. Refuerzo de pilares con FRP	15
Ilustración 2-5. Limpieza por abrasión	16
Ilustración 2-6. Presión y apoyo local.....	17
Ilustración 2-7. Imprimación epoxi.....	17
Ilustración 2-8. Limpieza de la superficie.....	17
Ilustración 2-9. Puesta en obra.....	17
Ilustración 2-10. Refuerzo con pintura de protección.....	17
Ilustración 2-11. Relación esquemática del momento-curvatura.....	19
Ilustración 2-12. Diferentes tipos de pretensado de FRP.....	20
Ilustración 2-13. Ejemplo de pretensado de un puente en Rijeka, Croacia.	20
Ilustración 2-14. Edificio de oficinas, Zurich Altstetten, Suiza.....	21
Ilustración 2-15. Delaminación en una viga de hormigón	22
Ilustración 2-16. Fallo por delaminación en FRP.	22
Ilustración 2-17. Gráfico cortante-desplazamiento de un análisis experimental y numérico ..	23
Ilustración 3-1. Modelo de viga de fibras de hormigón reforzado con FRP.....	25
Ilustración 3-2. Tensión-deformación del hormigón según las ecuaciones constitutivas.....	26
Ilustración 3-3. Tensión-deformación del refuerzo de acero y FRP	27
Ilustración 3-4. Sección de modelo híbrido N-M-V.	28
Ilustración 3-5. Medidas y configuración de los refuerzos de la viga control, la viga W90S3 y la viga W90S5	32
Ilustración 3-6. Resultados del fallo. Diferentes contribuciones a la resistencia a cortante	33
Ilustración 3-7. Configuración y malla de la prueba del modelo numérico (dimensiones en mm).....	34
Ilustración 3-8. Daños experimentales y numéricos en el fallo para las vigas de control y reforzadas: a) fallo experimental a cortante con la diagonal principal; b) fallo experimental por flexión a cortante de la viga reforzada con el fallo de los FRP y la fractura del hormigón con la aplicación de la carga; c) fallo a cortante numérico de la viga control con fallo de los estribos; d) fallo numérico de flexión por cortante con fallo de los FRP, fractura de hormigón y flexión de la armadura longitudinal y transversal. .36	
Ilustración 3-9. Desplazamientos en el punto medio-cortante en las vigas control y reforzadas de vano largo (resultados numéricos y experimentales).	37
Ilustración 3-10. Curvas de cortante deformación en la viga control, WS903 y WS905	38
Ilustración 3-11. Fractura localizada en una viga con refuerzo. a) Análisis numérico con fisuras distribuidas b) Analisis corrector con fisura discreta predefinida.....	40
Ilustración 3-12. Modelos de fisuras ortogonales: a) Modelo de fisura fija. b) Modelo de fisura rotativa.	41
Ilustración 3-13. Modelos de compresión.....	43
Ilustración 3-14. Curva de Throrenfeldt	44
Ilustración 3-15. Curva de compresión parabólica.	45
Ilustración 3-16. Modelos de tensión.....	46
Ilustración 3-17. Comportamiento de fisuración frágil.....	48
Ilustración 3-18. Reblandecimiento de tracción no lineal (Hordjik et al.)	49

Ilustración 3-19. Reblandecimiento de tracción multilinear.....	49
Ilustración 3-20. Influencia del confinamiento lateral en la curva de compresión de tensión- deformación	51
Ilustración 3-21. Factor de reducción debido a la fisuración lateral.....	52
Ilustración 3-22. Carga aplicada y reacciones en la viga.....	53
Ilustración 3-23. Mapa de fisuras en la fase inicial de la viga control.....	54
Ilustración 3-24. Mapa de fisuras en la fase final de la viga control	54
Ilustración 3-25. Estado de las fisuras en la última fase de carga.....	54
Ilustración 3-26. Distribución de tensiones en la primera fase de carga de la viga control.....	55
Ilustración 3-27. Distribución de tensiones en la última fase de carga de la viga control.....	55
Ilustración 3-28. Mapa de distribución de cortantes en fase semi-inicial de la control.....	56
Ilustración 3-29. Mapa de distribución de cortantes en fase final de la viga control	56
Ilustración 3-30. Mapa de desplazamientos en la última fase de aplicación de carga de la viga control	57
Ilustración 3-31. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga de control	58
Ilustración 3-32. Mapa de fisuras en fase inicial en la viga W90S3.....	59
Ilustración 3-33. Mapa de fisuras en fase final en la viga W90S3	59
Ilustración 3-34. Mapa de tensiones en fase inicial de carga en la W90S3	60
Ilustración 3-35. Mapa de tensiones en fase final de carga en la W90S3.....	60
Ilustración 3-36. Mapa de deformaciones producidas en la W90S3	61
Ilustración 3-37. Mapa de cortantes en la fase inicial de carga de la viga W90S3.....	61
Ilustración 3-38. Mapa de cortantes en la fase final de carga de la viga W90S3	62
Ilustración 3-39. Mapa de tensiones en la armadura en fase inicial de carga en la viga W90S3	62
Ilustración 3-40. Mapa de tensiones en la armadura en fase final de carga en la viga W90S3	63
Ilustración 3-41. Área plastificada de la viga W90S3	63
Ilustración 3-42. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga W90S3.....	64
Ilustración 3-43. Mapa de fisuras en la fase inicial de carga en la viga W90S5	65
Ilustración 3-44. Mapa de fisuras en la fase final de carga en la viga W90S5	65
Ilustración 3-45. Mapa de tensiones en la fase inicial de carga de la viga W90S5	66
Ilustración 3-46. Mapa de tensiones en la fase final de carga de la viga W90S5	66
Ilustración 3-47. Mapa de deformaciones de la viga W90S5	67
Ilustración 3-48. Mapa de cortantes de la viga W90S5	67
Ilustración 3-49. Mapa de tensiones en la armadura en la fase inicial de carga de la viga WS905.....	68
Ilustración 3-50. Mapa de tensiones en la armadura en la fase final de carga de la viga W90S5.....	68
Ilustración 3-51. Mapa de desplazamiento vertical en la fase final de la viga W90S5	68
Ilustración 3-52. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga W90S5.....	69

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Desde que se hace uso del hormigón armado en la construcción ha sido necesario realizar diversos tipos de refuerzos en la estructura por varios motivos que puedan causar el deterioro o la insuficiencia a la hora de resistir las cargas. Se ha de distinguir los términos de reparación y refuerzo y tratar de no confundirlos. El primero se refiere la modificación de una estructura dañada para restaurar sus características iniciales de servicio, la capacidad de carga y para mejorar su durabilidad si es necesario. El refuerzo es la modificación de una estructura que no está necesariamente dañada para aumentar su capacidad portante o su estabilidad respecto a las condiciones iniciales.

Entre las patologías más comunes se encuentran las fisuras de diferente tipología, los defectos asociados a la fase de proyecto, los relacionados con la calidad de los materiales y los de defectuosa ejecución, la mayoría de ellos produciéndose en estructuras ordinarias tales como vigas y forjados. Así pues, se han de realizar refuerzos en estructuras cuando haya evidencia de debilidad estructural, como grietas, deformaciones, desconchados, etc. o la estructura haya sufrido daños; cuando a pesar de que el proyecto original sea correcto, se presente la necesidad de cambiar las acciones de uso o cuando sea necesario evaluar la capacidad portante de la estructura. En ocasiones, no es necesario que estas patologías sean evidentes, sino que también pueden surgir sospechas de posibles defectos en la estructura. Estos refuerzos tienen un alcance muy amplio y están constituidos de varios tipos de materiales como hormigón, estructura y chapas metálicas, materiales compuestos, pretensado exterior u hormigón proyectado como la gunita. Aquí se estudiará, por tanto, los materiales de refuerzo compuestos con matriz polimérica como elemento actuante conjunto con el hormigón.

El uso de polímeros reforzados con fibras ha emergido durante las últimas décadas como una alternativa competitiva a las técnicas de refuerzo tradicionales como el aumento del canto con los recrecidos o los encolados de chapas, ambos con muy buenos resultados. Aun así, los FRP han supuesto un avance considerable en este campo y que se encuentran en constante desarrollo debido a los numerosos estudios que se están realizando debido a sus excelentes cualidades mecánicas. Las ventajas clave de los materiales compuestos avanzados aplicados en la ingeniería civil son básicamente sus altas capacidades de resistencia y su

ligereza que permiten obtener unos ratios de resistencia-peso y rigidez-peso muy competitivos. La aplicación de los materiales FRP comenzó en las estructuras de hormigón armado, donde su uso demostró ser muy efectivo ante el refuerzo de vigas de hormigón armado y el confinamiento de columnas, extendiéndose posteriormente a la mampostería y estructuras de madera. Entre sus desventajas en particular se puede producir un fallo prematuro del sistema debido al desprendimiento antes de alcanzar la resistencia a tracción haciéndolos poco eficientes en este aspecto. Por esta razón, la capacidad de unión de los FRP se ha investigado profundamente en los últimos años.

A pesar del incremento de estudios de vigas reforzadas a cortante con láminas de FRP, su investigación es mucho más limitada que el simple refuerzo a flexión. De hecho, se producen dispersiones considerables cuando se han comparado los resultados experimentales de resistencia a cortante y los valores predichos de manera numérica, verificando que el comportamiento de los FRP no está aún bien definido con predicciones teóricas. Por ello es necesario clarificar los mecanismos de resistencia a cortante en vigas para diseñar soluciones eficientes. Así pues, los modelos numéricos capaces de predecir la respuesta de los FRP en elementos reforzados se necesitan para una aplicación más amplia y eficiente de las medidas tomadas en la práctica.

1.2 Objetivos de la tesina

La presente tesina pretende cumplir con los siguientes objetivos:

- Hacer una explicación de los fundamentos en los que se basan los laminados FRP como refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado. Para ello, se usa el modelo de vigas formadas con fibras para predecir la respuesta de las vigas de hormigón armado reforzado con FRP y que ha sido desarrollado por diferentes autores para un análisis de elementos reforzados, incluyendo los efectos de cortante.
- Estudiar el comportamiento detallado de los laminados a través de los ensayos experimentales disponibles en la literatura de FRPs-hormigón con el fin de conocer sus cualidades de interfase, los posibles tipos de fallo, la capacidad

portante y los parámetros que puedan afectar estos aspectos. Para ello, se pretende hacer una amplia recopilación bibliográfica que nos permita conocer los diferentes parámetros y resultados como el momento último resistente una viga de hormigón reforzada con FRP.

- Comparar los resultados numéricos de los experimentales con la ayuda de los datos obtenidos con el software MIDAS FEA y otras fuentes externas que nos permitan conocer de manera más profunda el comportamiento de los FRP.
- Con los datos de las diferentes campañas experimentales y los ensayos realizados en esta tesina debidamente contrastados, establecer una serie de conclusiones finales que verifiquen o incluyan información adicional a la existente.

1.3 Estructura de la tesina

La presente tesina se ha estructurado en 3 capítulos, la bibliografía y los anejos. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno.

- Capítulo 1. En este apartado se hace la introducción con el planteamiento, el objetivo a cumplir y la estructura de la tesina.
- Capítulo 2. En este capítulo se desarrolla el estado del arte haciendo una descripción de los polímeros reforzados con fibras, según los diferentes tipos, las propiedades y las aplicaciones en el campo de la construcción y la ingeniería civil.
- Capítulo 3. Aquí se hace el análisis numérico de las vigas reforzadas con FRP, donde se explica el modelo de viga de fibras de la campaña experimental llevada a cabo por Alzate (2012) y Ferreira, Oller et al. y las comparaciones experimentales, la modelización numérica con MIDAS FEA y el análisis de los resultados obtenidos para después compararlos con los de las anteriores campañas.
- Finalmente se establecen una serie de conclusiones a partir de los datos obtenidos y sus perspectivas en el futuro.

CAPTÍULO 2. Estado del arte

2.1 Polímeros reforzados con fibras (FRP).

Los plásticos reforzados con fibras (FRP), también llamados polímeros reforzados con fibras, son materiales de tipo composite o resinas compuestas constituidos por una matriz polimérica mezclada con ciertos materiales de refuerzo, como las fibras. Las fibras son, en general, basalto, carbono, vidrio o aramida; en ciertos casos amianto, madera o papel también se pueden usar.

Este tipo de polímeros son de la categoría en la que su fuerza mecánica y elasticidad son mejoradas gracias a la incorporación de materiales fibrosos. La matriz, que es el material del núcleo desprovisto de refuerzo de fibra, es dura, pero comparativamente más débil, y debe ser endurecida con la adición de fibras i filamentos más resistentes.



Ilustración 2-2. Tubos de fibra de carbono

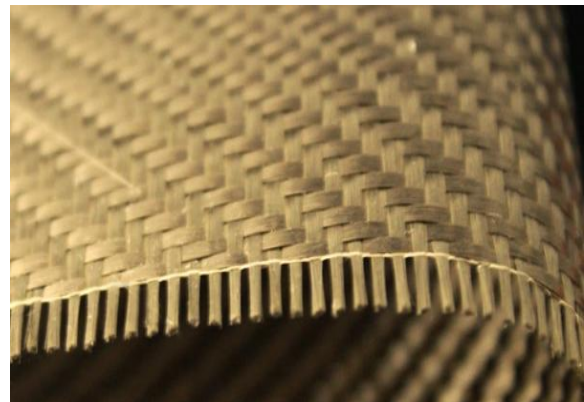


Ilustración 2-1. Fibra de basalto

Históricamente, los primeros plásticos sintéticos se originaron hacia la primera década del siglo XX con la invención de la baquelita. Desde entonces, el desarrollo de los plásticos reforzados con fibras para uso comercial fue objetivo de la investigación, especialmente en la industria de la aviación. La combinación de fibra de vidrio con resina supuso una alta resistencia y promesa como material estructural y de construcción. La producción de plástico de fibra de carbono comenzó a finales de los años 50 y se utilizó en la industria británica a principios de los 60. Hoy en día, cada una de estas fibras (principalmente vidrio, carbono y aramida) son muy usadas para cualquier aplicación que requiera plásticos con una fuerza o cualidades elásticas específicas.

2.1.1 Formación y producción de los FRPs.

La producción de los FRP incluye dos procesos distintos, el primer proceso en el que material fibroso es producido y formado de manera separada y el segundo en el que los materiales fibrosos se unen con la matriz durante el moldeo. De manera básica, hay dos procesos por los que se desarrolla un polímero: polimerización por crecimiento escalonado y polimerización por adición. Los plásticos compuestos se forman cuando una pareja de materiales homogéneos y de diferentes características se une para formar el producto final, con las propiedades materiales y mecánicas deseadas.

La mayoría de estos plásticos se producen en orientaciones de dos y tres dimensiones. Esta última surgió de la necesidad de la industria para reducir los costes de fabricación, incrementar las propiedades mecánicas y mejorar la tolerancia al daño por impacto que eran problemas asociados a los polímeros de dos dimensiones. Su formación es posible gracias a varios procesos de moldeo en los que un molde o una herramienta se usa para colocar la fibra, constituyendo una 'fibra seca' o una fibra con una proporción específica de resina. Después de humedecer estas fibras secas con resina, se produce el curado, en el que las fibras y la matriz toman la forma del molde. En esta fase, es posible aplicar calor y presión. Hay diferentes métodos de moldeo disponibles en la actualidad.



Ilustración 2-3. Proceso de producción de las fibras

2.1.2 Propiedades comunes de los FRPs.

Estos materiales plásticos son típicamente ligeros y resistentes. De hecho, algunos plásticos reforzados con fibras pueden ser incluso tan fuertes como algunos metales. Es

posible personalizar las propiedades de los plásticos reforzados para cumplir un amplio rango de requisitos. Tienen unas propiedades eléctricas y de compresión excelentes y muestran una gran resistencia a los agentes meteorológicos. Su proceso de producción es también económicamente muy efectivo con una producción media alta.

Otras propiedades de este tipo de plásticos incluyen aislamiento térmico, integridad estructural, y resistencia al fuego y a materiales químicos y corrosivos junto estabilidad a rayos ultravioleta. Las características de los plásticos dependen de ciertos factores como las propiedades mecánicas de la matriz y la fibra, el volumen relativo de estos componentes y la longitud de la fibra y la orientación en la matriz. Entre las fibras más comunes anteriormente citadas se encuentran:

- **Vidrio.** La fibra de vidrio es un material compuesto de filamentos muy finos de vidrio aglomerados con resinas que, al entrelazarse, dan lugar a una estructura fuerte perfecta para ser empleada como refuerzo estructural de otros materiales. Es un buen material aislante que mezclado con la matriz forma fibra de vidrio. Comparado con la fibra de carbono, es menos resistente y rígido, pero también menos frágil y más económico. Mantiene sus propiedades resistentes hasta los 1000 °C. La llamada lana de vidrio tiene muchas aplicaciones como material aislante térmico y acústico. Aparte de sus propiedades de aislamiento es incombustible e imputrescible, de fácil colocación y de poco peso. También encontramos los productos de Fiberglass, que se utilizan para formar marcos de ventanas y puertas.
- **Fibra de carbono.** La fibra de carbono es una fibra sintética constituida por finos filamentos de 5–10 μ m de diámetro y compuesto principalmente por carbono. Cada fibra de carbono es la unión de miles de filamentos de carbono. Se trata de una fibra sintética porque se fabrica a partir del poliacrilonitrilo. Es el material mayormente utilizado y ofrece una alta resistencia a tracción, resistencia química, dureza, ligereza y tolerancia a la temperatura con baja expansión térmica. Gran resistencia al ataque alcalino y a fatiga. Los átomos de carbono forman cristales que se disponen a lo largo del eje de la fibra. Esto hace que el material sea fuerte con un alto ratio de fuerza-volumen. Mantiene sus propiedades resistentes hasta los 650 °C.

Hoy en día, los campos en los que se aplica la fibra de carbono en el mundo de la construcción son las reparaciones y los refuerzos anti-sismos. Su implantación en la obra civil está avanzando más despacio que la utilización en reparaciones debido al bajo coste de los materiales tradicionales, a la limitación de procesos de fabricación de estructuras de materiales compuestos y al conservadurismo de las normativas de edificación y obra civil en todos los países industrializados. Sin embargo, los tres asuntos mencionados están siendo abordados con eficiencia obteniéndose los primeros resultados interesantes en la ejecución de puentes para vehículos de luces bajas, así como en cubiertas de edificios y obras singulares.

- **Aramida.** Las fibras de aramida están compuestas por fibras robustas de polímero sintético resistentes al calor y de alta resistencia. Mantiene sus propiedades resistentes hasta los 200 °C. Se preparan dos tipos de aramidias, meta-aramida (por ejemplo, Nomex®) y para-aramida (por ejemplo, Kevlar®). Ambos tipos de fibras de aramida son livianas y proporcionan una resistencia extremadamente alta.

Las fibras de aramida tienen muchas aplicaciones estructurales; pueden usarse como tendones en hormigón pretensado, como cables de suspensión en puentes y cuerdas en la industria naval debido a sus buenas propiedades de tracción, bajo peso y falta de corrosión.

Algunas de las propiedades mecánicas con un 65% de fibra son las siguientes:

Fibra	Aramida	Carbono	Vidrio	Acero de armar	Acero pretensado
Resistencia de la fibra (GPa)	3.66	3.50	2.10	0.04	1.86
Módulo de deformación (GPa)	125	181	75	200	190
Resistencia del compuesto (GPa)	1.54	1.75	0.83	0.04	1.86
Modulo de deformación (GPa)	84	132	49	200	190
Deformacion en rotura (%)	2.4	1.2	3.0	12	7

En tejidos o láminas de carbono unidireccional:

Propiedad	Tipo de fibra		
	T300	T700	M46J
Tracción de fibra en volumen (%)	70	70	70
Resistencia a tracción longitudinal (MPa)	2000	2800	2600
Módulo de deformación long. (GPa)	148	152	305
Deformación en rotura (%)	1.4	1.8	0.85
Densidad (g/cm ³)	1.5	1.5	1.6

Las matrices, por su parte, proveen de soporte lateral a las fibras y las protegen de los agentes físicos o químicos del ambiente en el que se encuentren. Algunas de las características que son importantes considerar a la hora de elegir la matriz para refuerzo de FRP son: la rigidez, la resistencia, la resistencia a fractura, conductividad térmica y eléctrica, habilidad para impregnar y unir las fibras, etc. Algunos de los materiales ampliamente utilizados como matrices son las resinas de poliéster, las resinas epoxi, las poliamidas o las termoplásticas. Sus propiedades se detallan en la siguiente tabla:

Propiedades	Poliéster	BMI	Poliamida	Epoxy	PEEK
Resistencia a tracción (MPa)	20-100	40-100	40-190	55-130	103
Módulo de elasticidad (GPa)	2.1-4.1	2.7-4.2	3-5	2.5-4.1	1.1
Deformación última (%)	1-6	1.2-6.6	1-60	1-9	30-150
Densidad (g/cm ²)	1.0-1.45	1.2	1.3-1.4	1.1-1.3	1.3

T_g (°C)	100-140	220-320	210-340	50-260	144
CTE ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	55-100	21-73	14-50	45-90	55

2.1.3 Ventajas y desventajas de los FRP.

Los refuerzos FRP presentan ventajas y desventajas como cualquier otro material que se enumeran a continuación:

Ventajas

- **Amplio diseño y flexibilidad.** Los FRP se pueden adaptar a una gran variedad de necesidades de diseño, en relación a los diferentes usos de requisitos medioambientales, de rendimiento, diseño y producción. Así pues, los materiales FRP son un excelente material con grandes posibilidades en la industria.
- **Variedad en la producción.** Este tipo de materiales tienen una amplia variedad de métodos de producción, por lo que se pueden elegir diferentes diseños y requisitos para cada tipo de situación. Pueden ser de producción mecánica o hechos a mano y normalmente moldeado de solo una vez, no así como otros materiales metálicos. En cuanto al diseño, reduce considerablemente el consumo de otros materiales y mano de obra.
- **Buenas propiedades físicas y químicas.** Los FRP son ligeros, resistentes, buenos aislantes térmicos, resistentes a la radiación, resistentes a la corrosión, tienen ondas electromagnéticas transparentes, baja temperatura y otras características. Son materiales anisótropos con amplias alternativas y con formulaciones adicionales que se pueden controlar artificialmente ajustando sus propiedades físicas y químicas.
- **Ahorro energético de calidad.** Al poder realizar el empastado manualmente en componentes grandes a bajas temperaturas, su método de producción no requiere un molde muy complejo por lo que el consumo de energía es bastante bajo.
- **Bajo coste de mantenimiento.**

Desventajas

- En ocasiones, debido a no estar aún afianzados en el mercado algunos materiales avanzados de los FRP pueden ser de alto coste.
- La separación de las láminas FRP de la superficie de adhesión es muy común y se generalmente se produce antes de alcanzar el momento último que puede soportar, por lo que es necesario realizar estudios concisos y revisiones para asegurarse de que esto no ocurra. En ocasiones se producen fisuras en las fibras y decoloraciones.
- Falta de códigos y normativas y ausencia de un método formal para diseñar refuerzos de estructuras en muchos países.
- Su poco uso favorece también la falta de conocimiento sobre los efectos medioambientales a largo plazo con el uso de grandes volúmenes de resinas.
- Baja ductilidad, siendo el fallo no previsible haciéndolo potencialmente catastrófico.

2.1.4 Aplicaciones de FRP en reparación y refuerzo.

La aplicación de refuerzos con FRP a estructuras de hormigón se relaciona con una serie de desarrollos recientes:

- El constante incremento de estructuras de hormigón dañadas por la corrosión de acero armado o pretensado.
- El progreso considerable en el campo de plásticos disponibles para aplicaciones industriales (aviación y espacial, automovilística, ferroviaria, robótica, naval...).
- La posibilidad de incorporar sensores ópticos, que ofrecen perspectivas potenciales en la monitorización de las estructuras de hormigón.

Los sistemas FRP son apropiados para el refuerzo a flexión, cortante y confinamiento de columnas y mejoras en la ductilidad. También se han utilizado satisfactoriamente como refuerzo ante sismos en estructuras de hormigón. Estas aplicaciones incluyen minimizar los mecanismos de fallo por fragilidad como el fallo a cortante de nudos de vigas y de columnas

y en el fallo de los solapes de armaduras. Los FRP también se han utilizado para confinar columnas y así resistan el pandeo de barras de acero longitudinales. Estos esquemas FRP aumentan el desplazamiento global y las capacidades de disipación de energía de la estructura de hormigón mejorando su comportamiento general.

Por su resistencia a la corrosión, los FRP se pueden utilizar tanto en el interior como en el exterior de la estructura y en casi todo tipo de ambientes.



Ilustración 2-4. Refuerzo de pilares con FRP

Fases de aplicación de FRP

1. Diseño y cálculo.

En esta fase se llevan a cabo las tareas de diseño del proceso de aplicación de los FRP y los cálculos necesarios para que se haga de manera correcta. Se debe tener en cuenta la normativa existente respetando los valores de cálculo y límites establecidos sin alterar los principios de los códigos de construcción presentes en el lugar. Por ejemplo, las estructuras de materiales convencionales tienen requisitos de durabilidad en cuanto a plasticidad (absorción de energía). Aunque los refuerzos FRP sean frágiles, es posible obtener una buena plasticidad con el diseño apropiado de los materiales, la geometría y la construcción.

2. Selección del compuesto.

Los aspectos principales a la hora de elegir el compuesto para estructuras de hormigón son la resistencia a corrosión, la resistencia a tracción, una baja relajación mecánica, dureza, alta resistencia a fatiga, estabilidad y unas propiedades térmicas y eléctricas que

varían según cual sea la aplicación. Por supuesto, estas condiciones se han de adaptar a las necesidades propias de la estructura de hormigón que se esté tratando.

3. Preparación del soporte.

El soporte de las fibras debe estar limpio, seco, firme, rugoso y libre de aceites y contaminantes, ya que, en caso contrario, no se produciría una correcta adhesión y podría dar lugar al fallo por delaminación. El International Concrete Repair Institute recomienda diferentes texturas para cada tipo de fibra.



Ilustración 2-5. Limpieza por abrasión

4. Aplicación del laminado.

Primeramente, según se ha comentado en el punto anterior se hace una limpieza apropiada del sitio en el que se vaya a aplicar. Seguidamente se ha de hacer una imprimación con una resina, por ejemplo epoxi, que pueda adherir la lámina con la superficie que se quiera reforzar. Se coloca la lámina FRP y con un instrumento de tipo rodillo se hace presión y apoyo local para fijarla bien y asegurarse que no sufra movimientos laterales o longitudinales. Posteriormente, se elimina la resina sobrante. También se puede aplicar un refuerzo con pintura de protección en algunos casos donde el ambiente sea más agresivo. La puesta en obra debe ser segura y adaptada en cada caso.

5. Comprobación.

Por último, se han de realizar una serie de comprobaciones mecánicas, de ejecución, etc., y verificar que cumplen las condiciones del material. Esta fase no se debe minusvalorar ya que la función de las láminas FRP es vital en el buen funcionamiento de la estructura.



Il·lustració 2-8. Limpieza de la superficie



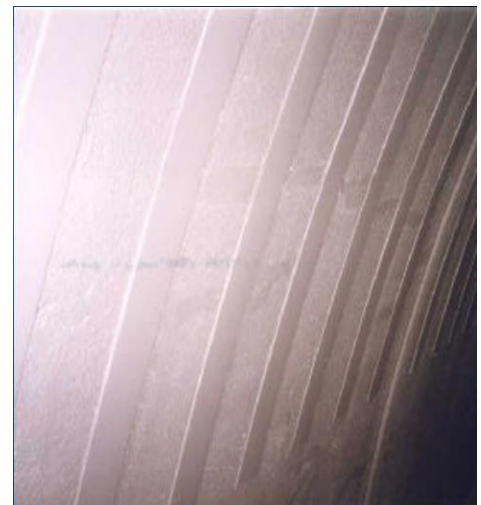
Il·lustració 2-7. Imprimación epoxi



Il·lustració 2-6. Presión y apoyo local



Il·lustració 2-9. Puesta en obra



Il·lustració 2-10. Refuerzo con pintura de protección

Beneficios de los FRP en vigas de hormigón.

- Aumenta la resistencia a flexión en las zonas de momentos tanto positivos como negativos.
- Aumenta la resistencia a cortante.
- Aumenta la rigidez en cargas de servicio.
- Reduce el ancho de las fisuras para mejorar la durabilidad y la resistencia a la corrosión.
- Retarda la corrosión reduciendo la entrada de humedad en las vigas.
- No reduce la altura libre (por ej. en parkings).
- Coste más bajo que los métodos convencionales.

2.1.5 Laminado FRP pretensado.

Varias investigaciones han verificado las ventajas del FRP pretensado como refuerzo de estructuras. Se usa principalmente en forma de tiras/láminas (flexión), tirantes (cortante) y láminas de confinamiento. Un aspecto positivo es la posibilidad de actuar activamente contra el peso muerto y así reducir la existencia de deformaciones y fisuras en la estructura. Con una cantidad suficiente de pretensado en la lámina, la carga en la que se produce fisuración se ve considerablemente aumentada comparada con una viga de referencia sin reforzar. También es aplicable a la carga en la que la armadura comienza a deformarse. La capacidad portante última también se ve generalmente mejorada. A pesar de todo, se puede observar una disminución de la ductilidad, a causa de la baja deformación cuando se alcanza la carga última, cuando se aplica el pretensado inicial en la lámina. Las fibras sin pretensar tienen la desventaja de proveer una rigidez adicional muy limitada a la estructura bajo cargas de servicio. Además, una gran cantidad de actividades de investigación han demostrado claramente que el fallo a nivel estructural se produce después de la deshesión del refuerzo con FRP de sustrato de hormigón. Generalmente, los FRP no suelen alcanzar la capacidad última de tensión, por lo que su resistencia a tracción no es explotada al máximo; normalmente, solo el 20-30% de la capacidad del material se usa de manera eficiente.

Cuando una estructura este reforzada con una lámina destensada siempre presente el fallo de delaminación en la carga punta, es posible obtener el fallo a tracción en el refuerzo exterior si la deformación inicial es suficientemente alta. El gráfico siguiente muestra una representación esquemática de la relación del momento-curvatura ($M - \chi$) para los tres tipos de situaciones (fallo por delaminación o por tensión con pretensado, fallo por delaminación sin pretensar y fallo por flexión de armadura / fractura de hormigón). Una mejora de las fisuras, flexión y carga última se muestra en términos de un incremento de los momentos últimos respectivos ΔM_{cr} , ΔM_y y ΔM_u .

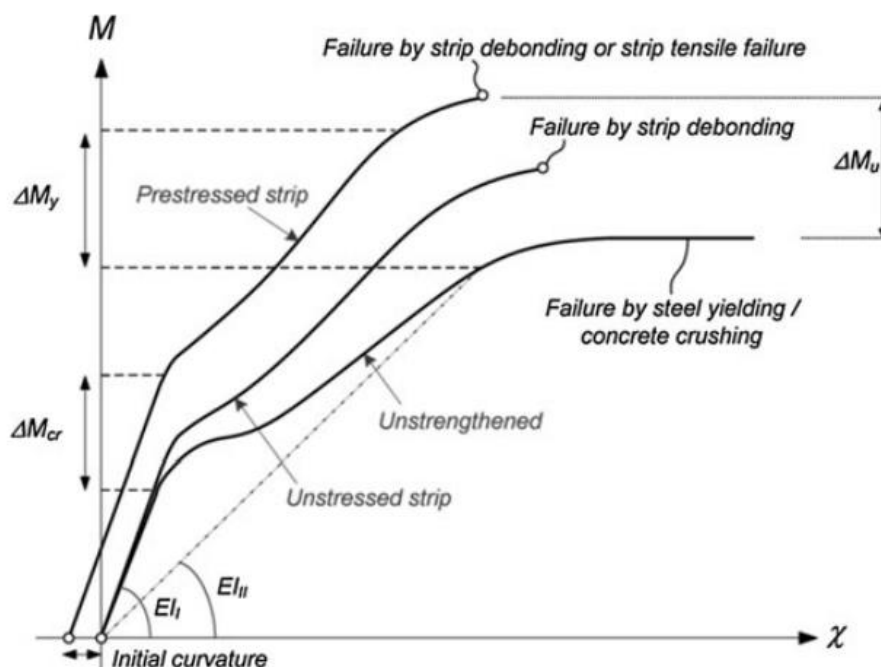


Ilustración 2-11. Relación esquemática del momento-curvatura

Tipos de pretensado

Una estructura existente puede ser pretensada según tres métodos, que son resumidos en El-Hacha et al. (2001) y presentados en la siguiente figura. La primera técnica, conocida como el *sistema de vigas flectadas*, requiere una contra flexión inicial ante los pesos muertos con la ayuda de gatos hidráulicos. Después, la lámina de FRP se coloca y la estructura es pretensada debido a que se libera la flexión inicialmente aplicada. Una segunda posibilidad es el uso de un soporte constructivo externo, en el que el equipo de pretensado se apoya. La tercera categoría es la más común y consiste en pretensar sobre la misma estructura. Esta

medida requiere la previa instalación de elementos de soporte, como tornillos de anclaje que se usan para fijar el gato hidráulico. En la mayoría de los casos, estos elementos temporales se retiran después de completar el refuerzo.

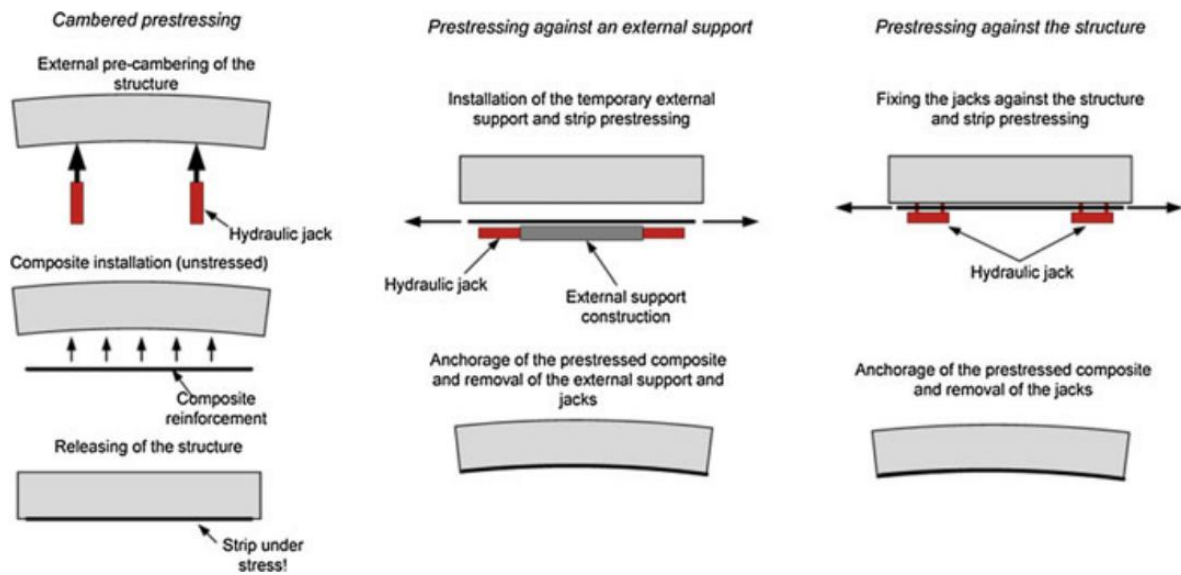


Ilustración 2-12. Diferentes tipos de pretensado de FRP.



Ilustración 2-13. Ejemplo de pretensado de un puente en Rijeka, Croacia.



Ilustración 2-14. Edificio de oficinas, Zurich Altstetten, Suiza.

Los FRP de carbono en los modos de cortante y confinamiento son aun limitados en investigación académica. Algunas aplicaciones prácticas ya se han implementado. El procedimiento que se aplica parece ser muy beneficioso y de gran valor para investigación e instalación.

2.1.6 Tipos de fallo.

Los fallos que experimentan los FRP con la estructura suelen ser de dos tipos:

- **Fallo de los materiales.** Se produce cuando el material (hormigón, acero, adhesivo o compuesto) sobre el que se soporta el FRP sufre un fallo debido a flexión, cortante, exceso de cargas, etc. La rotura se puede producir en el compuesto, en el hormigón en la zona comprimida o traccionada o en el acero armado o pretensado.
- **Fallo de interfases.** Se produce cuando, estando la estructura en buenas condiciones, la interfase o adhesivo con el hormigón o compuesto sufre un fallo, fenómeno llamado delaminación. Las causas son por fisuras de cortante, fisuras de flexión o la falta de planeidad en la preparación de la superficie.

Varios estudios experimentales han demostrado que la delaminación del sustrato es el tipo de fallo más común de los materiales FRP aplicados en estructuras de hormigón, con muy pocos casos en los que se produce un fallo del adhesivo o la ruptura del refuerzo.



Ilustración 2-15. Delaminación en una viga de hormigón

Los resultados de trabajos experimentales de FRP sobre hormigón revelan un fallo por separación con la extracción de una pequeña capa del sustrato u hormigón, normalmente mayor en correspondencia con las uniones de mortero. En los refuerzos a flexión, el fallo por delaminación se puede iniciar tanto en fisuras intermedias debidas a tensiones cortantes como cerca del borde de la lámina. Cuando se produce esta separación, la lámina ya no contribuye en resistencia de la sección transversal, generalmente produciendo un fallo estructural, ya que no se puede establecer ningún equilibrio entre las fuerzas aplicadas, reacciones y fuerzas internas.

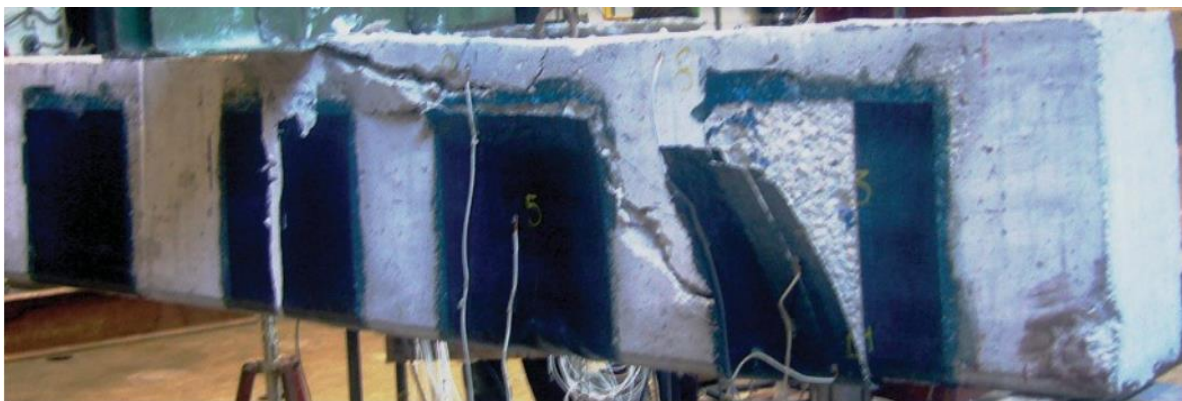
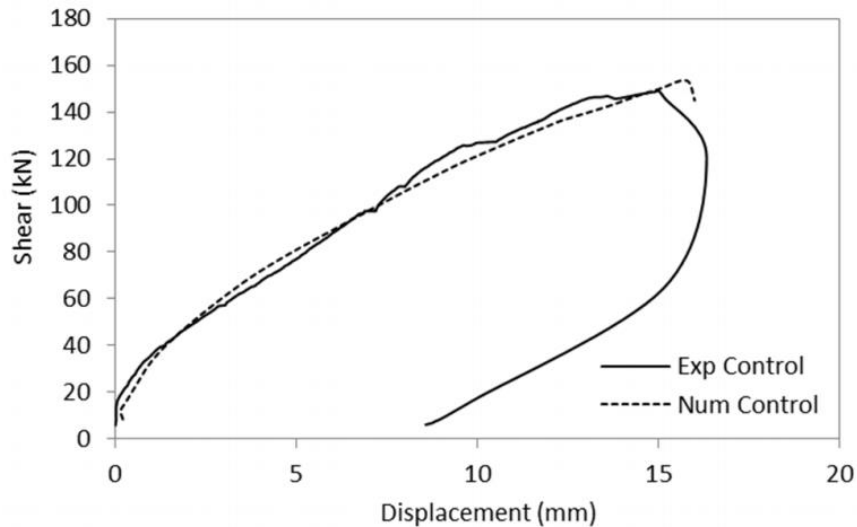


Ilustración 2-16. Fallo por delaminación en FRP.

En el refuerzo a cortante, el fallo por delaminación comienza una vez se abren las fisuras del cortante crítico. Después, la lámina se separa si la longitud de adhesión del FRP desde la fisura de cortante al borde de la lámina no es suficiente para anclar o transferir la tensión actuando en el FRP. En el siguiente grafico se puede observar el desplazamiento según el cortante en una viga control de manera experimental y numérica.



Il·lustració 2-17. Gràfic cortante-desplazamiento de un análisis experimental y numérico

Fases de ensayo sobre modelos reparados a flexión.

1. Preparación de una viga continua de hormigón armado.
2. Ensayo de la viga hasta que se produzca la rotura y toma de datos con sensores.
3. Reparación y refuerzo con bandas FRP.
4. Ensayo hasta producir rotura y toma de datos experimentales de las deformaciones con sensores.

El límite último es la resistencia del hormigón, ya que las fibras suelen fallar antes de su resistencia última. También es posible que se produzcan roturas por punzonamiento (fisuras). Con una buena puesta en obra no debería haber roturas por interfaces.

CAPÍTULO 3. Análisis numérico con láminas FRP

El objetivo de este análisis es el de contribuir al entendimiento de los mecanismos de resistencia a cortante en vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con láminas de FRP. Así pues, un modelo de viga RC (hormigón armado) sujeta a una combinación de fuerzas normales y cortantes, previamente desarrollado por varios autores, se ha extendido para incluir la respuesta de un refuerzo de FRP unido externamente a la viga de manera envuelta. No se tendrán en consideración los fenómenos de delaminación o las reducciones de tensión en las esquinas. De tal manera, haremos una comparación de los resultados numéricos con ocho resultados experimentales y se estudiará la influencia de las láminas FRP en el refuerzo a cortante.

Se han llevado a cabo diversos estudios basados en métodos de elementos finitos sobre el refuerzo a cortante con FRP como Arduini et al. (1997), Vecchio y Bucci (1999), Wong y Vecchio (2003) o Lee et al. (2008). La mayoría de ellos eran modelos bidimensionales o tridimensionales que trataban el mecanismo de unión y la delaminación. A pesar de todo, estos modelos no siempre ofrecían unas predicciones claras o completas. Por eso, los modelos numéricos capaces de predecir las respuestas de los elementos reforzados con FRP de una manera precisa y sencilla, se necesitan para una aplicación más amplia y eficiente en la práctica. Aquí pues, se considera una solución totalmente envuelta de los FRP sobre la viga para prevenir los efectos de la delaminación prematura. En otros estudios, se considerarán también otras configuraciones de refuerzo a ambos lados de la viga o en forma de U.

3.1 Modelo de viga de fibras.

Para la simulación de elementos RC reforzados a cortante crítico se presenta un modelo de fibra no lineal. Basándose en un modelo de viga de fibras a flexionadas (Marí 2000), la formulación propuesta es creada para estructuras 2D de RC, incluyendo la interacción entre las fuerzas axiales, cortantes y el momento de flexión. En este sentido, los efectos del cortante y su efecto con las fuerzas normales son considerados en los estados de servicio y últimos como un modelo seccional sensible a cortante. Esta formulación se basa en un enfoque híbrido y tiene en cuenta las tensiones multiaxiales generadas en cada fibra además de las fisuras y comportamiento anisótropo no lineales de la estructura. De acuerdo

a la simulación basada en la teoría de vigas de Timoshenko, las secciones de la viga son discretizadas en fibras: el refuerzo longitudinal se simula según unos filamentos longitudinales y el refuerzo transversal, que incluye los cercos de acero y el FRP externo, se consideran unidos a las fibras. Este modelo numérico tiene una dependencia temporal y una construcción evolutiva que es detallado por los estudios de Ferreira et al. (2013). En la siguiente figura se puede observar la disposición general de los elementos:

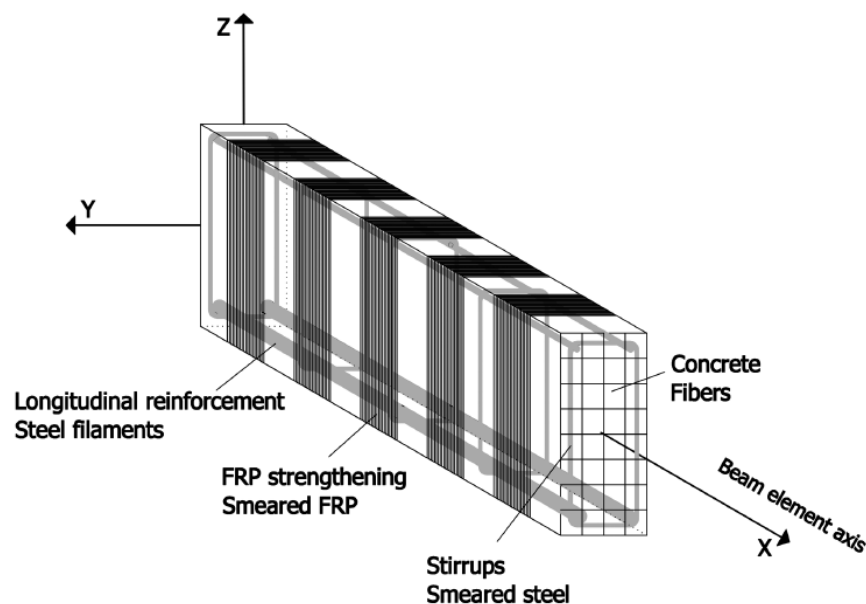


Ilustración 3-1. Modelo de viga de fibras de hormigón reforzado con FRP.

3.1.1 Modelos constitutivos.

El hormigón fisurado es simulado como un material continuo de características equivalentes ortotrópicas y uniaxiales considerando una rotación total de las fisuras. En cada nivel de tensión, el ángulo principal de las deformaciones θ , coincide con el ángulo principal de las tensiones (Bazant 1983).

Las tensiones en cada dirección principal se determinan de acuerdo a las curvas de tensión-deformación consideradas. El estado de tensiones normales y tangenciales en 2D es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = D_{12} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

$$D_{12} = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix}$$

donde D_{12} es la rigidez del material de la matriz, constituida por el módulo de rigidez determinado en cada dirección principal con las leyes constitutivas (E_1 , E_2); y G_{12} es el módulo cortante que se determina con la siguiente expresión:

$$G_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}$$

Cuando el refuerzo de FRP se coloca con una configuración de envoltura, se produce un aumento de la resistencia máxima y la deformación última causada por el confinamiento, según proponen Spoelstra y Monti (1999) según se observa en la siguiente figura:

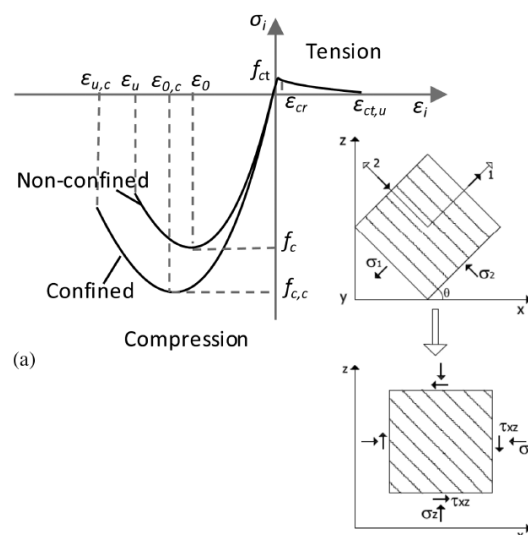


Ilustración 3-2. Tensión-deformación del hormigón según las ecuaciones constitutivas.

La matriz de la rigidez actúa como una aproximación del módulo de elasticidad tangencial, permitiendo que el problema no lineal sea resuelto como un sistema de solución

iterativa. En cuanto al hormigón en tensión, antes de que empiece la fisuración, se asume una respuesta lineal en la que f_t y ε_{cr} son respectivamente a la tensión de rotura y la deformación correspondiente. Después de la rotura, la disminución de la tensión es considerada según la curva de Cervenka (1985), con sus parámetros $c = \varepsilon_{sy}$ y $k_2 = 0.5$; ε_{sy} es la deformación de la fluencia de la armadura en la que la tensión de rigidez se supone que desaparece cuando se produce la fluencia en la armadura. En un estado sin fisuras, la rigidez E_1 es el módulo elástico del hormigón; después de la fisuración, se asume una rigidez secante.

La armadura y el refuerzo FRP se simulan con ecuaciones constitutivas bilineares y lineares en 1D, respectivamente. También se asume una conexión perfecta entre la armadura de acero y el hormigón.

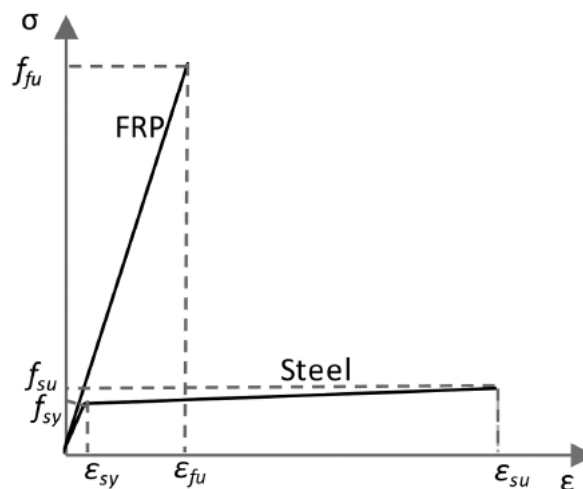


Ilustración 3-3. Tensión-deformación del refuerzo de acero y FRP

3.1.2 Modelo de sección.

Las suposiciones de la sección híbrida del modelo (cinemática/fuerza), incluyendo la interacción axial-cortante-momento (N-M-V), se representan en la Ilustración 3-4. Y son: se asume que la parte cinemática es la teoría de la sección plana de Bernouilli-Navier, que va acompañada de la parte de la fuerza, la tensión cortante constante a lo largo de la sección:

$$\tau^* = G^* A^* \gamma_0$$

donde G^* es el módulo transversal, γ_0 es la distorsión en el eje central y A^* es área cortante efectiva, obtenida con la suma de las áreas de las fibras resistentes a cortante. Las fibras localizadas en el recubrimiento de hormigón se consideran que tienen tensión cortante nula. Se considera que el refuerzo transversal constituido por los estribos de acero y el FRP están unidos a las fibras de hormigón.

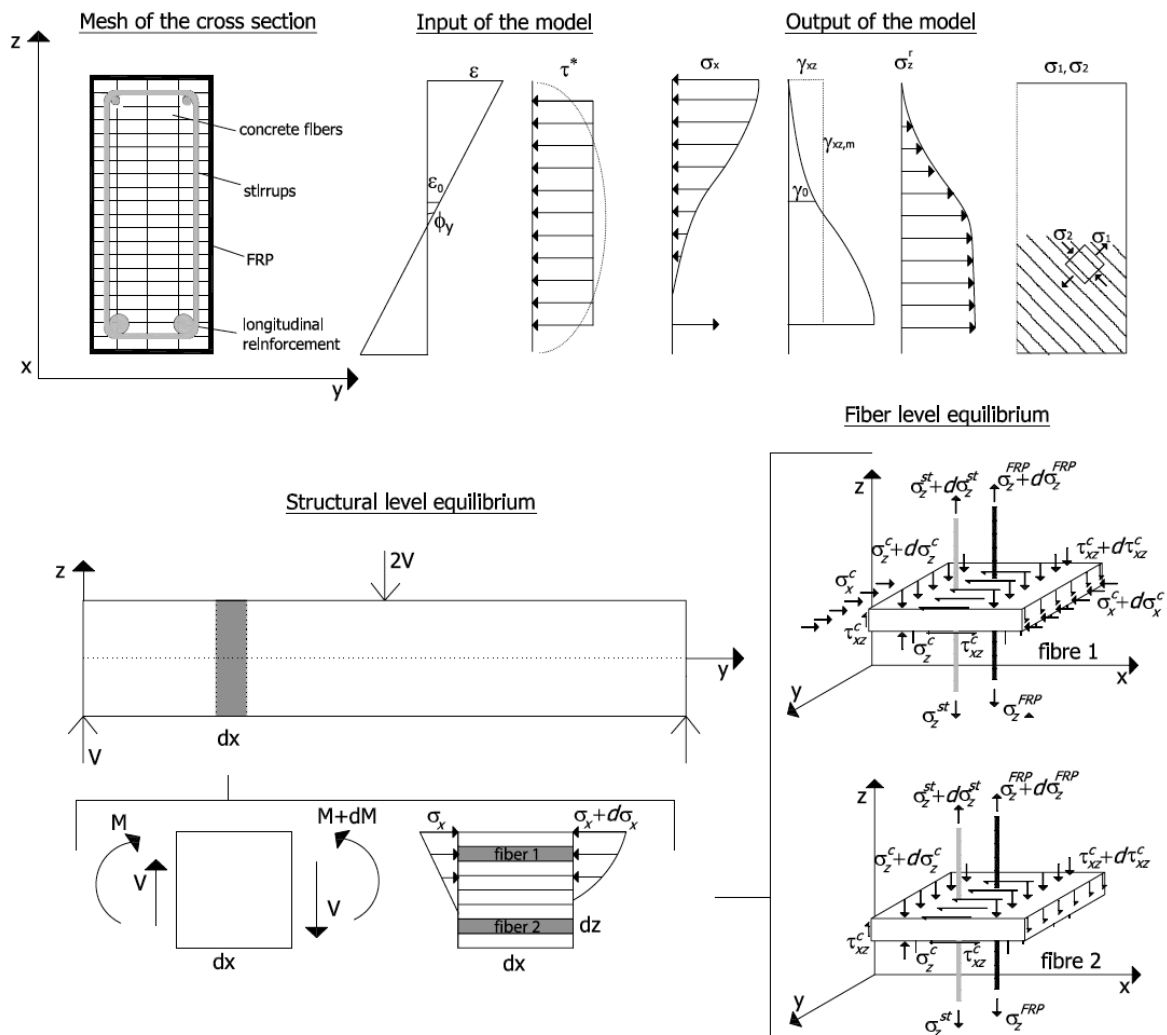


Ilustración 3-4. Sección de modelo híbrido N-M-V.

La determinación del estado de las fibras (constituidas por hormigón y armadura, denotadas como $c + st$) y los filamentos (constituidos por la armadura longitudinal y denotados como s/l) se realiza de forma incremental y se describe resumidamente en los puntos siguientes. Como resultado, la matriz rígida, K_{sec} , y el vector de carga interna, $S_{sec} = [NV_z M_y]^T$, de la sección transversal son dados como la suma de ambas contribuciones según:

$$K_{sec} = K_{sec}^{c+st} + K_{sec}^{sl}$$

$$S_{sec} = S_{sec}^{c+st} + S_{sec}^{sl}$$

Los refuerzos transversales (acero y FRP) se consideran unidos a las fibras de hormigón, lo que significa que sus contribuciones a las fuerzas y rigidez se hacen con un ratio determinado y su estado de tensión-deformación se obtiene según leyes constitutivas independientes. Incluso si el refuerzo es discontinuo o aplicado en la parte externa de la sección transversal, se considera que está en todas las fibras resistentes a cortante. En el caso de secciones transversales rectangulares, toda la red de fibras, sin considerar el recubrimiento, es resistente a cortante. Otras geometrías más complejas son dadas en las proposiciones de Ferreira et al. (2013).

Considerando la interacción N-M-V, cada fibra se encuentra en un estado 2D de tensión-deformación según se observa en la ilustración 3-4 anterior. Este estado de tensión-deformación se puede escribir según la siguiente ecuación, que relaciona el tensor de tensiones con la tensión de deformaciones con la matriz de rigidez de la fibra D_{fibra} :

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xz} \end{pmatrix} = D_{fibra} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xz} \end{pmatrix}$$

$$D_{fibra} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & \bar{D}_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix}$$

La matriz de la rigidez la fibra D_{fibra} se obtiene como la suma de las contribuciones del hormigón y el refuerzo transversal. Dado que el refuerzo transversal solo está sometido a tensiones longitudinales en la dirección transversal, su contribución se asume con el termino D_{22} de la matriz de la rigidez según lo siguiente:

$$\bar{D}_{22} = D_{22} + \rho_r E_r$$

$$\rho_r E_r = \sum_{k=1}^{n_k} \left(\frac{A_{st,k}}{s_{st,k} b_{st,k}} E_{st,k} \right) + \sum_{l=1}^{n_l} \left(\frac{A_{FRP,l}}{s_{FRP,l} b_{FRP,l}} E_{FRP,l} \right)$$

Donde $A_{st,k}$ es el área de armadura transversal; $b_{st,k}$ el ancho de la sección transversal; $s_{st,k}$ el espacio longitudinal de cada configuración de los estribos k ; n_k el número total de configuraciones de estribos en una sección transversal (que en el caso de elementos reforzados puede ser mayor que 1); $A_{FRP,l}$ el área transversal del refuerzo FRP; $b_{FRP,l}$ el ancho de la sección transversal; $s_{FRP,l}$ el espacio longitudinal de cada configuración de las láminas FRP; y n_l el número total de configuraciones FRP en una sección transversal.

También se impone que la deformación vertical ε_z en el hormigón es igual a la deformación en el refuerzo transversal (estribos y FRP).

El estado de la fibra se obtiene según el (1) equilibrio en la dirección transversal entre el hormigón y los refuerzos verticales (estribos y FRP):

$$\Delta\sigma_z^c + \rho_r \Delta\sigma_z^r = 0$$

$$\rho_r \Delta\sigma_z^r = \sum_{k=1}^{n_k} \left(\frac{A_{st,k}}{s_{st,k} b_{st,k}} \Delta\sigma_{z,k}^{st} \right) + \sum_{l=1}^{n_l} \left(\frac{A_{FRP,l}}{s_{FRP,l} b_{FRP,l}} \Delta\sigma_{z,l}^{FRP} \right)$$

Y (2) el incremento de la tensión de cortante, $\Delta\tau_{xz}$, debe igualar a la tensión de cortante impuesta dada por la restricción de tensión fijada $\Delta\tau^*$:

$$\Delta\tau^* - \Delta\tau_{xz} = 0$$

Este método es no lineal. Por eso, se obtiene otra matriz en forma condensada a partir de la Eq. (1) y el módulo de cortante G^* se da en la matriz:

$$K_{fibra} = \begin{pmatrix} D_{11} - \frac{D_{12}D_{21}}{D_{22}} & D_{13} - \frac{D_{12}D_{23}}{D_{22}} \\ D_{31} - \frac{D_{32}D_{21}}{D_{22}} & D_{33} - \frac{D_{32}D_{23}}{D_{22}} \end{pmatrix}$$

La contribución de las fibras a la matriz de la rigidez seccional K_{sec} y el vector de fuerza interna S_{sec} se obtienen con la integración de la rigidez y las fuerzas de las fibras de la sección transversal. La armadura longitudinal se considera que está en un estado de tensión-deformación axial. La contribución del refuerzo longitudinal se obtiene como la integral de la rigidez y las tensiones en todos los filamentos.

3.1.3 Procedimiento numérico no lineal.

Para resolver las ecuaciones de equilibrio, el desplazamiento no lineal basado en el modelo de elementos finitos se implementa en un marco de Newton-Raphson. La respuesta de la viga en sus diferentes etapas de daño (elástica, fisura, fluencia y estados últimos) es se presenta en este modelo. Asimismo, los efectos no lineales del cortante y su interacción con las fuerzas normales son considerados en todos los tipos de daños.

Al estar el modelo basado en la formación de una viga de fibras en 1D, permite el análisis no lineal de los refuerzos FRP de manera precisa y sencilla. Este procedimiento es capaz de predecir los fallos de cortante, considerando las contribuciones del hormigón, los estribos, y el refuerzo del RFP en la resistencia de la viga. También es capaz de predecir la carga correspondiente en el comienzo de la carga de la viga para los refuerzos transversales, asociados con el inicio de las fisuras diagonales y el final de la contribución del hormigón en las tracciones del mecanismo resistente a cortante. El desarrollo no lineal de las desviaciones con las cargas, tensiones, y deformaciones en el hormigón y los refuerzos, la dirección principal de los flujos de tensiones y los patrones de fisuras también se analizan en el modelo 1D.

3.2 Comparaciones con resultados experimentales.

El modelo descrito anterior es comparado con una campaña experimental de vigas de RC reforzadas a cortante con FRP. Los datos experimentales de las deformaciones y desviaciones medidas se comparan con las predicciones numéricas y posteriormente se discuten, como el desarrollo de tensiones y deformaciones en los estribos y láminas, la inclinación de los ángulos de compresión y el flujo de las deformaciones transversales en la sección crítica de cortante.

3.2.1 Descripción.

En esta campaña experimental propuesta por Alzate (2012), las vigas de 4.5 metros de largo, tiene apoyos simples, y con una sección rectangular de 0.42 m de altura y 0.25 m de ancho. A parte del espécimen de control, que corresponde a la viga sin refuerzo, se simulan otras vigas reforzadas a cortante con diferentes cantidades de FRP envueltas (W90S5y W90S3). La geometría y los distintos refuerzos se presentan en la siguiente figura:

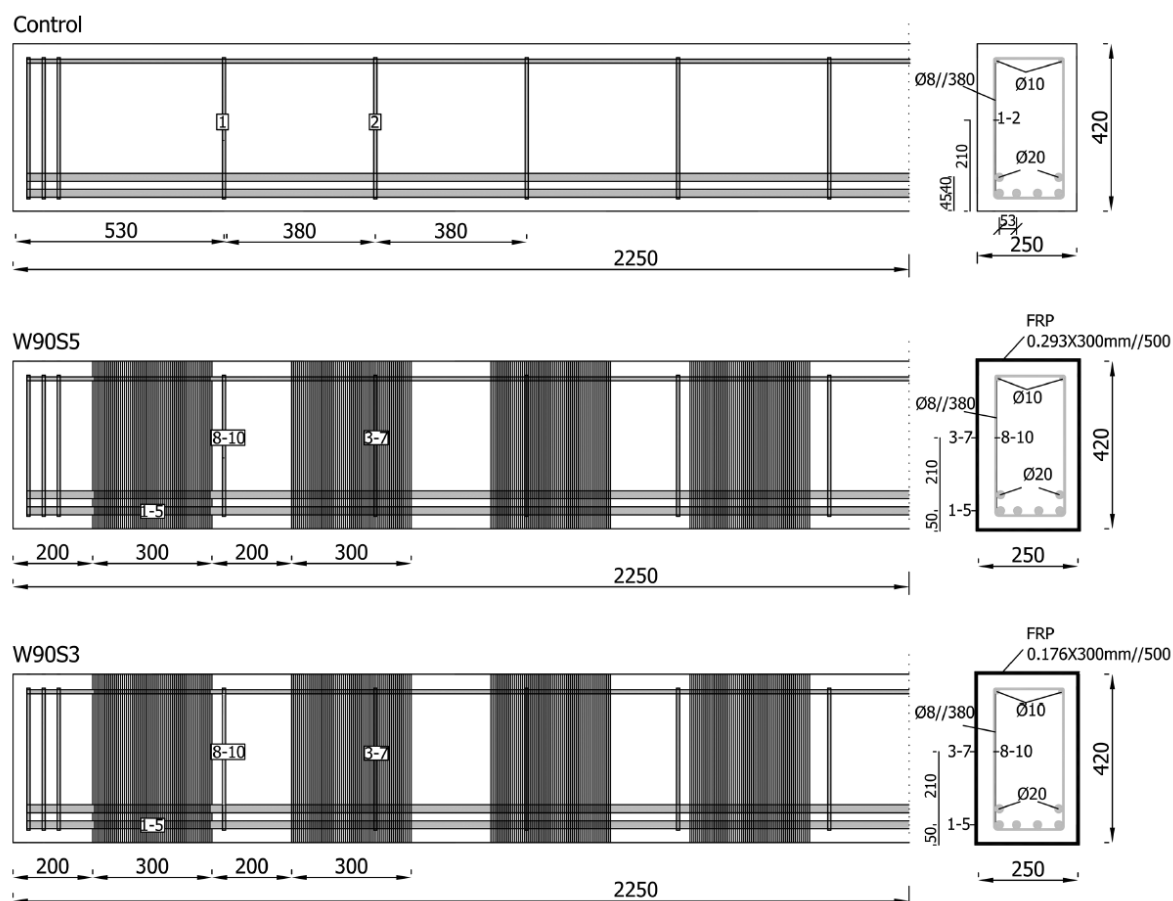


Ilustración 3-5. Medidas y configuración de los refuerzos de la viga control, la viga W90S3 y la viga W90S5

Las láminas de FRP forman un ángulo de 90° con respecto al eje longitudinal y tienen una separación S de 200 mm de borde a borde y son de dos tipos de fibras unidireccionales (Tipos 3 o 5; 300 o 530 g/m²) de dos grosores distintos (0.165 y 0.293 mm para los tipos 3 y 5 respectivamente). Las esquinas de la sección son preparados apropiadamente para unir las láminas FRP. Las esquinas inferiores tienen un radio mínimo de 25 mm, hechos con un molde cóncavo. Las esquinas superiores se han redondeado con el pulimento de la superficie.

En cuanto a las características de los materiales, solo se ha determinado la resistencia a compresión del hormigón experimentalmente y cuyos valores se consideran en el modelo. La armadura tiene un límite elástico de 550 MPa con los valores de la tabla **num**. Las propiedades usadas para simular los FRP son dados por el proveedor.

Beam	Test	Material properties (according to Fig. 2)			Total shear resistance (kN)			Nonstrengthened shear resistance (kN)			FRP contribution to shear resistance (kN)		
		Concrete	Steel	FRP	$V_{u,exp}$	$V_{u,num}$	$V_{u,num}/V_{u,exp}$	$V_{1,exp}$	$V_{1,num}$	$V_{1,num}/V_{1,exp}$	$V_{f,exp}$	$V_{f,num}$	$V_{f,num}/V_{f,exp}$
Control	Long	$f_c = 36.95$ MPa	$f_{sy} = 550$ MPa	—	149	154	1.03	149	154	1.03	—	—	—
	Short	$E_c = 32.56$ GPa $\epsilon_0 = 0.00227$ $\epsilon_u = 0.0035$ $f_{ct} = 3.33$ MPa $\epsilon_{cr} = 0.0035$ $\epsilon_{ct,u} = 0.002$	$f_{su} = 580$ MPa $E_s = 200$ GPa $\epsilon_{sy} = 2.75 \times 10^{-3}$ $\epsilon_{su} = 0.12$		158	173	1.09	158	173	1.09	—	—	—
W90S5	Long	$f_c = 24.47$ MPa	$f_{sy} = 550$ MPa	$f_{fu} = 4,000$ MPa	276	281	1.02	135	136	1.01	141	145	1.03
	Short	$E_c = 28.77$ GPa $\epsilon_0 = 0.0017$ $\epsilon_u = 0.0035$ $f_{c,c} = 46.9$ MPa $E_{c,c} = 34.98$ GPa $\epsilon_{0,c} = 0.0027$ $\epsilon_{u,c} = 0.018$ $f_{ct} = 3.90$ MPa $\epsilon_{cr} = 0.000112$ $\epsilon_{ct,u} = 0.002$	$f_{su} = 580$ MPa $E_s = 200$ GPa $\epsilon_{sy} = 2.75 \times 10^{-3}$ $\epsilon_{su} = 0.12$	$E_f = 240$ GPa $\epsilon_{f,u} = 0.015$	374	296	0.79	143	153	1.07	231	143	0.62
W90S3	Long (a)	$f_c = 22.64$ MPa	$f_{sy} = 550$ MPa	$f_{fu} = 3,800$ MPa	311	277	0.89	132	132	1.00	179	145	0.81
	Long (b)	$E_c = 28.11$ GPa	$f_{su} = 580$ MPa	$E_f = 240$ GPa	284	277	0.98	141	132	0.94	152	145	0.95
	Short (a)	$\epsilon_0 = 0.0016$	$E_s = 200$ GPa	$\epsilon_{f,u} = 0.0150$	321	297	0.93	133	150	1.13	181	147	0.81
	Short (b)	$\epsilon_u = 0.0035$ $f_{c,c} = 37.0$ MPa $E_{c,c} = 32.57$ GPa $\epsilon_{0,c} = 0.00227$ $\epsilon_{u,c} = 0.013$ $f_{ct} = 3.33$ MPa $\epsilon_{cr} = 0.000102$ $\epsilon_{ct,u} = 0.002$	$\epsilon_{sy} = 2.75 \times 10^{-3}$ $\epsilon_{su} = 0.12$		277	297	1.07	141	150	1.06	136	147	1.08
Average						0.98			1.04			0.88	
SD						0.10			0.06			0.17	

Ilustración 3-6. Resultados del fallo. Diferentes contribuciones a la resistencia a cortante

Cada viga es sometida a dos pruebas de carga con diferentes vanos totales y e igual longitud transversal.

- Prueba del vano largo (*long span* en inglés). En esta primera prueba se considera toda la longitud de la viga y la carga es aplicada a una distancia de tres veces la altura ($a = 3h = 1.26$ m) desde el apoyo.
- Prueba del vano corto (*short span*). Después de un primer fallo en algún borde de la viga, se realiza una segunda prueba en la parte no dañada, considerando el vano total

de 3.04 m y localizando la carga concentrada en el lado opuesto a una distancia de 3h (1.26 m en este caso) desde el apoyo.

Para el caso de W90S3, se probaron dos vigas, W90S3a y W90S3b. En cuanto a la instrumentación aplicada en cada viga, los desplazamientos verticales en el punto medio se midieron con transductores de desplazamiento y las deformaciones verticales de los estribos y FRP se monitorizaron con medidores de deformación. La localización de estos sensores se representa en la Ilustración 3-7.

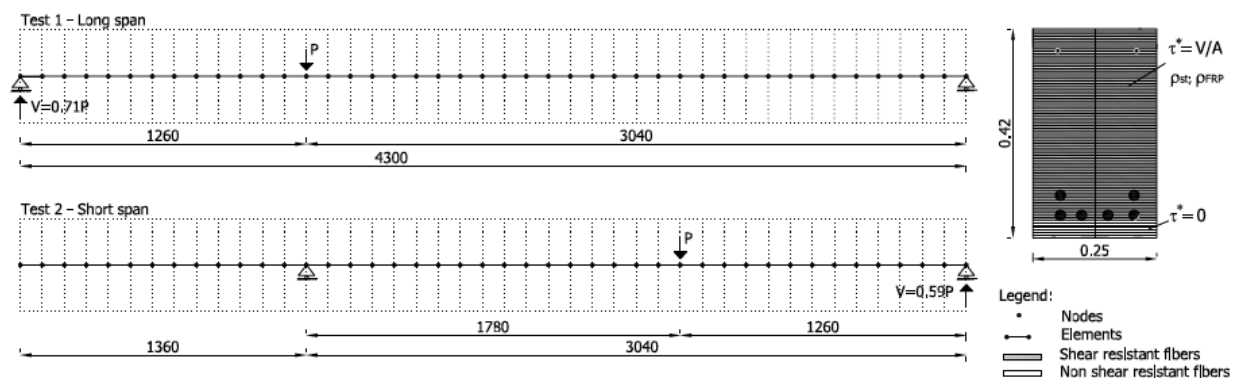


Ilustración 3-7. Configuración y malla de la prueba del modelo numérico (dimensiones en mm)

3.2.2 Resultados del modelo y discusión.

La resistencia a cortante predicha por el modelo numérico, $V_{u,num}$, es comparada con los resultados experimentales, $V_{u,exp}$, en la tabla de la Ilustración 3-6. En general, se obtiene una buena aproximación, con una media $V_{u,num}/V_{u,exp}$ de 1.07. La mayor diferencia entre estos dos valores aparece en la prueba del vano corto de la viga W90S5 que presenta una resistencia a cortante no standard, significativamente mayor que las otras pruebas, y que también fue mencionado por los autores en la campaña experimental (Alzate 2012). Las diferentes contribuciones a la resistencia a cortante de vigas reforzadas se muestran en la tabla de la Ilustración 3-8:

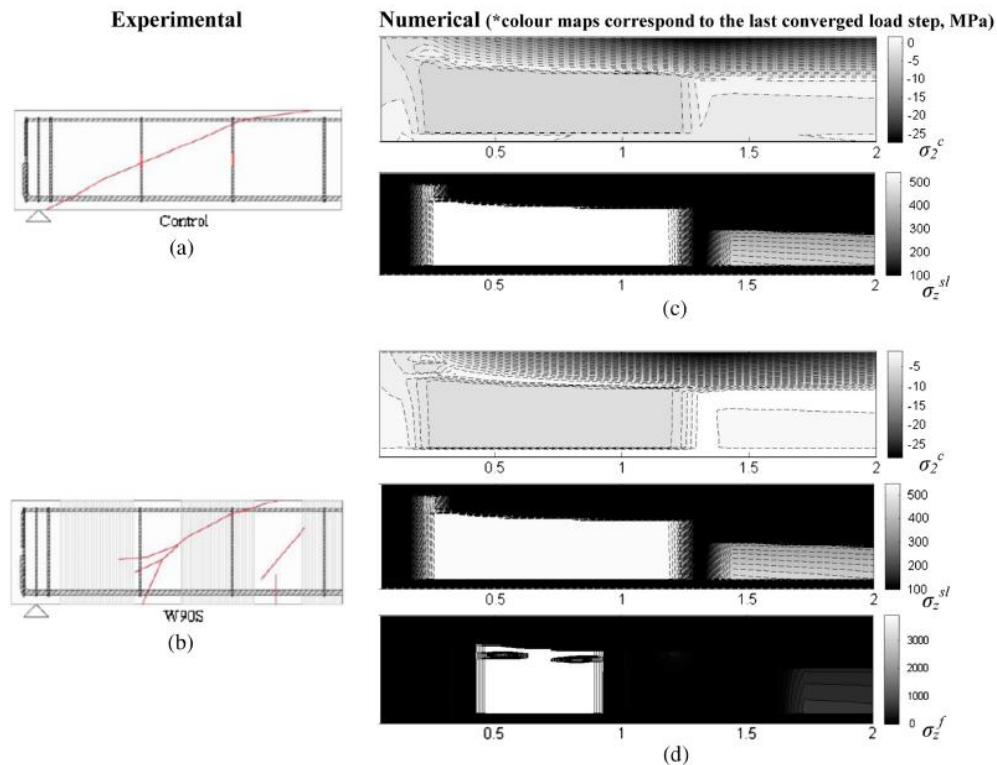
- V_1 es la resistencia a cortante de la viga sin el FRP. El valore experimental $V_{1,exp}$ es dado por Alzate y determinado por extrapolación, proporcional a la raíz cubica del radio entre las resistencias a compresión de las vigas control y de prueba; la resistencia a

cortante teórica $V_{1, num}$, se determina con el modelo numérico simulando las vigas W90S5 y W90S3 sin considerar la resistencia de FRP.

- V_f representa el cortante producido por el FRP y se determinado restando la resistencia a cortante de las vigas sin refuerzo (V_1) al cortante ultimo de las vigas (V_u) en los casos experimental y numérico.

La eficiencia del modelo para simular la capacidad de carga de las vigas RC ha sido ya demostrada en los trabajos de Ferreira (2013) y Ferreira et al. (2013). Para ello ha de haber una buena predicción de la capacidad a cortante de las vigas sin reforzar. Además, lo más notable del modelo numérico es su capacidad para considerar las láminas FRP en el refuerzo a cortante que se ha demostrado dada la buena aproximación de los valores experimentales y numéricos.

El fallo suele estar relacionado con el cortante, con los estribos alcanzando la deformación límite última para el caso de las vigas control y de flexión a cortante con el fallo de los FRP y fractura del hormigón para el caso de las vigas reforzadas. En las vigas reforzadas con FRP, se observaron dos tipos de fallo: uno con la rotura de los FRP cerca del punto de aplicación de la carga, y el otro, la fractura del hormigón cerca del punto de aplicación de la carga (Alzate 2012). En la siguiente figura se muestra un resumen de los daños observados:



Il·lustració 3-8. Daïnos experimentals i numèrics en el fallo per a les viges de control i reforzades: a) fallo experimental a cortante amb la diagonal principal; b) fallo experimental per flexi3n a cortante de la viga reforzada amb el fallo de los FRP i la fractura del hormig3n amb la aplicaci3n de la carga; c) fallo a cortante numèric de la viga control amb fallo de los estribos; d) fallo numèric de flexi3n per cortante amb fallo de los FRP, fractura de hormig3n i flexi3n de la armadura longitudinal i transversal.

Sobre los resultados experimentales, los mapas de distribuci3n de tensiones en los estribos y FRP y los esfuerzos principales de compresi3n en el hormig3n se representan a lo largo de las viges y se relacionan con la 3ltima fase de carga convergente antes de llegar al fallo. Estos mapas demuestran la existencia de fallo por las siguientes razones: la viga control presenta flexi3n en los estribos en casi toda la zona de cortante; las viges reforzadas con FRP presentan ruptura por tensi3n en los FRP en el centro de la zona de cortante, junto con fractura de hormig3n cerca del punto de aplicaci3n de la carga. Tambi3n se predice una flexi3n de la armadura longitudinal en las viges reforzadas.

Ya que el modelo de viga de fibras N-V-M computa la respuesta no lineal de la viga de hormig3n ante varios niveles de carga, los desplazamientos y deformaciones en los estribos y FRP monitoreados son comparados con los resultados predichos. Algunas comparaciones se hacen a continuaci3n.

Las curvas de carga-desplazamiento en el punto medio se representan, junto con los resultados experimentales, en la Ilustraci3n 3-9 para las viges control y reforzadas (W90S3a,

W90S3b y W90S5). Todos los resultados se relacionan con las pruebas de vano largo. De hecho, las pruebas de vano corto presentan algunas respuestas imprevistas.

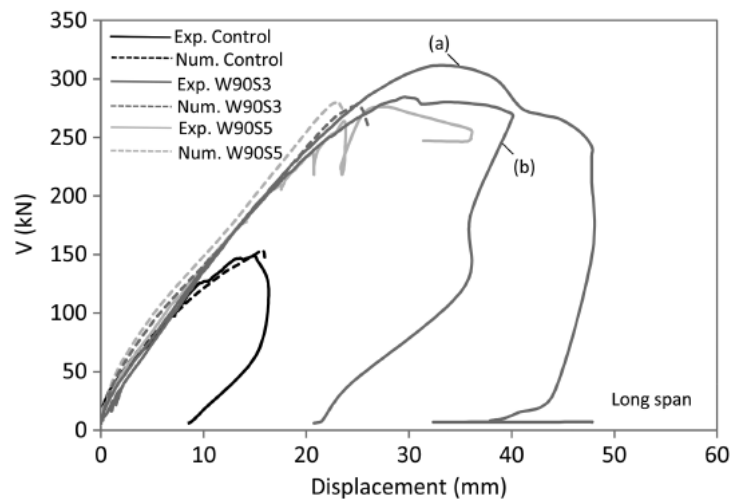


Ilustración 3-9. Desplazamientos en el punto medio-cortante en las vigas control y reforzadas de vano largo (resultados numéricos y experimentales).

Al ser esta la segunda prueba realizada en cada espécimen, no es seguro si el daño previo inducido en la primera prueba puede afectar en la respuesta de la prueba del vano corto. En todos los casos, según se muestra en la Ilustración 3-9 el modelo numérico predice la respuesta experimental de las vigas con satisfacción.

También se analizaron las deformaciones en los estribos con la ayuda de sensores (8-10) en la zona cortante de las vigas reforzadas. Los estribos empezaron a sufrir deformaciones significantes más tarde y con mayor capacidad elástica con la presencia de los FRP de donde se demuestra su contribución en la resistencia a cortante. De la misma manera, el confinamiento producido por los FRP ayuda a la resistencia a cortante del hormigón.

Las deformaciones medidas en las láminas FRP se comparan con las predicciones numéricas. Los resultados obtenidos por los sensores de las vigas reforzadas se muestran en la siguiente figura:

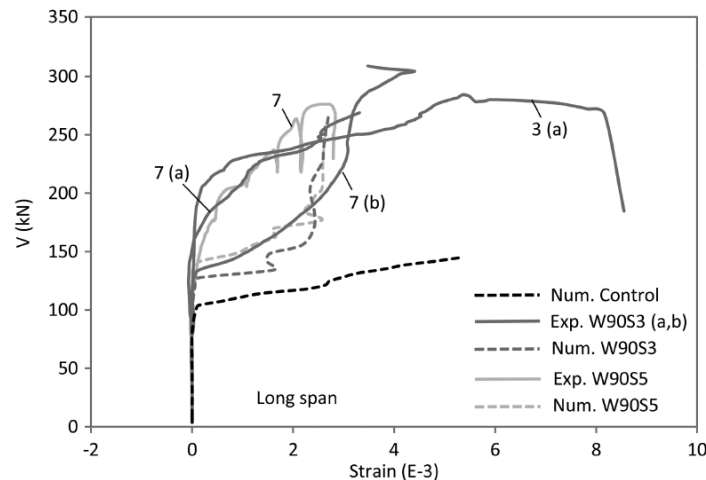


Ilustración 3-10. Curvas de corte deformación en la viga control, WS903 y WS905

El modelo no asume posibles acciones de deslizamiento de las láminas ya que no considera una unión perfecta entre el hormigón y los refuerzos. A pesar de todo, los resultados se consideran razonables de acuerdo con el comportamiento experimental sabiendo la dificultad para simular la respuesta de los FRP. Además de lo anteriormente comentado, con este modelo se ha podido hacer un estudio de otros aspectos como el ángulo de inclinación de la fisura cortante y la evolución de la deformación vertical a lo largo de la zona de cortante.

Finalmente se establecen una serie de conclusiones sobre el presente estudio:

- Con el refuerzo FRP, la resistencia del hormigón a cortante aumenta y el nivel de carga en el que los estribos desarrollan una tensión significativa es más tardía.
- En las vigas reforzadas con FRP, los estribos se mantienen en su fase elástica para mayores niveles de carga.
- Antes de que haya flexión del acero, los FRP y los estribos tienen respuestas similares, después de la flexión de los estribos, el FRP aumenta considerablemente su tensión.
- Para niveles más bajos de carga, las deformaciones en los FRP y estribos son casi nulas.
- La presencia de FRP disminuye el componente longitudinal de las fisuras compresión diagonales relacionado con el efecto del cambio de tensión de la armadura longitudinal.

- El ángulo medio de las fisuras de compresión se comprende entre los 40° y los 25°-20° con el aumento de carga.
- El mecanismo de fallo de las vigas no es únicamente por el cortante, también contribuyó el fallo de los FRP y la fractura local de hormigón en el punto de carga.

3.3 Modelización numérica con MIDAS FEA.

3.3.1 Descripción del programa

Midas FEA es un software de ingeniería estructural para el análisis no lineal avanzado de aplicaciones civiles y estructurales incluyendo la modelización de estructuras de hormigón simples y reforzadas, daños y fisuras del hormigón, estructuras de mampostería simples y reforzadas, estructuras de acero, cimentaciones y estructuras marítimas.

En esta tesina se ha usado el programa estructural Midas FEA para modelizar los tres tipos de vigas descritas en los puntos anteriores por Alzate (2012) y así comparar los resultados numéricos del fallo a cortante de las vigas de hormigón reforzadas y sin reforzar con los experimentales para ver la eficiencia del modelo y su respuesta ante la aplicación de la carga.

3.3.2 Modelos de fisura de hormigón.

Para la modelización se adoptado un análisis no lineal de elementos finitos usando el modelo de *Total Strain Crack* (fisura de deformación total en inglés) implementado en el Midas FEA. Este modelo nos ayudará obtener los estados últimos de la viga de hormigón como la fisuración y grietas en el fallo a cortante con la relación entre la tensión-deformación a cortante.

Los modelos de análisis de fisuración de hormigón se pueden clasificar en *modelo de fisuras discretas* y *modelo de fisuras distribuidas*. El modelo discreto usa elementos finitos en el que las fisuras de hormigón se representan como límites. En el de fisuras distribuidas, las fisuras se asumen esparcidas en la superficie, sin hacer uso de los elementos discretos. Entre las ventajas del modelo de fisuras discretas se encuentra la de representar los comportamientos como discontinuidad física debidos a la fisuración del hormigón y el

deslizamiento de la armadura. También tiene desventajas como la dependencia de la precisión del análisis con las propiedades del material, o que el modelo finito puede llegar a ser complejo. El modelo de deformación total se puede simplificar en el modelo de fisuras distribuidas usando la deformación total sin tener que descomponerlo en los componentes de deformación. Además, es más práctico y con un algoritmo fácil de entender.

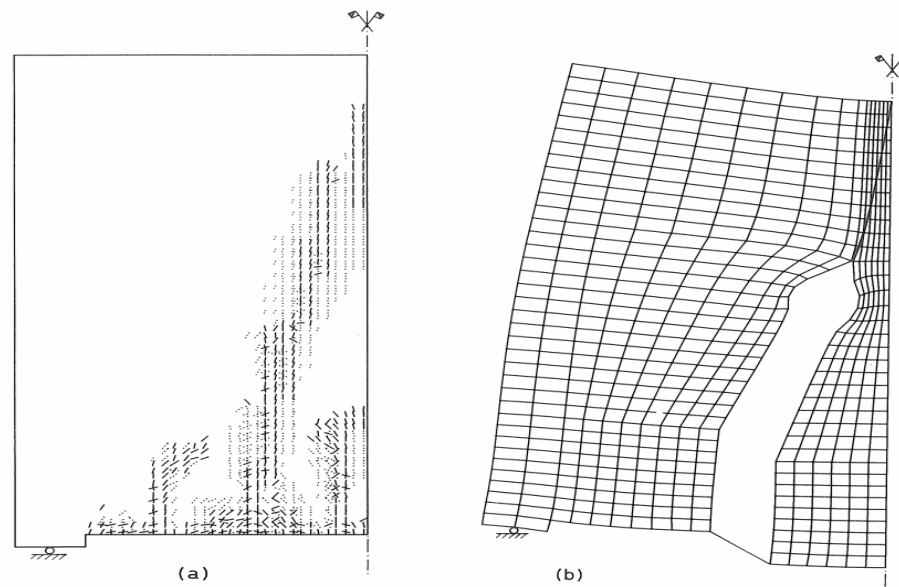


Ilustración 3-11. Fractura localizada en una viga con refuerzo. a) Análisis numérico con fisuras distribuidas b) Analisis corrector con fisura discreta predefinida

3.3.3. Modelo *Total Strain Crack*.

Midas usa el modelo de *total strain crack* clasificado en el modelo de fisuras distribuidas. Como se muestra en la Ilustración 3-12, consta de dos métodos que son englobados en el modelo de fisuras fijas y el modelo de fisuras rotativas dependiendo de los ejes de fisuras de referencia. El primero asume que los ejes de las fisuras no cambian una vez los ejes de las fisuras se han definido. En el segundo, por el contrario, las direcciones de las fisuras se asumen que rotan continuamente dependiendo de los cambios en los ejes principales de las deformaciones.

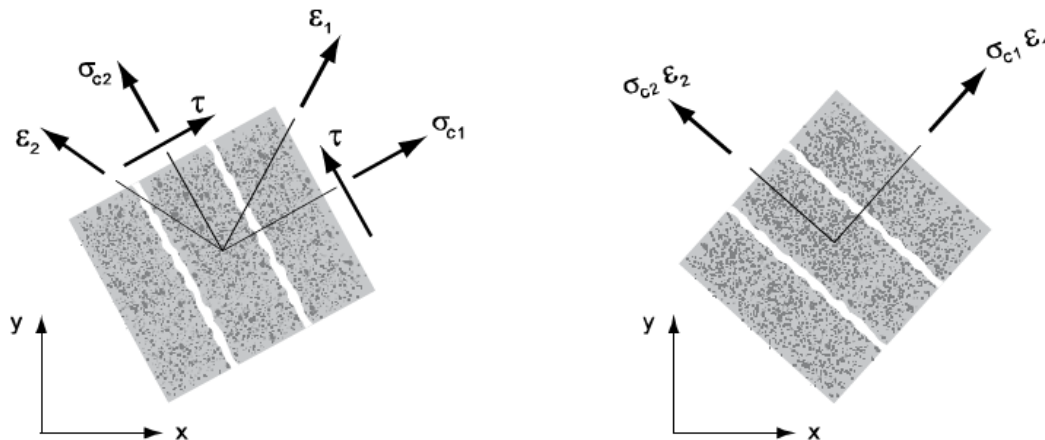


Ilustración 3-12. Modelos de fisuras ortogonales: a) Modelo de fisura fija. b) Modelo de fisura rotativa.

Los materiales de hormigón muestran propiedades isotrópicas antes de fisurar y propiedades anisotrópicas después de la fisuración. Midas considera las propiedades del hormigón como materiales ortotrópicos después de la fisuración. Así pues, las tensiones normales y cortantes se calculan de la superficie de las fisuras como se muestra en la Ilustración 3-12. De todas formas, se supone que nuevas fisuras pueden aparecer en las direcciones de las deformaciones principales en el modelo de fisuras rotativo por lo que solo las tensiones normales están presentes en las superficies de las fisuras según la Ilustración 3-12 a). Como resultado, ambos modelos usan los conceptos de tensión-deformación fijos y tensión-deformación coaxiales respectivamente. Midas los clasifica en un modelo de fisuras ortogonales.

El modelo constitutivo basado en deformaciones totales se fundamenta en la *Teoría del Campo de Compresiones Modificadas* propuesto por Vecchio y Collins que es formulada basándose en modelos bidimensionales.

Propiedades básicas.

Para analizar el modelo *Total Strain Crack* se necesitan definir los siguientes parámetros:

- Tipo de modelo de fisuración (*Crack model*). El modelo *Total Strain Crack* incluye el modelo de fisuras distribuidas fijas (SFDM) y el modelo de fisuras distribuidas rotativas (SRDM).
- Propiedades generales del hormigón. Son definidas por el usuario o el programa (CEB-FIP 1990). Estas son el módulo de Young, coeficiente de Poisson, resistencia a tracción,

resistencia a compresión y energía de fractura si es necesario. También se puede definir la clase de hormigón de acuerdo a su resistencia a compresión característica.

- Comportamiento a tracción
- Comportamiento a compresión
- Comportamiento a cortante
- Influencias laterales

El concepto básico del modelo *Total Strain Crack* es que las tensiones se calculan considerando las direcciones de las fisuras. Las deformaciones en el sistema de coordenadas del elemento se renuevan considerando el incremento de deformación $\Delta\varepsilon_{xyz}$.

$${}^{t+\Delta t}_{i+1}\varepsilon_{xyz} = {}^t\varepsilon_{xyz} + {}^{t+\Delta t}_{t+1}\varepsilon_{xyz}$$

Las deformaciones en las direcciones de la fisura se calculan multiplicando las deformaciones en el sistema de coordenadas del elemento por la matriz de transformación \mathbf{T} .

$${}^{t+\Delta t}_{i+1}\varepsilon_{nst} = \mathbf{T}_{i+1}^{t+\Delta t} \varepsilon_{xyz}$$

Siendo,

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}({}^{t+\Delta t}_{i+1}\varepsilon_{xyz})$$

Esta matriz de transformación es fijada por la dirección inicial de la fisura en el modelo de fisuras fijas.

En el análisis de fisuración del hormigón se usa un procedimiento iterativo por su no linealidad. Para satisfacer el equilibrio entre las fuerzas internas y externas, se usa uno de los procesos iterativos incrementales como el de Newton-Raphson. Para ello, el modelo constitutivo necesita ser definido con una matriz de rigidez apropiada. Midas usa las aproximaciones de rigidez secante y tangente para determinar la matriz de rigidez. La primera es especialmente adecuada para encontrar soluciones estables a los análisis de estructuras de hormigón reforzado, que desarrolla frecuentes fisuras. Por el contrario, la aproximación

de rigidez tangente es conocida por ser muy apropiada para análisis de fisuras locales o propagaciones de las mismas.

3.3.4 Modelos de compresión

El hormigón sometido a compresión muestra un comportamiento dependiente de la presión, como, por ejemplo, que la fuerza y ductilidad aumentan con el aumento de las tensiones isotrópicas. Debido al confinamiento lateral, la relación de tensión-deformación a compresión se modifica para incorporar los efectos de las tensiones isotrópicas incrementadas. Además, se asume que el comportamiento compresión está influenciado por la fisuración lateral. Para modelizar el efecto lateral de confinamiento, los parámetros de la función de tensión-deformación a compresión se determinan con una función de fallo que da las tensiones de compresión.

Si el material se fisura en la dirección lateral, los parámetros son reducidos en la tensión y deformación máximas. La función base en compresión, con los parámetros f_p y α_p es modelada con diferentes curvas predefinidas por el programa o definidas por el usuario. Las curvas predefinidas son la curva constante y curva frágil, y las curvas de reblandecimiento lineares y exponenciales basadas en la energía de fractura a compresión, G_c . En la siguiente figura se muestra las curvas de endurecimiento-reblandecimiento a compresión. Estas curvas se dividen en parabólicas, parabólicas exponenciales y de endurecimiento sugeridas por Thorenfeldt et. Al.

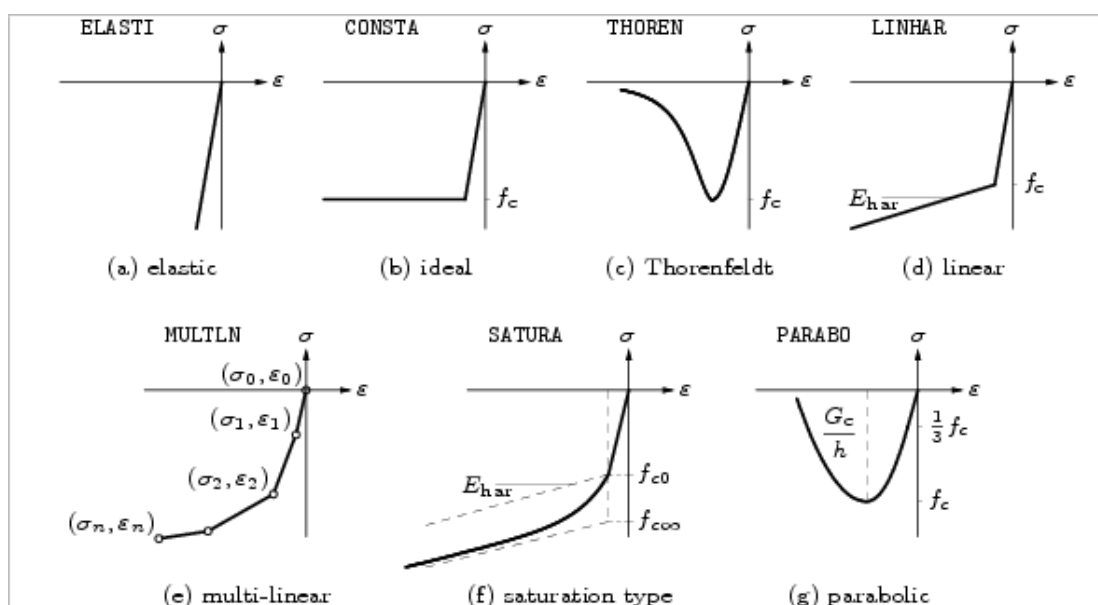


Ilustración 3-13. Modelos de compresión

a) Modelo elástico.

Se usa el módulo de Young para el modelo elástico general. No hay información adicional.

b) Modelo ideal.

El modelo ideal es aquel en el que una tensión de tracción excede la resistencia a tracción, la tensión no sigue aumentando. (Ilustración 3-13-b).

La resistencia de compresión se define como, $f_c > 0.0$.

c) Modelo Thorenfeldt.

Este modelo usa el valor de la resistencia a compresión según, $f_c > 0.0$, Ver Ilustración 3-13-c

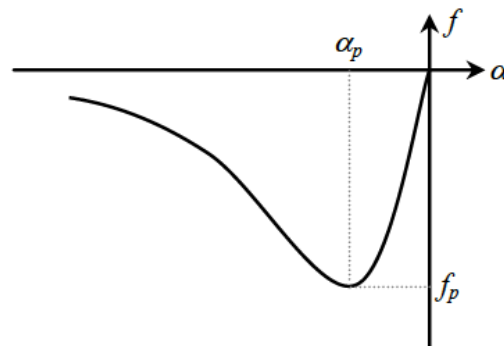


Ilustración 3-14. Curva de Thorenfeldt

d) Modelo de endurecimiento lineal.

En este modelo, después de la flexión en el punto de flexión a compresión f_c , el comportamiento a compresión depende de la rigidez reducida E_{har} , que cambia linealmente. (Ver Ilustración 3-13-d).

Usa $f_c > 0.0$ y $E_{har} > 0.0$ como input.

e) Modelo de endurecimiento multi-lineal.

El usuario puede definir una curva de tensión asignando una cierta función de tensión-deformación. Como máximo se pueden introducir 30 puntos; el primero debe ser 0.00 (ver Ilustración 3-13-e).

f) Modelo de saturación.

Este modelo usa las siguientes propiedades materiales como un conjunto de variables a introducir. (ver Ilustración 3-13-f).

Resistencia a compresión inicial: $f_{co} > 0.0$

Resistencia a compresión ultima: $f_{c\infty} > 0.0$

Modulo constante de endurecimiento: $E_{har} > 0.0$

Factor de decadencia: $\gamma > 0.0$

g) Modelo parabólico.

El modelo parabólico sugerido por Feenstra se deriva de la base de energía de fractura. Esta línea curva se presenta por las siguientes tres características variables (ver Ilustración 3-13-g).

Resistencia a compresión: $f_c > 0.0$

Energía de fractura a compresión: $G_c > 0.0$

Longitud característica del elemento: $h > 0.0$

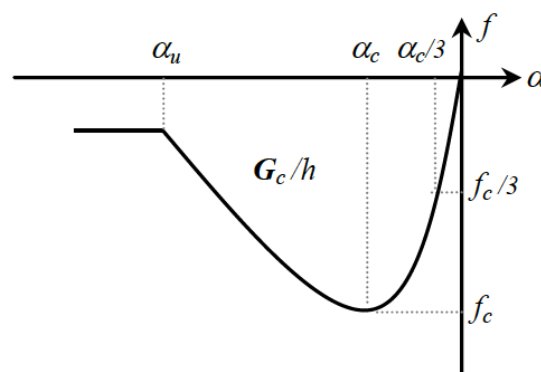


Ilustración 3-15. Curva de compresión parabólica.

3.3.5 Modelos de tensión.

El modelo del comportamiento a tracción definido por el modelo *Total Strain Crack* tiene comportamientos de tipo elástico, ideal, frágil, lineal, exponencial, hordjik, multilinear y definido por el usuario. Estos modelos se pueden dividir según la base de las siguientes teorías:

El modelo *Total Strain Crack* materializa la función de reblandecimiento basada en la energía de fractura, Los modelos basados en esta función son: la curva lineal de reblandecimiento, la curva exponencial de reblandecimiento, y la curva no lineal de reblandecimiento sugerida por Hordjik. En el caso de el modelo de fisuras distribuidas, estos modelos tienen una relación con el ancho de banda de la fisura. Después, hay un comportamiento de tracción, que no tiene un efecto directo en la energía de fractura. Este comportamiento se puede representar en el concepto de deformación total (*total strain* en inglés). Los modelos pertenecientes a este grupo se definen como los comportamientos de tipo ideal, tracción constante, multilinear y frágil. Finalmente, Midas FEA permite que el usuario use su propia sub rutina, para asignar un comportamiento a tracción.

A continuación, se muestran las diferentes curvas para cada tipo de modelo:

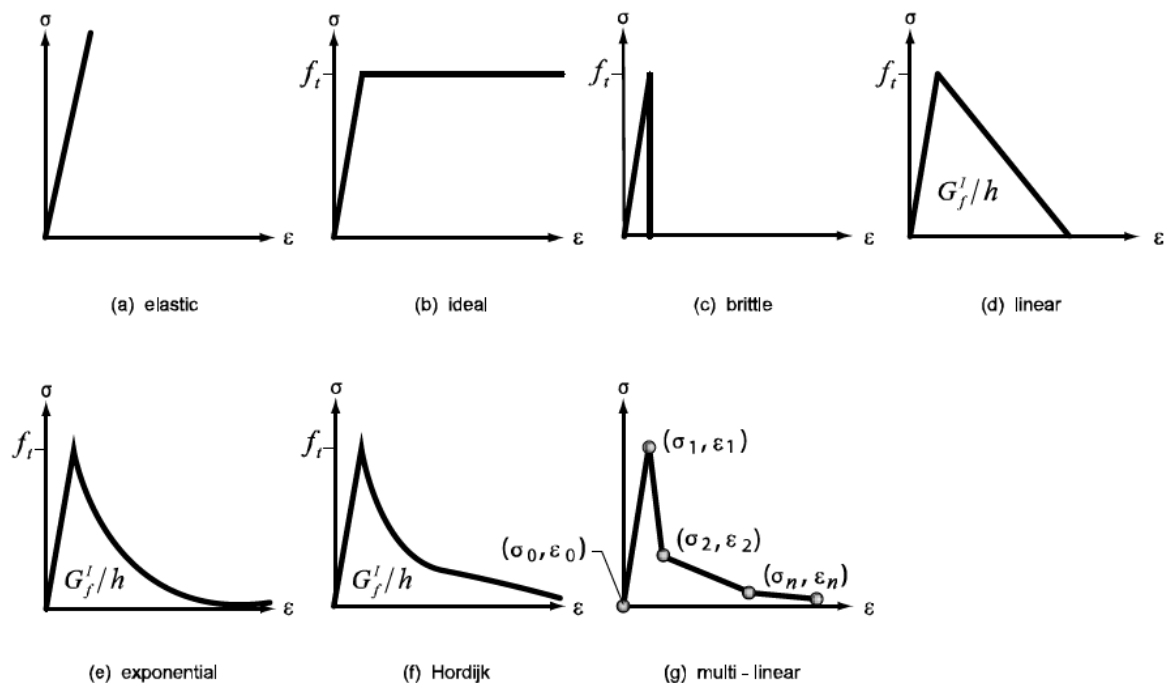


Ilustración 3-16. Modelos de tensión

a) Modelo elástico.

El modelo elástico generalmente usa el módulo de Young. No hay información adicional (ver Ilustración 3-16-a).

b) Modelo ideal.

En este modelo cuando la tensión de tracción supera la resistencia a tracción, la tensión es constante (ver Ilustración 3-16-b). En este caso, la resistencia a tracción es asignada como $f_t > 0.0$.

c) Modelo frágil.

El comportamiento frágil se caracteriza por la completa reducción de la resistencia después de que la resistencia haya sido violada (Ilustración 3-16-c). Este modelo tiene una discontinuidad, Antes de la tensión máxima, solo hay deformación elástica. Después, la deformación disminuye hasta cero inmediatamente; la deformación elástica desaparece y solo hay deformación de fisuración. La deformación repentina baja, indicada en la línea en la Ilustración 3-16-c, suponiendo la disipación de la energía, que se relaciona con la deformación máxima ε_{nn}^{peak} y el ancho de fisura de banda. En este caso, la resistencia a tracción se asigna según $f_t > 0.0$.

$$G_f = \frac{1}{2} f_t \varepsilon_{nn}^{peak} h$$

donde, ε_{nn}^{peak} es un valor fijo igual a $\frac{f_t}{E}$.

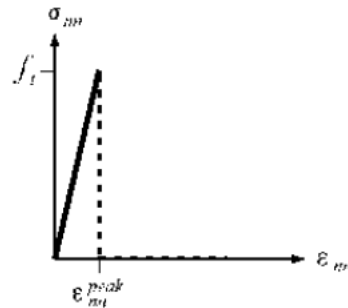


Ilustración 3-17. Comportamiento de fisuración frágil.

d) Modelo lineal de reblandecimiento.

Este modelo se observa cuando la tensión de tracción supera la resistencia a tracción (ver Ilustración 3-16-d).

Energía de tracción de fractura: $G_f^I > 0.0$

Ancho de banda de fisuración: $h > 0.0$

Usa los siguientes valores como input:

Resistencia de tracción $f_t > 0.0$

Energía de tracción de fractura: $G_f^I > 0.0$

Ancho de banda de fisura: $h > 0.0$

e) Modelo de reblandecimiento exponencial.

El reblandecimiento exponencial ocurre cuando la tensión de tracción supera la resistencia de tracción (ver Ilustración 3-16-e). La pendiente de reblandecimiento de determina según la energía de fracturación, G_f^I y el ancho de banda de fisuración, h .

Cuenta con los siguientes parámetros para el input:

Resistencia a tracción: $f_t > 0.0$

Energía de tracción de fractura: $G_f^I > 0.0$

Ancho de banda de fisura: $h > 0.0$

f) Modelo de Hordjik.

Hordjik, Cornelissen Y Reinhardt propusieron una expresión para el comportamiento de reblandecimiento del hormigón, que también resulta en una tensión de fisuración igual a cero en la tensión de deformación $\varepsilon_{nn,ult}^{cr}$ (Ilustración 3-16-f).

Usa los siguientes valores:

Resistencia a tracción: $f_t > 0.0$

Energía de tracción de fractura: $G_f^I > 0.0$

Ancho de banda de fisura: $h > 0.0$

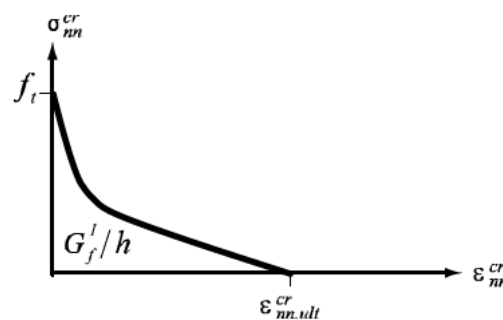


Ilustración 3-18. Reblandecimiento de tracción no lineal (Hordjik et al.)

g) Modelo multilíneal.

El reblandecimiento ocurre cuando la tensión de tracción supera la resistencia a tracción (ver Ilustración 3-13-g). Como máximo se pueden definir 30 nodos, y el primero debe ser 0.d0.

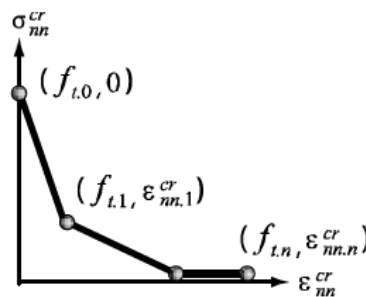


Ilustración 3-19. Reblandecimiento de tracción multilíneal.

La siguiente condición se debe satisfacer para la pendiente tangencial inicial:

$$\frac{f_{t.1} - f_{t.0}}{\varepsilon_{nn.1}^{cr}} \geq -E$$

3.3.6 Modelos de cortante.

La modelización del comportamiento cortante solo es necesaria en el concepto de fisuración fija cuando la rigidez del cortante es normalmente reducida después de la fisuración. Para la actual implementación en Midas, solo una reducción de rigidez a cortante constante es modelizada,

$$G^{cr} = \beta G$$

donde, β el factor de retención de cortante, $0 \leq \beta \leq 1$. En cuanto al concepto de fisuración rotativa, este factor se puede asumir igual a uno.

3.3.7 Influencia lateral.

El efecto de Poisson en un material determina el desplazamiento lateral de un espécimen sujeto a una tensión uniaxial o carga compresiva. Si estos desplazamientos se restringen, un confinamiento lateral pasivo actuará en el espécimen. Este efecto es considerado importante en una modelización tridimensional de estructuras de hormigón armado. En el trabajo de Selby y Vecchio este efecto es modelizado como un tipo de pretensión en el que los efectos de la expansión lateral se contabilizan según la carga externa adicional de la estructura. Esto implica que el flujo computacional del elemento finito se adapta a este método. El efecto de Poisson es considerado con el equivalente concepto de deformación uniaxial. En el caso del comportamiento linear-elástico, la relación constitutiva en situación de tensión-deformación tridimensional es dada por,

$$\sigma_{nst} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu \\ \nu & 1 - \nu & \nu \\ \nu & \nu & 1 - \nu \end{bmatrix} \varepsilon_{nst}$$

Este concepto se puede aplicar en un modelo material no lineal. El vector de tensiones en el sistema principal de coordenadas, es evaluado en términos del vector equivalente de deformaciones uniaxial, $\tilde{\epsilon}_{123}$, y no en términos del vector de deformaciones principal, ϵ_{nst} . El vector equivalente de deformaciones uniaxial se determina cuando el vector de deformaciones principal y el módulo constante de Poisson son conocidos. La submatriz de rigidez tangencial D_{nst} es modificada levemente debido al concepto de deformaciones uniaxiales equivalentes. La matriz es dada por,

$$D_{nst} = \frac{\partial \sigma_{nst}}{\partial \epsilon_{nst}} = \frac{\partial \sigma_{nst}}{\partial \tilde{\epsilon}_{nst}} P$$

El aumento de la resistencia con el aumento de la tensión isotrópica se define según la superficie de fallo de cuatro parámetros de Hsieh-Ting-Chen obteniéndose la tensión principal máxima. Para ello, es necesario adecuar la resistencia de tensión uniaxial y de compresión, la resistencia biaxial de compresión y las pruebas de datos experimentales en especímenes de hormigón. En compresión desconfiada, los valores en el pico son dados por los valores de la resistencia uniaxial de compresión, y el factor de tensión máximo es igual a uno.

Las ecuaciones se obtienen como resultado de un aumento gradual en la resistencia máxima en compresión confinada, con una pendiente inicial del diagrama de tensión-deformación dada por el módulo de Young. En una situación de tensión triaxial total, la superficie de fallo no se puede alcanzar obteniéndose una relación de tensión-deformación lineal.

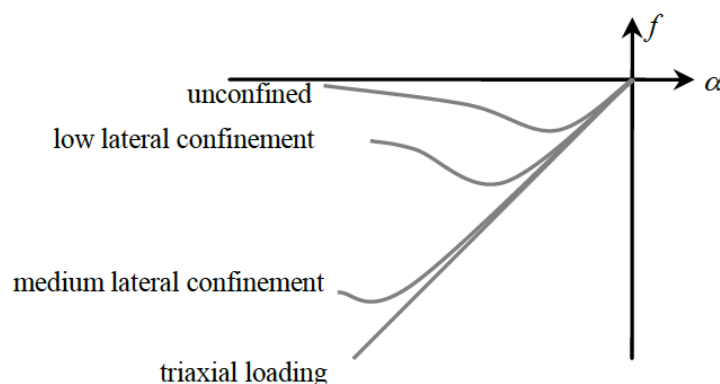


Ilustración 3-20. Influencia del confinamiento lateral en la curva de compresión de tensión-deformación

En hormigón fisurado, las altas tensiones de tracción perpendiculares a la dirección principal de compresión reducen la resistencia de compresión del hormigón. La relación para la reducción debida a la fisuración lateral es el modelo propuesto por Vecchio y Collins.

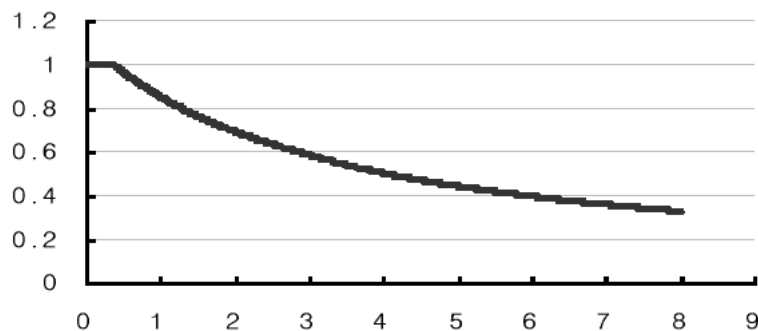


Ilustración 3-21. Factor de reducción debido a la fisuración lateral

3.4 Análisis de resultados.

En este apartado se estudiará la campaña experimental de vigas reforzadas a cortante con FRP propuesta por Alzate (2012) y que ha sido llevada a cabo por Denise Ferreira, Eva Oller et al. (2013), con la ayuda del programa de análisis estructural MIDAS FEA para después comparar los resultados obtenidos con los originales anteriormente comentados. El estudio se hace en tres tipos de vigas: la viga control, la viga W90S5 y la viga W90S3. En la primera no se hace ningún tipo de refuerzo con FRP mientras que en la segunda y la tercera sí, con diferentes cantidades de FRP envueltos.

Las vigas se han modelizado según las propiedades citadas anteriormente. Para ello, se han definido los diferentes materiales que la constituyen (hormigón, acero, materiales elásticos) y sus elementos. La viga biapoyada cuenta con la armadura longitudinal y transversal en forma de cercos así como dos apoyos a ambos lados que no permiten el desplazamiento horizontal pero sí la rotación. En la parte superior se ha dispuesto una banda elástica que sirve de punto de aplicación de la carga, que se ha especificado para alcanzar un

desplazamiento de 15 mm en el caso de la viga control y 30 cm para las reforzadas con FRP. Posteriormente se ha llevado a cabo la obtención de los resultados del comportamiento de la viga según las condiciones definidas anteriormente. El módulo elástico del hormigón es el mismo del modelo propuesto por Alzate, siendo este de 32560 MPa, con un coeficiente de Poisson de 0,2. El modelo de fisuras es rotativo, con una rigidez secante y un efecto de confinamiento según Selby y Vecchio. También se ha definido una función de endurecimiento y una función de *Total Strain Crack* con una función de Hordjik y otra parabólica. Los valores del primero son: $F_t = 3 \text{ N/mm}^2$; $G_f = 0,009735 \text{ N/mm}$ y $h = 100 \text{ mm}$. En cuanto a la parabólica se tiene: $F_c = 45 \text{ N/mm}^2$; $G_c = 10 \text{ N/mm}$ y $h = 25 \text{ mm}$. Estos valores se han ido ajustando para obtener un resultado admisible y acorde a nuestras vigas de estudio, ya que en un principio presentaban problemas como la fisuración a compresión, la rigidez o el movimiento en los apoyos.

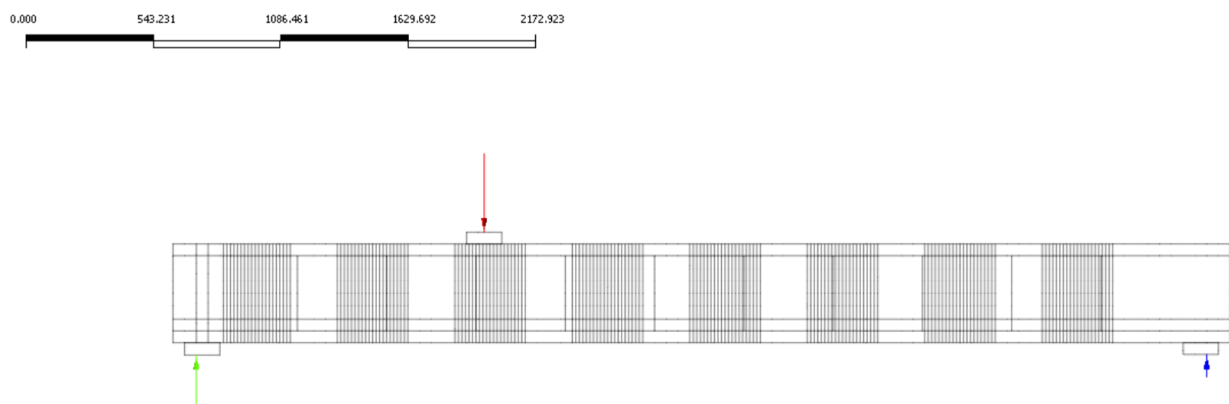
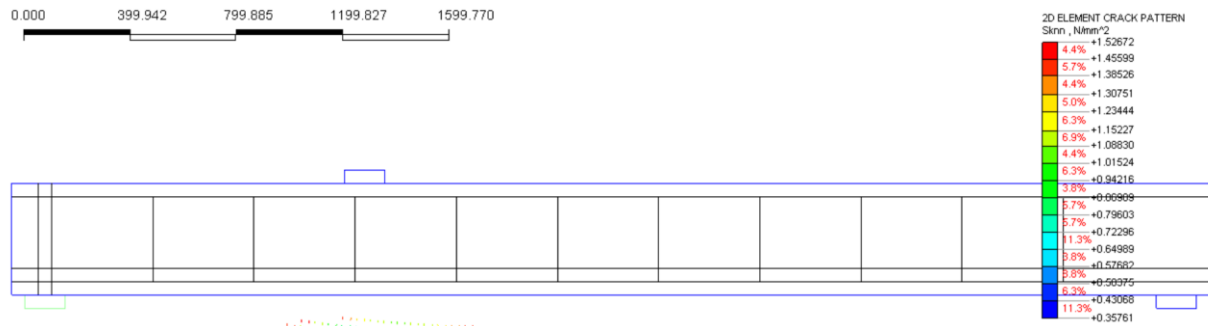


Ilustración 3-22. Carga aplicada y reacciones en la viga

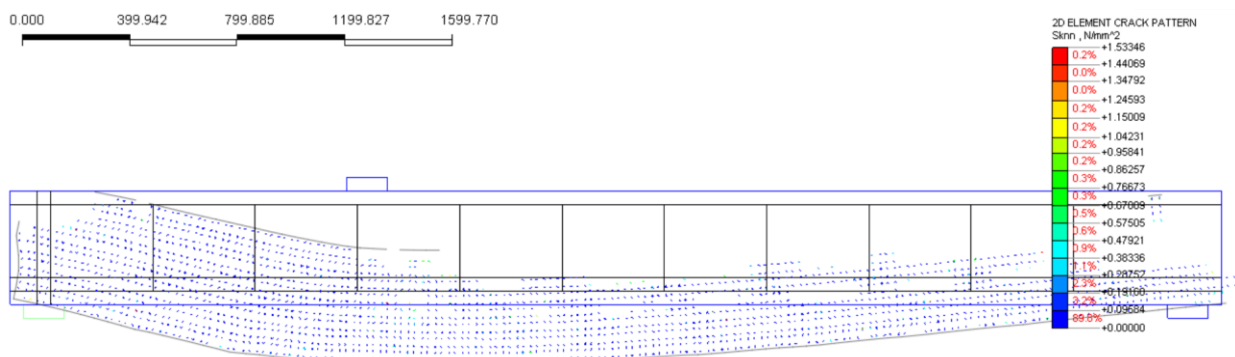
3.4.1 Viga de control

Al inicio de aplicación de la carga se empiezan a producir fisuras en la parte inferior con diferentes niveles de tensiones que van aumentando con la carga. El tamaño máximo de fisura en esta fase es de 0,212 mm para una carga de 79,92 kN y una flecha de 4,92 mm. En la siguiente figura se pueden ver la distribución de las fisuras en la primera fase de carga.



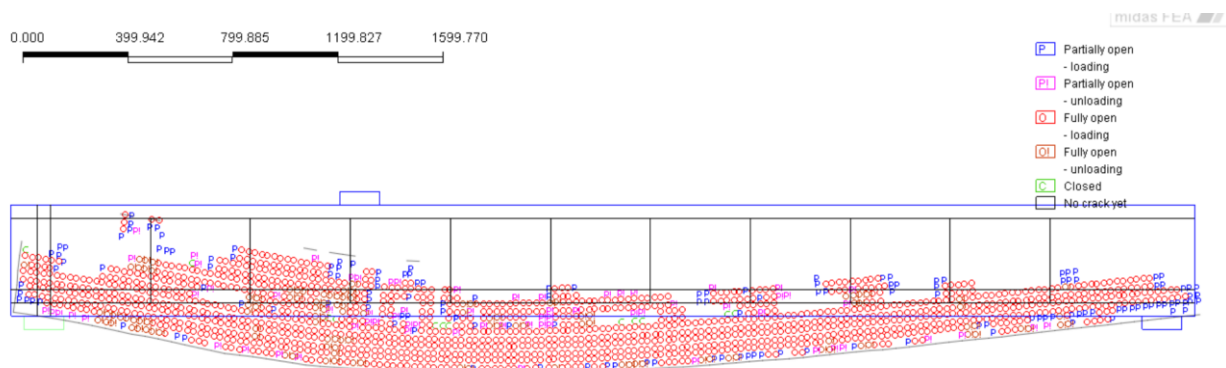
Il·lustració 3-23. Mapa de fisuras en la fase inicial de la viga control

Posteriorment, en la última fase de carga la viga se ve fisurada en su gran parte a excepción de una pequeña zona a compresión en la parte superior según se puede observar en la siguiente figura.



Il·lustració 3-24. Mapa de fisuras en la fase final de la viga control

Las fisuras se encuentran totalmente abiertas en su gran parte en la última fase de carga según se puede ver a continuación:



Il·lustració 3-25. Estado de las fisuras en la última fase de carga

En cuanto a las tensiones producidas, en una primera fase de aplicación de carga se observa en la Ilustración 3-26. de tensiones a lo largo del eje x claramente la zona de compresión como de tracción en la parte superior e inferior respectivamente. En el resto de la viga no se observan grandes tensiones a excepción de los apoyos donde la viga se ve afectada por el cambio de la geometría. La concentración de tensiones se produce en la parte inferior más inmediata a la placa de carga que van aumentando según se va incrementando la carga hasta que se produce la fisuración en la parte central. Después estas tensiones descienden drásticamente y solo dependen de la resistencia a tracción y la ductilidad del acero de la armadura en su estado plástico. Esto se puede observar en la Ilustración 3-27. donde la viga ha sufrido una rotura en el punto de aplicación de carga produciendo una nueva distribución de tensiones variables según las fisuraciones producidas.

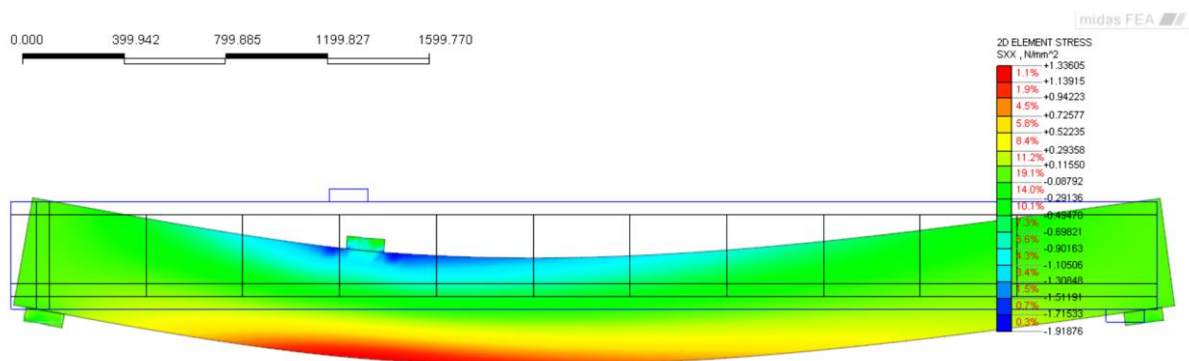


Ilustración 3-26. Distribución de tensiones en la primera fase de carga de la viga control

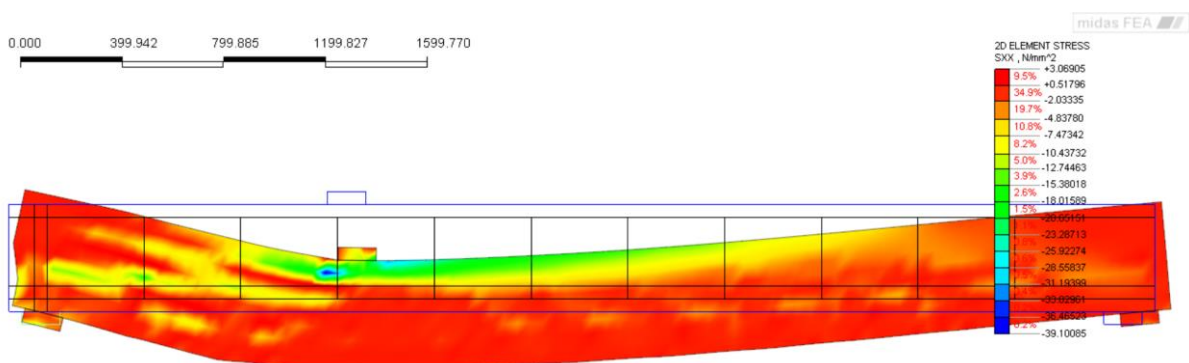


Ilustración 3-27. Distribución de tensiones en la última fase de carga de la viga control

Al ser una viga biapoyada, el estado de cortantes se concentra en los apoyos y va disminuyendo según se aproxima al centro de la viga. Así pues, el cortante es mayor en los laterales próximo a los apoyos donde la diferencia de fuerzas es mayor. Según esto es ahí donde las láminas de refuerzo FRP trabajarían más para resistir este esfuerzo que aumenta con la carga. En la Ilustración 3-28 se observa claramente la forma de cortante en el lado izquierdo de la viga desde el punto de carga hasta el apoyo y se comprueba de esta manera que es en la parte superior donde menos se ve afectada por este fenómeno. Se puede ver que tiene similitud con la distribución de fallo a cortante de la viga control estudiada por Alzate (2012) en la Ilustración 3-8

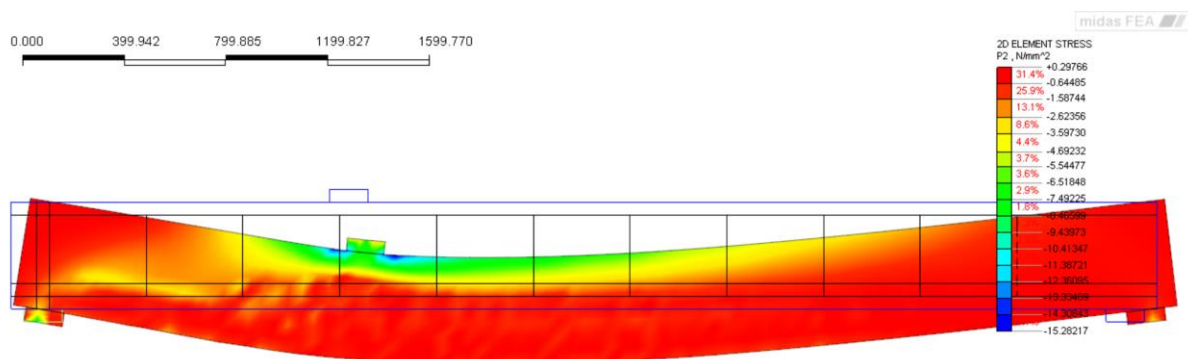


Ilustración 3-28. Mapa de distribución de cortantes en fase semi-inicial de la control

En la fase final de carga la fisura de cortante se acentúa hasta casi llegar a la rotura según se observa en la siguiente figura:

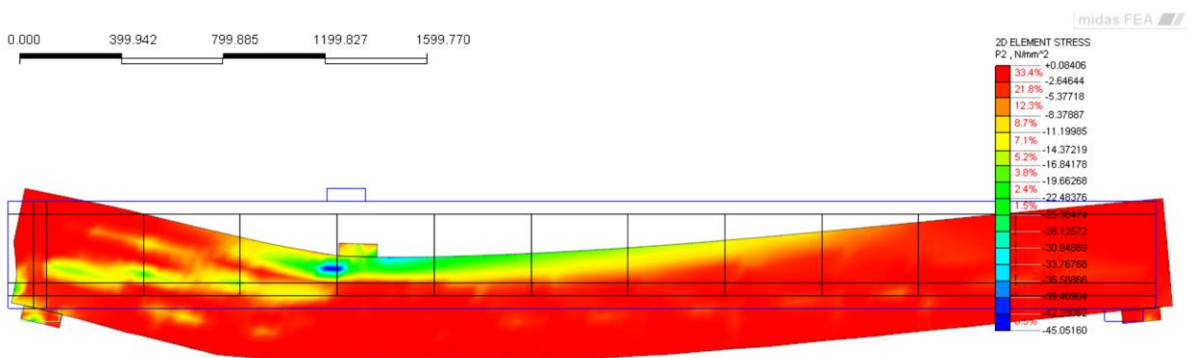


Ilustración 3-29. Mapa de distribución de cortantes en fase final de la viga control

En la siguiente figura se muestra el mapa de los desplazamientos producidos en la fase final. Se puede ver que el mayor desplazamiento se da en el eje central próximo al punto de aplicación de carga. De esta manera la flecha máxima es de 14,50 mm en su última fase de aplicación de carga.

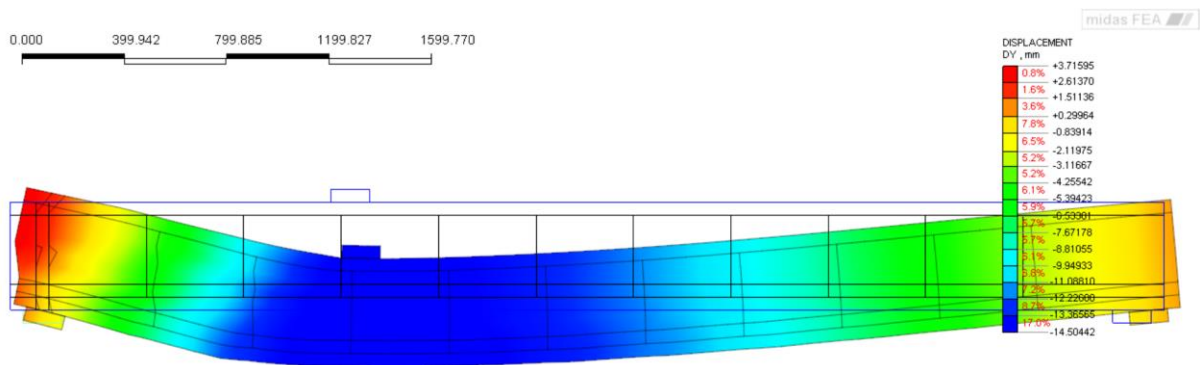


Ilustración 3-30. Mapa de desplazamientos en la última fase de aplicación de carga de la viga control

Finalmente, con los datos obtenidos dibujamos la gráfica con la curva de cortante y desplazamiento que nos define el comportamiento de la viga ante una carga aplicada y su desplazamiento en el punto de mayor flexión y mayor flecha. Se puede observar que el esfuerzo empieza a descender cuando se alcanza un desplazamiento de unos 14 mm siendo en ese momento cuando el hormigón pierde su resistencia a tracción y disminuye su contribución de resistencia ante la carga pasando esta a la armadura interior.

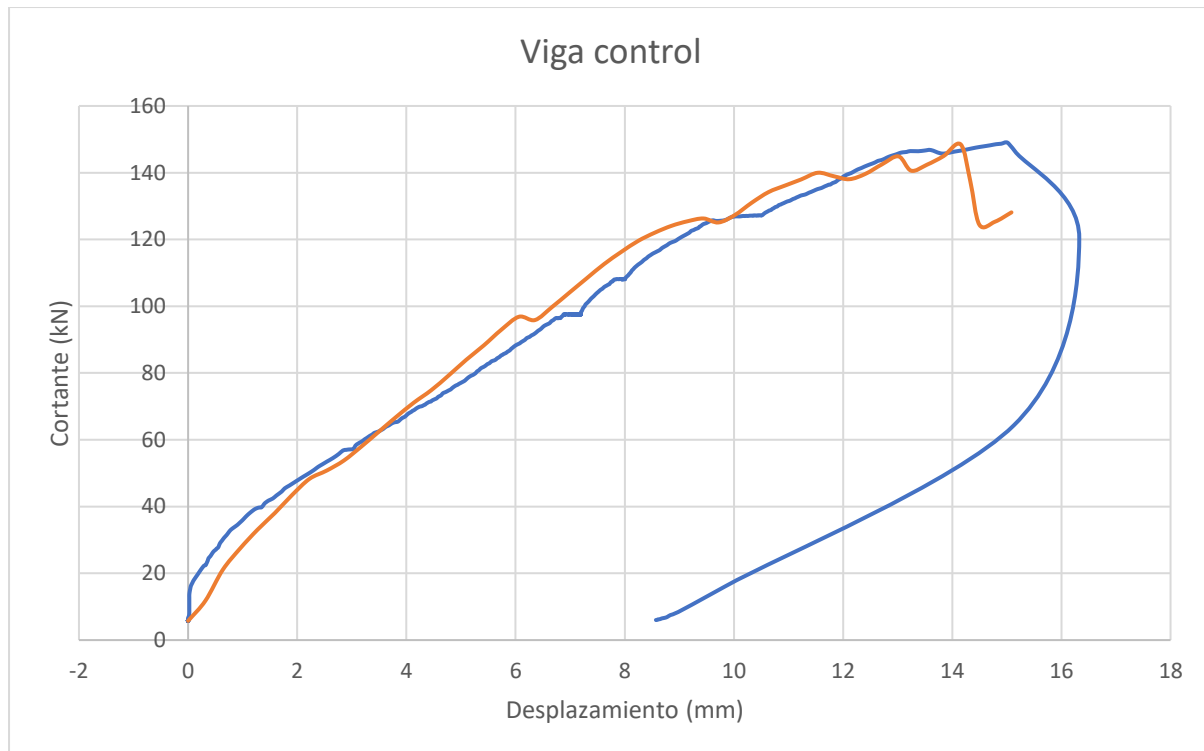


Ilustración 3-31. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga de control

Comparando la gráfica anterior con la viga experimental de Denise Ferreira, Eva Oller et al. (2013) en la Ilustración 3-9 vemos que el comportamiento de la viga es muy parecido a la original respecto al incremento del esfuerzo cortante con el desplazamiento. En nuestro caso, la deformación de la viga aumenta hasta alcanzar un cortante de aproximadamente 145 kN en su punto de máxima flexión y es a partir de ahí cuando empieza a disminuir hasta alcanzar finalmente un valor de 125 kN aproximadamente llegando finalmente al desplazamiento fijado de 15 mm. En el caso llevado a cabo por Denise Ferreira, Eva Oller et al., el cortante llega hasta un valor de unos 150 kN hasta que empieza a descender, por lo que tiene gran similitud con nuestro caso. Se observa también que el desplazamiento desciende en la última fase debido a la descarga aplicada en la viga llegando a una flecha final de unos 8,5 mm.

3.4.2 Viga W90S3

La viga W90S3 es igual que la viga control a diferencia de que está reforzada con láminas FRP en toda su longitud de un ancho de 200 mm y un grosor de 0,165. En nuestro caso, para poder

analizarla en un modelo 2D en el MIDAS FEA, se han considerado los mismos parámetros como de resistencia última, módulo de elasticidad o área de las láminas FRP pero con líneas verticales a modo de refuerzo de barras que imitan las características de los FRP según las propiedades anteriores. De este modo obtenemos unos resultados muy parecidos al modelo de Denise Ferreira, Eva Oller et al. que se describen a continuación.

Al principio de aplicación de carga se observa una fisuración típica inicial en la parte inferior de la viga que va aumentando proporcionalmente a la carga. El tamaño máximo de las fisuras en esta fase inicial es de 0,036 mm para una carga de 62,76 kN según se ve en la zona roja de la Ilustración 3-32. En la fase final de carga las fisuras aumentan hasta alcanzar un ancho de 1,21 mm para una carga aplicada de 283,16 kN según la Ilustración 3-33. En esta fase la viga se encuentra casi totalmente fisurada a excepción de la zona superior derecha donde no se producen grandes tensiones a compresión que puedan causar estas fisuras.

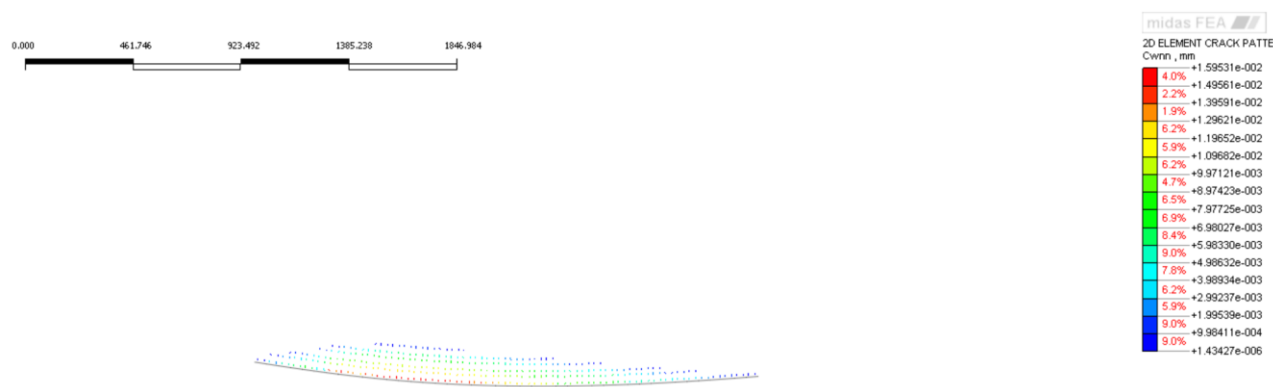


Ilustración 3-32. Mapa de fisuras en fase inicial en la viga W90S3.

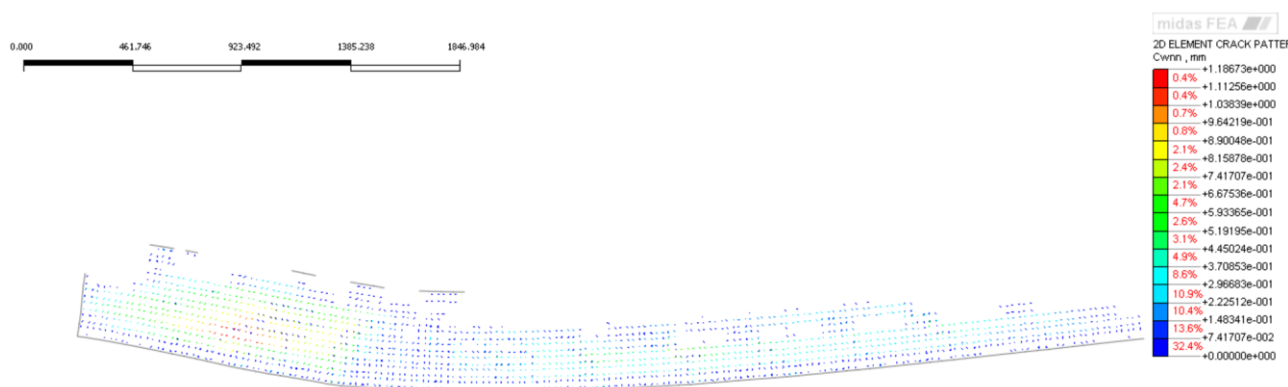


Ilustración 3-33. Mapa de fisuras en fase final en la viga W90S3

Las tensiones en este caso de configuración con FRP son diferentes a la viga sin FRP. En la fase inicial, según se observa las tensiones máximas se concentran en una zona central de la viga disminuyendo según se acerca a los extremos, aun así las tensiones son mayores en la parte

inferior que la superior. Esto es debido a la acción de las láminas FRP sobre la viga aumentando así su capacidad de resistencia a tracción.

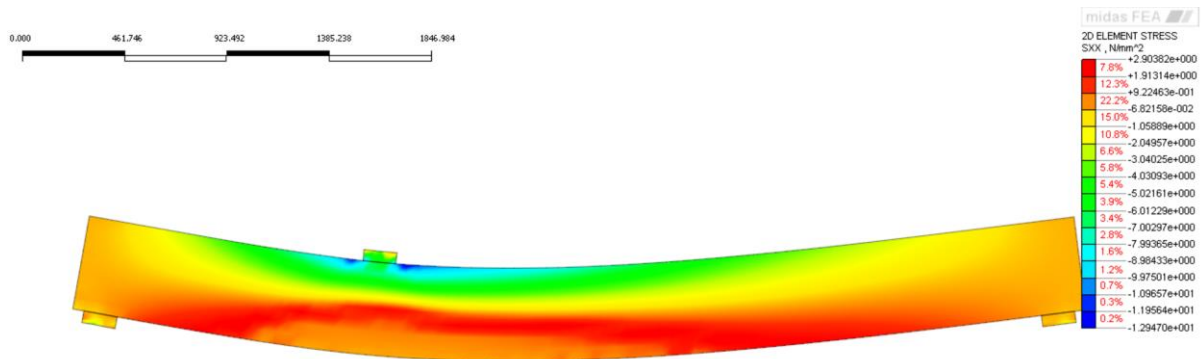


Ilustración 3-34. Mapa de tensiones en fase inicial de carga en la W90S3

En la fase final de carga, la acción de las láminas FRP no es muy efectiva y se observa un aumento claro de tensiones en la zona inferior de la viga hasta alcanzar un valor máximo de 3,30 MPa en la zona roja de la Fig.

En la zona superior, la viga está sometida a compresión y las tensiones son negativas como lo indica la zona azul.

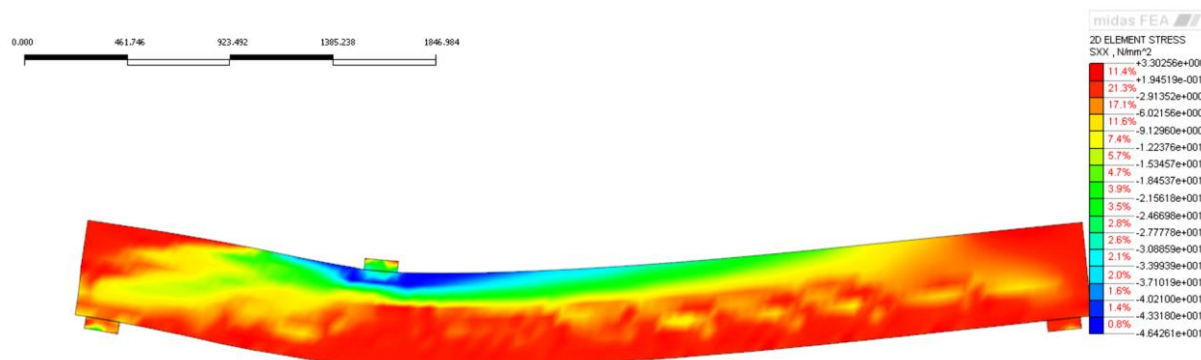


Ilustración 3-35. Mapa de tensiones en fase final de carga en la W90S3

Las deformaciones producidas en la fase final de carga se concentran en la parte de la izquierda de la viga donde el cortante es máximo y hay una mayor tendencia de desplazamiento entre los componentes. La zona roja es donde mayor deformación se produce, llegando a un valor de 0,0116, disipándose progresivamente según nos alejamos de ese punto.

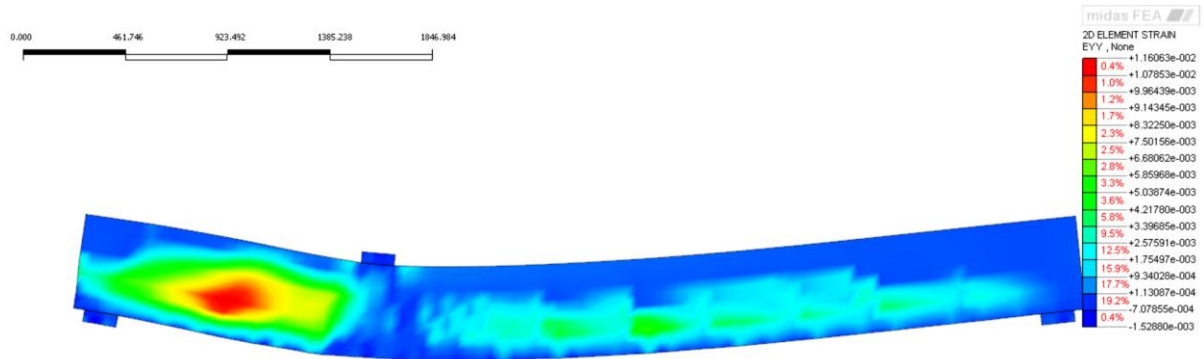


Ilustración 3-36. Mapa de deformaciones producidas en la W90S3

Durante la fase de carga inicial, el cortante empieza a desarrollarse en la parte inferior de los extremos según se observa en la zona roja de la figura 3-37. Según se aumenta la carga, este va aumentando hasta que se produce la fisuración completa en la viga según el corte diagonal característico del cortante, como se ve en la figura 3-38. Aquí el valor máximo de cortante es de 61,85 MPa a tracción.

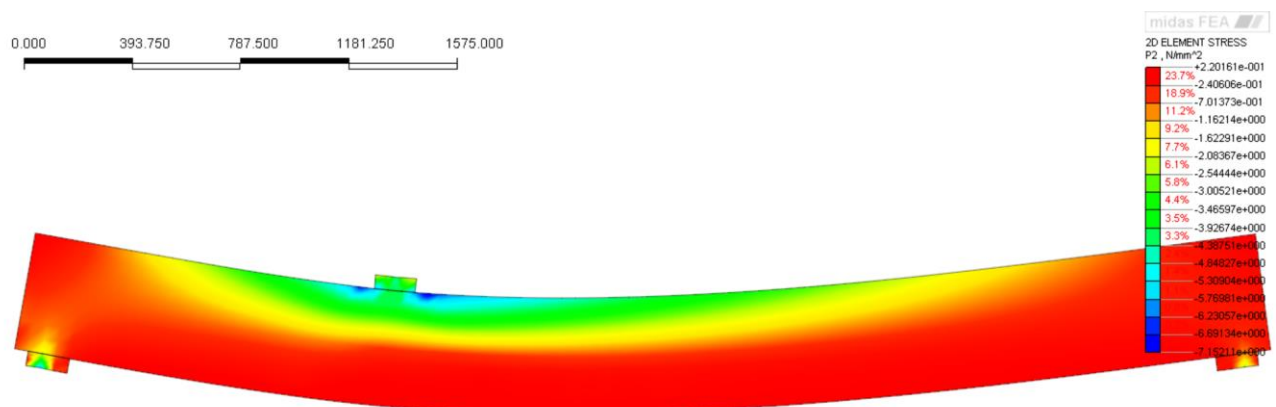


Ilustración 3-37. Mapa de cortantes en la fase inicial de carga de la viga W90S3

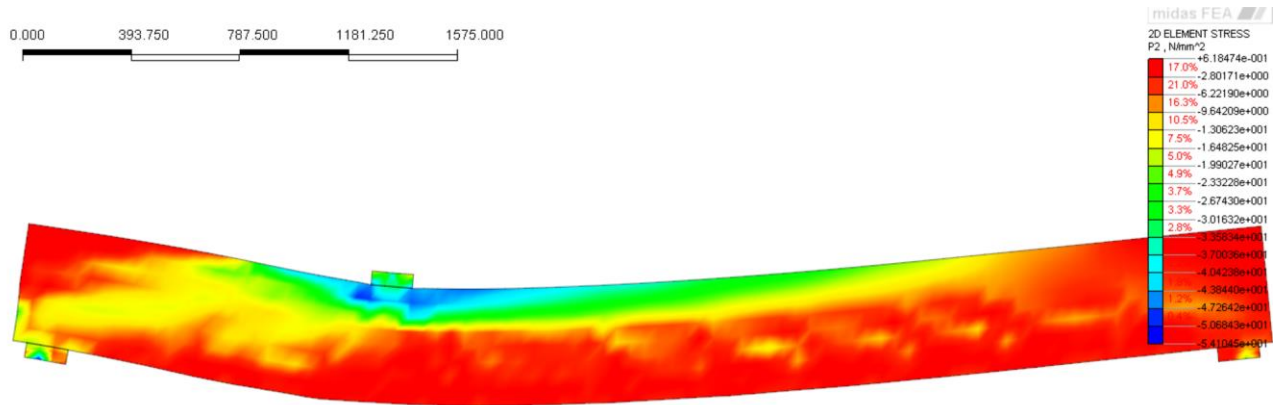


Ilustración 3-38. Mapa de cortantes en la fase final de carga de la viga W90S3

La armadura de la viga en la fase inicial percibe tensiones de tracción en la zona inferior y de compresión en la zona superior. En esta fase, la armadura aún no ha plastificado. Las tensiones máximas de tracción son 49,86 Mpa y de compresión -46,04 Mpa en las barras longitudinales.

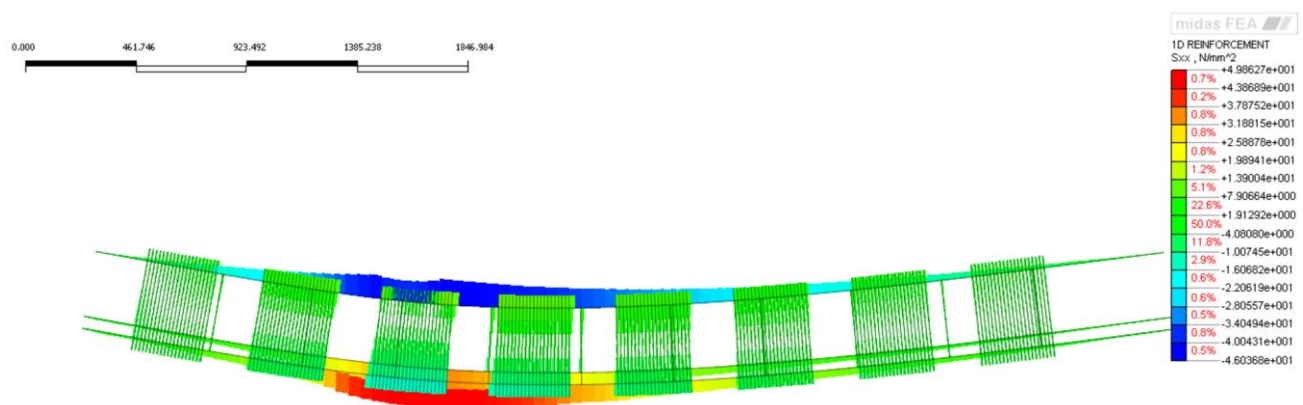


Ilustración 3-39. Mapa de tensiones en la armadura en fase inicial de carga en la viga W90S3

Más tarde, en la última fase de carga las armaduras longitudinales se encuentran plastificadas y es aquí cuando los cercos y las láminas FRP en el lado izquierdo sufren mayores tensiones llegando a un máximo de 2940 MPa según se observa en la Fig.

En este momento toda la viga esta plastificada en su mayor parte excepto en la zona superior derecha.

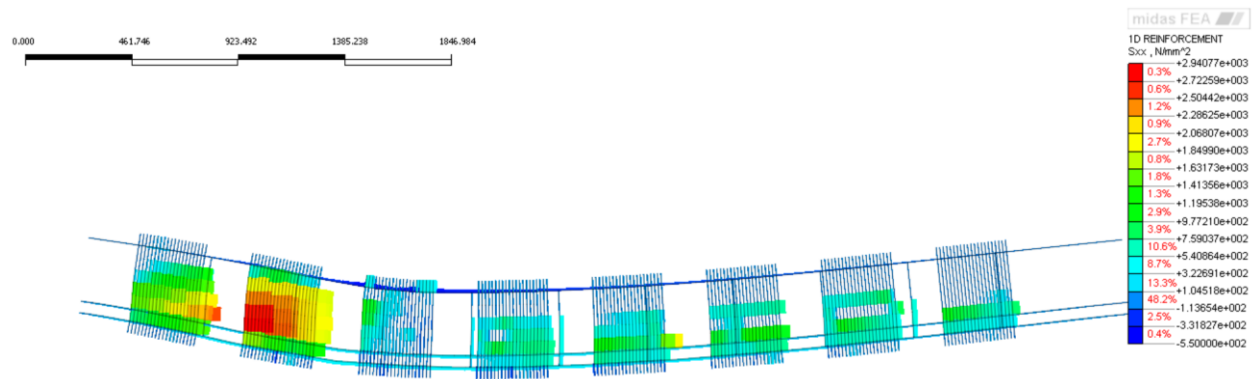


Ilustración 3-40. Mapa de tensiones en la armadura en fase final de carga en la viga W90S3

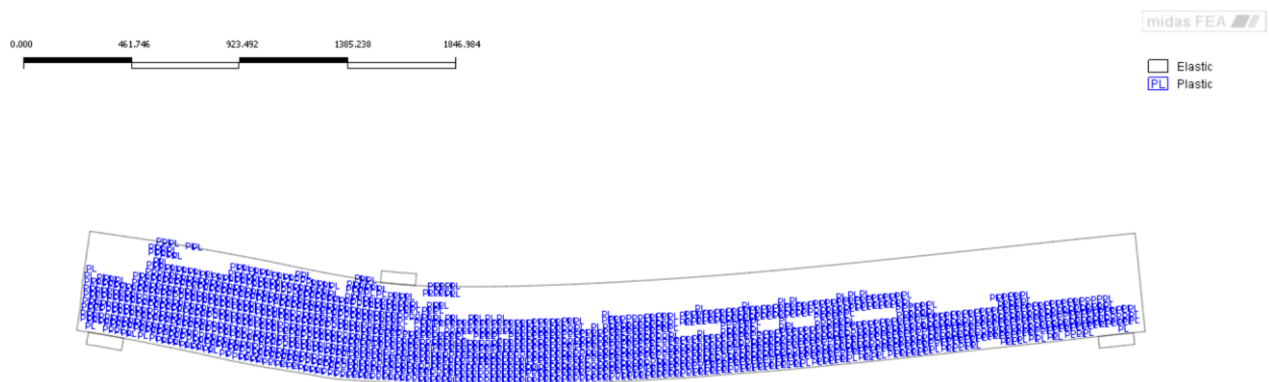


Ilustración 3-41. Área plastificada de la viga W90S3

A continuación, en la Ilustración 3-42 se muestran las curvas curvas desplazamiento numérica y experimental de la viga reforzada con la primera configuración de FRP. Se puede observar es considerablemente satisfactorio según se va incrementando la carga hasta llegar a una flecha máxima de unos 30 cm. La diferencia de carga de la curva numérica con la experimental no supera los 30 kN en general.

En el caso numérico modelizado por MIDAS FEA, la curva tiene un incremento constante de la carga y desplazamiento hasta alcanzar un cortante máximo de aproximadamente para un desplazamiento de 32 cm. A diferencia de la viga control anterior, en este caso la viga sigue mostrando una buena capacidad portante gracias al refuerzo de las láminas FRP llegando a cargas mucho mas elevadas. En el caso experimental, la viga alcanza un córtante máximo de

unos 320 kN con una deformación de 35 mm y a partir de ahí la curva comienza a descender con el aumento de carga.

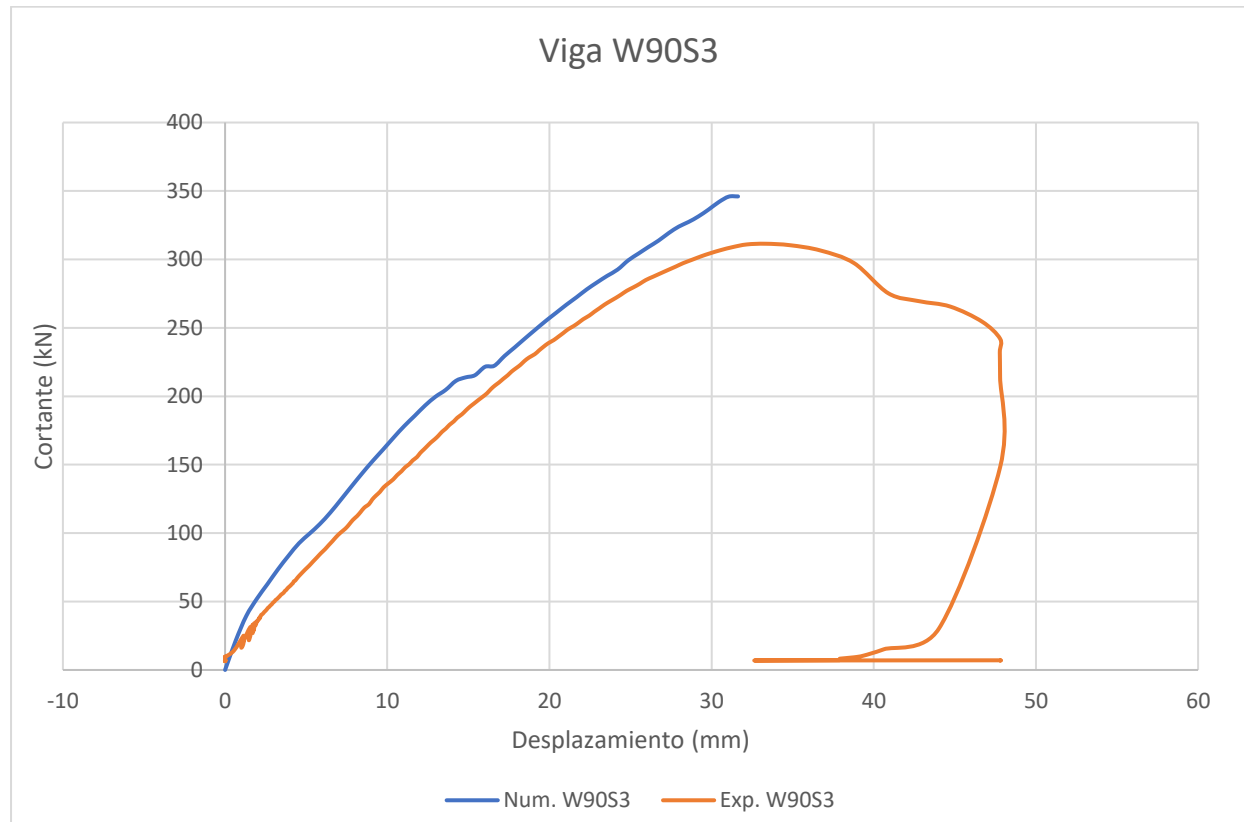


Ilustración 3-42. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga W90S3

3.4.3 Viga W90S5

En esta viga las láminas FRP tiene 300 de ancho como en la anterior pero su grosor es de 0,293 mm, lo que la hace más resistente a tracción y por tanto aumenta la capacidad portante de la viga ante la aplicación de la carga vertical. El procedimiento es el mismo que se ha seguido en la W90S3, conservando las propiedades de las fibras y adaptándolas a la configuración de barras aplicada en el MIDAS FEA. Así pues, se obtienen los siguientes resultados.

Las fisuras al igual que en la anterior se producen primero en la parte inferior con un ancho de 0,036 mm para una carga aplicada inicial de 62,76 kN y 1,21 mm para una carga final de 353,84 kN. En las figuras siguientes se observa su distribución.

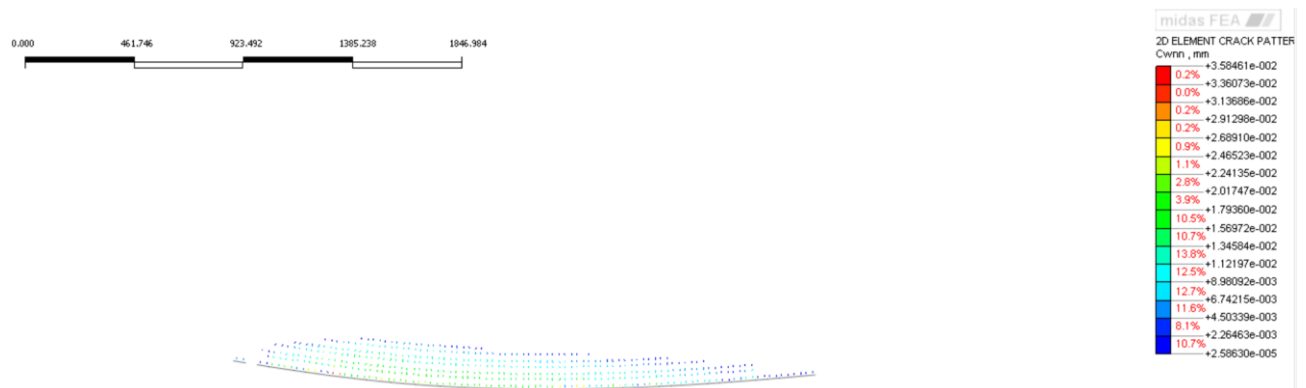


Ilustración 3-43. Mapa de fisuras en la fase inicial de carga en la viga W90S5

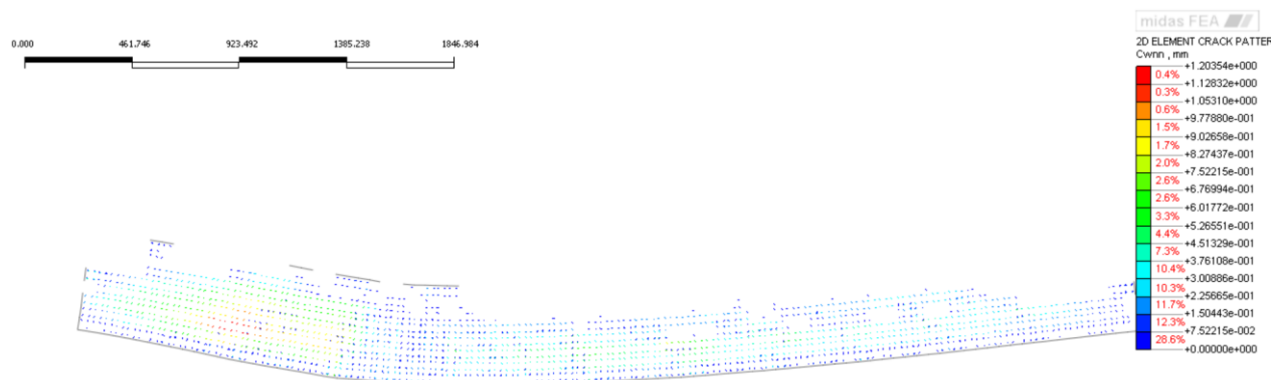


Ilustración 3-44. Mapa de fisuras en la fase final de carga en la viga W90S5

La distribución de las tensiones es razonablemente parecida a las de la viga W90S3 ya que también se nota la contribución de las láminas FRP en la resistencia con una franja semicentral de tensiones máximas en la fase inicial, con unas tensiones máximas de 2,92 Mpa a tracción. En su última fase de aplicación de carga, la armadura plastifica y las tensiones se concentran en la zona inferior alcanzando un valor máximo de tracción de 3,06 Mpa, inferior al de la viga analizada anteriormente. Las tensiones a compresión considerablemente elevadas con valores de -48,06 Mpa en la zona cercana a la placa de carga.

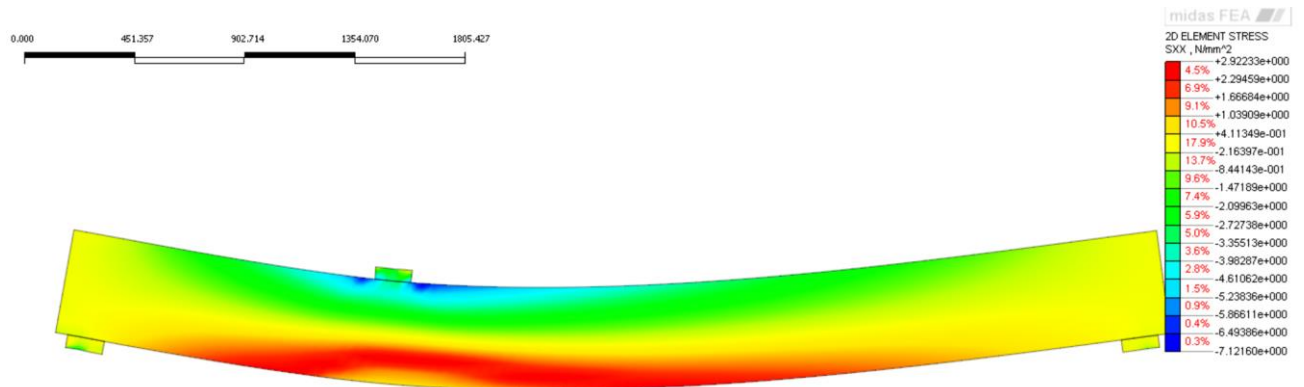


Ilustración 3-45. Mapa de tensiones en la fase inicial de carga de la viga W90S5

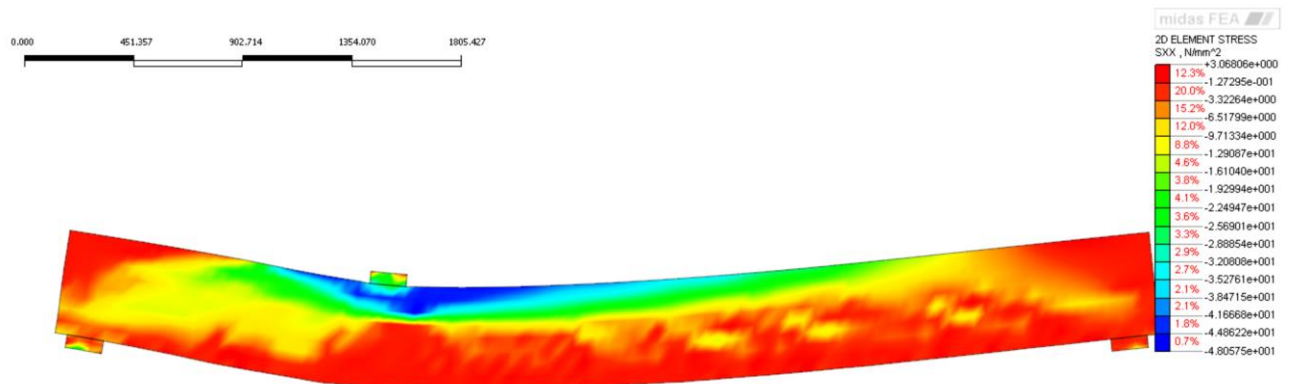


Ilustración 3-46. Mapa de tensiones en la fase final de carga de la viga W90S5

La deformación en la fase final también es muy parecida y se concentra en el punto izquierdo de la viga con un valor máximo de 0,011 Mpa debido al efecto del cortante y que disminuye según se va alejando hacia el exterior según se ve en la Ilustración 3-47.

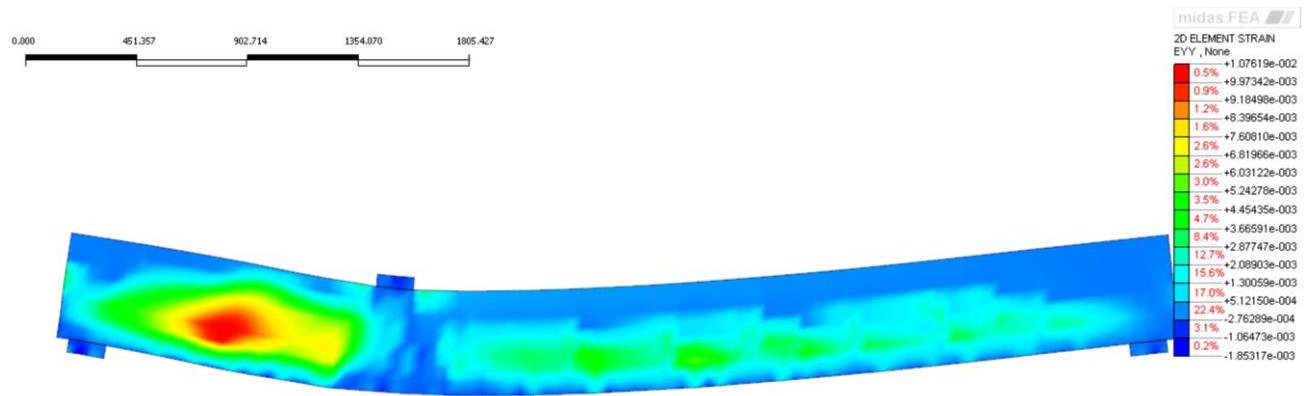


Ilustración 3-47. Mapa de deformaciones de la viga W90S5

Aquí también se puede observar la forma del cortante en la zona izquierda de la viga. En la parte superior tiene valores inferiores que van aumentando según nos alejamos. El valor máximo es de 10,30 Mpa inferior al de WS903.

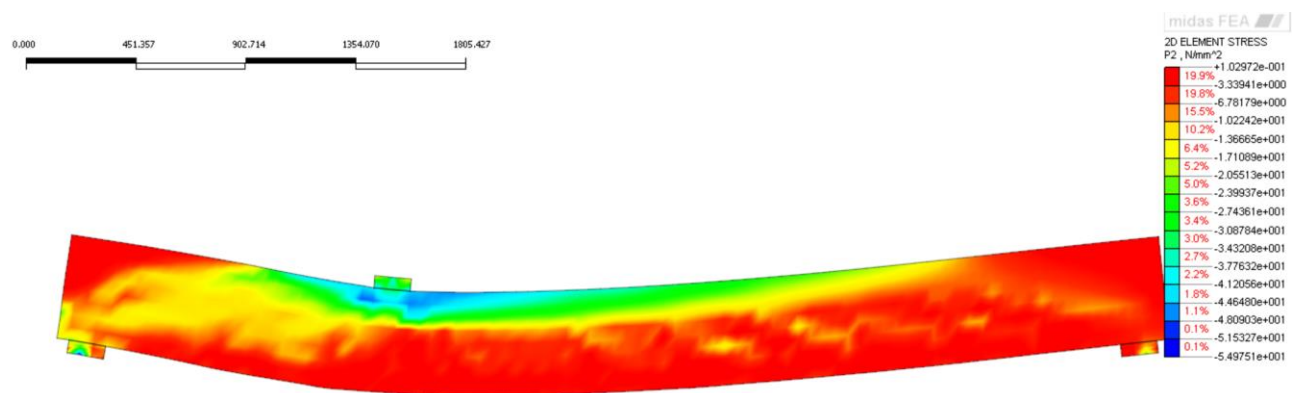
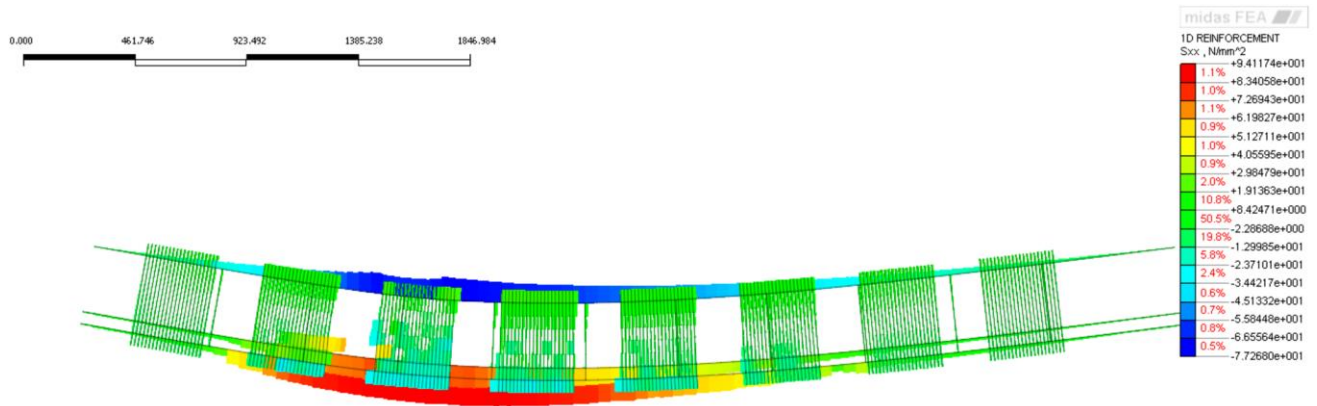
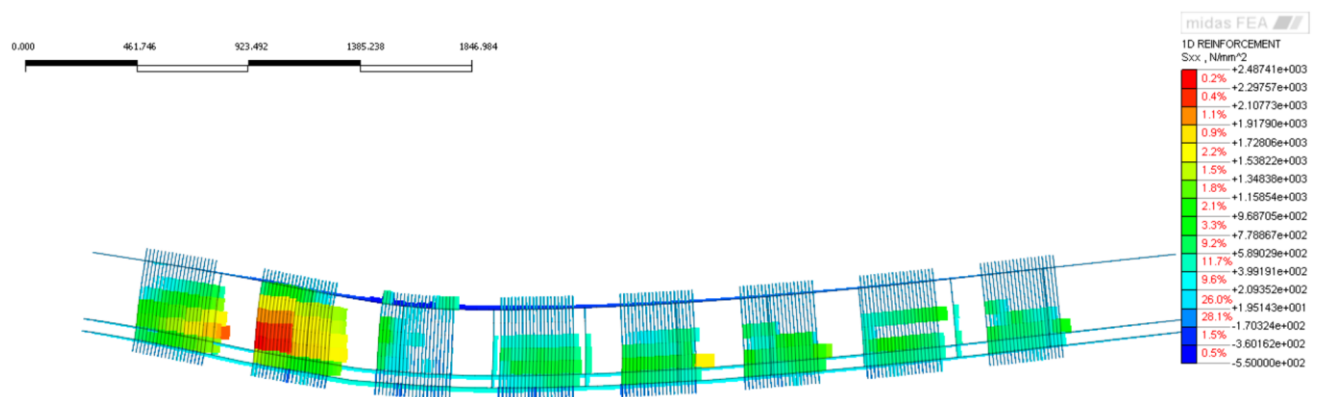


Ilustración 3-48. Mapa de cortantes de la viga W90S5

En cuanto a la armadura, se puede ver que inicialmente la longitudinal recibe mayores tensiones tanto a tracción como a compresión y que una vez plastificadas pasan a los cercos y las laminas de FRP. En esta ultima fase de carga las tensiones máximas son de 2487,4 Mpa a tracción y 550 Mpa a compresión.

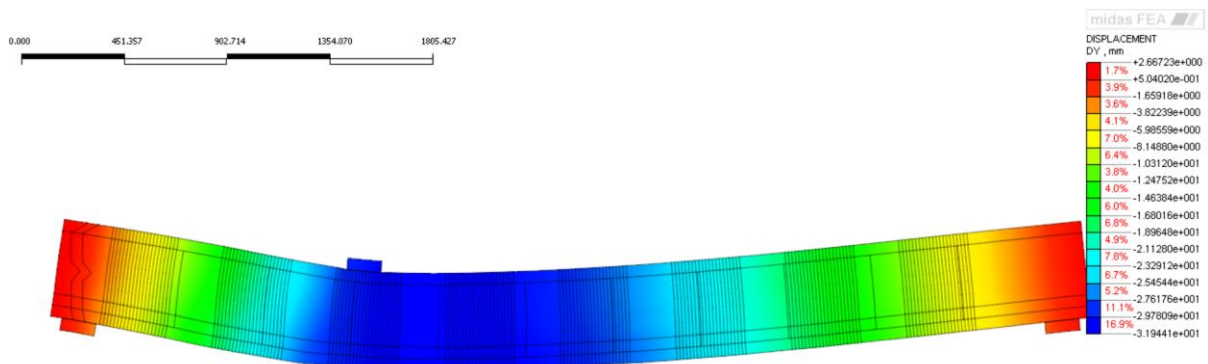


Il·lustració 3-49. Mapa de tensions en la armadura en la fase inicial de carga de la viga WS905



Il·lustració 3-50. Mapa de tensions en la armadura en la fase final de carga de la viga W90S5

La zona de mayor desplazamiento vertical se produce en la zona sombreada de color azul según se ve la Ilustración 3-48. alcanzando un valor aproximado de 30 cm según se especificó en el MIDAS FEA para la aplicación de la carga.



Il·lustració 3-51. Mapa de desplazamiento vertical en la fase final de la viga W90S5

En la Ilustración 3-52, se muestra el comportamiento del análisis experimental y numérico no lineal de la viga ante la carga. En este caso, se puede ver que la viga muestra mayor resistencia aumentando el valor de la carga para un determinado desplazamiento, comparada con la W90S3. El cortante llega a un valor de unos 375 kN para un desplazamiento de 32 mm. La contribución del hormigón a la resistencia a cortante aumenta con la presencia de los FRP, debido principalmente al efecto de confinamiento del hormigón producido por la configuración envuelta de los FRP. Además, los cercos mantienen su estado elástico para cargas mayores que en la viga de control.

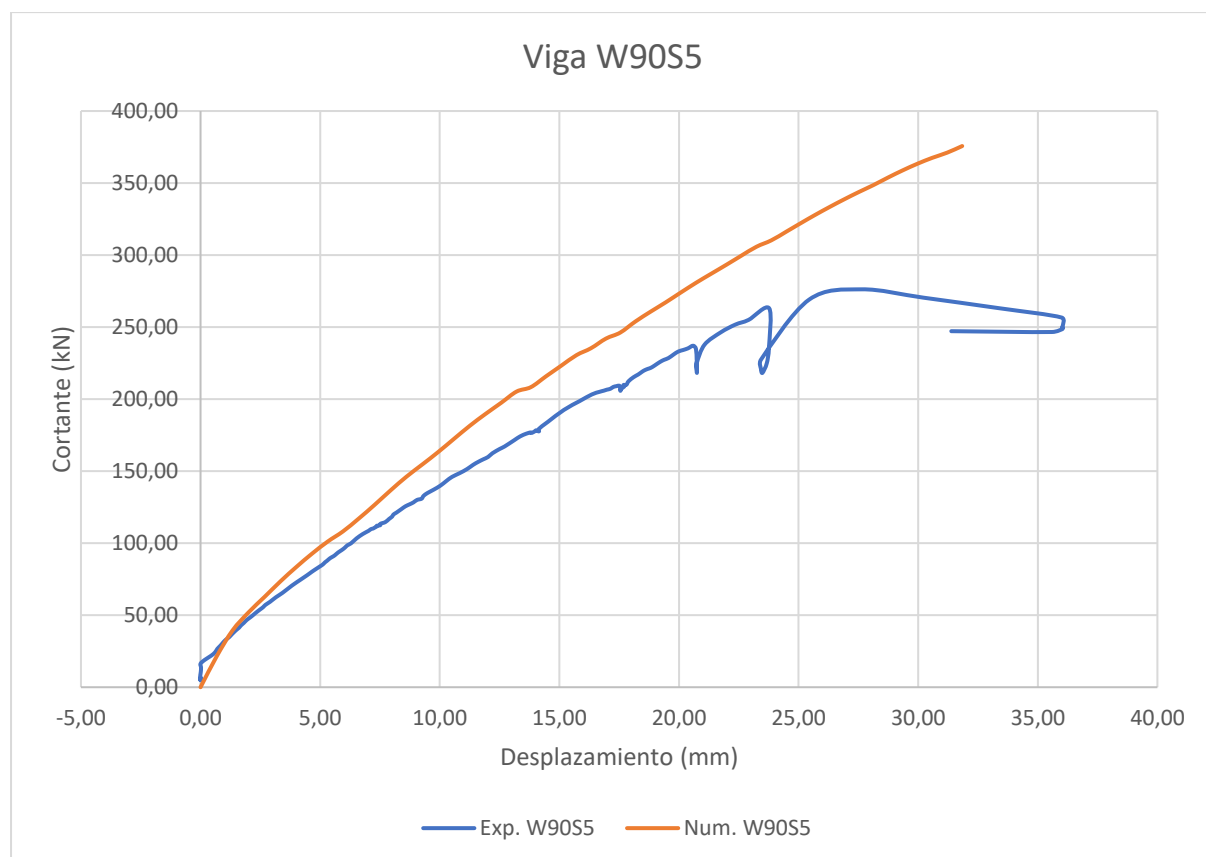


Ilustración 3-52. Diagrama de cortantes y desplazamientos en el centro del vano de la viga W90S5

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han estudiado las fibras sintéticas, determinando cuáles son sus propiedades, ventajas, desventajas, aplicaciones, etc. De esta manera se puede afirmar que el concepto de fibras como refuerzo no es nuevo, sino que ya se utilizaban en la construcción un siglo atrás siendo su campo de aplicación es muy amplio, dado que son muchas las aplicaciones en las que se puede sacar provecho de sus propiedades mecánicas. Más allá del campo de la construcción, en el cual todavía no se han conseguido afianzar totalmente debido a su coste elevado, se utilizan en la industria textil, automovilística, militar, etc. Hoy en día las fibras sintéticas son muy utilizadas en rehabilitaciones y refuerzo de estructuras. Se han estudiado sus principales campos de aplicación, que son:

- Se ha visto que las fibras de carbono se utilizan mucho como refuerzo de pilares, muros o forjados.
- La fibra de vidrio se utiliza sobre todo por sus buenas capacidades aislantes y en revestimientos de cerramientos.
- El uso de las fibras de aramida en la obra civil se centra en los cables de suspensión de puentes o los tendones de hormigón pretensado.
- El hormigón reforzado con fibras se utiliza en pavimentos, aprovechando su capacidad de eliminar las juntas, en capas de compresión, para evitar disponer armadura (como se ha visto en el ejemplo práctico expuesto) dadas sus buenas propiedades mecánicas, lo cual es especialmente interesante en esos casos en los cuales la disposición de acero no sea conveniente, como en ambientes agresivos donde sus propiedades magnéticas o eléctricas no son deseadas.

A pesar de todo, las láminas de fibras reforzadas con polímeros también presentan problemas durante su uso debido a varias causas, entre ellas el tipo de estructura y su localización, el ambiente en las que se encuentran, la cantidad de carga que han de soportar o su falta de adherencia a la superficie de contacto provocando una pronta delaminación antes de haber alcanzado la capacidad resistente, haciéndolas poco eficientes en algunos casos.

En la segunda parte, con la descripción del modelo de vigas y el funcionamiento analítico del MIDAS FEA según los modelos de fisura de hormigón, incluyendo el modelo de *Total Strain Crack*, el de compresión, tensión y cortante, se ha hecho la modelización de las vigas propuestas por Alzate para obtener finalmente los resultados numéricos y ser comparados.

En lo que respecta al análisis de las vigas de hormigón reforzadas con láminas FRP, cabe decir que los resultados obtenidos en el MIDAS FEA son considerablemente similares a los obtenidos por el modelo de Denise Ferreira, Eva Oller et al., donde también se pudo hacer una comparación experimental. El diseño propuesto es según una modelización 2D de las vigas de hormigón que conserva las mismas propiedades de medidas y mecánicas que las del modelo original. En el caso de la viga control, al no tener refuerzo de FRP resultó mucho más sencillo la modelización en la que solo dependía de las propiedades mecánicas de resistencia del hormigón y las de la armadura de acero en forma de cercos y de barras longitudinales. Para las vigas W90S3 y W90S5 se ha tenido que adaptar las láminas de FRP en forma de barras verticales que imitasen en su mejor medida su efecto resistente. Inicialmente las vigas mostraban un comportamiento más rígido ante la aplicación de la carga produciendo menores deformaciones para cargas más elevadas, lo que no tenía coherencia con el modelo a comparar. También debido a esto la viga presentaba una rotura en la zona de la placa de carga que se solventó. A pesar de estas dificultades iniciales y en la adaptación de los parámetros originales con el modelo propuesto, los resultados son altamente aceptables según se puede comprobar en las gráficas obtenidas de cortante-desplazamiento finales.

Futuras líneas de investigación.

Partiendo de aquí, se concluye que las fibras sintéticas de refuerzo estructural tienen un gran futuro en el campo de la construcción en el que se están llevando a cabo numerosas campañas de experimentación e investigación en cuanto al diseño y la eficiencia estructural de las fibras. De esta manera según se avance en la investigación y se vaya ganando experiencia en la producción del material, el uso de las fibras sintéticas en nuestra industria aumentaría, por la aparición de nuevas clases de materiales más optimizados, con una mayor disponibilidad y menor precio, que actualmente es uno de sus problemáticas más significativas. Los problemas que respectan a la separación temprana de las laminas de la estructura también se están estudiando llevando a cabo proyectos de investigaciones para mejorar sus propiedades ante esta patología.

Actualmente, algunos sistemas innovadores de puentes de FRP/hormigón, como el sistema de capa de capa de carbono rellena hormigón (siglas CSS en inglés) y el sistema híbrido de

tubos (HTS en inglés) usan efectivamente los FRP para construcciones nuevas, combinándolos con materiales convencionales como el hormigón y el acero. La caracterización del sistema y los estudios de investigación proporcionan la base para el diseño de sistemas de FRP en puentes en términos de deformación y estados límite de tensión. Se espera que los sistemas modulares de FRP en puentes de este tipo conducirán a una mayor velocidad construcción y menos interrupción del tráfico debido a su ligereza, así como unos costes más bajos en el ciclo de vida debido a su reducido mantenimiento.

El alcance de estas aplicaciones FRP para la renovación de la ingeniería civil dependerá de (1) la resolución de problemas pendientes tales como reparabilidad, el fuego, la durabilidad y preocupaciones ambientales; (2) la medida en la que la automatización en el proceso de fabricación pueda reducir el coste; (3) la disponibilidad de códigos validados, estándares y pautas que puedan usarse como referencias en el diseño y herramientas de la comunidad de ingeniería civil; y (4) el grado de control de calidad y garantía de calidad que se puede desarrollar y proporcionar durante el fabricación/instalación con una mano de obra general y sin grandes habilidades.

REFERENCIAS

1. David A.Hensher and L. Anselin, “Fiber-Reinforced-Plastic (FRP). Reinforcement for concrete structures. Properties and Applications.” *Developments in Civil Engineering* volume 42. Septiembre, 1993
2. Alessandro Bellini and Claudio Mazzotti. “A review on the bond behavior of FRP composites applied on masonry substrates” Diciembre, 2017
3. Ngekpe, B.E., Ode. T., and Eluozo S.N., “Application of Total-Strain Crack Model in Finite Element Analysis for Punching Shear at Edge Connection”, *B. E. I , International Journal of Research in Engineering and Social Sciences*, Vol. 06 Issue 12, December 2016, page 1-9
4. J.G. Rots, Blaauwendraad. “Crack models for concrete discrete or smeared? Fixed, multidirectional or rotating?” *Civil Engineering and Geosciences*. Institutional Repository, enero 1989.
5. A. Mira Vete. “Hacia la fibra de carbono en la construcción Towards the carbon fibers in the building industry” Universidad de Zaragoza, enero, 2001.
6. Viet Duc Dang, “MIDAS FEA Analysis Algorithm”, *Finite Element Analysis*, abril 2013.
7. Julien Michels, Joaquim A. O. Barros, et al., “Prestressed FRP systems” *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures*. Cap. 7, Agosto 2015.
8. Antonio Nanni, “Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for concrete structures. Properties and applications” The Pennsylvania State University Park, PA, USA. 1993
9. Ravi Jain and Luke Lee, “Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability”, University of the Pacific, California, USA, 2012.
10. Fawzi Latosh, Alireza Trokman and Ashutosh Bagchi, “Non-linear Analysis of Concrete Deep Beams Reinforced with FRP”, *Conference paper*, Junio 2018.
11. Denise Ferreira, Eva Oller et al., “Numerical Analysis of Shear Critical RC Beams Strengthened in Shear with FRP Sheets” *American Society of Civil Engineers*, 2013
12. Alzate, A. (2012). “Análisis de los modelos de comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP). Validación y calibración experimental.” *Ph.D. thesis*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid (in Spanish).

13. Caiazza, R., Recupero, A., and Scilipoti, C. D. (2006). "Collasso di travi in C.A. per taglio e utilizzo di FRCM per l'adequamento." *Proc., Convenio Nazionale Crolli e Affidabilità delle strutture civili* (CRASC'06), Università degli Studi di Messina, Italy (in Italian).
14. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1988). "Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using the modified compression field theory." *ACI J.*, 85(3), 258–268.
15. Arnaud Rolland, M. Quiertant et al. "Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars". *Construction and Building Materials article*. Junio 2018.
16. Hakeem Majeed, William G. Davids, Roberto A. Lopez-Anido. "Experimental and numerical investigation of splicing of concrete-filled fiber reinforced polymer tubes", *Construction and Building Materials article*. Junio 2018.
17. Jayamol George, M.S. Sreekala, Sabu Thomas, "A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites", *Polymer Engineering & Science*. Vol. 41, abril 2004.
18. William H. Seemann, III, "Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures", Junio 1988.
19. V.N. Gaitonde, S.R. Karnik at al., "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, Julio 2008.
20. O. Chaallal, M. J. Nollet and D. Perraton, "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fiber-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1998.
21. A. Abdulridha, "Performance of Superelastic Shape Memory Alloy Reinforced Concrete Elements Subjected to Monotonic and Cyclic Loading," no. April, 2013.