



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

## Estudio del comportamiento a flexión de elementos de hormigón armado o pretensado con FRP

Trabajo realizado por:

**Sara Tamames Soriano**

Dirigido por:

**Dra. Eva Oller Ibars**

**Dr. Antonio Ricardo Mari**

Grado en:

**Ingeniería de Obras Públicas**

Barcelona, 15 de setiembre del 2021

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## Agradecimientos

A mis padres y familia por todo el cariño y esta oportunidad, a mi pareja por la paciencia y a mis amigos por los buenos momentos.

A la Universidad Politécnica de Cataluña por estos años de crecimiento y en especial a la tutora de este TFG: Dra.Eva Oller por esta oportunidad y todas las enseñanzas. Al Dr. Nikola Tosic y Galo Ortiz, por sus enseñanzas, consejos y motivación.

También al personal de laboratorio de tecnología de estructuras y materiales, por toda la ayuda y ganas que han puesto en esta tesis, en especial a Carlos.



## Resumen

En el campo de la ingeniería estructural y de la construcción, el acero es el material por excelencia para uso como armado en estructuras de hormigón. Los problemas de corrosión del acero que aceleran el deterioro del hormigón, junto con el desarrollo de la industria; han planteado la posibilidad de nuevos materiales con mejores propiedades físico-químicas, como las barras de polímeros reforzados con fibras FRP.

El uso de las barras de FRP ha ido ganando popularidad en la ingeniería estructural, por su naturaleza no corrosiva, principalmente en ambientes severos con resultados satisfactorios en servicio. Las barras de FRP están disponible en el mercado con diferentes tipos de fibras, así como diferentes resinas o matrices, que se pueden clasificar en termoestables o termoplásticas. Las resinas más habituales son termoestables, que no se pueden reutilizar siendo así el impacto medioambiental mayor. A diferencia, las resinas termoplásticas, menos conocidas y que se están introduciendo en la actualidad en el sector de la construcción, se pueden reciclar y permiten el doblado de la barra una vez ha curado la resina, por lo que tienen un gran potencial.

Las barras de FRP han sido estudiadas como refuerzo externo desde los años 90. En la actualidad existen investigaciones que tienen por objetivo estudiar el uso de armaduras FRP para elementos estructurales, una de estas es el proyecto de investigación del Plan Nacional Straduravius, coordinado por la Universidad Politécnica de Catalunya y en el que participa la Universidad de A Coruña, en el que se enmarca este trabajo, que tiene como objetivo el estudio del comportamiento a flexión de elementos con armadura de FRP activa y pasiva.

Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento estructural de elementos armados y pretensados con barras de FRP, utilizando resinas termoestables y termoplásticas. Las campañas experimentales planteadas en este trabajo investigan el comportamiento estructural de vigas analizando la influencia de ciertas variables, como son el tipo de resina y la cuantía de armadura.

Los resultados obtenidos en este trabajo se reflejan en las cargas últimas, la relación carga-deformación, así como en la relación carga-deformación obtenida.

**Palabras clave:** Barras FRP, ensayos a flexión, resina termoplástica, resina termoestable, armadura FRP activa, armadura FRP pasiva.



## Abstract

In the field of structural engineering and construction, steel is the material par excellence for use as reinforcement in concrete structures. However, the problems of expansive corrosion of steel that accelerate the deterioration of concrete, along with the development of the industry; have raised the possibility of new materials with superior physico-chemical properties, such as FRP fiber-reinforced polymer bars.

The use of FRP bars has been gaining popularity in the civil engineering community, due to its non-corrosive nature, mainly in harsh environments with satisfactory results in service, FRP bars are available on the market in different types of fibers, depending on the fiber material as well as the material of the resin or matrix, from the latter the materials can be classified into thermosets or thermoplastics; thermosetting resins cannot be reused, thus the greater environmental impact, unlike thermoplastic resins, less known, which can be reused.

FRP bars have been studied as external reinforcement since the 90s, currently there are investigations that aim to study the use of FRP reinforcements for structural elements, one of these is the research project of the Straduravius National Plan, coordinated by the Polytechnic University of Catalonia and the University of A Coruña, in which this work is framed, which aims to study the bending behavior of elements with active and passive FRP reinforcement.

This work focuses on the study of structural behavior through two experimental campaigns. The experimental campaigns planted in this work investigate the structural behavior of beams reinforced with FRP bars, by analyzing the influence of certain variables, such as the type of resin and the amount of reinforcement.

The results obtained in this work are reflected in the ultimate loads, the load-deformation relationship, as well as the load-displacement relationship obtained.

**Keywords:** FRP bars, bending tests, thermoplastic resin, thermosetting resin, active FRP reinforcement, passive FRP reinforcement.

## Índice general

Agradecimientos .....	1
Resumen.....	3
Abstract .....	4
Índice general.....	5
Índice de figuras .....	7
Índice de tablas .....	11
1. Introducción .....	12
1.1 Antecedentes y problemática .....	12
1.2 Objetivos .....	12
Objetivos específicos.....	12
1.3 Metodología .....	13
2 Estado del conocimiento.....	14
2.1 FRP (Polímeros reforzados con fibras) .....	14
Fibras .....	15
Matriz o resina .....	17
Comportamiento mecánico .....	19
2.2 Uso como material estructural.....	23
Antecedentes de armaduras pasivas de FRP .....	25
Antecedentes de armaduras activas de FRP .....	26
2.3 Antecedentes de estudio en la Universidad Politécnica de Cataluña .....	27
Caracterización del material - Ensayos de Pull-out.....	27
2.4 Conclusiones del estado del conocimiento.....	29
3 Campañas experimentales .....	30
3.1 Objetivos de las campañas experimentales .....	30
Objetivos específicos de la campaña experimental de ensayos a flexión de vigas armadas con barras FRP.....	30
Objetivos específicos de la campaña experimental de ensayos a flexión de vigas pretensadas con barras FRP .....	31
3.2 Definición de las campañas.....	31
Campaña experimental a flexión de vigas con armadura pasiva de FRP .....	31
Campaña experimental a flexión de vigas con armadura activa de FRP.....	35
3.3 Fabricación de las vigas de la campaña experimental con armadura pasiva.....	41
3.4 Caracterización de los materiales de la campaña de armadura pasiva de FRP .....	44



Hormigón.....	44
Armaduras pasivas .....	48
3.5 Ensayos a flexión con armadura pasiva de FRP.....	54
Configuración del ensayo .....	54
Instrumentación .....	56
Instrumentos utilizados.....	61
3.6 Proceso de ensayo de armadura pasiva de FRP.....	68
Ciclos de carga .....	68
Observaciones durante el ensayo .....	69
4 Resultados y análisis de resultados de la campaña de armadura pasiva de FRP.....	82
4.1 Grupo 1.....	82
Carga última .....	82
Carga – Desplazamientos .....	83
Carga – Deformaciones .....	91
4.2 Grupo 2.....	97
Carga última .....	97
Carga – Desplazamientos .....	98
Carga – Deformaciones .....	105
4.3 Conclusiones de los resultados .....	111
5 Conclusiones.....	112
5.1 Futuras líneas de investigación .....	113
6 Bibliografía .....	114

## Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de los materiales Compuestos - Analysis and performance of fiber composites. D. AGARWAL y J. BROUTMAN, (1990) .....	14
Figura 2. Grafico comparativo resistencia tracción en fibras - FIB Bull40.....	15
Figura 3. Grafica comparativa Tensión-Deformación de las fibras de Carbono, Aramida y Grafito. Fuente: GIOVANNY, 2021.....	20
Figura 4. Tensiones en ensayo de compresión. Fuente: J. HENRÍQUEZ (2018). .....	22
Figura 5. Cronología de los códigos y normativas de uso y diseño para armaduras FRP. Fuente: FIB bull 40 .....	24
Figura 6. Fotografía realizada insitu del ensayo Pull-out. Fuente: propia .....	28
Figura 7. Fotografía del ensayo Pull-out. Fuente: A. MONCAYO (2021) .....	28
Figura 8. Disposición armadura longitudinal de GRFP. Grupo 1. Ensayo armadura pasiva.....	32
Figura 9. Disposición armadura longitudinal de Acero. Grupo 1. Ensayo armadura pasiva .....	33
Figura 10. Disposición armadura longitudinal de GRFP termoestable. Grupo 2. Ensayo armadura pasiva.....	33
Figura 11. Disposición armadura longitudinal de GRFP termoplástica. Grupo 2. Ensayo armadura pasiva.....	33
Figura 12. Disposición armadura de cortante de Acero. Ensayo armadura pasiva .....	34
Figura 13. Disposición armadura de cortante de GRFP. Ensayo armadura pasiva .....	34
Figura 14. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa. G. ORTIZ, (2020) .....	37
Figura 15. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de acero, fuerza de pretensado 60% fpu. G. ORTIZ, (2020).....	38
Figura 16. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de acero, fuerza de pretensado 60% fpu. Detalle de la armadura de cortante G. ORTIZ, (2020) .....	38
Figura 17. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de carbono, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60% fpu; Low/Baja 40% fpu; Null/Nula 0% fpu ). G. ORTIZ, (2020) .....	39
Figura 18. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de carbono, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60% fpu; Low/Baja 40% fpu; Null/Nula 0% fpu ). Detalle de la armadura de cortante. G. ORTIZ, (2020) .....	39
Figura 19. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de vidrio, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60% fpu; Low/Baja 40% fpu; Null/Nula 0% fpu ). G. ORTIZ, (2020) .....	40
Figura 20. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de vidrio, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60% fpu; Low/Baja 40% fpu; Null/Nula 0% fpu ). Detalle de la armadura de cortante. G. ORTIZ, (2020) .....	40
Figura 21. Armadura montada de las vigas de armadura pasiva.....	41
Figura 22. Armadura dentro del encofrada, vigas de armadura pasiva.....	41
Figura 23. Dosificación del hormigón de la campaña. Fuente: PROMSA.....	42
Figura 24. Vertido del hormigón en las vigas con armadura pasiva. ....	42
Figura 25. Curado de las vigas con armadura pasiva. ....	43
Figura 26. Barras ensayadas para la caracterización de material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 .....	48
Figura 27. Barras FRP para caracterización del material, con las protecciones en los extremos. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 .....	49

Figura 28. Desprendimiento de la resina en los extremos. Fuente: TFM A.Moncayo.2021..... 49

Figura 29. Instrumentación de las barras ensayo de caracterización del material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021. .... 50

Figura 30. Curva esfuerzo-deformación barras VE-10mm. Caracterización Material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 ..... 50

Figura 31. Curva esfuerzo-deformación barras VE-13mm. Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 ..... 51

Figura 32. Figura 3.14 Curva esfuerzo-deformación barras TP-13mm. Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 ..... 51

Figura 33. Curva esfuerzo-deformación barras ST-10mm Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021 ..... 51

Figura 34. Esquema de la situación de la viga ..... 54

Figura 35. Situación de la viga en el ensayo de armadura pasiva ..... 54

Figura 36. Apoyos utilizados en los ensayos de armadura pasiva ..... 55

Figura 37. Esquema de la instrumentación de los ensayos ..... 56

Figura 38. Imágenes detalle de los instrumentos utilizados durante los ensayos con armadura pasiva..... 57

Figura 39. Definición de las deformaciones ..... 58

Figura 40. Situación de las Galgas en la armadura..... 58

Figura 41. Diagrama de momentos generados por la carga en la viga ensayada..... 59

Figura 42. Diagrama de momentos de la tensión en la barra de la armadura ..... 59

Figura 43. Esquema del funcionamiento de un temposonic, vista frontal y lateral. .... 61

Figura 44. Temposonic colocado para el ensayo ..... 61

Figura 45. Esquema del circuito eléctrico del LVDT. M.MONTERO(2021). ..... 62

Figura 46. Posición inicial del LVDT y corrientes que se generan. M.MONTERO(2021). ..... 62

Figura 47. Posición núcleo desplazado hacia arriba, en el LVDT. M.MONTERO(2021). ..... 63

Figura 48 Posición núcleo desplazado hacia abajo, en el LVDT. . M.MONTERO(2021). ..... 63

Figura 49. Función transferencia de un LVDT típico. Fuente: R.PALLÁS-ARENY y J. G. WEBSTER. .... 63

Figura 50. Detalle de la galga extensiométrica..... 64

Figura 51. Puente de Winston completo ..... 64

Figura 52. Información aportada por el fabricante de las Galgas Extensiométricas. .... 65

Figura 53. Multiplexor y conversor de datos de analógico a digital ..... 66

Figura 54. Máquina de compresión universal..... 67

Figura 55. Fisuras Viga 4A10 a 23,6kN. Grupo 1. .... 69

Figura 56. Fisuras Viga 4A10 a 46,1 kN. Grupo 1. .... 69

Figura 57. Fisuras Viga 4A10 a 49 kN. Grupo 1. .... 70

Figura 58. Fisuras Viga 4A10 a 49,4 kN, Grupo 1. .... 70

Figura 59. Fisuras Viga 2V10 a 9,7 kN, Grupo 1. .... 71

Figura 60. Fisuras Viga 2V10 a 24,2 kN, Grupo 1. .... 71

Figura 61. Fisuras Viga 2V13 a 55,4 kN, Grupo 1. .... 72

Figura 62. Fisuras Viga 2V13 a 56,9 kN, Grupo 1. .... 72

Figura 63. Fisuras Viga 2V13 a 54,6 kN, Grupo 1. .... 73

Figura 64. Fisuras Viga 2T13a a carga de rotura, Grupo 1. .... 74

Figura 65. Fisuras Viga 2T13b a carga de rotura, Grupo 1. .... 74

Figura 66. Fisuras Viga 5V10. Grupo 2..... 75

Figura 67. Fisuras Viga 5V10 (2). Grupo 2. .... 75

Figura 68. Fisuras Viga 5V10 a carga de rotura. Grupo 2. .... 76

Figura 69. Fisuras Viga 3V13 a 51,8 kN. Grupo 2..... 76

Figura 70. Fisuras cortantes de la Viga 3V13 a 51,8 kN. Grupo 2. .... 77

Figura 71. Fisuras de la Viga 3V13 a carga máxima. Grupo 2..... 77

Figura 72. Fisuras Viga 3T13a a 6,6kN. Grupo 2..... 78

Figura 73. Fisuras Viga 3T13a a 34,7kN. Grupo 2..... 78

Figura 74. Fisuras Viga 3T13b a 4,4kN. Grupo 2..... 79

Figura 75. Fisuras Viga 3T13b a 38kN. Grupo 2..... 79

Figura 76. Situación de la armadura en la viga 2V13 después de rotura..... 80

Figura 77. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 4A10. . 83

Figura 78. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 4A10 . .... 83

Figura 79. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2V13.. 84

Figura 80. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2V13. .... 84

Figura 81. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2T13a 85

Figura 82. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2T13a..... 85

Figura 83. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2T13b 86

Figura 84. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2T13b. .... 86

Figura 85. Gráfica carga-desplazamientos primer ciclo. Grupo 1. .... 87

Figura 86. Gráfica carga-desplazamientos. Grupo 1. .... 88

Figura 87. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 4A10, Grupo 1. .... 88

Figura 88. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 2V13, Grupo 1. .... 89

Figura 89. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 2T13A y 2T13B, Grupo 1. .... 89

Figura 90. Grafica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 4A10..... 91

Figura 91. Grafica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 4A10..... 91

Figura 92. Grafica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 2V13..... 92

Figura 93. Grafica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 2V13..... 92

Figura 94. Grafica deformaciones-carga de la galga. En centro de vano. Viga 2T13a ..... 93

Figura 95. Grafica deformaciones-carga de la galga. Cuarto de luz. Viga 2T13a ..... 93

Figura 96. Grafica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 2T13b ..... 94

Figura 97. Grafica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 2T13b..... 94

Figura 98. Grafica carga-deformaciones a ½ de vano. Grupo 1..... 95

Figura 99. Grafica carga-deformaciones ¼ de vano. Grupo 1..... 96

Figura 100. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 5V10 98

Figura 101. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 5V10 ..... 98

Figura 102. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 3V13 99

Figura 103. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3v13..... 99

Figura 104. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 3T13a  
..... 100

Figura 105. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3T13a..... 100

Figura 106. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 3T13b  
..... 101

Figura 107. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3T13b .... 101

Figura 108. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Grupo 2..... 102

Figura 109. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Vigas 5V10 y 3V13. Grupo 2 ..... 102

Figura 110. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Vigas 3T13a y 1T13b. Grupo 2..... 103

Figura 111. Gráfica carga-desplazamientos. Grupo 2 ..... 103

Figura 112. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 5V10 y 3V13. Grupo 2 ..... 104

Figura 113. Grafica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 5V10 ..... 105

Figura 114. Grafica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 5V10 ..... 105

Figura 115. Grafica deformación -carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3V13 .....	106
Figura 116. Grafica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3V13 .....	106
Figura 117. Grafica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3T13a.....	107
Figura 118. Grafica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3T13a .....	107
Figura 119. Grafica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3T13a.....	108
Figura 120. Grafica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3T13a .....	108
Figura 121. Grafica carga-deformación $\frac{1}{2}$ de vano. Grupo 2. ....	109
Figura 122. Grafica carga-deformación $\frac{1}{4}$ de vano. Grupo 2. ....	110

## Índice de tablas

Tabla 1. Tabla propiedades fibras. Fuente: FIB Bull40 (2007).....	16
Tabla 2. Tabla de propiedades de las resinas termoestables - FIB Bull40 ( 2007) .....	18
Tabla 3. Tabla propiedades resinas termoplásticas - FIB Bull40 (2007).....	18
Tabla 4. Nomenclatura Campaña Pull-out. A. MONCAYO (2021) .....	27
Tabla 5. Tabla resultados tracción barras FRP y acero. Ensayos Pull-out. A. MONCAYO (2021)	28
Tabla 6. Muestra grupo 1. Campaña experimental armadura pasiva.....	32
Tabla 7. Muestra grupo 2. Campaña experimental armadura pasiva.....	33
Tabla 8. Nomenclatura según tipo de barras de los ensayos de armadura activa. G. ORTIZ, (2020)	36
.....	36
Tabla 9. Nomenclatura general de vigas para los ensayos de armadura activa. G. ORTIZ, (2020)	36
.....	36
Tabla 10. Resultados ensayo de Flow. Caracterización Materiales. ....	46
Tabla 11. Resultados ensayos a compresión hormigón del día 14/05/2021 .....	46
Tabla 12. Resultados ensayos a tracción hormigón del día 14/05/2021 .....	46
Tabla 13. Resultados ensayos del módulo elástico hormigón del día 14/05/2021 .....	47
Tabla 14. Resultados ensayos a compresión hormigón día 25/05/2021 .....	47
Tabla 15. Resultados ensayos a tracción hormigón día 25/05/2021 .....	47
Tabla 16. Resultados ensayos del módulo elástico hormigón del día 25/05/2021 .....	47
Tabla 17. Tipos de barras y nomenclatura. ....	48
Tabla 18. Resultados ensayos de tracción de las barras. Caracterización de los materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021. ....	53
Tabla 19. Tipos de apoyos .....	55
Tabla 20. Información obtenida por cada instrumento .....	56
Tabla 21. Ciclos de carga ensayos con armadura pasiva.....	68
Tabla 22. Canto útil real de las vigas con armadura pasiva .....	80
Tabla 23. Carga última del grupo 1 .....	82
Tabla 24. Flechas en carga máxima. Grupo 1.....	90
Tabla 25. Resumen deformaciones Galgas. Grupo 1. ....	95
Tabla 26. Carga última del grupo 2 .....	97
Tabla 27. Resumen de los valores de Flecha. Grupo 2.....	104
Tabla 28. Resumen deformación Galgas. Grupo 2.....	109



# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes y problemática

El hormigón armado y el hormigón pretensado están al orden del día, pero suelen tener problemas de corrosión, en especial en ambientes agresivos. Para que no tener esta problemática, en el sector de la construcción se ha empezado a introducir el empleo de otro tipo de materiales, como los polímeros reforzados con fibras (FRP), en lugar del acero convencional, que nos presentan problemas de corrosión.

Los polímeros reforzados con fibras presentan características diferentes a las del acero que se deben considerar para su uso como armadura. El material se caracteriza por ser una combinación de dos o más materiales, donde su composición define la capacidad resistente, tiene una elevada relación resistencia/peso y rigidez/peso, una buena resistencia a la fatiga y una baja pérdida de tensión por relajación. Es un material elástico-lineal, por lo tanto, con un comportamiento frágil en rotura, pero que combinado con el hormigón presenta una baja ductilidad.

El uso de polímeros reforzados con fibras como armadura pasiva o activa se plantea por su ausencia de corrosión y porque tienen una elevada resistencia a tracción. Sin embargo, en función del tipo de fibra empleado, el módulo de elasticidad es bajo.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es plantear el uso de armadura FRP como sustitución de la armadura de acero, tanto en armadura activa como armadura pasiva, para poder llegar a algunas conclusiones para el desarrollo de pautas de diseño en un futuro.

### Objetivos específicos

1. Revisar la literatura orientada al estudio del comportamiento mecánico de las armaduras de FRP, identificar los diferentes parámetros a tener en cuenta.
2. Investigar el comportamiento mecánico de las barras de FRP como armadura pasiva y activa pretensada, con resina termoestable o termoplástica y compararlas con armaduras convencionales de acero. Teniendo en cuenta los siguientes parámetros:
  - a. Material de refuerzo: FRP o acero
  - b. Tipo de resina (termoestable o termoplástica)
  - c. Cuantía de armadura
3. En base a los resultados obtenidos, definir los diferentes factores que afectan las propiedades estructurales del conjunto.

### 1.3 Metodología

Para poder entender el comportamiento de este material junto con el hormigón, se ha planteado el estudio mediante: análisis numérico, análisis paramétrico y campaña experimental.

- Análisis numérico, se desestimó por la complejidad que supone una modelización numérica y posterior validación de datos.
- Análisis paramétrico, para el caso de armadura FRP pretensada, existen pocas campañas experimentales, lo que imposibilita hacer un análisis paramétrico debido a la poca muestra. A. GUNNARSSON (2013).
- Campaña experimental, es la vía de estudios que tomamos en este trabajo de final de grado, junto con su posterior tratamiento de datos.

Por estas razones la metodología empleada en este trabajo se basa en la realización y análisis de resultados de una campaña experimental de vigas armadas y/o pretensadas con FRP. Tal y como se explicará más adelante, el alcance de este trabajo sólo contempla la campaña experimental con armadura pasiva de FRP y como futuro trabajo de investigación en el marco de la tesis doctoral del estudiante Galo Ortiz se realizará la campaña experimental con armadura activa de FRP.

## 2 Estado del conocimiento

En la década de 1990, con la necesidad de reforzar las estructuras existentes, en especial en el mundo de la edificación y junto con el problema de la corrosión de armaduras de acero, las nuevas técnicas industriales, plantean la idea de sustituir las armaduras de acero tradicional por materiales tales como los polímeros con fibras o Fiber Reinforcer Polymers (FRP).

### 2.1 FRP (Polímeros reforzados con fibras)

Los polímeros reforzados con fibras se consideran un material compuesto, en base a la clasificación de los materiales compuestos de D. AGARWAL y J. BROUTMAN, (1990), Figura 1:

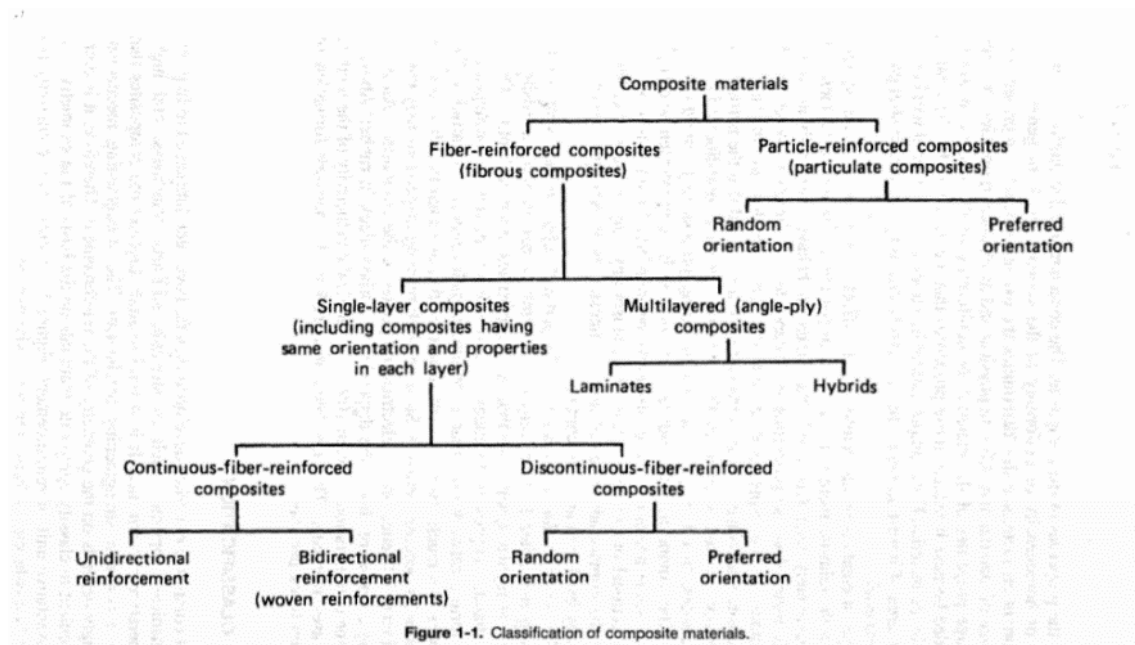


Figura 1. Clasificación de los materiales Compuestos - Analysis and performance of fiber composites. D. AGARWAL y J. BROUTMAN, (1990)

Con respecto a esta clasificación, los materiales compuestos se dividen en dos grupos: fibras y partículas. La característica que diferencia las fibras de una partícula es que esta es de naturaleza no fibrosa, es decir, tiene una estructura esférica, cúbica, tetragonal, una plaqueta o de otra forma regular o irregular, pero es aproximadamente equiaxial. Una fibra se caracteriza porque su longitud es mucho mayor que sus dimensiones de sección transversal.

Los polímeros o plásticos reforzados con fibras, están compuestos por una matriz de polímero (resina) y unas fibras de vidrio, carbono, aramida o basalto (filamentos).

**La matriz o resina** define las propiedades mecánicas del FRP: adherencia, baja viscosidad y limita la contracción de las fibras; están compuestas por poliestireno, vinil éster y resina epoxi. Puntualizamos que la resina en sí no tiene peores propiedades mecánicas que las fibras.

**Las fibras** tienen un comportamiento mecánico frágil, aunque tienen buena resistencia, es por ese motivo que los dos materiales se unen. La resina mantiene la posición de las fibras, las protege de los agentes ambientales y las fibras aportan esa resistencia a la resina o matriz.

## Fibras

En este apartado presentaremos 4 tipos de fibras, según FIB Bulletin 40, (2007):

- Fibra de Vidrio: filamentos de vidrio, es poco pesada, fácil de moldear, altamente resistente a la corrosión y abrasión, aislamiento eléctrico y tiene una buena relación coste-beneficio.
- Fibras de Carbono: el coste de producción de la fibra de carbono es ligeramente superior al de las fibras de vidrio y se ha utilizado en laminados durante más de 30 años para fortalecer la estructura.
- Fibras de Aramida: conocidas como fibras de Kevlar, son más resistentes a la tracción, por lo que se utilizan más en cables y haces de varillas, su desventaja es que son menos resistentes a la compresión, pero tienen mejor resistencia al impacto, por lo que se utilizan principalmente en estructuras militares.
- Fibras de Basalto: mayor resistencia a la tracción y la resistencia a la rotura son mejor que la fibra de carbono en cuanto a resistencia a la corrosión.

También es vital entender que las fibras de vidrio tienen un comportamiento isotrópico, en cambio las fibras de aramida y carbono tienen un comportamiento anisótropo. FIB Bulletin 40, (2007)

En la Figura 2 se puede observar una comparación de la resistencia a tracción de las diferentes fibras:

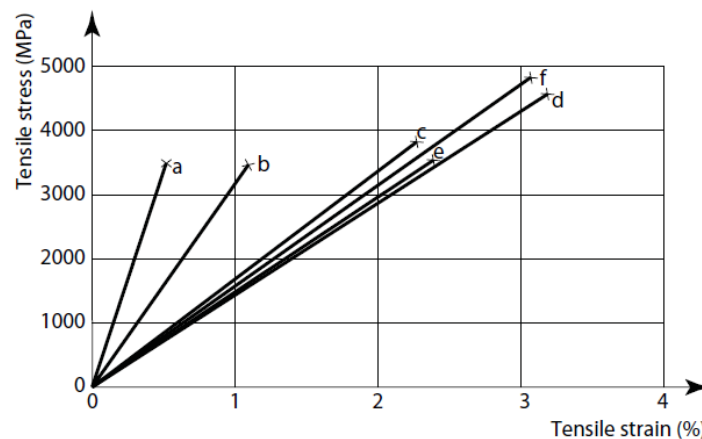


Figure 2-1: Stress-strain curves of typical reinforcing fibres: a) carbon (high modulus); b) carbon (high strength); c) aramid (Kevlar 49); d) S-glass; e) E-glass; f) Basalt

Figura 2. Grafico comparativo resistencia tracción en fibras - FIB Bull40

Las propiedades generales de estas fibras son ver Tabla 1:

Fibre Type	Density	Tensile strength	Young modulus	Ultimate tensile strain	Thermal expansion coefficient	Poisson's coefficient
	(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(GPa)	(%)	(10 <sup>-6</sup> /°C)	
E-glass	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
S-glass	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
Alkali resistant glass	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-	-
ECR	2620	3500	80.5	4.6	6	0.22
Carbon (high modulus)	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2...-0.1	0.20
Carbon (high strength)	1750	3500	240	1.1	-0.6...-0.2	0.20
Aramid (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-6.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (SVM)	1430	3800-4200	130	3.5	-	-
Basalt (Albarrie)	2800	4840	89	3.1	8	-

Tabla 1. Tabla propiedades fibras. Fuente: FIB Bull40 (2007).

Las fibras de vidrio son las fibras de refuerzo más utilizadas para las armaduras pasivas y activas. Por ello en este estudio nos centraremos en las fibras de vidrio GFRP, matriz con filamentos de vidrio. El vidrio fundido se puede estirar en filamentos continuos que se agrupan en mechas. Durante la fabricación, las superficies de las fibras se recubren con un "apresto" para mejorar la humectación con la matriz y proporcionar una mejor adherencia entre los componentes. El recubrimiento de las fibras de vidrio se hace con un agente de acoplamiento que proporciona una capa flexible en la interfaz, mejorando la resistencia de la unión y reduciendo el número de huecos en el material.

Existen varios tipos de fibras de vidrio, las más comunes están fabricadas de E-glass, S-glass y AR-glass (vidrio resistente a los álcalis).

- **E-glass** es el más barato de los vidrios y tiene una amplia aplicación en la industria del plástico reforzado con fibra.
- **S-glass** tiene mayor resistencia a la tracción y módulo más alto que el E-glass. Sin embargo, es más caro de fabricar que las fibras de E-glass, hecho que lo hace menos populares que el E-glass.
- **Fibras de vidrio resistentes a los álcalis (AR)**, que ayudan a prevenir la corrosión por ataque de álcalis en las matrices de cemento, se producen mediante la adición de circonio.

En general la resistencia a la tracción de las fibras de vidrio se reduce a temperaturas elevadas, pero puede considerarse constante para el rango de temperaturas a las que pueden exponerse las matrices poliméricas. La resistencia también se reduce con la corrosión química y con el tiempo bajo cargas sostenidas.

## Matriz o resina

Generalmente, el polímero se denomina sistema de resina durante el procesamiento y se denomina matriz después del curado. La matriz del polímero puede considerarse estructural y protectora y el término resina se usa para referirse a polímeros. La fabricación y el rendimiento de los materiales compuestos se ven afectados fundamentalmente por la resina y su composición química y propiedades físicas. El material de la matriz suele representar el 30-60% del volumen del compuesto polimérico. A nivel estructural, la función principal de la matriz es unir las fibras de refuerzo, transferir y distribuir la carga a las fibras y, al mismo tiempo, proteger las fibras de la erosión ambiental y la abrasión mecánica.

Por lo tanto, la elección de la matriz es muy importante al diseñar un sistema compuesto, lo que afectará las propiedades mecánicas y físicas del producto. Hay dos categorías básicas de matrices poliméricas utilizadas en compuestos FRP: resinas termoestables (thermosetting) y resinas termoplásticas (thermoplastic).

Las **resinas termoestables** son polímeros que se forman irreversiblemente a partir de moléculas poco pesadas. Estos polímeros tienen fuertes enlaces y desarrollan una estructura en red que permite mantener la forma. Si se calientan después de que se hayan curado no se derriten, conservando su forma, hasta que comienzan a descomponerse térmicamente por altas temperaturas.

Las **resinas termoplásticas** son polímeros que no desarrollan enlaces cruzados. Se pueden modificar, ablandar y endurecer repetidamente, sometiéndolos a ciclos de temperatura que alcanzan un valor superior a su temperatura de formación.

### Resinas termoestables

Las resinas termoplásticas del estado sólido se calientan para ser procesadas y vuelven al estado inicial después de que se completa el procesamiento y se enfrían. No sufren ninguna transformación química durante el proceso. Los termoplásticos tienen una alta viscosidad a la temperatura de procesamiento, lo que dificulta el proceso de fabricación.

Existen tres tipos de resinas termoestables:

- **Resinas Epoxy:** son una clase de resinas preparadas mediante la polimerización por apertura de anillo de compuestos que contienen un promedio de más de un grupo epoxi por molécula.
- **Resinas Polyester:** fabricado utilizando etilenglicol, éter ortoftálico o ácido isoftálico como diácido saturado y fumárico como diácido insaturado.
- **Vinyl Ester:** son resinas a base de metacrilato y acrilato.

La siguiente tabla muestra el rango de algunas de las propiedades de algunas resinas anteriormente explicadas en la Tabla 2:

Property	Matrix		
	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Tensile strength (MPa)	34.5 - 104	55 - 130	73 - 81
Longitudinal modulus (GPa)	2.1 - 3.45	2.75 - 4.10	3.0 - 3.5
Poisson's coefficient	0.35 - 0.39	0.38 - 0.40	0.36 - 0.39
Thermal expansion coefficient (10 <sup>-6</sup> /°C)	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Moisture content (%)	0.15 - 0.60	0.08 - 0.15	0.14 - 0.30

Tabla 2. Tabla de propiedades de las resinas termoestables - FIB Bull40 (2007)

En este trabajo nos centraremos en estudio de las matrices Vinyl Ester:

**Vinyl Ester** son resinas a base de metacrilato y acrilato. Algunas variaciones contienen grupos puente de uretano y éster. Debido a su estructura química, estas resinas tienen menos enlaces cruzados, son más flexibles y tienen mayor tenacidad a la fractura que los poliésteres.

#### Resinas termoplásticas

Los compuestos con matrices termoplásticas se puede moldear su forma y reciclar, mediante el calor, las veces que se dese.

Los principales polímeros utilizados son:

- **PEEK** (poliéster éter cetona): la resina termoplástica más común para aplicaciones de alto rendimiento. Eso tiene una alta tenacidad a la fractura, que es importante para la tolerancia al daño de los compuestos. PEEK tiene una absorción de agua muy baja (aproximadamente 0,5% en peso) a temperatura ambiente.
- **PPS** (sulfuro de polifenileno): termoplástico con muy buena resistencia química.
- **PSUL** (polisulfona): termoplástico con un alargamiento muy alto hasta la rotura y una excelente estabilidad en condiciones de calor y humedad.

La Tabla 3 muestra las propiedades tipo de las tres resinas termoplásticas mencionadas en líneas anteriores.

Property	Matrix		
	PEEK	PPS	PSUL
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1320	1360	1240
Tensile strength (MPa)	100	82.7	70.3
Tensile modulus (GPa)	3.24	3.30	2.48
Tensile elongation (%)	50	5	75
Poisson's coefficient	0.40	0.37	0.37
Thermal expansion coefficient (10 <sup>-6</sup> /°C)	47	49	56

Tabla 3. Tabla propiedades resinas termoplásticas - FIB Bull40 (2007)

En este TFG la resina termoplástica con la que se realizarán los ensayos, es la resina Elium de la empresa francesa Arkema<sup>1</sup>, utilizada por la empresa italiana Sireg<sup>2</sup> para fabricar las barras de FRP termoplásticas.

<sup>1</sup> [https://www.arkema.com/global/en/products/product-finder/product-range/incubator/elium\\_resins/](https://www.arkema.com/global/en/products/product-finder/product-range/incubator/elium_resins/)

<sup>2</sup> <https://www.sireggeotech.it/es/prodotti/barras-para-armaduras-en-fibra-de-vidrio/>

## Comportamiento mecánico

### *Comportamiento a tracción*

Para comprender el comportamiento a tracción del material, debemos entender que se trata de un material compuesto por una resina, un material isótropo, es decir se comporta de la misma manera en las diferentes direcciones donde se aplica el esfuerzo; y un segundo material: fibras, las cuales no se comportan de la misma manera en las diferentes direcciones.

Las propiedades de las fibras cambian en función del eje de referencia, es decir, es un material otrotrópico<sup>3</sup>, lo que implica que el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras sea diferente a la relación esfuerzo-deformación en dirección transversal.

$$E_{\text{longitudinal}} \gg E_{\text{transversal}}$$

Las propiedades del material compuesto, como por ejemplo, el módulo de elasticidad se obtiene con la regla de mezclas:

$$E_{\text{longitudinal}} = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Siendo:

$$E_f = \text{módulo de Young de las fibras}$$

$$V_f = \text{el volumen de fibras en tanto por uno (entorno al 40% – 60\%)}$$

$$E_m = \text{módulo de Young de la matriz}$$

Debido a que el módulo de la matriz es muy pequeño en comparación con el de las fibras, la expresión se puede simplificar como:

$$E_{\text{longitudinal}} = E_f V_f$$

Siguiendo este razonamiento, las propiedades mecánicas de materiales FRP se pueden calcular teniendo en cuenta únicamente el aporte de resistencia de las fibras por su volumen, siendo este un cálculo conservador ya que no se considera el aporte de resistencia de la resina. FIB Bull40 (2007).

El comportamiento tensión-deformación en la Figura 3:

---

<sup>3</sup> Los materiales otrotrópicos, son un tipo más restrictivo de materiales anisótropos. Los materiales anisótropos son aquellos que tienen comportamientos distintos en las diferentes direcciones, en el caso de los materiales otrotrópico los comportamientos son distintos solo en las direcciones ortogonales.



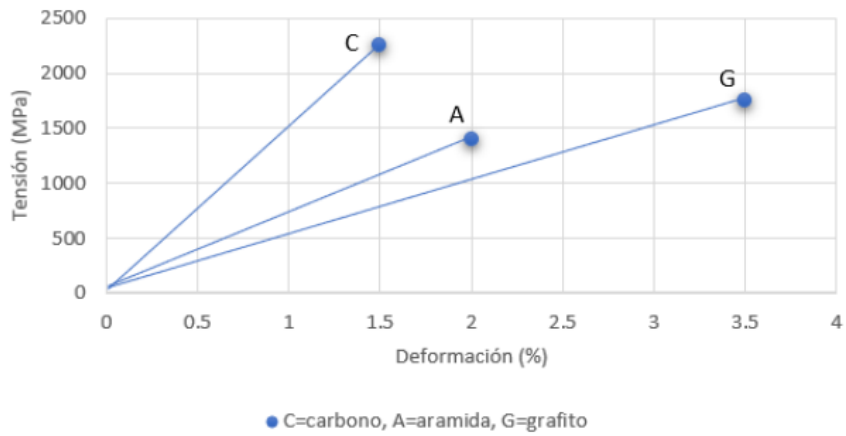


Figura 3. Grafica comparativa Tensión-Deformación de las fibras de Carbono, Aramida y Grafito. Fuente: GIOVANNY, 2021.

Como se puede observar en la gráfica tensión-deformación de la Figura 7, las fibras tienen un comportamiento inelástico y lineal, es decir no es un material dúctil.

### Comportamiento a compresión

Cuando los componentes de FRP se cargan en compresión longitudinal, los modelos teóricos para la resistencia longitudinal a la tracción no se pueden utilizar ya que la falla de los materiales compuestos está, en muchos casos, asociada con el micro pandeo o torsión de la fibra dentro de la restricción del material de la matriz. Para entender el aporte de las fibras a los esfuerzos de compresión, se ha estudiado el micro pandeo de estas, en especial CFRP y GFRP. En varias investigaciones experimentales se ha obtenido que el micro pandeo de las fibras depende de las siguientes propiedades:

1. Las propiedades o materiales base de la matriz
2. Las propiedades o materiales base de las fibras
3. Volumen de las fibras

Además de estas propiedades se ha encontrado falla del material debido a que fractura por deformación de Poisson y cortante, sin que se haya alcanzado pandeo de las fibras. Por estas razones, no se puede confiar en su aporte estructural en comportamiento a compresión del FRP.

A partir de los ensayos experimentales se han obtenido modelos analíticos para cada modelo de falla para determinar la resistencia a la compresión longitudinal,  $f_{Lc}$ , y se dan a continuación:

1. Por micro pandeo de las fibras, J.M. JONES (1999):

$$f_{Lc} = \frac{G_m}{1 - V_f}; \quad V_f \geq 0,4$$

Donde el módulo de cortante de la resina o matriz  $G_m$  es:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + V_m)},$$

siendo  $V_m$  el volumen de la matriz en el elemento.

$E_f$  = modulo de Young de las fibras

$V_f$  = el porcentaje de fibras ( entorno al 40 – 60)

$E_m$  = módulo de Young de la matriz

1. Por fractura de tracción transversal a causa de la tensión de Poisson, D. AGARWAL y J. BROUTMAN, (1990):

$$f_{lc} = \frac{(E_f V_f + E_m (1 - V_f)) \left(1 - V_f^{\frac{1}{3}}\right) \varepsilon_{mu}}{v_f V_f + v_m (1 - V_f)}$$

Donde  $\varepsilon_{mu}$  es la deformación final por tracción de la matriz.

siendo  $V_m$  el volumen de la matriz en el elemento.

$E_f$  = modulo de Young de las fibras

$V_f$  = el porcentaje de fibras ( entorno al 40 – 60)

$E_m$  = módulo de Young de la matriz

Tensión de Poisson es aquella que se produce cuando se comprimen las fibras, y se genera la siguiente distribución de tensiones, ver Figura 4:

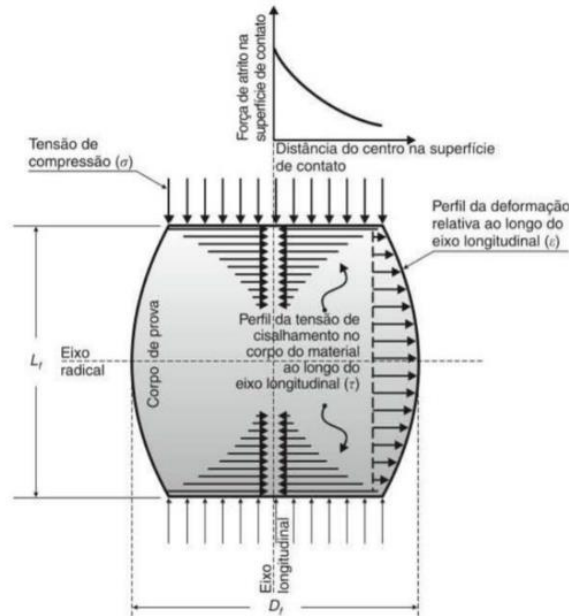


Figura 4. Tensiones en ensayo de compresión. Fuente: J. HENRÍQUEZ (2018).

El diámetro de la sección central percibe esta tensión y se ensancha, hasta genera una falla en esa sección.

1. Por fallo de las fibras en cizalla directa, I. DANIEL y O. ISHAI. (1994).

$$f_{lc} = 2f_{fs} \left( V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right)$$

Donde  $f_{fs}$  es la resistencia al corte de las fibras.

$E_f$  = modulo de Young de las fibras

$E_m$  = módulo de Young de la matriz

$V_f$  = el porcentaje de fibras ( entorno al 40 – 60)

### Relación Compresión-Tracción

El Trabajo experimental de P. K. MALLICK, (1988), demostró que la resistencia a compresión de las FRP es menor que la resistencia a tracción, y es proporcional, es decir, si la resistencia a tracción es mayor también lo será la resistencia a compresión; a excepción de las fibras AFRP.

## 2.2 Uso como material estructural

En los últimos 15 años, las barras de polímeros reforzados con fibras se han vendido como refuerzos para el hormigón, y ahora se utilizan más de 10 millones de metros en la construcción cada año.

Hay muchas razones por las que los ingenieros civiles y estructurales pueden necesitar utilizar armaduras de polímeros reforzados con fibras en el hormigón. La razón principal es la durabilidad, pero otras razones incluyen neutralidad electromagnética, alta resistencia y peso ligero. Los compuestos de FRP todavía son nuevos en la construcción y la mayoría de los ingenieros no están familiarizados con sus propiedades y características.

La durabilidad química de los materiales FRP generalmente se da por sentada ya que se ha utilizado en entornos hostiles durante más de cincuenta años. Sin embargo, hasta hace poco, no había experiencia en el uso de materiales compuestos en entornos de hormigón altamente alcalinos y químicamente complejos.

El primero en introducir las directrices de diseño de hormigón armado con (CR) FRP fue Japón en 1996. Estas pautas proporcionan un modelo para la mayoría de las guías de diseño y especificaciones posteriores. Sin embargo, ni esta guía ni las guías posteriores tratan los temas básicos de la filosofía del diseño. FRP FIB Bulletin 40, (2007).

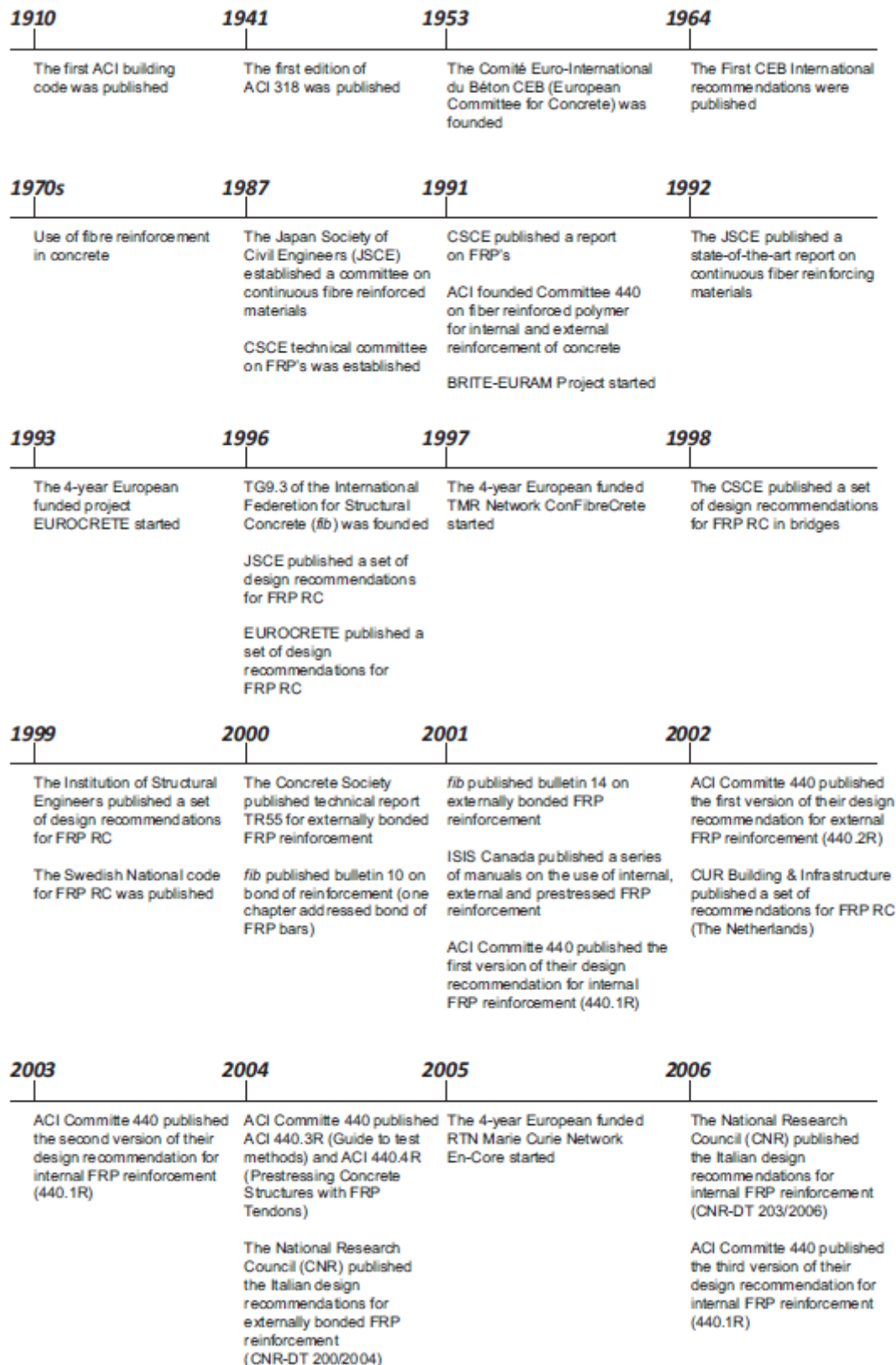


Figura 5. Cronología de los códigos y normativas de uso y diseño para armaduras FRP. Fuente: FIB bull 40

### Antecedentes de armaduras pasivas de FRP

Existe mucha bibliografía sobre el uso de barras de FRP como armadura pasiva en elementos estructurales. Tal es así, que Canadá, Estados Unidos, Japón e Italia, tienen guías de diseño para elementos de hormigón reforzado FRP, aunque no se han desarrollado códigos de diseño para el refuerzo FRP y debido a la ausencia de códigos de diseño, en la mayoría de los casos, la responsabilidad de la seguridad estructural y la capacidad de servicio recae totalmente en el diseñador. E. GUDONISA; E. TIMINSKASA; V. GRIBNIAKAB; G. KAKLAUSKASA; A. K. ARNAUTOVC y V. TAMULÉNASA (2013).

Por este motivo este apartado se centra en los antecedentes de ensayos con vigas armadas con barras FRP de uso pasivo, en elementos estructurales a flexión.

E.G. NAWY y G.E. NEUWERTH, (1971) realizaron un estudio con vigas armadas con barras de GRFP y barras de acero, variando la relación entre las barras de acero y las barras de GRFP. Los ensayos revelaron que la mayor parte de la carga de tracción es absorbida inicialmente por el hormigón. Cuando se excede la resistencia a la tracción del hormigón, se forman grietas y este proceso de agrietamiento continúa hasta que las grietas se extienden sobre tres cuartas partes del tramo de la viga. Cuando se aplicó más carga, el hormigón se aplastó. En un segundo estudio (1977) ensayaron 14 vigas de las cuales 12 estaban armadas con FRP y el resto con acero. El análisis de los resultados indicó que el comportamiento de las vigas con respecto a la fisuración, la carga de rotura y la deflexión podría predecirse con el mismo grado de precisión que para las vigas de hormigón armado de acero. La relación entre la capacidad de momento observada y la calculada fue cercana a 1.0, con un valor medio de 1.09 y una desviación estándar de 0.18. Con respecto a la capacidad de servicio, se discutió un nivel de tensión de carga de trabajo en el FRP del 15% de su capacidad de tracción para resistencias del concreto entre 27.6 MPa y 5 ksi 34.5MPa.

En la campaña experimental de J. LARRALDE; L. RENBAUM; y A. MORSI (1988) se realizó un estudio del rendimiento de flexión y cortante de vigas de hormigón reforzadas solo con refuerzo de PRFV barras y en combinación con barras de refuerzo de acero. Las deformaciones se calcularon utilizando el momento de inercia de la sección transformada fisurada, despreciando la resistencia a la tracción del hormigón por debajo del eje neutro. Las capacidades de carga última se calcularon usando secciones transformadas, secciones compuestas linealmente elásticas, limitando la resistencia a la compresión del concreto a  $f_c$ , equilibrio y distribución de deformación por tensión no lineal para concreto. Los autores reconocieron que es necesario desarrollar una metodología para la predicción de la resistencia al corte del hormigón armado FRP independientemente de las ecuaciones de acero / hormigón.

H.SAADATMANESH y M.R.EHSANI (1991), probaron seis vigas de hormigón, reforzadas longitudinalmente y con cortante con diferentes combinaciones de PRFV y barras de refuerzo de acero. Debido a la gran cantidad de fisuras distribuidas uniformemente, se concluyó que se había desarrollado una buena unión mecánica entre las barras de FRP y el concreto. Los especímenes reforzados con estribos de FRP y refuerzo longitudinal de acero fallaron como resultado de la deformación en las barras longitudinales. A esto le siguió una gran deformación plástica hasta que se produjo una falla por compresión del hormigón. Las cargas máximas calculadas utilizando las propiedades de FRP estaban razonablemente cerca de los valores medidos experimentales.

### Antecedentes de armaduras activas de FRP

La introducción del pretensado comenzó con el uso de laminados de FRP pretensados para el refuerzo externo a flexión de losas, y continuó desarrollándose hasta convertirse en una de las áreas populares de aplicaciones de FRP, R.KOTYNIA (2014). Paralelamente a las barras pretensadas, el uso de tendones FRP pretensados para elementos postensado se introdujo en la década de 1990, C.J.BURGOYNE (1992).

El proceso de desarrollo del pretensado con armadura interna de FRP se ralentizó en todo el mundo debido a las preocupaciones sobre los efectos de rotura por fluencia y por la rotura frágil de los elementos armados con FRP. La investigación en profundidad en estas áreas ha demostrado que es posible resolver estos problemas, mediante el uso de diferentes tipos de materiales de FRP como armado, T.DONECHEV (2016), o el uso de diferentes niveles de pretensado para el mismo tipo de material de refuerzo, creando armados híbridos y así reduciendo la rotura por fragilidad. En cuanto al efecto de la rotura por fluencia, la caracterización del nivel de seguridad del pretensado no está bien establecida, debido a la falta de conocimiento de cómo realizar los anclajes, por lo que se necesitarán más investigaciones. Hasta la fecha, parece haber una tendencia a sobreestimar el riesgo de rotura a niveles de pretensados relativamente bajos.

Los últimos avances demuestran que es posible utilizar armaduras internas activas y pasivas de BFRP con fibras de basalto, cuando se utilizan en elementos prefabricados. En esta dirección se encuentra el trabajo realizado por la Universidad de Reykjavik utilizando barras BFRP.

Siendo la forma adoptada de anclaje para barras pretensadas mediante la fijación de barras de acero roscadas a los extremos de las barras de BFRP. S.H. GUÐMUNDSSON (2012).

M.PEARSON and T.DONECH (2013), desarrolló un enfoque de anclaje similar, pero con la aplicación de una técnica de pretensado para el armado de BFRP y la introducción de una armadura adicional de cortante. Uno de los aspectos importantes de este estudio era evaluar el papel de la barra de armadura. Como resultado de las pruebas, de muestras con y sin mortero, se estableció el efecto positivo del mortero para esta aplicación específica. El nivel de precarga que se aplicó fue hasta el 70% de la carga final. Los resultados obtenidos, muestran una disminución significativa de la deformabilidad de las probetas reforzadas con BFRP, con un aumento del nivel de pretensado en el caso de probetas con mortero postensado.

La Universidad de Reykjavik, en una investigación adicional en esa línea, concluyó en el desarrollo de un modelo teórico, que tiene una buena relación con los resultados experimentales y el modelo, determinando la forma de la curva fuerza-deformación establecida experimentalmente, que está muy cerca de la doble distribución lineal. Para componentes de hormigón pretensado con armadura pretensa E.THORHALLSSON. (2015)

El grupo de la Universidad de Kingston continuó su investigación, pero reemplazando el postensado por pretensado con el objetivo de evitar los problemas relacionados con el logro de una lechada de alta calidad necesaria para el postensado. Desarrolló tres series de experimentos, M.MIRSHEKARI (2016), que permitieron obtener datos sobre la influencia del nivel de pretensado en la deformabilidad de vigas reforzadas con BFRP. En las variables definidas, se encuentran, el diámetro de las barras de refuerzo, la resistencia del hormigón y el efecto que tiene agregar barras sin pretensado con el objetivo de formar un refuerzo híbrido y reducir la fragilidad de la falla.

Los resultados obtenidos de estos experimentos muestran que para el nivel de pretensado inicial, que es igual o superior al 30% de la carga última, la deformabilidad de una viga reforzada con BFRP es similar a la de una viga con igual número y diámetro de armadura de acero convencional de alto rendimiento. Pero la viga armada con BFRP alcanza una carga de rotura mucho mayor.

### 2.3 Antecedentes de estudio en la Universidad Politécnica de Cataluña

En la Universidad Politécnica de Cataluña se han planteado varios estudios referentes a el uso de FRP, proyecto de investigación del Plan Nacional, Straduravius. Primero estudiando el comportamiento de este material; identificando las propiedades, y luego caracterizando el comportamiento estructural como armadura pasiva y como armadura activa, analizando sus propiedades instantáneas, así como las propiedades a largo plazo.

También es importante remarcar los ensayos y estudios con resina termoplástica, que se han realizado junto a empresas de la industria, como la empresa italiana SIREG la cual proporcione la barras de FRP, así como la empresa francesa ARKEMA la cual proporcione la resina termoplástica.

#### Caracterización del material - Ensayos de Pull-out

Una de las campañas que se realizó en la universidad politécnica de Cataluña, en el marco del proyecto de investigación del Plan Nacional, Straduravius, fue la caracterización del material.

En la campaña experimental se trabajó con barras de FRP, ver Tabla 4:

**Una campaña de ensayos de pull-out con armaduras de GFRP con resina termoplástica y resina termoestable. A. MONCAYO (2021)**

Resina	Diámetro nominal (mm)	Nomenclatura
FRP	10	VE10
FRP	12,7	VE13
FRP	12,7	TP13
Acero	10	ST10

Tabla 4. Nomenclatura Campaña Pull-out. A. MONCAYO (2021)

Primero se realizó la caracterización de los materiales:

- En el caso del hormigón realizaron ensayos para caracterizar la resistencia a compresión y el módulo de deformación.
- En el caso de las barras realizaron ensayos caracterizando la resistencia a tracción.

Al ensayar las barras a tracción los resultados obtenidos son los siguientes ver Tabla 5:

Barra	Resistencia a tracción promedio (MPa)	Módulo de Young promedio (GPa)	Resistencia nominal a tracción del fabricante	Módulo nominal de Young del fabricante



(MPa)

(GPa)

VE10	808,47	44,83	900	46
VE13	703,50	46,71	850	46
TP13	928,10	53,49	900 – 1000	58
ST10	530,13	153,92	500 – 690	200

Tabla 5. Tabla resultados tracción barras FRP y acero. Ensayos Pull-out. A. MONCAYO (2021)

De estos ensayos de Pull-out, ver figura 6 y 7, se extrajeron las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la caracterización de la **adherencia** de las barras con el hormigón:

- La adherencia máxima de las barras con resina termoestable es del orden de 2 veces mayor que resistencia de las barras con resina termoplástica. En el estudio, se cita que esto puede deberse, no a la resina sino al tipo de acabado que se da a las barras FRP, que en este caso era diferente para las barras con resina termoplástica y para las barras con resina termoestable.
- La adherencia es menor en las barras de mayor diámetro.



Figura 7. Fotografía del ensayo Pull-out.  
Fuente: A. MONCAYO (2021)



Figura 6. Fotografía realizada insitu del ensayo Pull-out. Fuente: propia

## 2.4 Conclusiones del estado del conocimiento

El FRP como material es bastante novedoso dentro de la industria de la construcción, pero como armadura sigue presentando varios retos. Se necesita estudiar mejor los fenómenos que afectan a la adherencia, entender los fenómenos y propiedades a largo plazo, ya que químicamente se conocen bien las propiedades del material, pero se debe seguir estudiando más detalladamente el efecto de la fluencia de los materiales pretensados, así como, realizar estudios de pérdidas del pretensado para mejorar los modelos de diseños.

También para el uso del FRP como armadura activa, debido a su fragilidad, es necesario desarrollar materiales híbridos o limitar el efecto elástico; así como mejorar los sistemas de anclajes para las armaduras GRFP y BRFP.

Tanto en uso para armadura activa como para uso de armadura pasiva, son necesarios los estudios del material para poder desarrollar modelos de diseño más aproximados a la realidad. También a nivel de sostenibilidad existen retos, como el del uso de resinas termoplásticas, por su condición de material reciclable. Seguidamente y como se ha visto en los antecedentes se debe continuar con el estudio del comportamiento estructural de elementos armados con barras de FRP y en su último grado el uso de estas barras como elementos pretensados, donde hay más incerteza.

En esta línea de investigación, y en el marco proyecto de investigación del Plan Nacional, Straduravius, coordinado por la Universidad Politécnica de Catalunya; este trabajo pretende aportar resultados de ensayos de elementos estructurales, con armadura activa como pasiva, tanto con resinas termoestables como resinas termoplásticas, necesarios para poder generar modelos de diseño y entender mejor las variables a tener en cuenta en estos.

### 3 Campañas experimentales

En el marco del proyecto de investigación del Plan Nacional, Straduravius, RTI2018-097314-B-C21, relativo al estudio del comportamiento a flexión y cortante de elementos pretensados con barras o tendones de polímeros reforzados con fibras se han previsto varias campañas experimentales. Entre estas campañas se encuentran dos que se tratan en este documento. La primera consiste en unos ensayos a flexión de vigas armadas con barras de polímeros reforzados con fibras con dos tipos de resinas: termoestables y termoplásticas. Las barras fabricadas con resinas termoplásticas presentan un gran potencial (doblado de las mismas después de su fabricación) pero no están en el mercado porque falta conocer su comportamiento en profundidad. La segunda campaña consiste en unos ensayos a flexión de elementos pretensados con armadura pretesa de polímeros reforzados con fibras. Inicialmente se preveía participar en esta segunda campaña experimental durante la realización de este trabajo fin de grado, pero por varias circunstancias relacionadas con el subministro del material y de la pandemia, el inicio de la campaña se ha retrasado hasta septiembre de 2021, y este trabajo se centra en la primera campaña experimental. Se ha considerado conveniente exponer la segunda campaña experimental, puesto que se había trabajado en la misma. Sin embargo, los resultados mostrados.

#### 3.1 Objetivos de las campañas experimentales

El objetivo principal de estas dos campañas experimentales, es entender el comportamiento mecánico a flexión de vigas con barras FRP como armadura pasiva y activa pretensada, con resina termoestable o termoplástica y compararlas con armaduras convencionales de acero; y a partir de estos ensayos y otras investigaciones, en un futuro poder definir las bases de cálculo para el dimensionamiento y comprobación con este tipo de material.

Objetivos específicos de la campaña experimental de ensayos a flexión de vigas armadas con barras FRP

Los objetivos específicos de esta campaña experimental son:

- 1) Entender el comportamiento hasta rotura, analizando el tipo de agotamiento de la viga, la relación carga-desplazamiento, la tensión en las armaduras barras, y como afecta el cómo afecta el comportamiento elástico-lineal de las barras de FRP a la resistencia y plasticidad de las vigas.
- 2) Estudiar la diferencia de comportamiento entre el uso de resinas termoplásticas y termoestables.
- 3) Estudia la adherencia de las barras con el hormigón y ver si se ha producido un deslizamiento de las barras dentro del hormigón, que daría lugar a un fallo por anclaje.

Objetivos específicos de la campaña experimental de ensayos a flexión de vigas pretensadas con barras FRP

Los objetivos específicos de esta campaña experimental son:

- 1) Entender el comportamiento en servicio y hasta rotura, analizando el tipo de agotamiento de la viga, la relación carga-desplazamiento, la tensión en las armaduras barras.
- 2) Estudiar la influencia de la tensión de pretensado
- 3) Estudiar la diferencia de comportamiento entre el uso de resinas termoplásticas y termoestables, así como el uso de diferentes materiales como armadura activa.
- 4) Estudiar la adherencia de las barras de armadura activa con el hormigón.

### 3.2 Definición de las campañas

Campaña experimental a flexión de vigas con armadura pasiva de FRP

*Descripción de la campaña de ensayos*

La campaña experimental se centrará en la respuesta estática de los elementos de hormigón con armadura de GFRP, con resina termoplástica y resina termoestable. Se dispondrá de una viga de referencia con armadura de acero.

Las variables en estudio son:

- 1) Material para la armadura para la tracción:
  - a. Acero
  - b. Fibra de vidrio con resina termoplástica
  - c. Fibra de vidrio con resina termoestable
- 2) Cuantía de armadura
- 3) Diámetro de las barras

Uno de los elementos limitantes es el diámetro de las barras de resina termoplástica, ya que el industrial solo las produce en diámetro de 12,7mm.

Las vigas a ensayar se han dividido en 2 grupos, en base a la cuantía de armadura, que se calcula como:

$$\text{cuantía de armadura} = \frac{A}{b \cdot d}$$

siendo:

$A$  = *area de la armadura* en mm<sup>2</sup>

$b$  = *base* de la sección de la viga en mm

$d$  = *el canto útil* de la viga en mm

Al ser diferentes materiales la formula debería variar a:

$$\text{cuantía de armadura} = \frac{A}{b \cdot d} * \frac{E_f}{E_s}$$

Siendo:

$$E_f = \text{modulo elasticidad para GFRP} = 50 \text{ GPa}$$

$$E_s = \text{modulo elasticidad para Acero} = 200 \text{ GPa}$$

En base a estas ecuaciones, la muestra de campaña se divide en dos grupos.

División de las muestras:

- grupo 1, con una cuantía de 0,000178
- grupo 2, con una cuantía de 0,000265

### Grupo 1

En el grupo 1 de la campaña experimental con armadura pasiva, podemos encontrar las vigas de la Tabla 6:

Barras	Resina	Armadura	Nomenclatura	Momento último kN/m	Momento último con coeficientes kN/m
GRFP	Termoestable Vinyl Ester	2 barras de 12,7mm	2V13	60	26,1
GRFP	Termoplástica	2 barras de 12,7 mm	2T13(a) 2T13(b)	60	26,1
Acero	-	4 barras de 10mm	4A10	36	27,5

Tabla 6. Muestra grupo 1. Campaña experimental armadura pasiva.

Tal y como se puede observar, hay dos especímenes con resina termoplásticas, debido a que es un material poco conocido, y de este modo se puede obtener una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos.

También se decidió realizar una viga con armadura de acero como viga de control.

La Figura 8 y Figura 9, muestran la distribución de la armadura longitudinal:

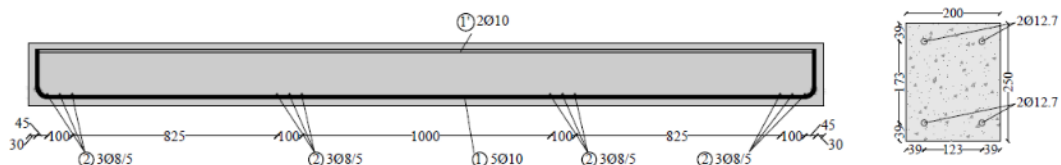


Figura 8. Disposición armadura longitudinal de GRFP. Grupo 1. Ensayo armadura pasiva.

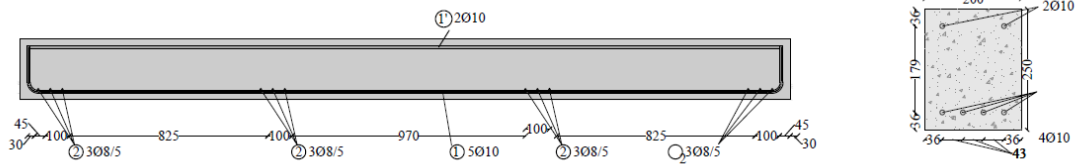


Figura 9. Disposición armadura longitudinal de Acero. Grupo 1. Ensayo armadura pasiva

### Grupo 2

En el grupo 2 de la muestra de la campaña experimental con armadura pasiva, podemos encontrar las siguientes vigas, véase Tabla 7:

Barras	Resina	Armadura	Nomenclatura	Momento último kN/m	Momento último con coeficientes kN/m
GRFP	Termoestable Vinyl Ester	3 barras de 12,7mm	3V13	86	37,8
GRFP	Termoplástica	3 barras de 12,7 mm	3T13(a) 3T13(b)	86	37,8
GRFP	Termoestable Vinyl Ester	5 barras de 10mm	5V10	86	37,8

Tabla 7. Muestra grupo 2. Campaña experimental armadura pasiva

En este grupo, la viga que se utiliza como viga de control, es la viga de Vinyl Ester 5V10, debido a que conocemos más el material. Vigas con barras de resina termoplástica se mantuvo la idea de ensayar 2 vigas para obtener una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos

La situación de las armaduras planteada es la siguiente, véase Figura 10 y Figura 11:

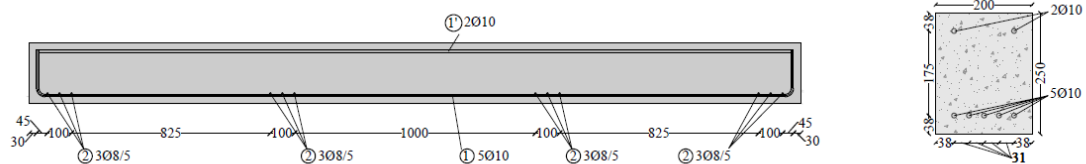


Figura 10. Disposición armadura longitudinal de GRFP termoestable. Grupo 2. Ensayo armadura pasiva

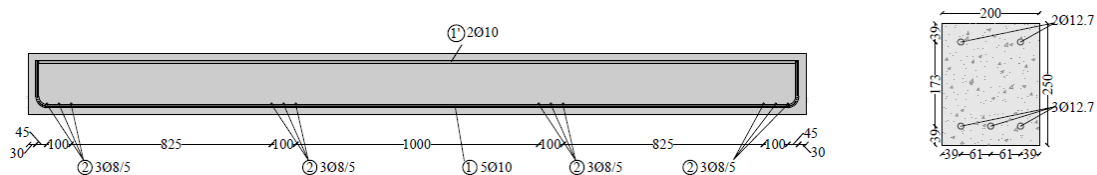


Figura 11. Disposición armadura longitudinal de GRFP termoplástica. Grupo 2. Ensayo armadura pasiva

En cuanto a la disposición de la armadura de cortante, esta no varía en las vigas de los dos grupos, sino que varía en base al material, si es acero o FRP. La viga de control tiene cercos de acero y las vigas con armadura longitudinal de GFRP tienen armaduras transversales de GFRP con resina vinylester en todos los casos (ver Figura 12 y Figura 13).

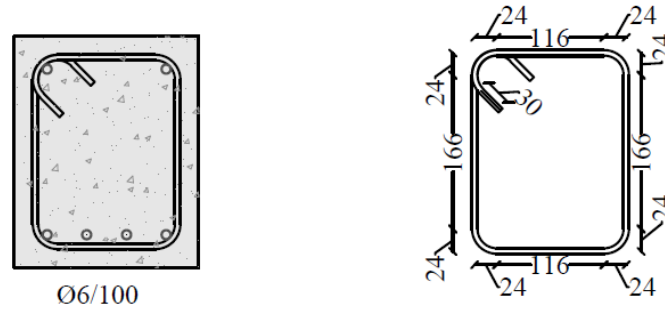


Figura 12. Disposición armadura de cortante de Acero. Ensayo armadura pasiva

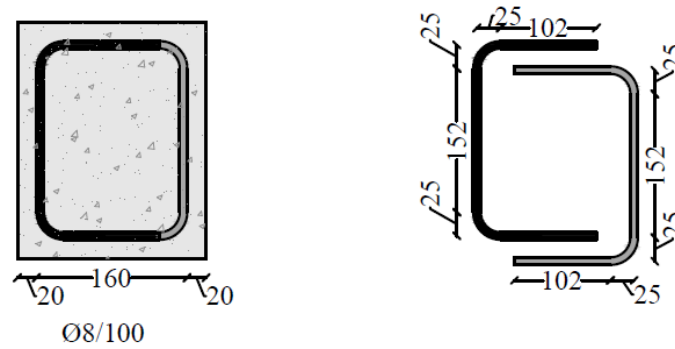


Figura 13. Disposición armadura de cortante de GRFP. Ensayo armadura pasiva

## Campaña experimental a flexión de vigas con armadura activa de FRP

### *Descripción de la campaña de ensayos*

El programa experimental se centra en estudiar la respuesta estática de los elementos de hormigón pretensado con armadura pretesa de FRP y con armadura transversal pasiva de FRP (en algunos casos).

Las variables en estudio son:

- 1) Material para la armadura activa:
  - a. Acero
  - b. Fibra de carbono
  - c. Fibra de vidrio
- 2) Fuerza de pretensado
  - a. Alta: 60%  $f_{pu}$
  - b. Baja: 40%  $f_{pu}$
  - c. Nula: 0%  $f_{pu}$
- 3) Cuantía de armadura transversal:
  - a. Sin armadura de cortante
  - b. Con armadura transversal GFRP separada 150mm
  - c. Con armadura transversal GFRP separada 250mm



*Nomenclatura del proyecto*

La nomenclatura general de los ensayos utilizada, recoge las variables a tener en cuenta, y se definen los parámetros como se indica en la Tabla 8:

Nomenclatura	Significado
<b>B</b>	Bending: ensayo a flexión
<b>H,L,N</b>	Fuerza de pretensado (H:alta; L:baja; N:nulo)
<b>S</b>	Steel: armaduras activas de acero
<b>C</b>	Carbon: armaduras activas de fibra de carbono
<b>G</b>	Glass: armaduras activas de fibra de vidrio
<b>wo</b>	Sin armadura transversal

Tabla 8. Nomenclatura según tipo de barras de los ensayos de armadura activa. G. ORTIZ, (2020)

Con la nomenclatura expuesta los ensayos se han definido los siguientes ensayos que se indican en la Tabla 9:

Muestra	#	Tipo	Pretensado		Armadura	
			%	Tensión / Fuerza total $A_p$	Activa	Transversal
<b>BSH</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	44%	825 MPa / 230 kN	Steel	Sin armadura
<b>BCH</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	60%	1470 MPa / 230 kN	CFRP	Sin armadura
<b>BCL</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	40%	980 MPa / 154 kN	CFRP	Sin armadura
<b>BCN</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	0%	0 MPa	CFRP	Sin armadura
<b>BGH</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	60%	540 MPa / 84 kN	GFRP	Sin armadura
<b>BGL</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	40%	360 MPa / 56.5 kN	GFRP	Sin armadura
<b>BGN</b>	1	Ensayo a flexión (4 puntos)	0%	0 MPa	GFRP	Sin armadura

Tabla 9. Nomenclatura general de vigas para los ensayos de armadura activa. G. ORTIZ, (2020)

### Geometría de las vigas

La geometría es la misma para todas las vigas (Ver Figura 17). Se trata de una viga con sección doble T, con una longitud de 5500 mm, que se ensayará con una luz libre de 4500 mm. La sección transversal tiene una ala superior de 300 mm de ancho, una ala inferior de 180 mm de ancho y un canto total de 300 mm. (Vease Figura 14)

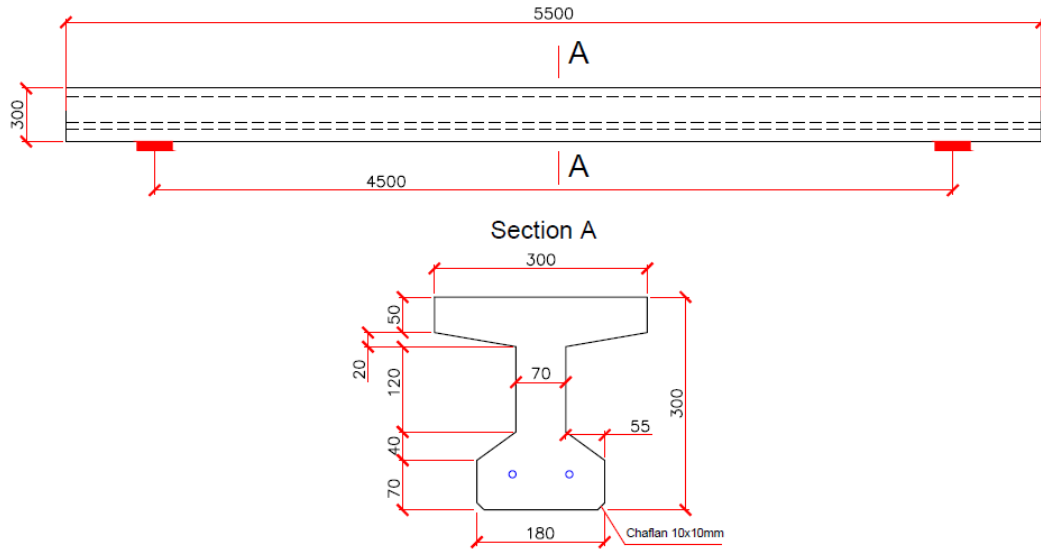


Figura 14. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa. G. ORTIZ, (2020)

Croquis de la viga BSH:

La viga BSH es un viga de control, con armadura activa de acero, fuerza de pretensado 44%  $f_{pu}$  (ver Figuras 15, 16)

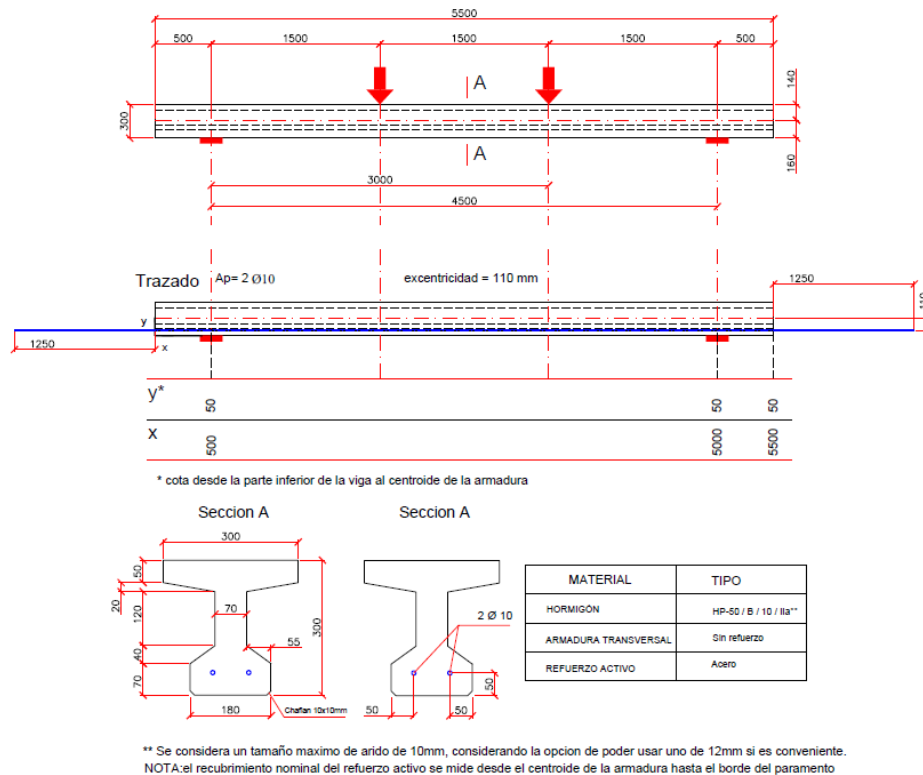


Figura 15. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de acero, fuerza de pretensado 60%  $f_{pu}$ . G. ORTIZ, (2020)

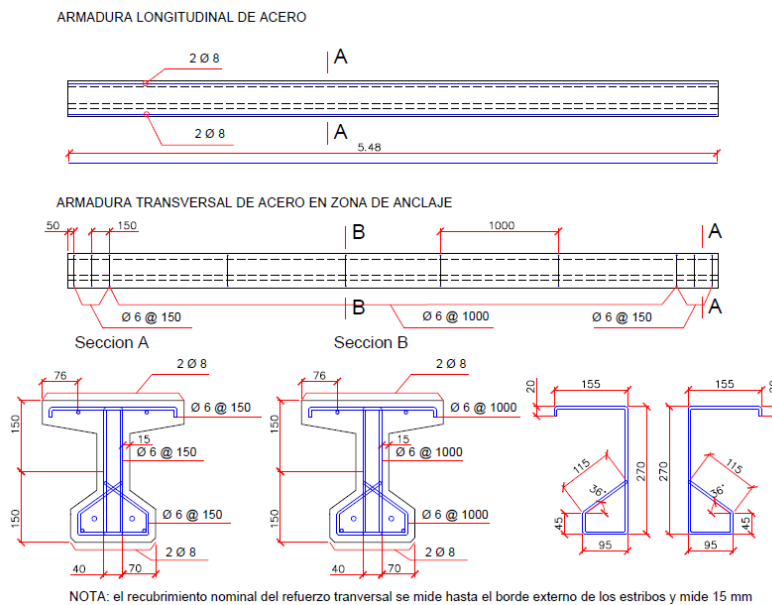


Figura 16. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de acero, fuerza de pretensado 60%  $f_{pu}$ . Detalle de la armadura de cortante G. ORTIZ, (2020)

Croquis Viga BCH, BCL, BCN:

Viga con armadura activa de fibra de carbono, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). (Vease Figura 17, Figura 18)

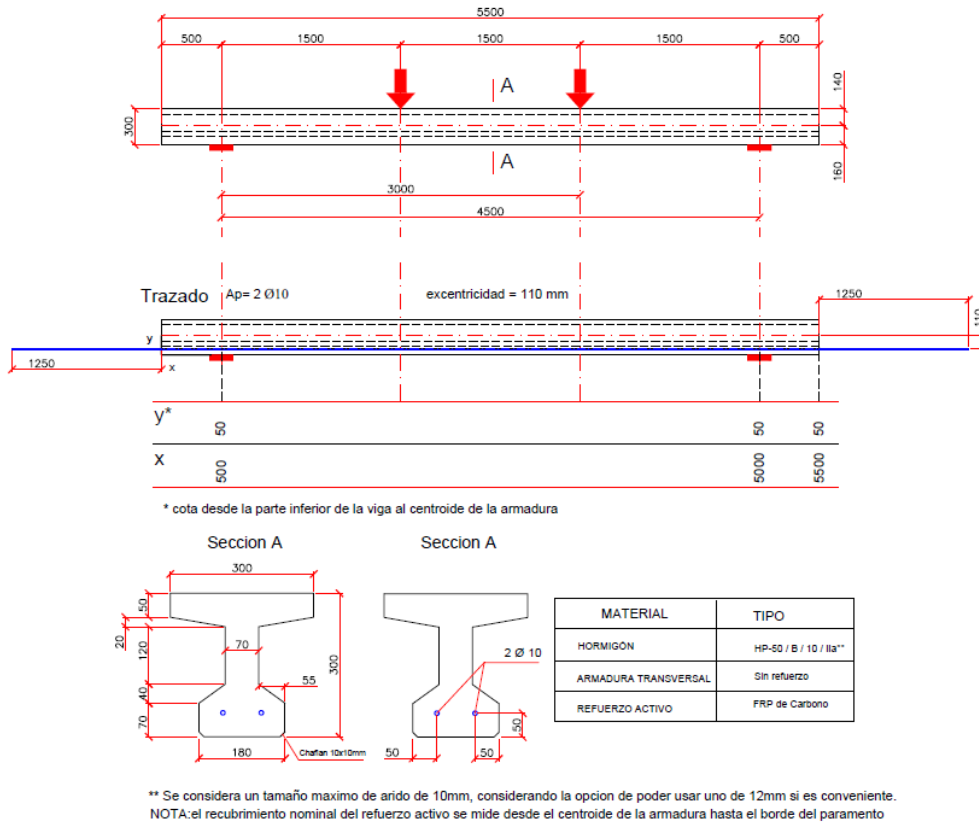


Figura 17. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de carbono, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). G. ORTIZ, (2020)

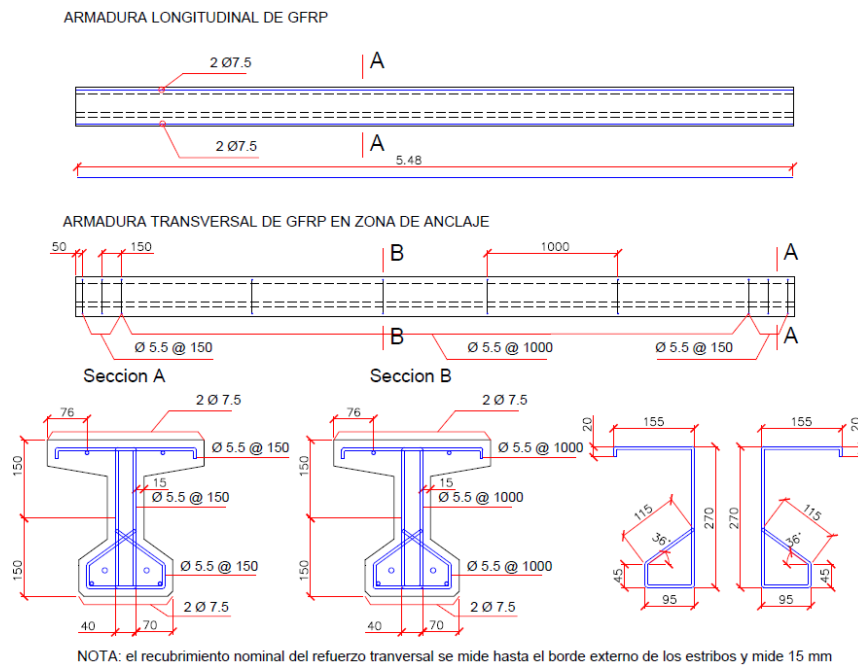


Figura 18. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de carbono, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). Detalle de la armadura de cortante. G. ORTIZ, (2020)

Croquis viga BGH, BGL, BGN:

Croquis de las vigas con armadura activa de fibra de vidrio, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). ( Véase figura 19, Figura 20):

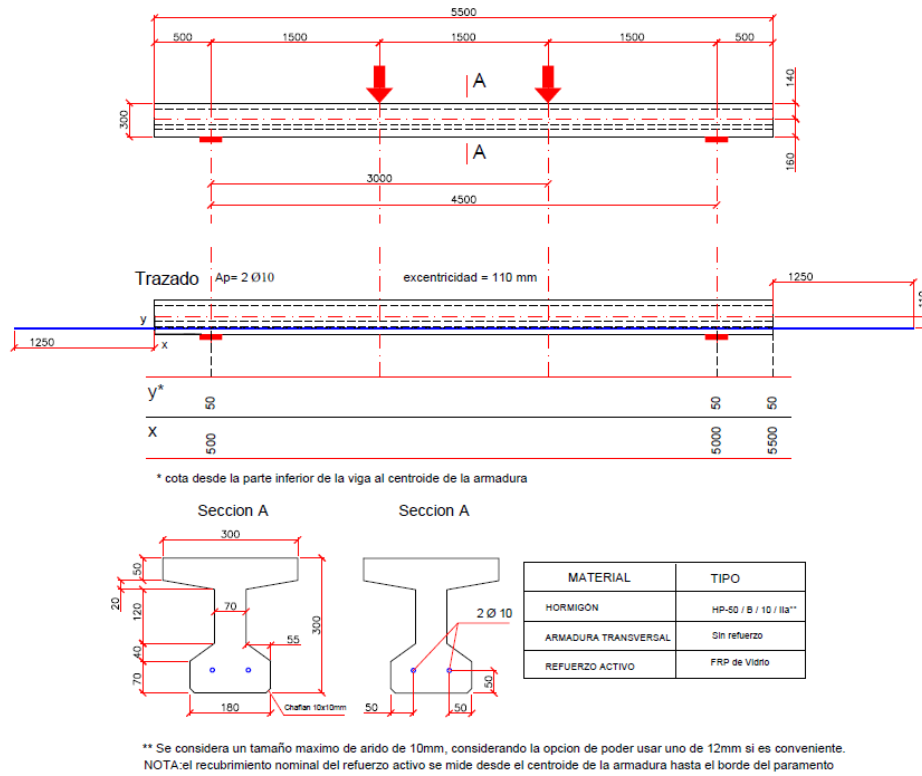


Figura 19. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de vidrio, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). G. ORTIZ, (2020)

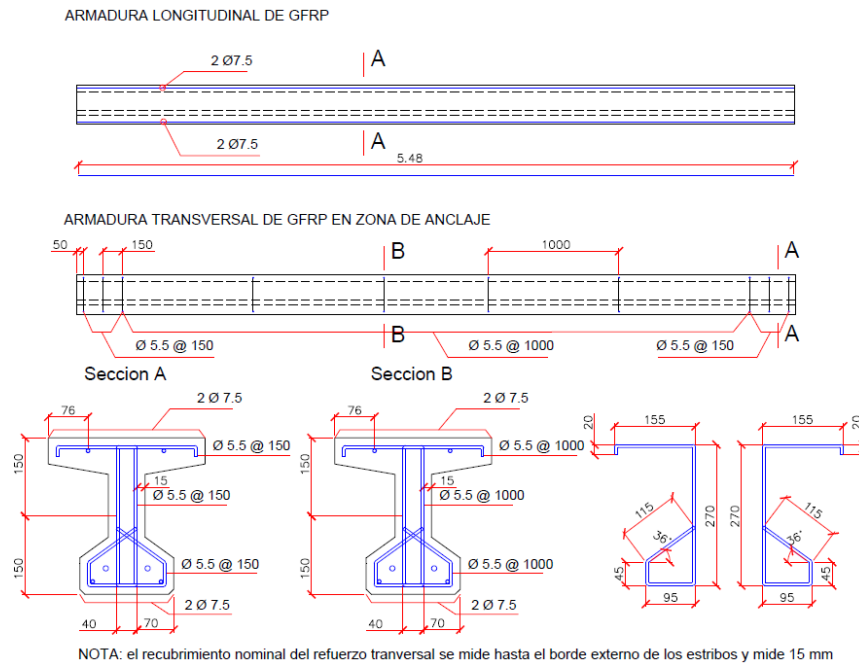


Figura 20. Dimensiones de las vigas de la campaña experimental con armadura activa de fibra de vidrio, con fuerza de pretensado variable (High/Alta 60%  $f_{pu}$ ; Low/Baja 40%  $f_{pu}$ ; Null/Nula 0%  $f_{pu}$ ). Detalle de la armadura de cortante. G. ORTIZ, (2020)



### 3.3 Fabricación de las vigas de la campaña experimental con armadura pasiva

La fabricación de las vigas armadas con CFRP se realizó en el laboratorio. Primero se realizó el montaje de las jaulas de armaduras (ver Figura21). Una vez montadas las jaulas y se fijaron las galgas extensométricas a las armaduras.



Figura 21. Armadura montada de las vigas de armadura pasiva.

Seguidamente, se colocaron estas armaduras en el encofrado con los separadores. ( véase Figura 22)



Figura 22. Armadura dentro del encofrado, vigas de armadura pasiva.

El hormigón era de tipo autocompactant, para garantizar una uniformidad en la distribución durante la colocación, para evitar la segregación del árido y una buena compactación sin la necesidad de un vibrado mecánico.

Llego en dos cubas desde la planta de hormigonado de PROMSA en zona franca.

La dosificación del hormigón (ver Figura 23) enviada por la planta de fabricación:

MATERIA ( Kg/m <sup>3</sup> )	HAC-40/AC-E2/20/IIa
Arena 0/4	879 kg/m <sup>3</sup>
Arena 0/2	360 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo Plastificante (MasterPozzolith 7003)	0,64% s.p.c
Aditivo Superplastificante (MasterEase 3850)	1,6% s.p.c
Relación a/c	≤ 0,50
Garbancillo 4/10	150 kg/m <sup>3</sup>
Gravilla 10/20	300 kg/m <sup>3</sup>
Cemento CEM II/A-L 42,5 N	≥ 475 kg/m <sup>3</sup>

Figura 23. Dosificación del hormigón de la campaña. Fuente: PROMSA

Se hormigonaron las vigas de dos cubas diferentes: (ver Figura 24)

- Día 14 de mayo del 2021: vigas 5V10, 2V13 y 2X2T13
- Día 25 de mayo del 2021: A10, 3V13 y 2x3T13



Figura 24. Vertido del hormigón en las vigas con armadura pasiva.

Al ser un hormigón autocompactante no se tuvo que realizar la compactación mediante medios mecánicos, realizándose directamente el curado: se tapó con plástico dos días y luego



desencofrando y tapando con arpillera (mojándola cada 3–4 días) y plástico, hasta la fecha de los ensayos. Ver Figura 25:



Figura 25. Curado de las vigas con armadura pasiva.



### 3.4 Caracterización de los materiales de la campaña de armadura pasiva de FRP

En esta apartado se expone los métodos de caracterización de los materiales, así como los resultados de esta caracterización.

#### Hormigón

Se hormigonaron las vigas con dos amasadas diferentes, pero con la misma dosificación:

- Día 14 de mayo del 2021: vigas 5V10, 2V13 y 2X2T13
- Día 25 de mayo del 2021: A10, 3V13 y 2x3T13

Se realizaron 4 tipos de ensayos para cada amasada:

- Resistencia a compresión
- Módulo de deformación
- Resistencia a tracción directa
- Ensayo de diámetro de flow

#### *Ensayo de resistencia a compresión y módulo de deformación*

Siguiendo la norma UNE-EN-12390-3-2009, se ensayaron 6 probetas cilíndricas de Ø150/300 mm, de control por cada amasada. Tres probetas se ensayaron bajo compresión directa en una prensa Ibertest para determinar la resistencia del hormigón comprimido, y las otras tres muestras se utilizaron para determinar el módulo secante de deformación.

Para los diferentes ensayos, primero, se pulió la superficie de la pieza de prueba utilizando un disco de diamante. Luego, las muestras se pesan y miden para determinar su densidad.

Finalmente, la probeta se sometió a una prueba de compresión mediante una prensa controlada Ibertest a los 7 y 28 días. Cada muestra se coloca en la prensa de manera que la carga que soporta sea vertical. La velocidad de prueba es de 25 mm / min hasta que cada muestra se rompe.

La resistencia a compresión viene dada por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Donde;

$f_c$  = Resistencia a compresión (MPa)

$F$  = Carga máxima de rotura (N)

$A_c$  = Área transversal de la probeta (mm<sup>2</sup>)

#### *Ensayo de resistencia a tracción indirecta*

Siguiendo la norma UNE-EN-12390-6-2010, se ensayaron 3 muestras de control por cada amasada, para determinar la resistencia del hormigón a tracción. Las muestras en este caso se colocaron en posición horizontal en el interior de la prensa.

La velocidad de incremento de la carga de la prensa viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{s * \pi * L * d}{2}$$

Donde;

$R$  = Velocidad de incremento de carga (N/s)

$L$  = longitud de la probeta (mm)

$d$  = dimensión de la sección transversal de la probeta (mm)

$s$  = incremento tensión (MPa/s), la norma determina un valor constante entre 0.04 MPa/s y 0.06 MPa/s. Para este caso, el incremento de carga fué de 0.05 MPa/s.

Al final la resistencia a tracción viene dada por la ecuación:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d}$$

Donde;

$f_{ct}$  = resistencia a tracción indirecta de la probeta cilíndrica de hormigón (MPa)

$F$  = carga máxima de rotura (N)

$L$  = longitud de la probeta cilíndrica (mm)

$d$  = diámetro de la probeta cilíndrica (mm)

### Ensayo de diámetro de flow

Este ensayo se realizó según la normativa UNE-EN 12350-8:2020. Este ensayo consiste en llenar el cono de Abrams con el hormigón a ensayar, se levanta y se mide el diámetro de la circunferencia que forma el hormigón.

Se realizaron 4 veces este ensayo, dos por cada cuba. Los resultados son, ver Tabla 10:

Muestra	Fecha	Flow	
		Diámetro	Media
1	14/05/2021	580 mm	590 mm
2	14/05/2021	600 mm	
1	25 /05/2021	530 mm	545 mm
2	25 /05/2021	560 mm	

Tabla 10. Resultados ensayo de Flow. Caracterización Materiales.

Los valores admitidos por la normativa son de 650 mm de media, para ser considerado hormigón autocompactante, el hecho que se hayan obtenidos valores inferiores puede por una mala dosificación, relación agua/cemento o por tener demasiados finos. En el caso de esta campaña se necesitaba un hormigón trabajable para no tener que hacer un vibrado mecánico.

### Resultados primera cuba, día 14/05/2021

En la Tabla 11 se muestran los resultados de la resistencia a compresión del hormigón a 7 y 28 días. Tal y como se observa, la resistencia media a compresión para la primera amasada fue de 35,7 MPa a 7 días y de 40,1 MPa a 28 días. El coeficiente de variación fue de 1.2 % a 7 días y de 2.7 % a 28 días.

		Compresión			
Muestra	Edad	$F_{cm}$	Desviación estándar	CoV	$F_{ck}$
1	7	36,4	0.4	1,2%	35,7
2	7				
5	7				
4	28	42,0	1,2	2,7%	40,1
7	28				
6	28				

Tabla 11. Resultados ensayos a compresión hormigón del día 14/05/2021

A tracción, la Tabla 12, muestra que la resistencia media a tracción para la primera amasada fue de 2,23 MPa a 28 días. El coeficiente de variación fue de 8,7 % a 28 días.

		Tracción			
Muestra	Edad	$F_{ctm}$	Desviación estándar	CoV	$F_{ct,k}$
3	28	2,60	0,23	8,7%	2,23
9	28				
8	28				

Tabla 12. Resultados ensayos a tracción hormigón del día 14/05/2021

En la Tabla 13, se muestran los resultados obtenidos para el modulo elástico:

#### Modulo elástico

Muestra	Edad	$E_{cm}$	Desviación estándar	CoV
10	28	29277	494	1,7%
11	28			
12	28			

Tabla 13. Resultados ensayos del módulo elástico hormigón del día 14/05/2021

#### Resultados segunda cuba, día 25 /05/2021

En la Tabla 14 , se muestran los resultados de la resistencia a compresión del hormigón a 7 y 28 días. Tal y como se observa, la resistencia media a compresión para la primera amasada fue de 42,9 MPa a 7 días y de 50,5 MPa a 28 días. El coeficiente de variación fue de 0,9 % a 7 días y de 1,9 % a 28 días.

#### Compresión

Muestra	Edad	$F_{cm}$	Desviación estándar	CoV	$F_{ck}$
1	7	43,5	0.4	0.9%	42.9
5	7				
6	7				
2	28	51,7	0,7	1,9%	50.5
3	28				
4	28				

Tabla 14. Resultados ensayos a compresión hormigón día 25/05/2021

A tracción, la Tabla 15 , muestra que la resistencia media a tracción para la primera amasada fue de 1,90 MPa a 28 días. El coeficiente de variación fue de 23,7 % a 28 días.

#### Tracción

Muestra	Edad	$F_{ctm}$	Desviación estándar	CoV	$F_{ct,k}$
10	28	3,11	0,74	23,7%	1,90
11	28				
12	28				

Tabla 15. Resultados ensayos a tracción hormigón día 25/05/2021

En la Tabla 16 , se muestran los resultados obtenidos para el modulo elástico:

#### Tracción

Muestra	Edad	$E_{cm}$	Desviación estándar	CoV
7	28	30657	836	2,7%
8	28			
9	28			

Tabla 16. Resultados ensayos del módulo elástico hormigón del día 25/05/2021

### Armaduras pasivas

En el caso de las barras de FRP, la caracterización de estas se realizó conjunta con el ensayo de pull-out. Las armaduras utilizadas para las campañas se pueden clasificar en la siguiente Tabla 17:

Barra	Resina	Diámetro nominal (mm)	Nomenclatura
FRP	Vinyl Ester	10,0	VE10
FRP	Vinyl Ester	12,7	VE13
FRP	Termoplástica	12,7	TP13
Acero	-	10	ST10

Tabla 17. Tipos de barras y nomenclatura.

Las barras fueron producidas y suministradas por gentileza de Sireg. En la Figura 26, se pueden observar las diferentes barras ensayadas a tracción.

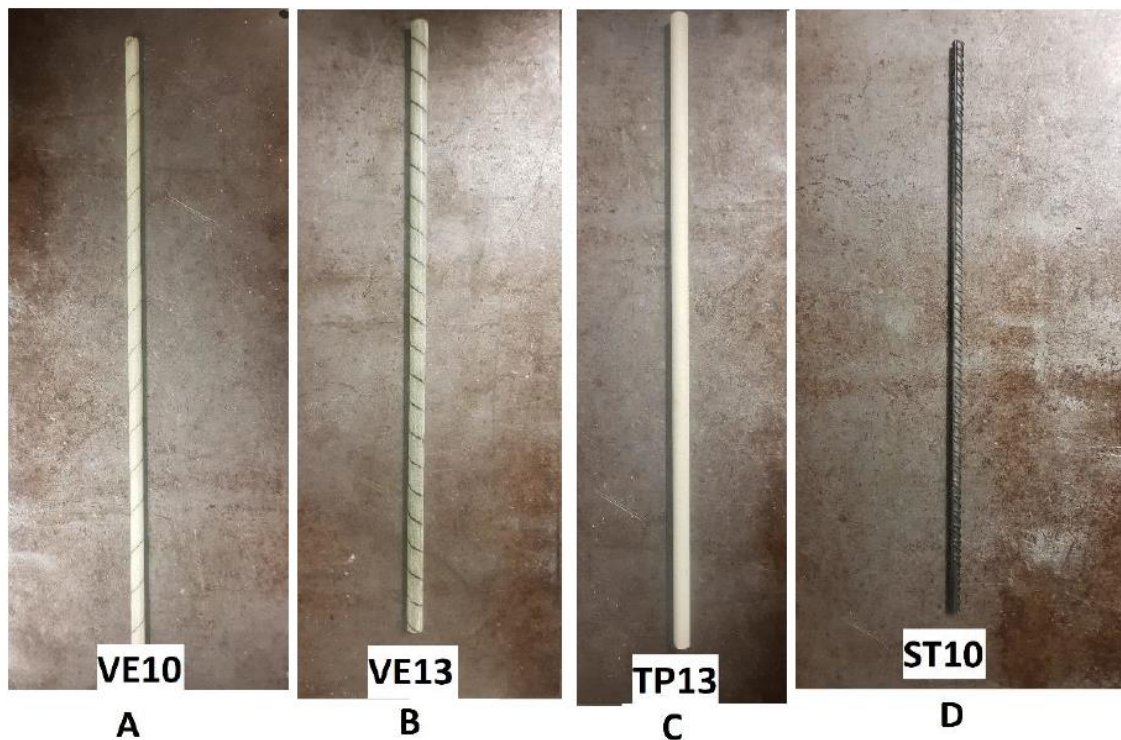


Figura 26. Barras ensayadas para la caracterización de material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021

Para la caracterización de las barras se realizaron ensayos a tracción longitudinal, obteniendo la resistencia a tracción y el módulo de Young. La resistencia a tracción y el módulo de Young de las barras FRP se obtuvieron según el apartado B.2 del ACI 440.R3-04 , y según la norma UNE-EN 10080 para las barras de acero. Se utilizaron muestras de 500mm de longitud, para cada tipo de barra.

Para este ensayo se adoptó un sistema de protección en los extremos de las barras FRP, ya que estas tienen una baja resistencia transversal y con las mordazas de la máquina de tracción, se podrían romper las barras.





Figura 27. Barras FRP para caracterización del material, con las protecciones en los extremos. Fuente: TFM A.Moncayo 2021

La protección de los extremos de las barras de FRP consistió en unas abrazaderas de acero de 25 mm de diámetro y 100mm de longitud, rellenas con resina HILTI HITRE 500 V4. ( Véase Figura 27) Después de ensayar con esta resina, se vio que, para las barras de menor diámetro, esta se desprendía de las abrazaderas al ser aplastadas por las mordazas y se decidió cambiar la resina, finalmente utilizando el adhesivo X60 de la marca HBM. ( Véase Figura 28)

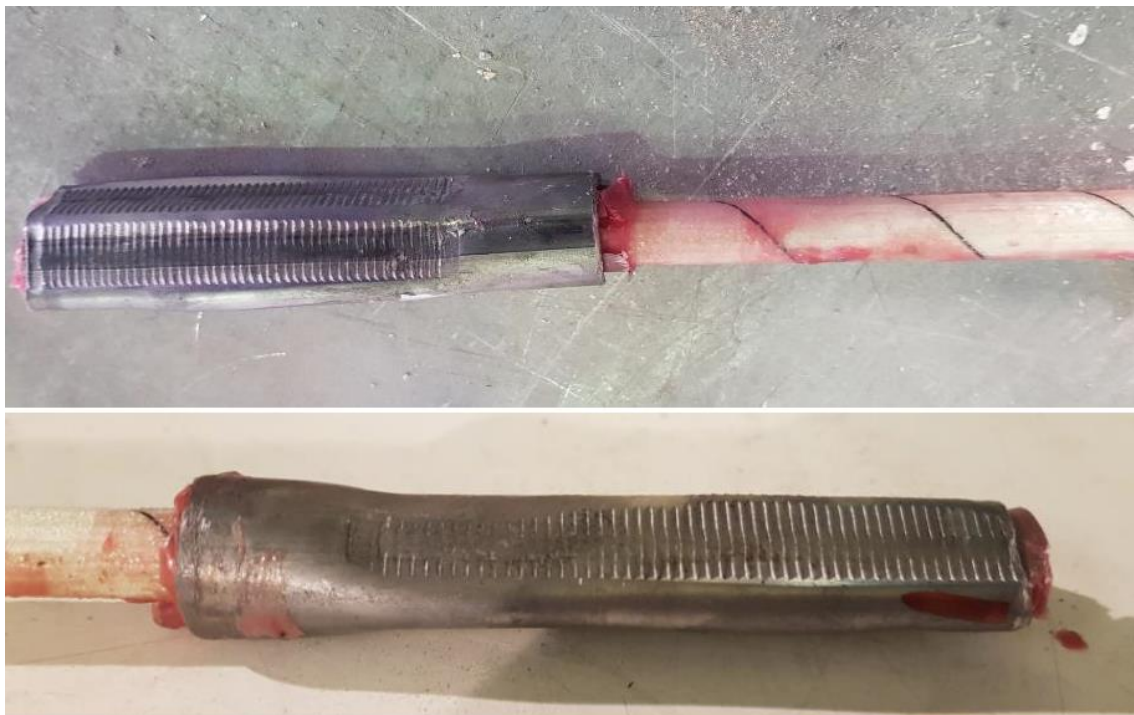


Figura 28. Desprendimiento de la resina en los extremos. Fuente: TFM A.Moncayo.2021

Para poder controlar el deformación de las barras se instaló una galga extensométrica y un extensómetro en el centro de las mismas, como muestra la figura 29.

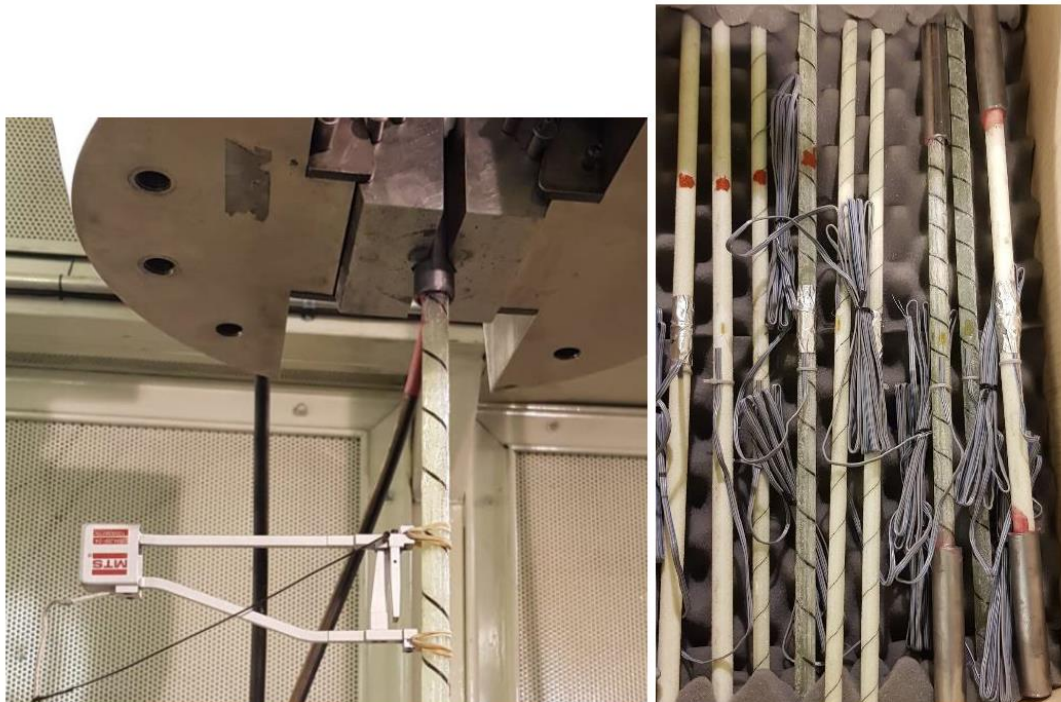


Figura 29. Instrumentación de las barras ensayo de caracterización del material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021.

Los resultados de los ensayos, como muestran la Figura 30, Figura 31 y Figura 32, sin considerar aquellas barras que habían fallado a bajas cargas debido al desprendimiento de la resina de las protecciones en los extremos, que hicieron que fallaran las barras a baja resistencia.

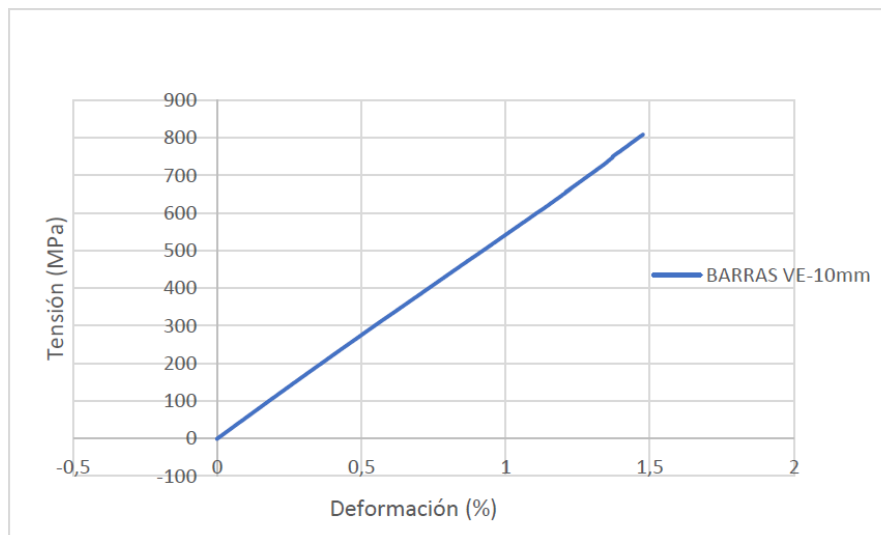


Figura 30. Curva esfuerzo-deformación barras VE-10mm. Caracterización Material. Fuente: TFM A.Moncayo 2021

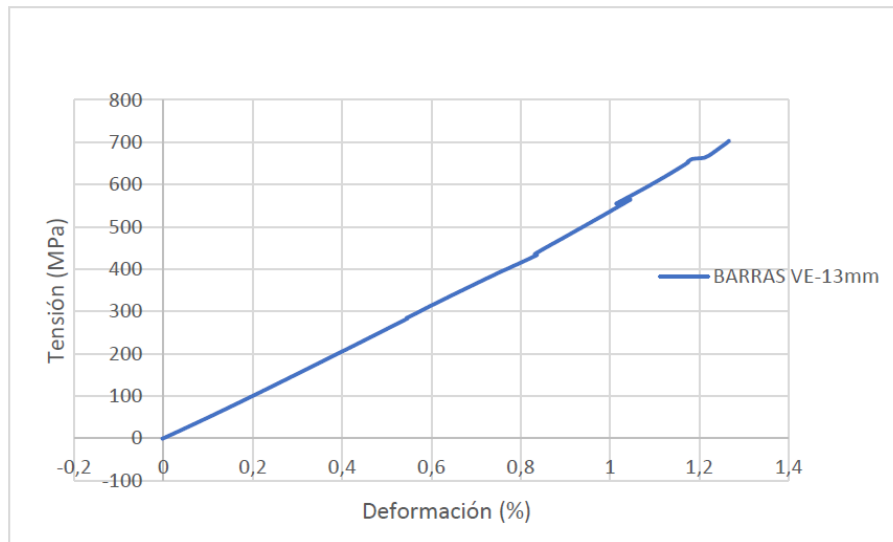


Figura 31. Curva esfuerzo-deformación barras VE-13mm. Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021

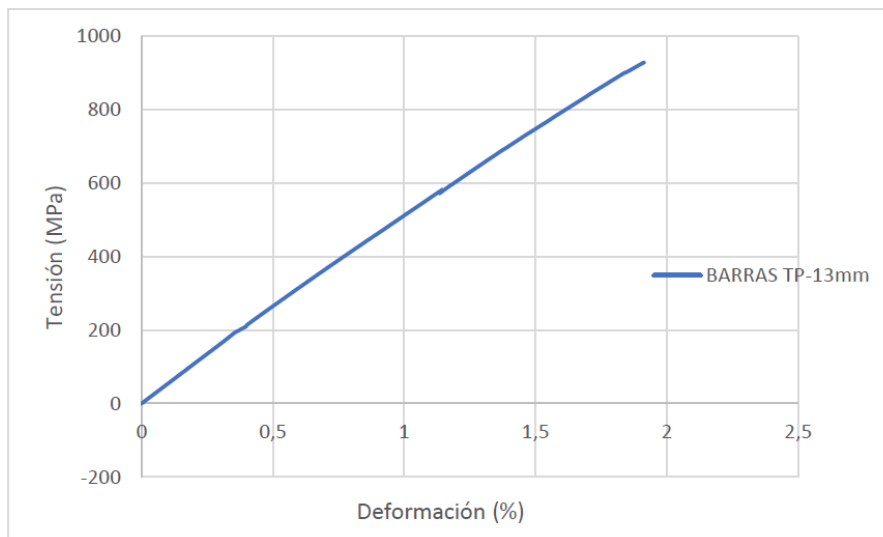


Figura 32. Figura 3.14 Curva esfuerzo-deformación barras TP-13mm. Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021

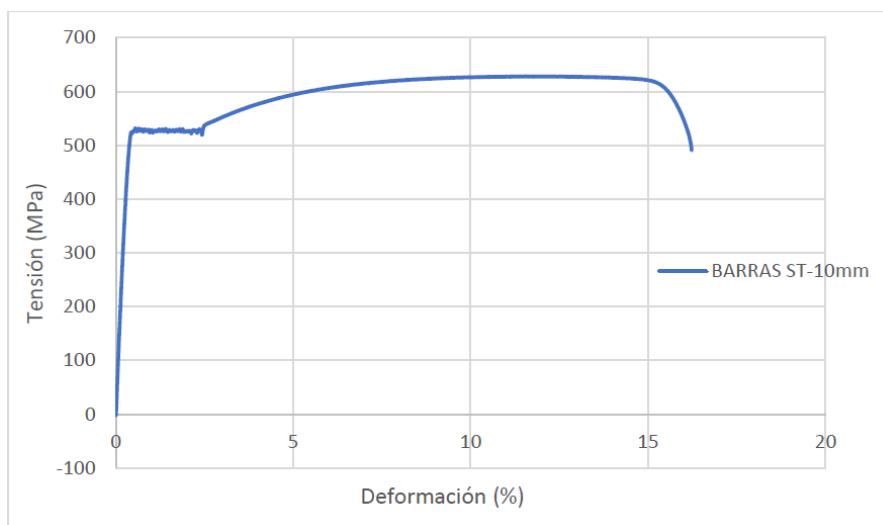


Figura 33. Curva esfuerzo-deformación barras ST-10mm Caracterización Materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021



Como se puede ver en la Figura 33, las barras FRP tienen un comportamiento elástico-lineal, a diferencia del acero que tiene un comportamiento elasto-plástico.

La resistencia a tracción para las barras de acero se calculó con la ecuación:

$$f_{fu} = \frac{F_m}{A}$$

Donde,

$$A = \text{area de la sección transversal}$$

En el caso de las barras de FRP al tener un comportamiento frágil, la resistencia máxima se calculó con la resistencia de rotura:

$$f_{fu} = \frac{F_u}{A}$$

Donde,

$$A = \text{area de la sección transversal}$$

En cuanto al módulo de elasticidad se obtuvo mediante una regresión lineal de los puntos del 20% al 50% de la resistencia a tracción de la barra, cuando la curva tensión-deformación es lineal.

Con la ecuación:

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * A}$$

Donde,

$$E_L = \text{módulo de elasticidad, MPa};$$

$$A = \text{area de la sección transversal};$$

$F_1$  y  $\varepsilon_1$  = Carga y deformación correspondiente, a aproximadamente el 50% de la capacidad de tracción última o capacidad de tracción garantizada, N y adimensional, respectivamente.

$F_2$  y  $\varepsilon_2$  = Carga y deformación correspondiente, a aproximadamente el 20% de la capacidad de tracción última o capacidad de tracción garantizada, N y adimensional, respectivamente.

En la Tabla 18, se muestran los valores resultantes de los ensayos a tracción:

<b>Barra</b>	<b>Resistencia a la tracción promedio (MPa)</b>	<b>Módulo de Young promedio (GPa)</b>
--------------	---	---------------------------------------

VE10	808,47	44,83
VE13	703,50	46,71
TP13	928,10	53,49
ST10	530,13	153,92

Tabla 18. Resultados ensayos de tracción de las barras. Caracterización de los materiales. Fuente: TFM A.Moncayo 2021.

En cuanto a las barras TP GFRP obtuvieron una resistencia a la tracción (928,10 N / mm<sup>2</sup>), un 31,9% superior a la de las barras VE GFRP (703,50 MPa). La diferencia en el módulo de elasticidad fue del 14,3%. (53,49 GPa para TP GFRP y 46,71 GPA para VE GFRP).

### 3.5 Ensayos a flexión con armadura pasiva de FRP

#### Configuración del ensayo

Para los ensayos a flexión, la viga se encuentra en una configuración biapoyada, sobre una viga de apoyo la cual carga sobre un elemento de apoyo rígido (ver Figura 34 y Figura 35). Se aplica una carga puntual simétrica en el centro de la luz mediante la prensa Instron.

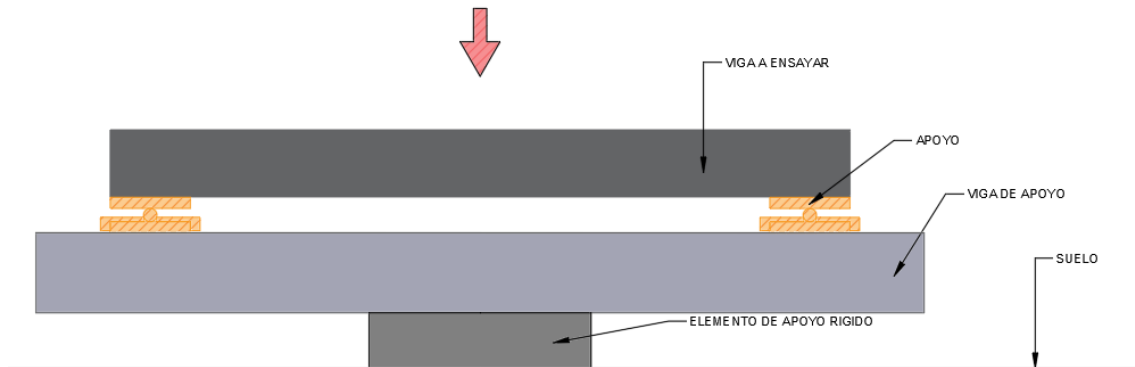


Figura 34. Esquema de la situación de la viga



Figura 35. Situación de la viga en el ensayo de armadura pasiva

Apoyos

Para poder garantizar los grados de libertad, el mecanismo general de apoyos se puede montar de las diferentes maneras como se muestra, Tabla 19:

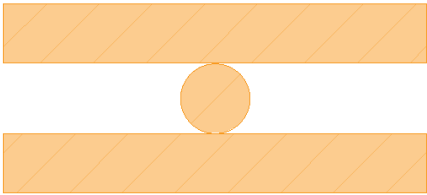
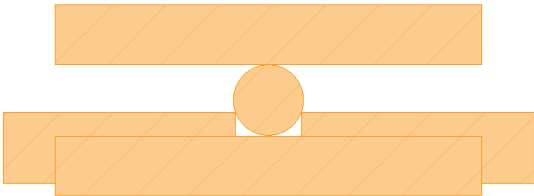
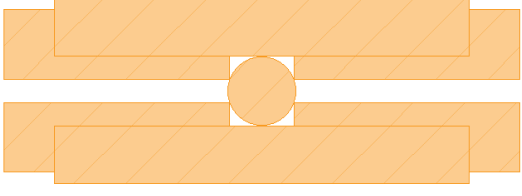
	<p>Este tipo de apoyo permite el giro y el desplazamiento. Tiene dos grados de libertad.</p>
	<p>En este tipo de apoyo el giro está permitido, pero no el desplazamiento. Tiene un grado de libertad.</p>
	<p>En este tipo de apoyo ni el giro ni el desplazamiento está permitido. No tiene ningún grado de libertad.</p>

Tabla 19. Tipos de apoyos

En el caso de los ensayos realizados, los aparatos de apoyos son del segundo tipo según la Tabla 16, es decir tienen limitado el deformación vertical y permiten el giro (ver Figura 36).



	
<p>Apoyo del lado izquierdo</p>	<p>Apoyo del lado derecho</p>

Figura 36. Apoyos utilizados en los ensayos de armadura pasiva

### Instrumentación

Para hacer el seguimiento del ensayo, los datos que se querían obtener son:

- Flecha central de la viga.
- Conocer la deformación para ver si tienen un comportamiento lineal o no.
- La carga aplicada y la carga de rotura.

La figura 37, junto la Tabla 20 y Figura 38, muestran el esquema estático junto con la instrumentación empleada:

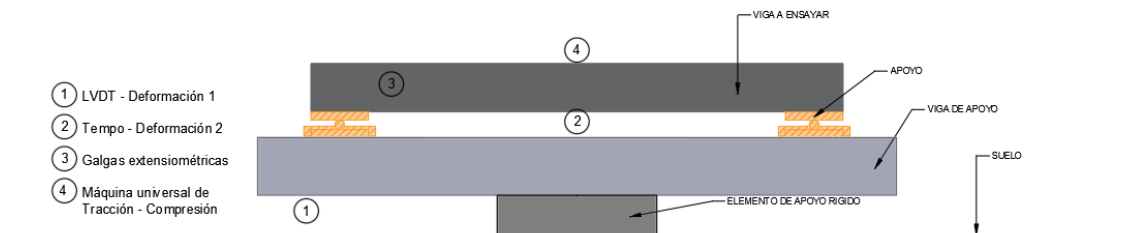


Figura 37. Esquema de la instrumentación de los ensayos

Situación	Datos obtenidos
1	El deformación de la viga sobre la que se apoyaban los apoyos en el extremo. LVDT
2	El deformación de la viga ensayada en el centro de la luz. Tempsonic
3	Conocer la deformación de las barras longitudinales. Galgas extensiométricas.
4	Determinar la carga aplicada, los ciclos de carga y determinar la velocidad de carga. Máquina de tracción- compresión universal.

Tabla 20. Información obtenida por cada instrumento





Figura 38. Imágenes detalle de los instrumentos utilizados durante los ensayos con armadura pasiva

### Registro de la flecha central

Para conocer la flecha central de la viga, se debía tener en cuenta la deformación de la viga sobre la que se colocaron los apoyos.

De tal manera que la flecha central de la viga se calculó como:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1$$

Donde las deformadas 1 y 2 son, ver Figura 39:

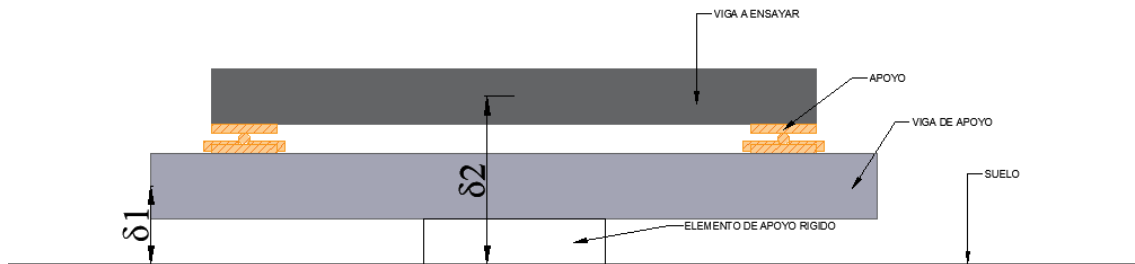


Figura 39. Definición de las deformaciones

Para poder obtener ambas flechas se ha usado un temposonic, para obtener la deformación de la viga ensayada en el centro de la luz y un LVDT, para obtener la flecha de la viga de apoyo.

### Control de las deformaciones en las barras

Para conocer las deformaciones de las barras longitudinales, se adhirieron galgas extensométricas a las barras antes de hormigonar, ver figura 40.



Figura 40. Situación de las Galgas en la armadura.

Al aplicar una carga en el centro del vano y tratarse de una viga biapoyada, se genera el siguiente diagrama de momentos, ver Figura 41:

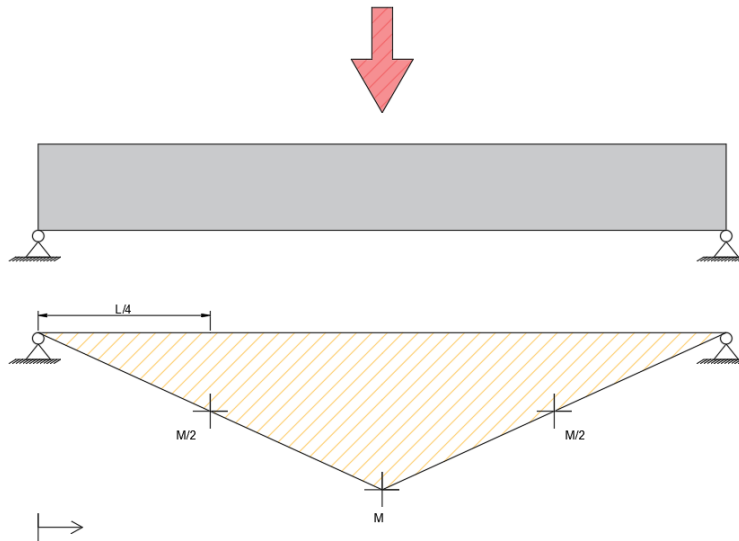


Figura 41. Diagrama de momentos generados por la carga en la viga ensayada

La ley de momentos es de la siguiente manera, con el sistema de referencia indicado en el diagrama de la Figura 41, es:

$$M = \frac{F}{2}x, \quad \text{del punto 0 al punto de aplicación de la carga.}$$

$$M = \frac{F}{2}(L - x), \quad \text{del punto de aplicación de la carga a el total de la luz.}$$

Las elongaciones que presenta las barras en los diferentes puntos del vano, considerando que el material, la excentricidad y la fuerza aplicada es la misma, deberían ser proporcionales a esta ley de momentos, como se puede ver en la Figura 42:

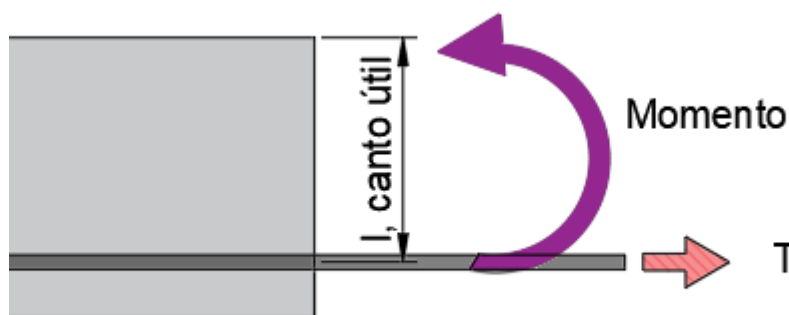


Figura 42. Diagrama de momentos de la tensión en la barra de la armadura

Del momento que hay en la sección, tenemos:

$$M = T * l$$

Donde T es la fuerza lineal, M es el momento y l es la longitud de palanca es decir el canto útil.



Donde la fuerza tenemos que es:

$$T = A * \sigma$$

Donde A es el área y la  $\sigma$  es la tensión.

Donde la tensión la podemos entender como:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Donde E es el modulo elástico, y la  $\varepsilon$  es la desplazamiento.

Entonces si consideramos que el canto útil no varía en la sección, que las barras de FRP tienen el mismo modulo elástico en toda su longitud, así como su área, se obtiene:

$$\text{en el centro de vano: } M = l * A * E * \varepsilon$$

$$\text{a un cuarto del vano } \frac{1}{2} M = l * A * E * \varepsilon$$

En ambos casos los valores de l, A, E son los mismos, por lo tanto, el deformaciónen  $\frac{1}{4}$  es dos veces el deformaciónen el centro de vano.

Hay que considerar que es una aproximación.

Al disponer de galgas extensiométricas a cada  $\frac{1}{4}$  de la luz de la viga, deberíamos poder comprobar que el comportamiento de las barras es lineal y se aproxima al valor calculado. Si estas condiciones no se cumplen debe ser por dos motivos:

- Plastificación de las barras, que no debería ser posible ya que tienen un comportamiento elástico sin régimen plástico, como se ha explicado en el marco teórico.
- Deslizamiento de las barras dentro del hormigón, que según el marco teórico es más posible.<sup>4</sup>

Las galgas extensiométricas, nos permiten controlar este fenómeno.

Aun así, las lecturas que se realicen mediante las galgas extensiométricas, depende de las fisuras que se produzcan en el hormigón, es decir si hay o no fisuras justo en la situación de la galga.

---

<sup>4</sup> Véase ensayos de pull out, campaña descrita en el apartado 8.4

## Instrumentos utilizados

### Funcionamiento del temposonic

En el caso de temposonic funciona mediante un campo magnético y un imán, al desplazarse este imán se genera una corriente eléctrica y el temposonic es capaz de identificar los voltios generados. El fenómeno físico que se produce se describe en la ley Faraday-Lenz, la cual describe la inducción de un campo eléctrico cuando el campo magnético varía en el tiempo.

El fabricante del instrumento calibra el instrumento y da una correlación entre los voltios y el desplazamiento, así podemos medir el deformaciónen

En este caso la correlación del instrumento es la siguiente Figura 43:

$$10 \text{ Voltios} \rightarrow 200 \text{ mm}$$

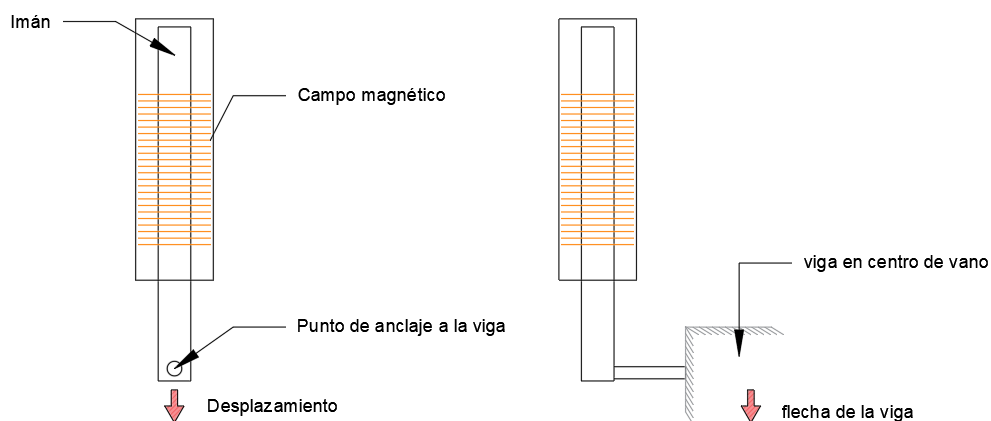


Figura 43. Esquema del funcionamiento de un temposonic, vista frontal y lateral.

Como se puede ver en el esquema, el punto de anclaje se mueve solidario a la viga, lo que hace que se mueva el imán y este hace varia el campo magnético en el tiempo, generando así una corriente eléctrica. Ver Figura 44, detalle del LVDT:



Figura 44. Temposonic colocado para el ensayo

*Funcionamiento del LVDT*

El transformador diferencial de variación lineal, conocido como LVDT, funciona diferente al temposonic, ambos sirven para medir deformaciones lineales, pero a diferencia del temposonic, el LVDT funciona por campos eléctricos y es capaz de identificar si hay deformación hacia un lado o hacia lado opuesto. Ver Figura 45:

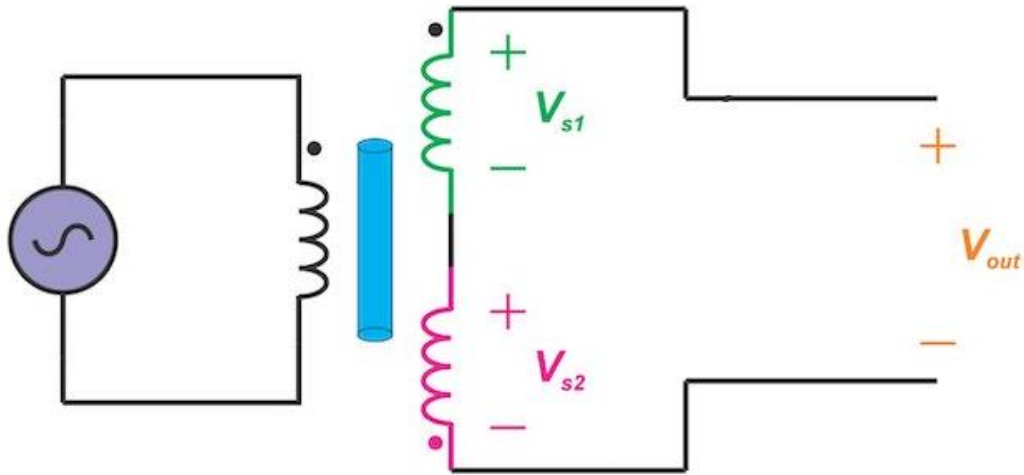


Figura 45. Esquema del circuito eléctrico del LVDT. M.MONTERO(2021).

Es el pistón central que se mueve solidario a la viga, dependiendo del deformación de este pistón, la onda de corriente que se genera es diferente:

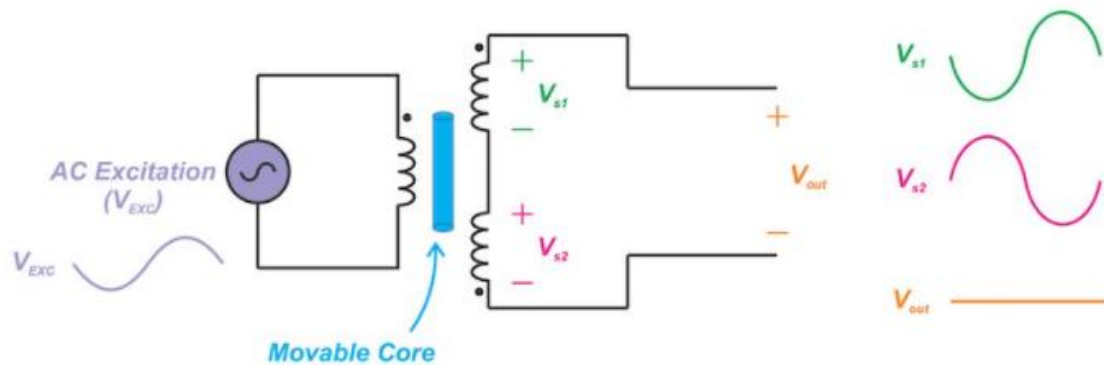


Figura 46. Posición inicial del LVDT y corrientes que se generan. M.MONTERO(2021).

En la posición inicial, se inducirán voltajes iguales con polaridades opuestas a través de los dos secundarios ( $V_{s1} = -V_{s2}$ ).

En cambio, si la varilla se desplaza se inducirán voltajes diferentes en los dos secundarios.

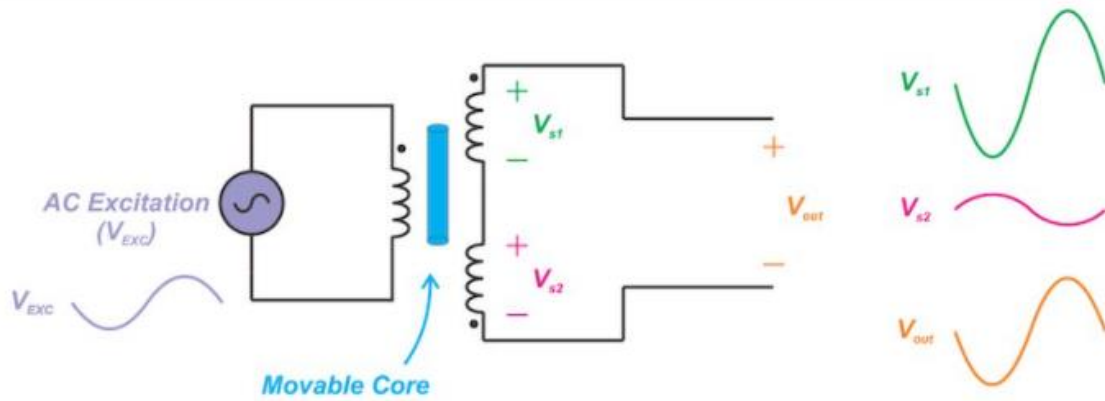


Figura 47. Posición núcleo desplazado hacia arriba, en el LVDT. M.MONTERO(2021).

En el caso que se desplace hacia arriba las corrientes secundarias serán del tipo: ( $|V_{s1}| > |V_{s2}|$ ). Como se puede observar en la Figura 47.

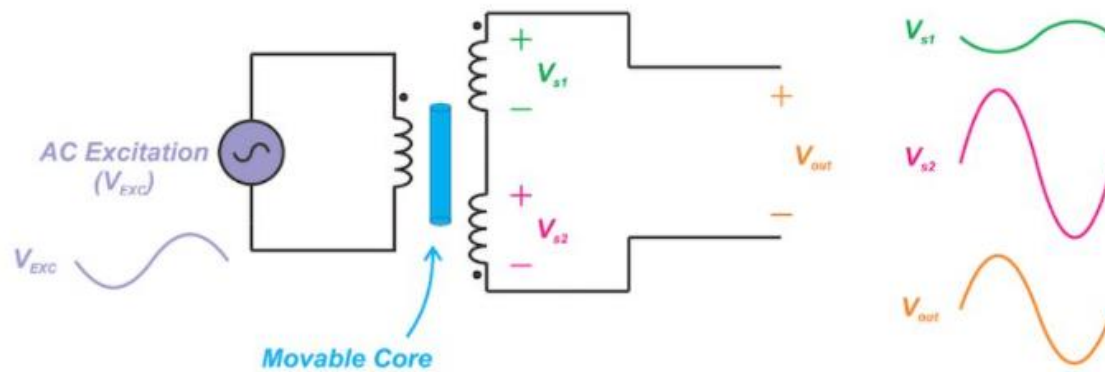
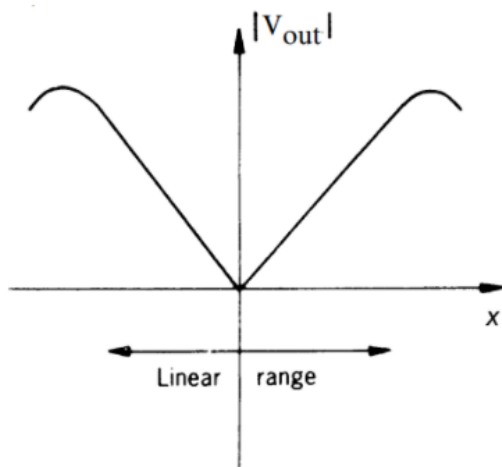


Figura 48 Posición núcleo desplazado hacia abajo, en el LVDT. . M.MONTERO(2021).

En el caso que se desplace hacia abajo, las corrientes secundarias serán del tipo:  $|V_{s2}| > |V_{s1}|$

Para poder interpretar esos voltajes de salida tenemos una función transferencia de un LVDT típico:



Esta función la calibra el industrial. Como se puede observar en esta función, no conocemos si el deformaciones en positivo en negativo, para poder aportar esa información debemos conocer la amplitud como la fase de salida.

Figura 49. Función transferencia de un LVDT típico. Fuente: R.PALLÁS-ARENY y J. G. WEBSTER.

### Funcionamiento de las Galgas Extensométricas

Las galgas extensométricas se adhieren a las barras de las armaduras con una resina epoxi, de tal manera que, si se la armadura sufre un desplazamiento, las galgas, compuestas por un pequeño filamento dispuesto de manera serpenteada, se mueven de manera solidaria, produciendo una variación en el diámetro de este filamento, ver Figura 50:

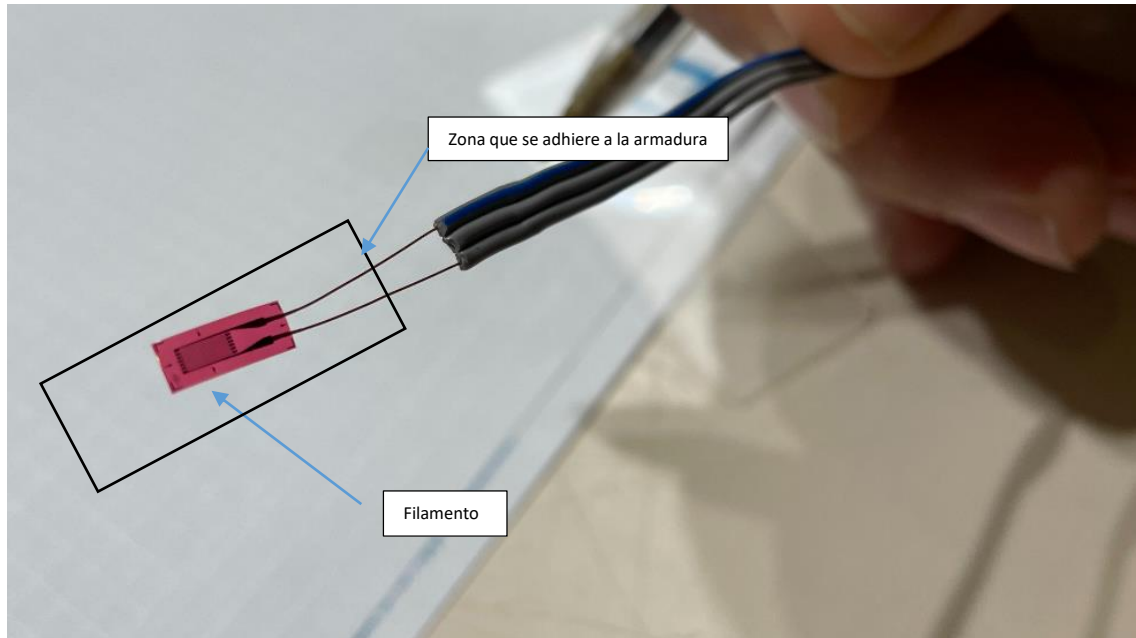


Figura 50. Detalle de la galga extensométrica.

El filamento de la galga es un material que es conductivo eléctricamente, pero como tal tiene resistencia eléctrica, que varía dependiendo del diámetro del filamento. Entonces, se hace pasar una corriente eléctrica por el filamento, si la armadura donde está adherida la galga experimenta un desplazamiento, el filamento también, modificando su diámetro y variando la resistencia eléctrica. Conociendo el material es posible relacionar la pérdida de resistencia eléctrica con el deformación del filamento, por lo tanto, el deformación de la armadura. Para poder obtener con precisión la resistencia eléctrica del material se utiliza el puente de Winston, ver Figura 51:

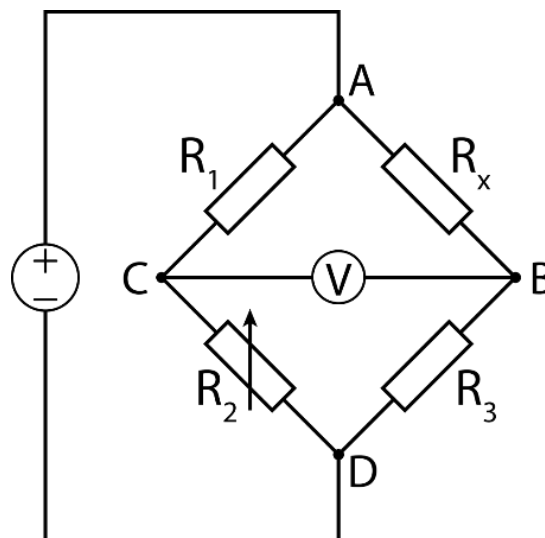


Figura 51. Puente de Winston completo

En el puente de Winston, existen 4 resistencias que se anulan, para ello todas tienen que tener la misma resistencia eléctrica, se aporta corriente eléctrica al sistema y con un Tester, en los puntos C y B, lados opuesto a los puntos A y D, se mide esta corriente. Si hay una variación en cualquiera de las resistencias, ya no se anulan y el Tester registrara corriente eléctrica en el sistema. Este es el dato que nos permite conocer el puente de Winston.

En nuestro caso, el puente de Winston funciona un poco diferente ya que no es completo, sino que es  $\frac{1}{4}$  del puente de Winston, solo necesitamos saber la variación de resistividad en una resistencia: la galga. El fabricante nos indica la resistencia de la galga y las demás resistencias de se configuran con la misma resistencia eléctrica, en el caso de esta campaña:  $120 \Omega$ . También nos da la relación entre la variación de resistividad y el diámetro, como se puede ver en la Figura 52:



Figura 52. Información aportada por el fabricante de las Galgas Extensiométricas.



### Sistema de recogida de datos

Como se ha indicado, en los diferentes instrumentos de obtención de datos, lo que se obtiene de estos instrumentos son corrientes eléctricas, se necesita interpretar estas corrientes y obtener datos digitales para poder trabajar con ellos.

Para ello, se necesita un sistema de adquisición de datos que se compone por el puente de Winston, un multiplexor, un convertor de analógico digital y un tester o voltímetro, como lector de corriente.

El multiplexor no permite realizar varias lecturas de corriente eléctrica de manera simultánea (ver Figura 53).



Figura 53. Multiplexor y convertor de datos de analógico a digital

### Control de carga

Para el control de la carga que se aplica sobre las vigas durante el ensayo, se disponen de una máquina universal de compresión equipada con una célula para medir la carga, así como una servoválvula que nos permite regular el pistón en base a su carga o a su deformación(ver Figura 54).



Figura 54. Máquina de compresión universal

El deformación del pistón se obtiene mediante un temposonic que incorpora la máquina. Este pistón en nuestro caso tiene un recorrido de  $\pm 50 \text{ mm}$ , uno de los limitantes a la hora de definir los ciclos de carga. La carga aplicada se regula con una servoválvula, que funciona mediante una válvula que se regula por un pistón en movimiento gracias a un campo eléctrico.

Con la información del temposonic y de la célula de carga, la máquina de compresión obtiene la información y regula la carga o desplazamiento, dependiendo de los parámetros que se le hayan introducido, y ese proceso de pregunta-repuesta-calibrar la acción, lo puede realizar unas 4000 veces por segundo, es decir a 4 Hz.



### 3.6 Proceso de ensayo de armadura pasiva de FRP.

#### Ciclos de carga

La carga aplicada en los ensayos estáticos a flexión se realizó de acuerdo con los cuatro ciclos indicados en la Tabla 21.

Ciclo	Situación inicial	Velocidad	Final de ciclo en desarrollo acumulado del pistón
<b>1r</b>	Reposo	1mm/ min	10 mm desarrollo
<b>2n</b>	10 mm desarrollo	10mm/ min	100 mm desarrollo
<b>3r</b>	110 mm desarrollo	33mm / min	200 mm desarrollo
<b>el pistón tiene un recorrido limitado, se debe volver a situar el pistón a una distancia más cercana de la viga para seguir ensayando</b>			
<b>4rt</b>	la carga inicial es de 12kN debido al peso propio del pistón	33mm / min	

Tabla 21. Ciclos de carga ensayos con armadura pasiva

Con estos ciclos de carga lo que se pretende es identificar cuando el hormigón empieza a fisurar, por eso el primer ciclo es más lento en cuanto la carga que se aplica; después un ciclo más rápido hasta la carga última seguido de otro ciclo hasta romper la viga en dos partes. El cuarto ciclo aparece debido a que se supera el recorrido del pistón, por eso no varía en velocidad respecto al 3r ciclo.

## Observaciones durante el ensayo

En este apartado se tratarán las observaciones que se realizaron durante el ensayo. Se clasificarán en los dos grupos de la campaña.

### Grupo 1

En el ensayo de la viga de control, armada con barras de acero, a partir de la carga de 10kN se podrían observar las primeras fisuras, estas crecieron longitudinalmente, como se muestra en la siguiente Figura 55:



Figura 55. Fisuras Viga 4A10 a 23,6kN. Grupo 1.

A una carga de 46,9 kN se podía observar un mayor número de fisuras y éstas eran más extensas, ver Figura 56:



Figura 56. Fisuras Viga 4A10 a 46,1 kN. Grupo 1.

Seguidamente aparecieron más fisuras en el centro de vano, que empezaron a curvarse en la parte de la carga y estas eran más gruesas, como se puede ver en la Figura 57:



Figura 57. Fisuras Viga 4A10 a 49 kN. Grupo 1.

A partir de esas fisuras centrales se acabó formando unas fisuras en forma de cono situadas en el centro de vano, y fallando por esa sección, ver Figura 58:



Figura 58. Fisuras Viga 4A10 a 49,4 kN. Grupo 1.

El modo de fallo es por fallo del hormigón a una carga última de aproximadamente 49 kN.

En el caso de la viga armada con 2 barras de vinyl ester, se empezaron a apreciar fisuras antes de la carga de 10kN, es decir, antes que en la viga 4A10. A una carga de 9,7kN las fisuras ya se podían apreciar más desarrolladas que en la viga 4A10, ver Figura 59:



Figura 59. Fisuras Viga 2V10 a 9,7 kN, Grupo 1.

A una carga entorno a los 24,2 kN se podían apreciar fisuras que cubrían el canto de la viga, más desarrolladas que en la viga de control, armada con acero, a una misma carga, ver Figura 60:



Figura 60. Fisuras Viga 2V10 a 24,2 kN, Grupo 1.



Seguidamente empezaron a aparecer unas fisuras en diagonal, fisuras por cortante, las cuales no se habían visto en la viga armada con acero, ver Figura 61:



Figura 61. Fisuras Viga 2V13 a 55,4 kN, Grupo 1.

En este caso la rotura fue muy rápida, las fisuras en forma de cono que se habían observado en la viga armada con acero, en esta viga aparecieron de manera instantánea rompiendo a un lateral de la carga. En la siguiente imagen se ve como empiezan a formarse las fisuras de compresión del hormigón en la zona alta, ver Figura 62:

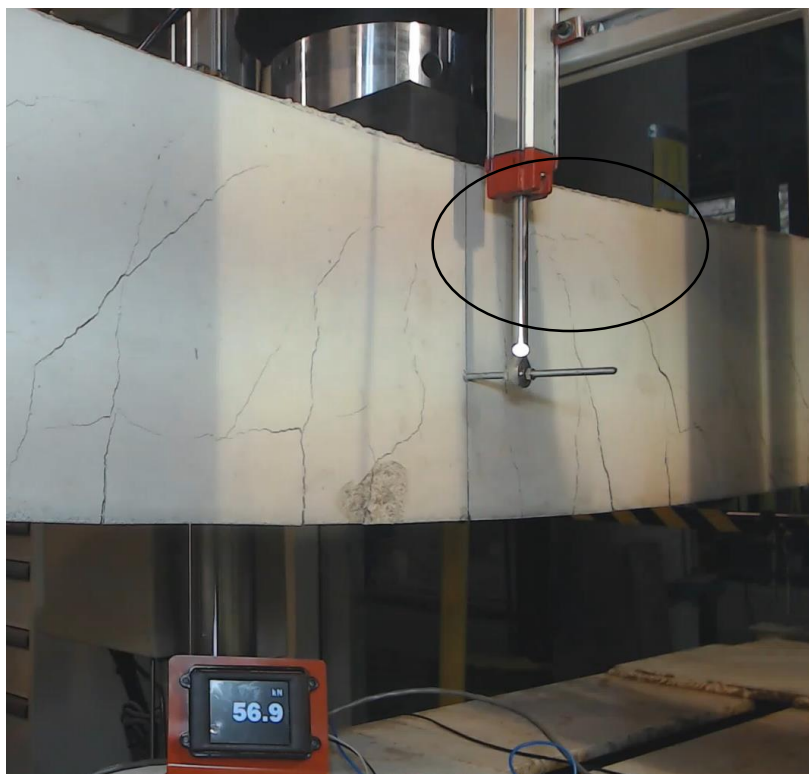


Figura 62. Fisuras Viga 2V13 a 56,9 kN, Grupo 1.

En cuestión de segundo se produce ese fallo por rotura del hormigón, ver figura 63:



Figura 63. Fisuras Viga 2V13 a 54,6 kN, Grupo 1.

El modo de fallo de esta viga de armadura de Vinyl Ester, es similar a la viga armada con acero, pero presenta varias diferencias, la carga de fisuración ha ido menor, se han formado fisuras de cortante, y la falla por compresión en el hormigón se ha producido de manera instantánea y se ha formado a un lateral de la carga, no tan centrado como en el caso de la viga armada con acero.

En el caso de las vigas de barras con resina termoplástica, 2T13a y 2T13b; la carga de fisuración fue en ambos casos menor a 7kN, valores por debajo de las vigas armadas con acero y con FRP resina termoestable.

En ambos casos, las vigas armadas con FRP resina termoplástica obtuvieron menores resistencias.

Como se puede apreciar en la Figura 64, en la viga 2T13a no aparecieron fisuras de cortante y también se produjo una falla por compresión del hormigón y esta se produjo descentrada.





Figura 64. Fisuras Viga 2T13a a carga de rotura, Grupo 1.

En el caso de la viga de 2T13b, se observaron características similares, no aparecieron fisuras de cortante y se produjo una falla por compresión del hormigón y esta se dio en un lateral de la viga. Como se puede observar en la Figura 65:



Figura 65. Fisuras Viga 2T13b a carga de rotura, Grupo 1.

*Grupo 2*

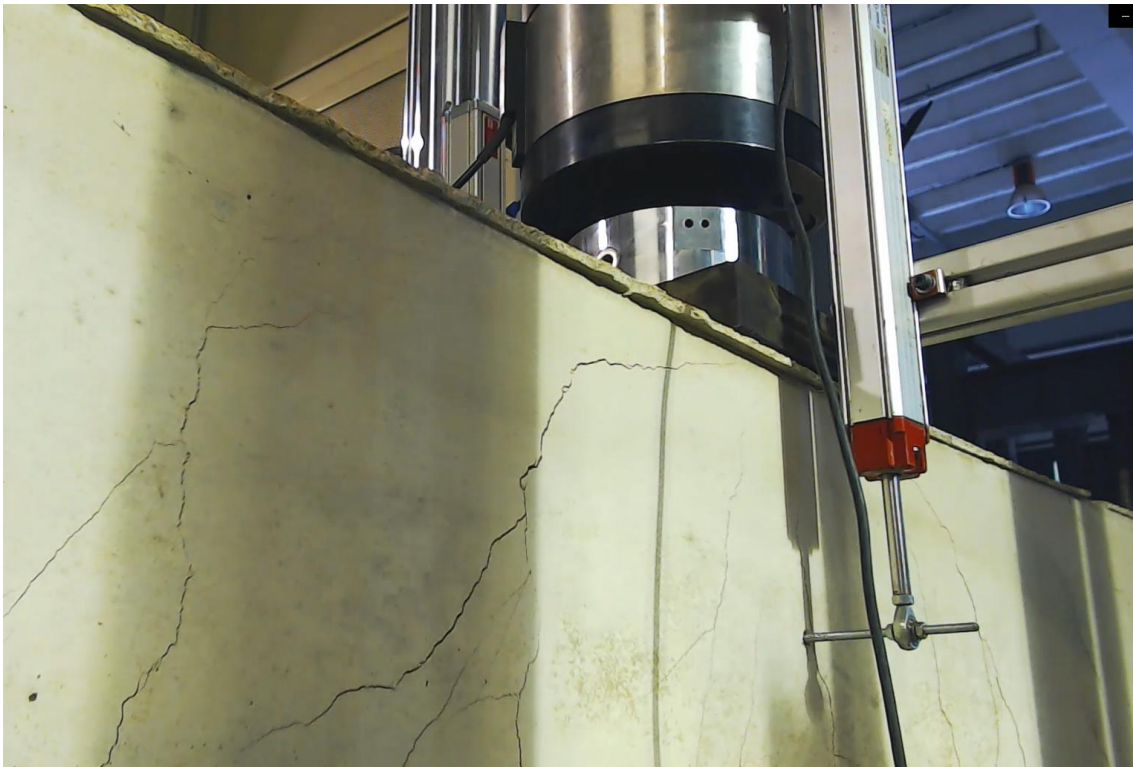
En el caso del grupo 2, las vigas de control son las vigas armadas con FRP resina termoestable.

En el caso de la viga armada con 5 barras de Vinyl Ester, la carga de fisuración fue inferior a 10kN, y se formaron fisuras transversales a la longitud de la viga, como se muestra en la Figura 66:



*Figura 66. Fisuras Viga 5V10. Grupo 2.*

Aparecieron fisuras de cortante, como se puede observar en la Figura 67:



*Figura 67. Fisuras Viga 5V10 (2). Grupo 2.*



Y el fallo se dio por compresión del hormigón a un lado de la carga, como se puede observar en la Figura 68:



Figura 68. Fisuras Viga 5V10 a carga de rotura. Grupo 2.

En el caso de la otra viga armada con FRP resina termoestable, la viga 3V13, las fisuras de cortante tuvieron un mayor desarrollo, como se puede ver en la Figura 69, también la carga última fue mayor que la viga 5V10.



Figura 69. Fisuras Viga 3V13 a 51,8 kN. Grupo 2.

Ver mayor detalle de las fisuras a cortante en la Figura 70:



Figura 70. Fisuras cortantes de la Viga 3V13 a 51,8 kN. Grupo 2.

El fallo de la viga se produjo por fallo de compresión en el hormigón como se puede apreciar en la Figura 71:



Figura 71. Fisuras de la Viga 3V13 a carga máxima. Grupo 2.



En el caso de las vigas armadas con resina termoplástica la carga de fisuración se dio en torno a 5 kN de carga, como se puede observar en la Figura 72, donde se puede ver la viga 3T13a:



Figura 72. Fisuras Viga 3T13a a 6,6kN. Grupo 2.

En el caso de la viga 3T13a, como se puede observar en la Figura 73, el fallo se dio por compresión del hormigón y no aparecieron fisuras de cortante.

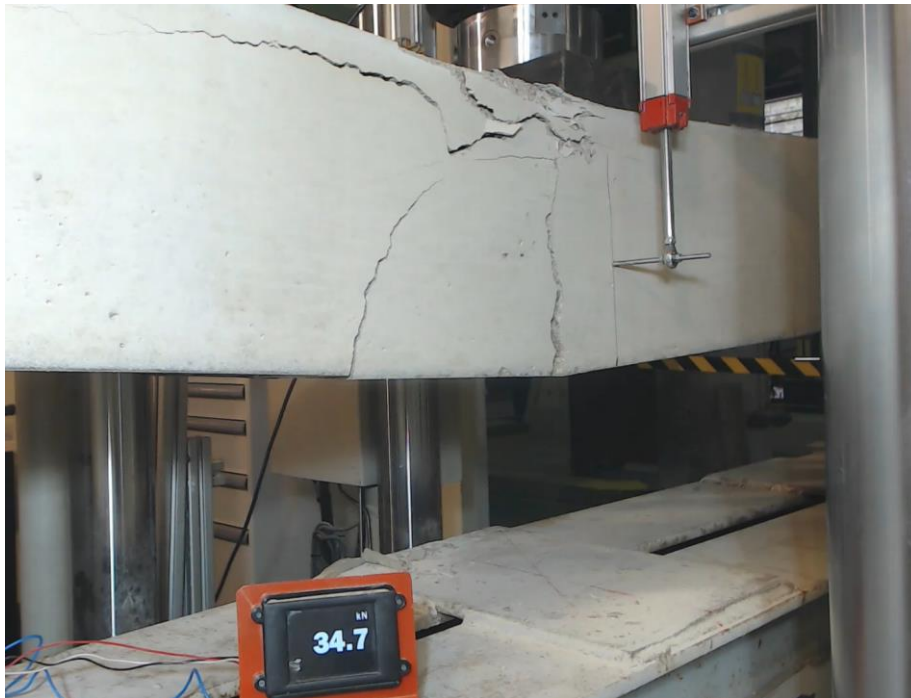


Figura 73. Fisuras Viga 3T13a a 34,7kN. Grupo 2.

En el caso de la viga 3T13b la carga de fisuración fue un poco menor, y a 4,4kN se puede observar fisuras, como se ve en la Figura 74:



Figura 74. Fisuras Viga 3T13b a 4,4kN. Grupo 2.

En la viga 3T13b el fallo también fue originado por fallo por compresión del hormigón, como se puede ver en la Figura 75, tampoco se aprecian fisuras de cortante desarrolladas.

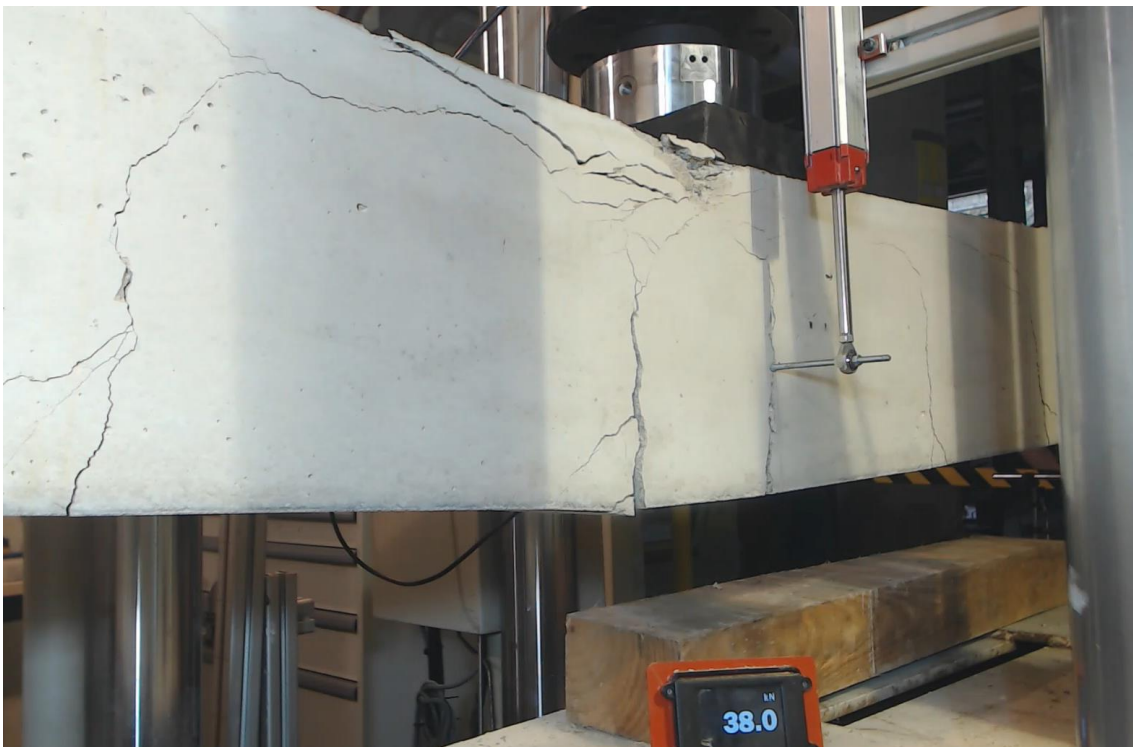


Figura 75. Fisuras Viga 3T13b a 38kN. Grupo 2.



### Canto útil real

Durante el ensayo también se puede observar que las barras de FRP, debido a su baja densidad habían flotado durante el hormigonado de las vigas y esto había hecho variar el canto útil de las vigas, afectando a la resistencia de estas. En la siguiente Tabla 22, se puede ver el canto útil de las vigas, medido al final del ensayo:

	$d_1$ (mm)
<b>4A10</b>	40
<b>2T13A</b>	75
<b>2T13B</b>	75
<b>2V13</b>	65
<b>5V10</b>	60
<b>3T13A</b>	70
<b>3T13B</b>	70
<b>3V13</b>	60

Tabla 22. Canto útil real de las vigas con armadura pasiva

Este hecho se debe tener en cuenta para futuras campañas experimentales, hasta para el uso en obra como material.

Véase Figura 76, como ejemplo de la flotación que se dio en la viga 2V13:



Figura 76. Situación de la armadura en la viga 2V13 después de rotura.

*Conclusiones de las observaciones de armadura pasiva de FRP*

En conclusión, todas las vigas, tanto en el grupo 1 como en el grupo 2, presentan fallo por compresión del hormigón.

En cuanto a la carga de fisuración en las vigas armadas con resinas termoplástica, esta es entorno a 6kN, inferior a la carga de fisuración de las vigas armadas con barras de resina termoestable y esta es menor que la carga de fisuración de la viga armada con barras de acero.

También se destaca que solo se han observado fisuras de cortante en las vigas armadas con resinas termoestables, ni en las vigas armadas con resinas termoplásticas ni en la viga armada con acero se han podido observar estas fisuras.

También importante destacar la flotación de las barras de FRP, variando el canto útil de las vigas.

## 4 Resultados y análisis de resultados de la campaña de armadura pasiva de FRP

Este apartado se analizarán los resultados obtenidos divididos por los grupos de ensayo, la información que se tratará en cada grupo es la siguiente:

- carga última
- carga- deformación
- carga-deformación

De esta manera se analizará cada información obtenida.

### 4.1 Grupo 1

El grupo 1 se compone de 4 vigas, 3 de ellas armadas con FRP: 2V13, 2T13a, 2T13b; y una viga de control armada con acero 4 A10.

Carga última

Tabla 23. Carga última del grupo 1

Viga	Fcm a 28 días (MPa)	Carga última (kN)	Predicción de carga última (kN)	Modo de fallo
4A10	51,7	49,08	52,31	Fallo hormigón
2V13	42,0	56,34	44,18	Fallo hormigón
2T13a	42,0	35,49	46,10	Fallo hormigón
2T13b	42,0	34,46	46,10	Fallo hormigón

La carga última se obtiene por cada viga, así como su predicción considerando el canto útil real, medido en el laboratorio después de romper las vigas.

Como se puede ver en la Tabla 23, la viga de control 4A10 tiene una carga última similar a la carga calculado con los modelos de diseño, en cambio la viga de Vinyl Ester, tienen carga última superior a la predicción, esto puede darse a que los modelos de diseño no son tan acurdados y al existir una mayor incertidumbre dan valores más conservadores.

Donde sí parece haber una diferencia sustancia es en el caso de las vigas con resina termoplástica, ya que se puede observar una carga última inferior a la hallada con modelos.

## Carga – Desplazamientos

En este apartado se analizará el comportamiento de la flecha de cada viga respecto a la carga. Primero se analiza cada viga por partes, seguido de una comparación de los resultados.

### Viga 4A10

Se trata de una viga armada con armadura de acero, de un diámetro de 10 mm cada barra. En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 77 y Figura 78:

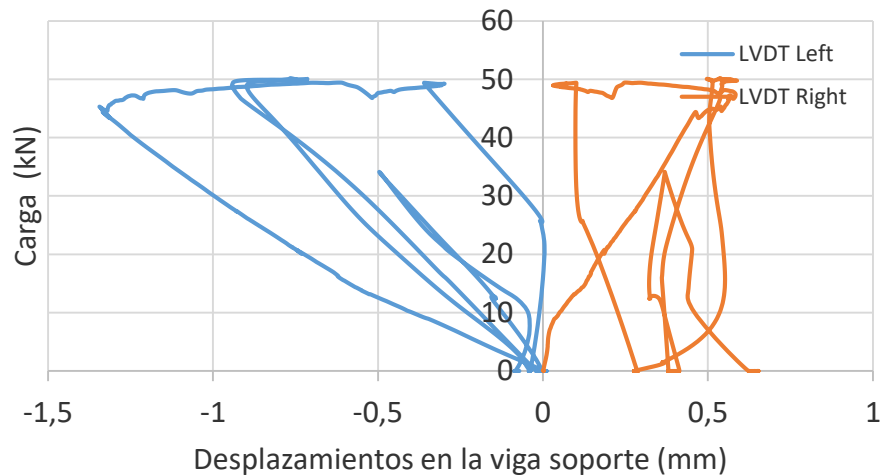


Figura 77. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 4A10.



Figura 78. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 4A10.

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada. Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 150 - (-0,25) = 150,25 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más el desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 150,25mm.

Viga 2V13

Se trata de una viga armada con armadura FRP de resina termoestable, de un diámetro de 12,7mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 79 y Figura 80:

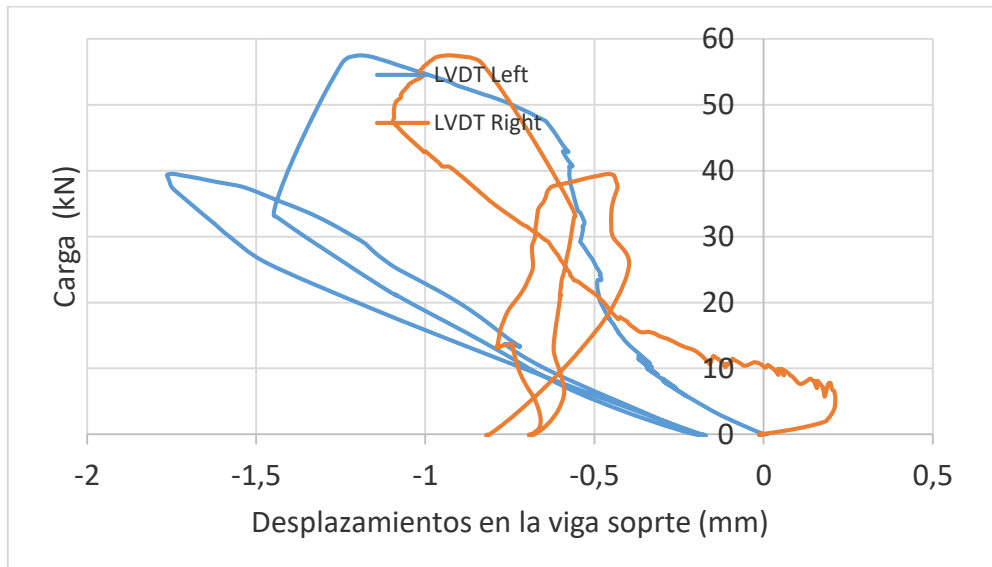


Figura 79. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2V13..

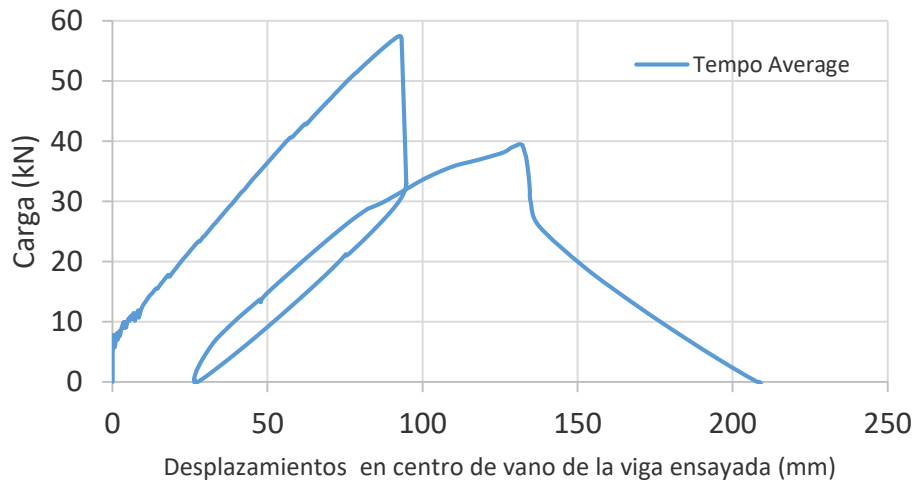


Figura 80. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2V13.

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 85,6 - (-1,00) = 86,6 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más la desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 84,6mm.

Viga 2T13A

Se trata de una viga armada con armadura FRP de resina termoplástica, de un diámetro de 12,7mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado en el apartado de instrumentación, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 81 y Figura 82:

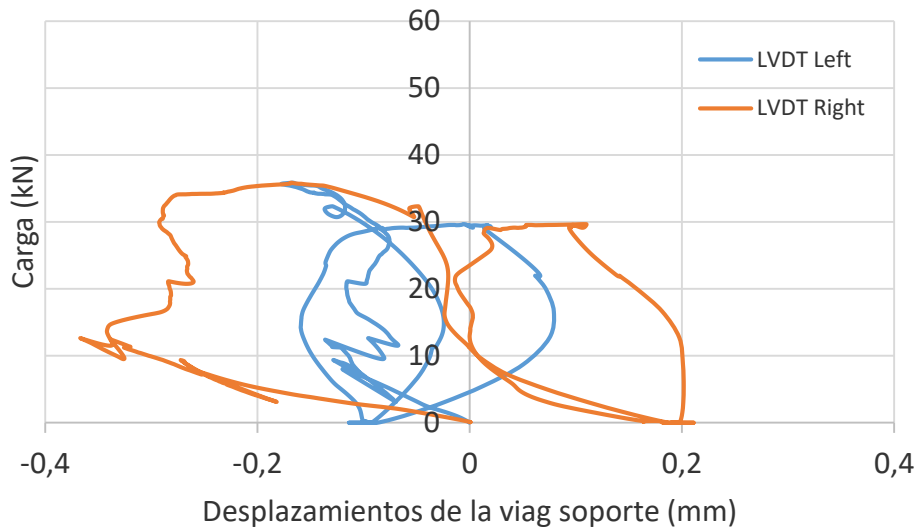


Figura 81. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2T13a

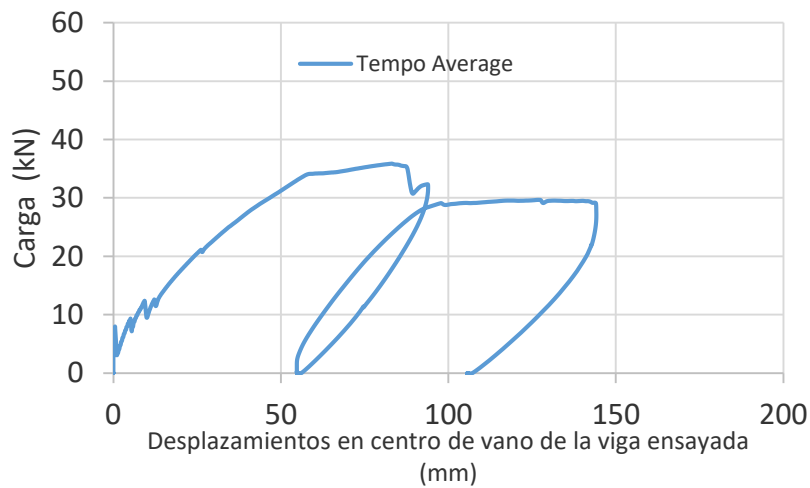


Figura 82. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2T13a.

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 72,5 - (-0,75) = 71,75mm$$



Viga 2T13B

Se trata de la segunda viga armada con armadura FRP de resina termoplástica, de un diámetro de 12,7mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 83 y Figura 84:

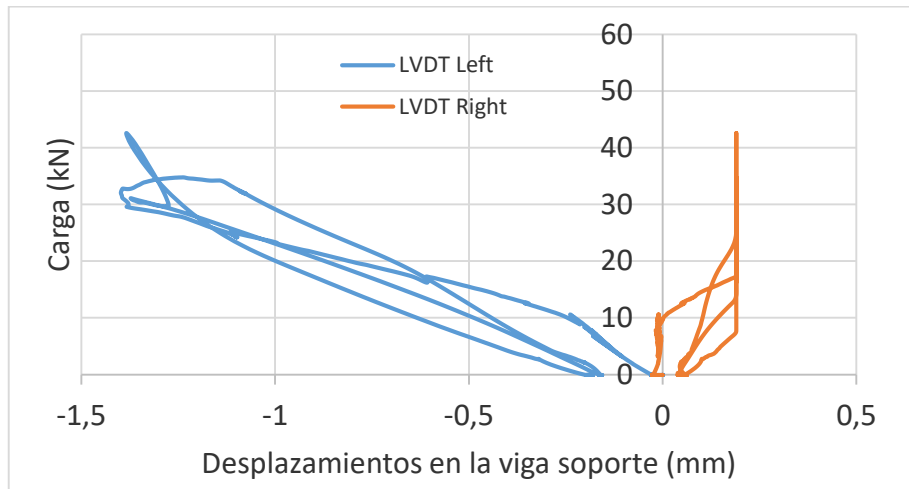


Figura 83. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 2T13b

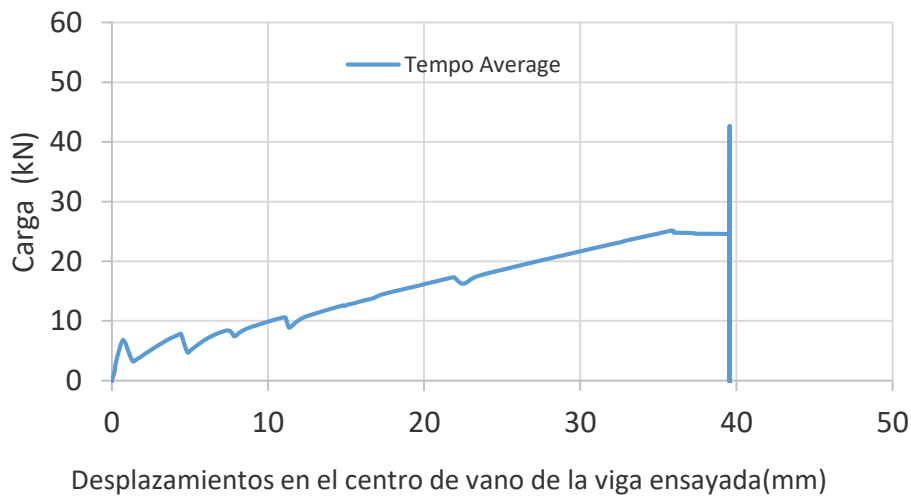


Figura 84. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 2T13b.

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 49,95 - (-1,35) = 51,3mm$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más la desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 51,33 mm.

### Comparación de la carga-desplazamientos

Primero se considera solo el primer ciclo, para poder analizar mejor los resultados hasta carga última:

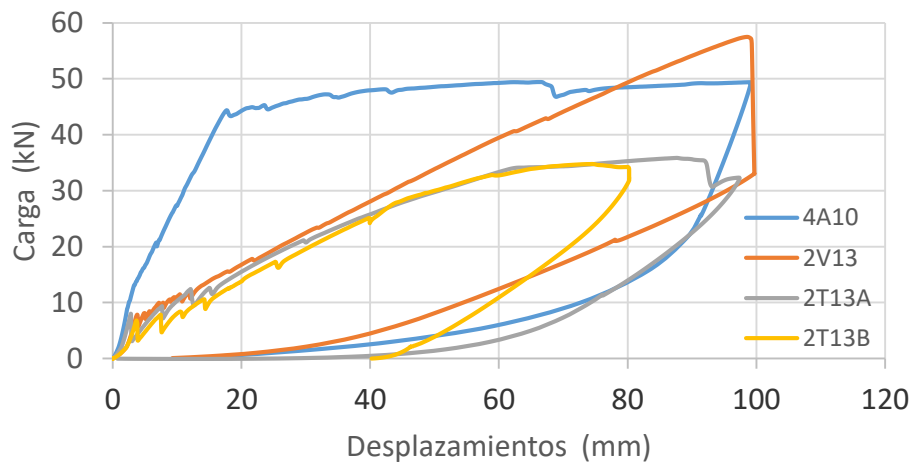


Figura 85. Gráfica carga-desplazamientos primer ciclo. Grupo 1.

En cuanto a la viga de control 4A10 se puede observar en la Figura 85, un comportamiento elástico-lineal hasta los 10kN aproximadamente, seguida de una rama lineal hasta los 45kN aproximadamente, y después una plastificación hasta carga última; un comportamiento esperable del acero.

En cuanto a la viga de Vinyl Ester 2V13 se puede ver un comportamiento elástico-lineal hasta los 10kN, seguido por un comportamiento lineal hasta la falla, propio de un material elástico como las barras FRP.

En cuanto a las vigas con resina termoplástica 2T13a y 2T13b se puede ver un comportamiento no lineal, las líneas que se aprecian en la gráfica no son rectas y a partir de los 32kN aproximadamente se puede ver un comportamiento “plástico”. Esto puede ser por tres motivos: plastificación del hormigón, plastificación de las barras o fallo en la adherencia. Plastificación del hormigón no puede ser debido a que no coinciden los órdenes de magnitud de desplazamiento del hormigón con el desplazamiento que se ha obtenido en el experimento. Plastificación de las barras no puede ser, debido que los estudios del material lo caracterizan como un material elástico sin comportamiento plástico. Por consecuencia, ha de ser fallo en la adherencia.

En el siguiente ciclo podemos ver en la Figura 86:

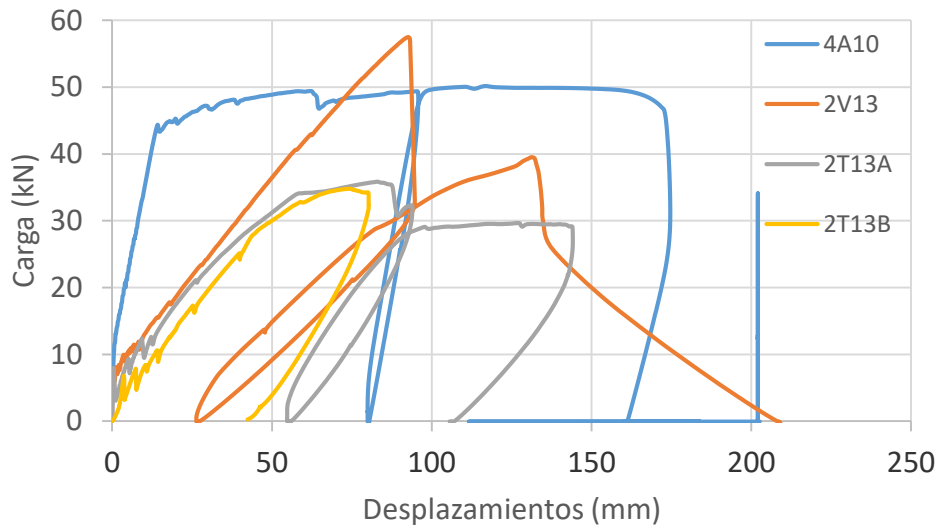


Figura 86. Gráfica carga-desplazamientos. Grupo 1.

En el siguiente ciclo, se puede observar que la viga de control 4A10, ver en la Figura 87, sigue teniendo un comportamiento esperado, mantiene el desplazamiento plástico y vuelve a entrar en un desplazamiento lineal, seguida de una rama plástica.

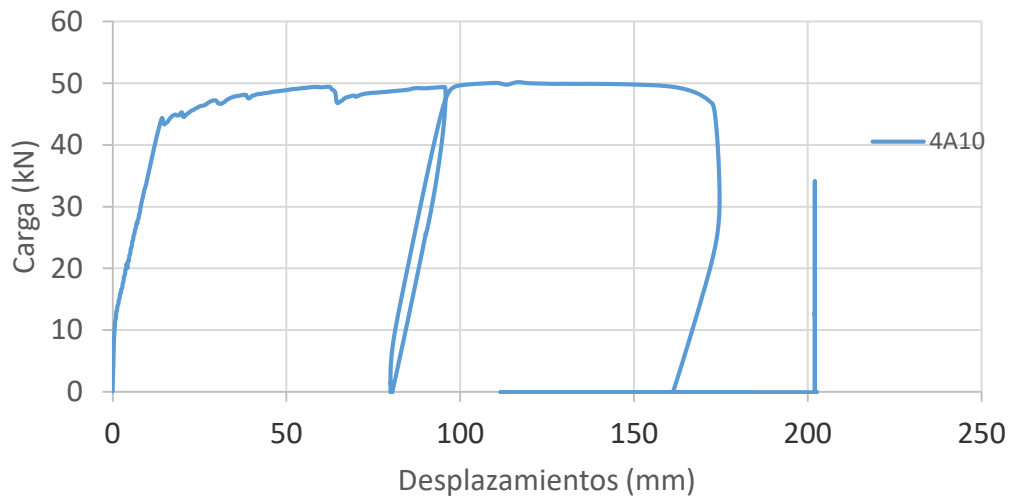


Figura 87. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 4A10, Grupo 1.

En el caso de la viga 2V13 se puede apreciar una desplazamiento irreversible al inicio del segundo ciclo de carga, asociada una desplazamiento remanente en hormigón, seguida de una rama lineal, con menor inclinación debido a la plasticidad del hormigón. Véase Figura 88:

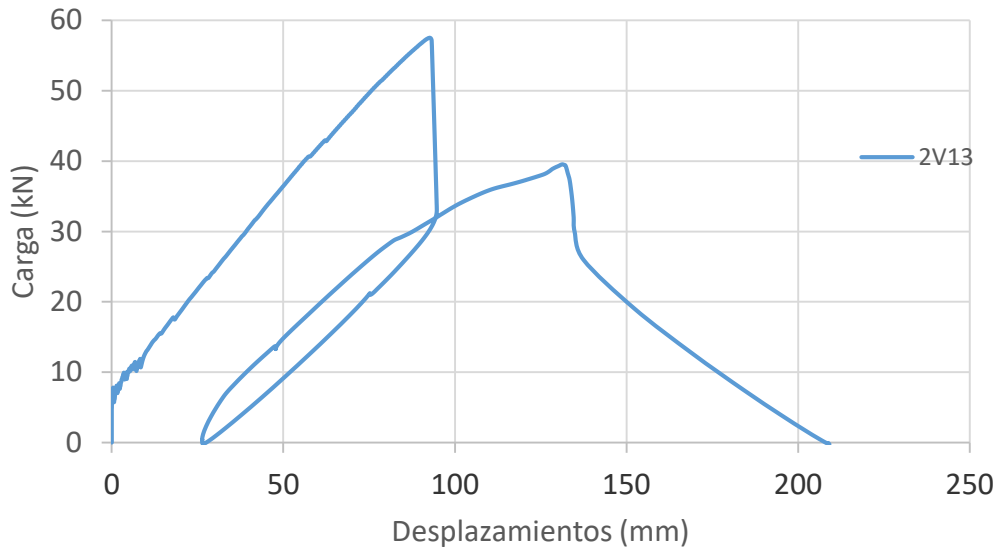


Figura 88. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 2V13, Grupo 1.

En el caso de las vigas con resina termoplástica, podemos ver un comportamiento no lineal, en ambos casos que se repite en el segundo ciclo solo en la viga 2T13a, véase Figura 89:

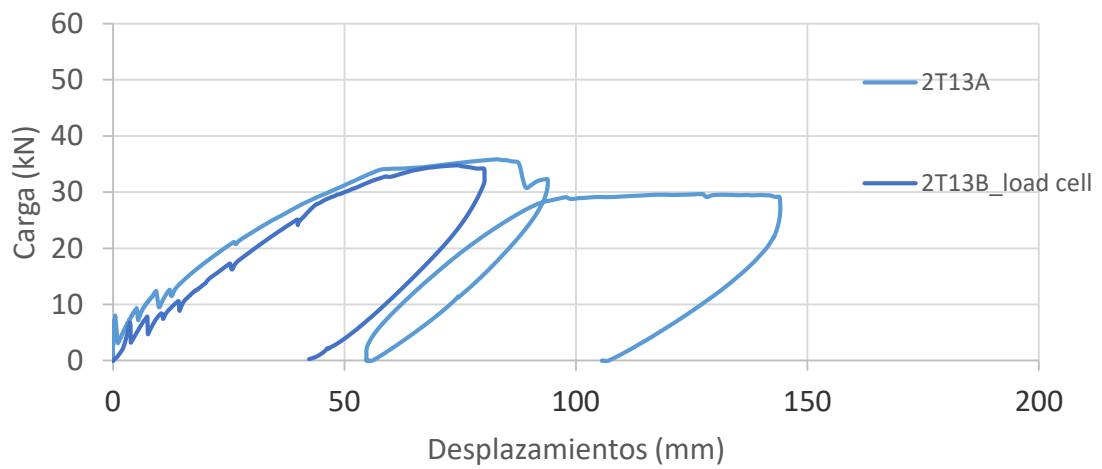


Figura 89. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 2T13A y 2T13B, Grupo 1.

En cuanto a la flecha en la carga máxima de las vigas tenemos la siguiente Tabla 24, resumen:

<b>Viga</b>	<b>Flecha en centro de vano, mayor carga (mm)</b>
4A10	150,25
2V13	86,6
2T13a	71,75
2T13b	51,33

*Tabla 24. Flechas en carga máxima. Grupo 1*

Se puede observar una diferencia en cuanto a las vigas armadas con FRP y la viga de control, armada con acero. Hay una diferencia menos notoria a lo que refiere la flecha entre las vigas armadas con barras con resina termoplástica y termoestables.

### Carga – Deformaciones

La carga la podemos relacionar con las deformaciones medido por las galgas, primero se analizará cada viga por separado seguidamente se comprarán los resultados:

#### Viga 4A10

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, en la viga de control, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 90 y Figura 91:

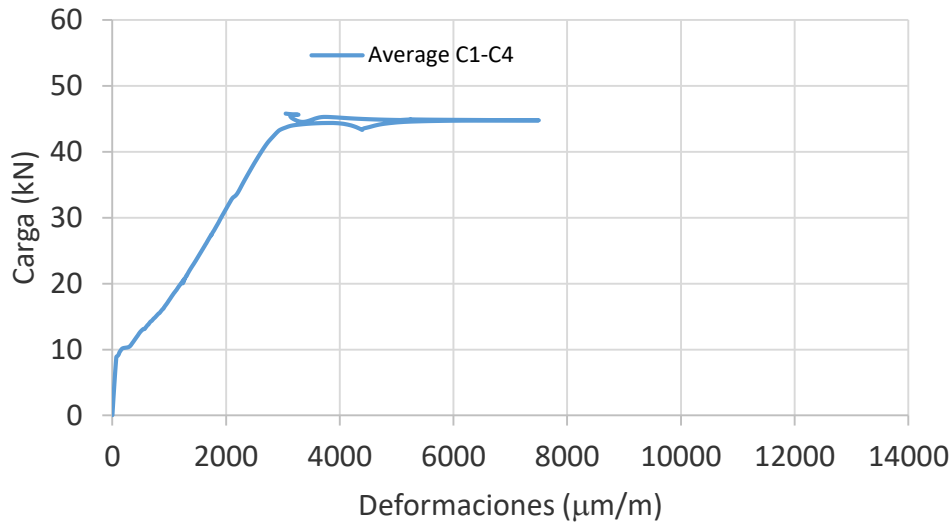


Figura 90. Grafica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 4A10

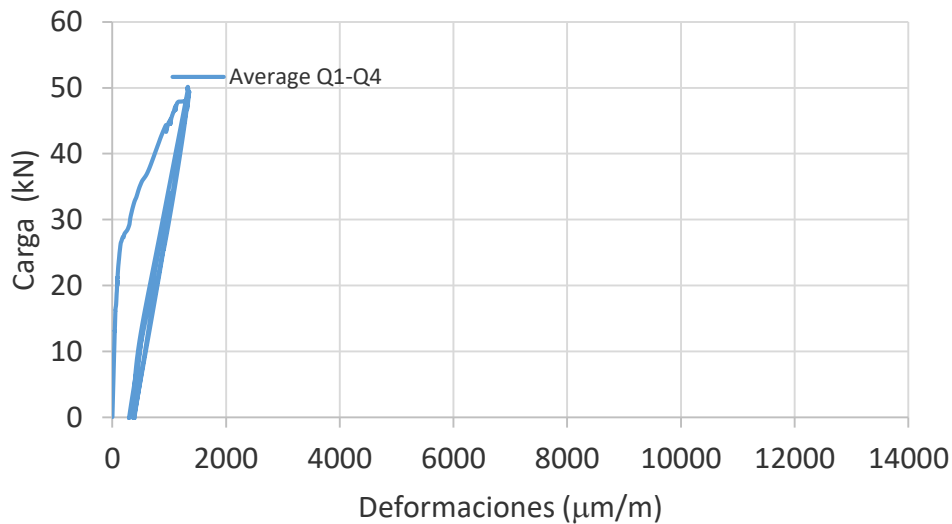


Figura 91. Grafica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 4A10

Lo primero se puede observar que, si existe un menor deformaciones registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre las deformaciones máximas del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{1570}{7890} = 0,199$$



Viga 2V13

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 92 y Figura 93:

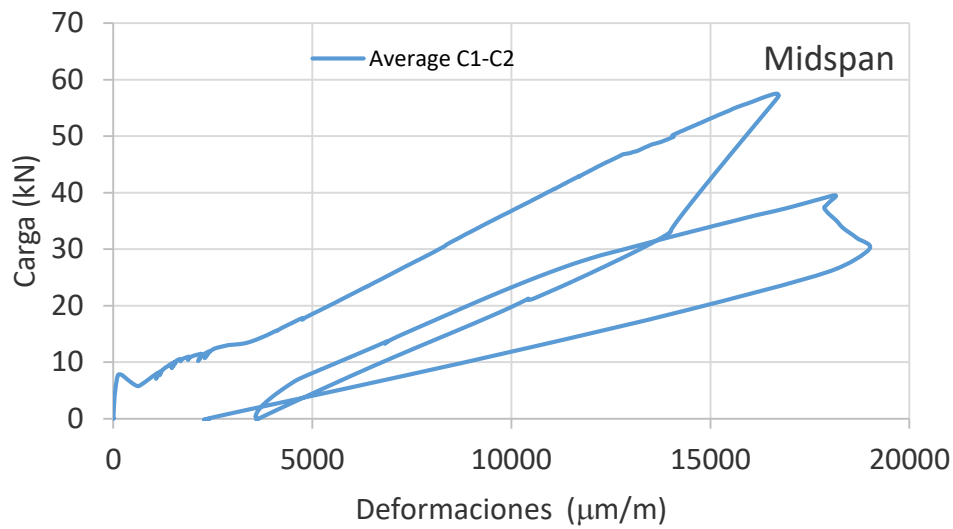


Figura 92. Gráfica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 2V13

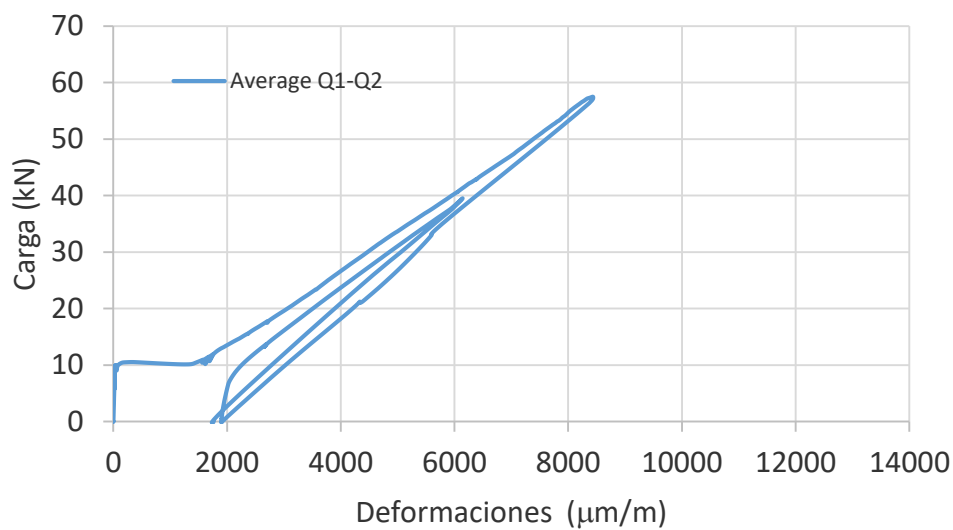


Figura 93. Gráfica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 2V13.

Lo primero se puede observar que, si existe un menor deformaciones registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre las deformaciones máximas del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{1667}{8195} = 0,20$$

Viga 2T13A

En cuanto los resultados obtenidos por las **galgas**, tenemos las siguientes gráficas, véase Figura 94 y Figura 95:

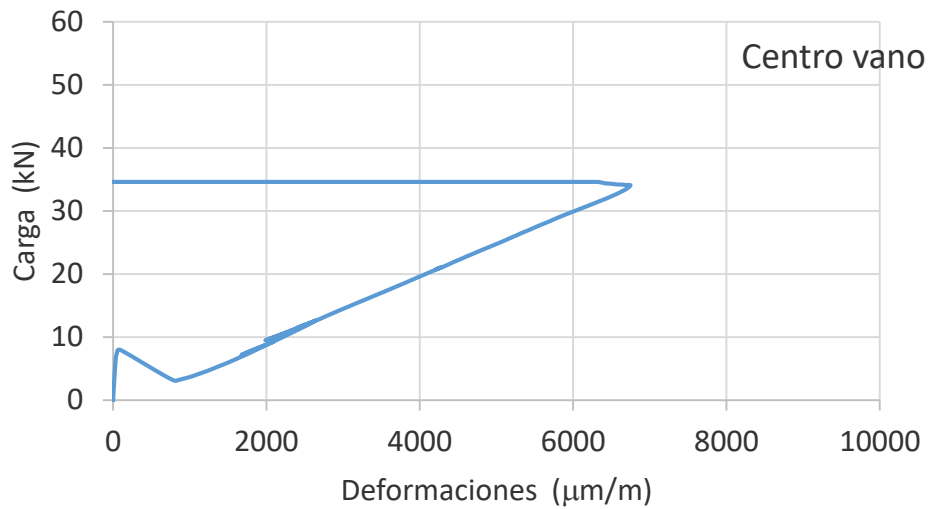


Figura 94. Gráfica deformaciones-carga de la galga. En centro de vano. Viga 2T13a

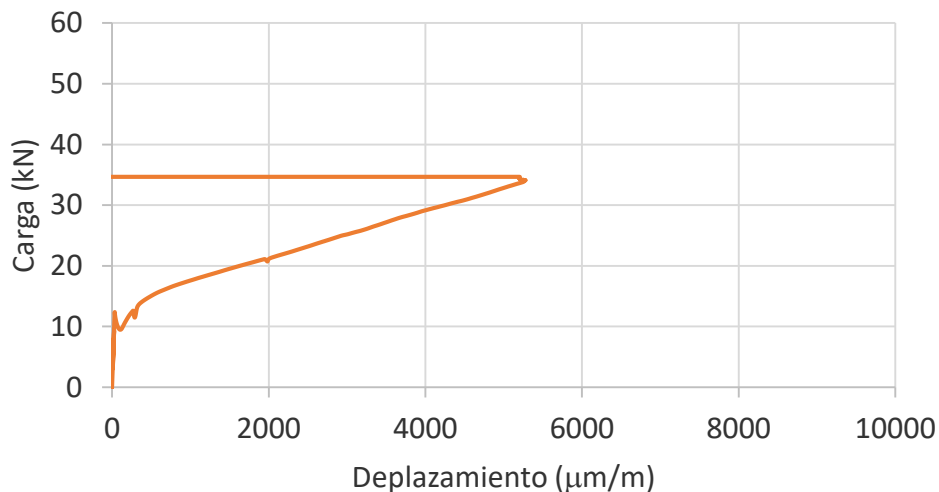


Figura 95. Gráfica deformaciones-carga de la galga. Cuarto de luz. Viga 2T13a

Lo primero se puede observar que, si existe un menor deformaciones registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre las deformaciones máximas del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{5200}{7850} = 0,66$$

Viga 2T13B

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 96 y Figura 97:

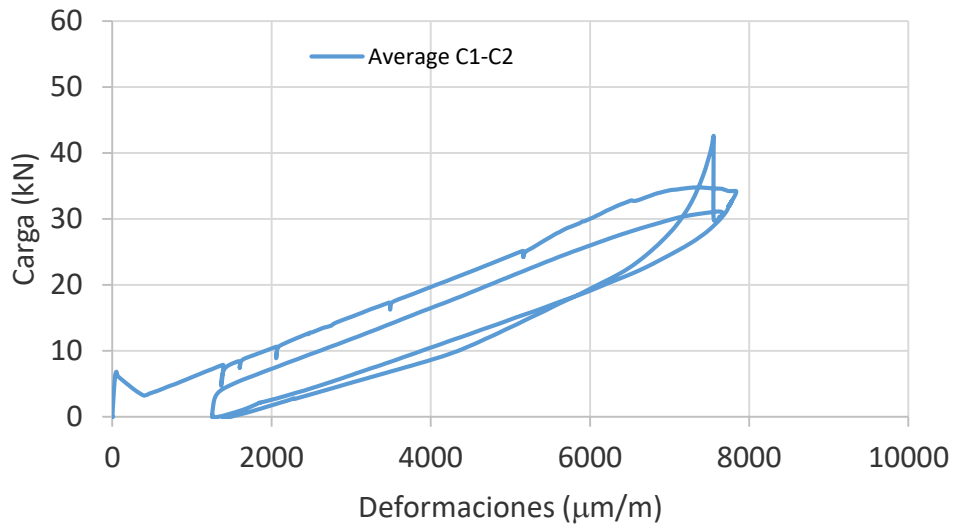


Figura 96. Gráfica deformaciones-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 2T13b

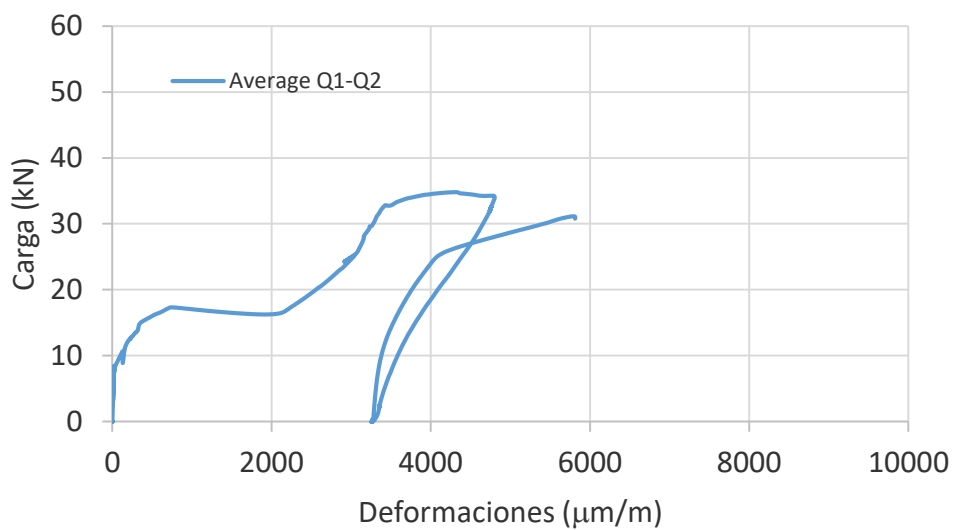


Figura 97. Gráfica deformaciones-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 2T13b.

Lo primero se puede observar que, si existe un menor deformaciones registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre las deformaciones máximas del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{4900}{7950} = 0,62$$

*Comparación de la carga-deformaciones*

Para poder comparar las deformaciones de las galgas utilizamos las relaciones entre las galgas a  $\frac{1}{4}$  del vano y a  $\frac{1}{2}$  del vano, la tabla resume los valores hallados, véase Tabla 25:

**Viga**

**Relación deformaciones entre galgas**

4A10	0,199
2V13	0,204
2T13a	0,663
2T13b	0,6164

Tabla 25. Resumen deformaciones Galgas. Grupo 1.

Se puede observar una diferencia de las vigas armadas con barras FRP con resina termoplásticas y las barras de resina termoestables y barras de acero. Para ver en mayor detalle los resultados ver las siguientes Figura 98:

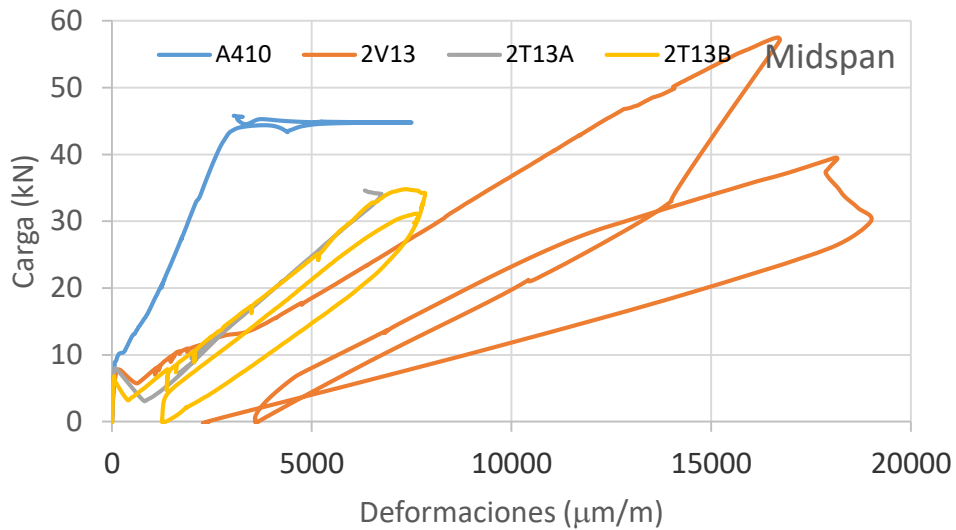


Figura 98. Grafica carga-deformaciones a  $\frac{1}{2}$  de vano. Grupo 1.

En a la Figura 98, se puede observar una deformación menor en las galgas de la viga de control, armada con acero; seguidamente de las vigas armadas con FRP resina termoplástica, siendo la viga armada con FRP resina termoestable la que mayor deformaciones presenta, en la zona de centro de vano.

En cuanto a las deformaciones a  $\frac{1}{4}$  del vano, se puede observar en la Figura 99:

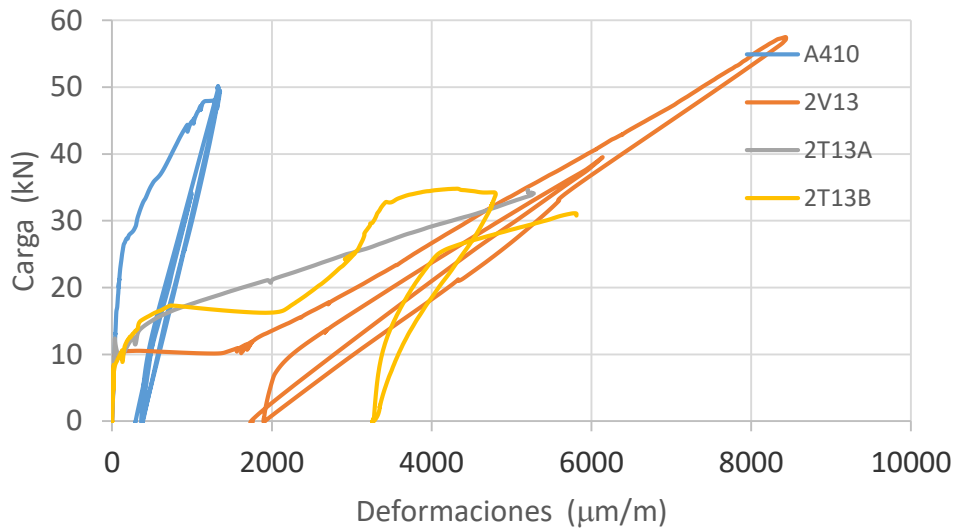


Figura 99. Gráfica carga-deformaciones  $\frac{1}{4}$  de vano. Grupo 1.

En la gráfica se puede observar que se mantiene el patrón, la viga de control es la que menor deformaciones presenta, seguida por las vigas armadas con FRP resina termoplástica, seguidas por la viga armada con FRP resina termoestable.

## 4.2 Grupo 2

El grupo 2 se compone de 4 vigas, todas de ellas armadas con FRP: 5V10, 3V13, 3T13A, 3T13B.

En este caso las vigas de control, son aquellas con resina termoestable, ya que se conoce mejor su funcionamiento estructural y características.

### Carga última

En la Tabla 26, se muestra la carga última obtenida por cada viga, así como su predicción considerando el canto útil real, medido en el laboratorio después de romper las vigas.

Viga	Fcm a 28 días (MPa)	Carga última (kN)	Predicción de carga última (kN)	Modo de fallo
5V10	42,0	64,23	62,63	Fallo hormigón
3V13	51,7	72,80	62,29	Fallo hormigón
3T13a	51,7	35,37	60,60	Fallo hormigón
3T13b	51,7	52,07	60,60	Fallo hormigón

Tabla 26. Carga última del grupo 2

Como se puede ver, en este caso las vigas de control: 5V10 y 3V13, han obtenido cargas últimas similares a las predicciones, en el caso de la viga 5V10 un valor un poco menor que la otra viga 3V13, también es menor la resistencia a compresión del hormigón de la viga 5V10 respecto a la viga 3V13.

En cambio, las vigas con resina termoplástica han obtenido valores por debajo de las cargas últimas previstas, en el caso de la viga 3T13a la diferencia es mayor.



### Carga – Desplazamientos

En este apartado se analizará el comportamiento de la flecha de cada viga respecto a la carga. Primero se analiza cada viga por partes, seguido de una comparación de los resultados.

#### Viga 5V10

Se trata de una viga armada con armadura de FRP de resina termoestable de un diámetro de 10 mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 100 y Figura 101:

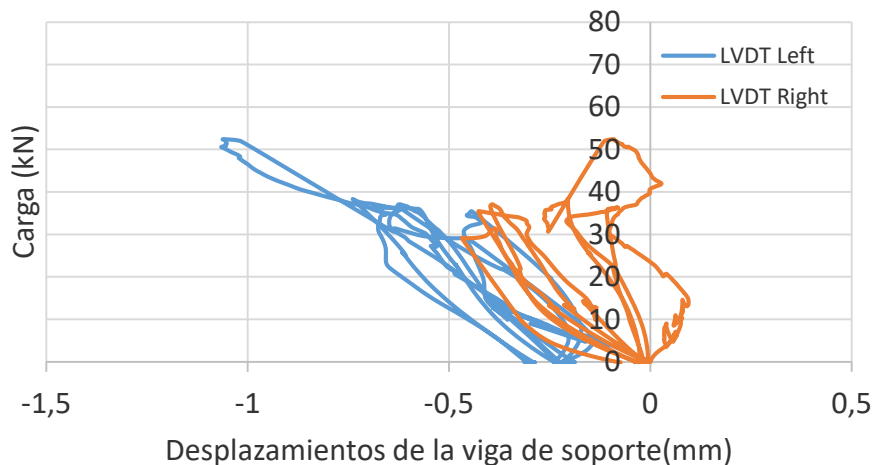


Figura 100. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 5V10



Figura 101. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 5V10

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 73,81 - (-0,65) = 74,46 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más el desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 74,46mm.

### Viga 3V13

Se trata de una viga armada con armadura de FRP de resina termoestable de un diámetro de 12,7 mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 102 y Figura 103:

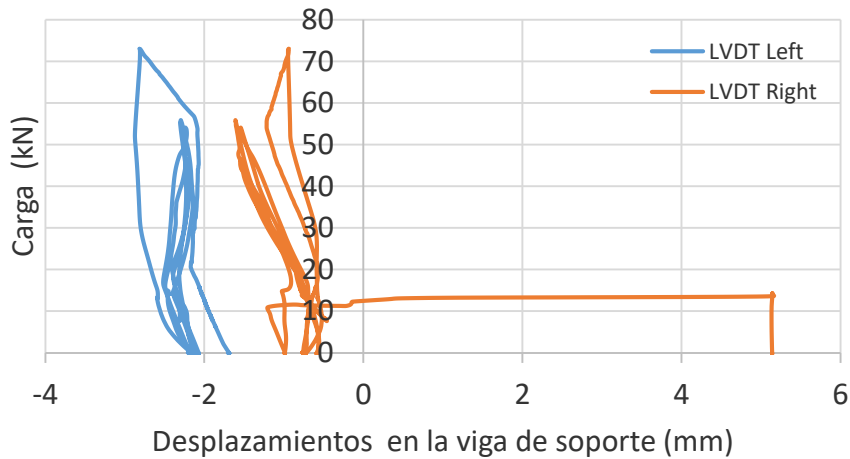


Figura 102. Gráfica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 3V13

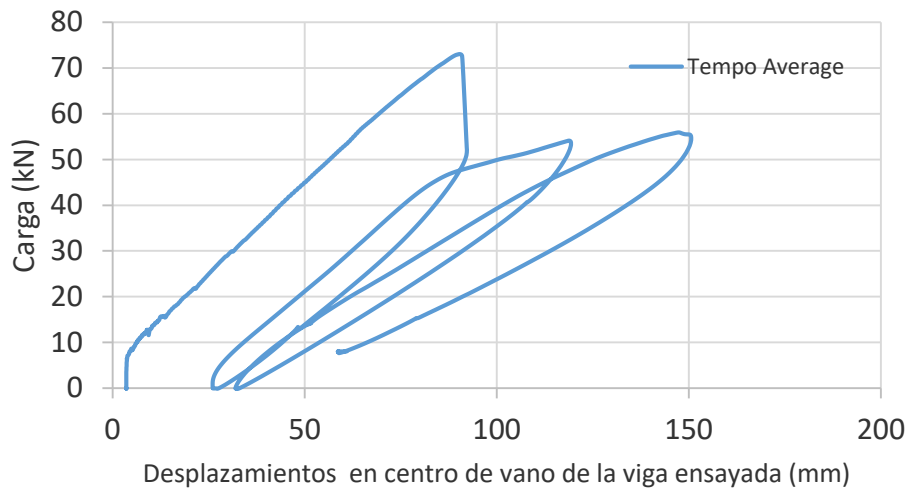


Figura 103. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3v13.

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 76 - (-1,25) = 77,25 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más el desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 77,25mm.

Viga 3T13a

Se trata de una viga armada con armadura de FRP de resina termoplásticas de un diámetro de 12,7 mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 104 y Figura 105:

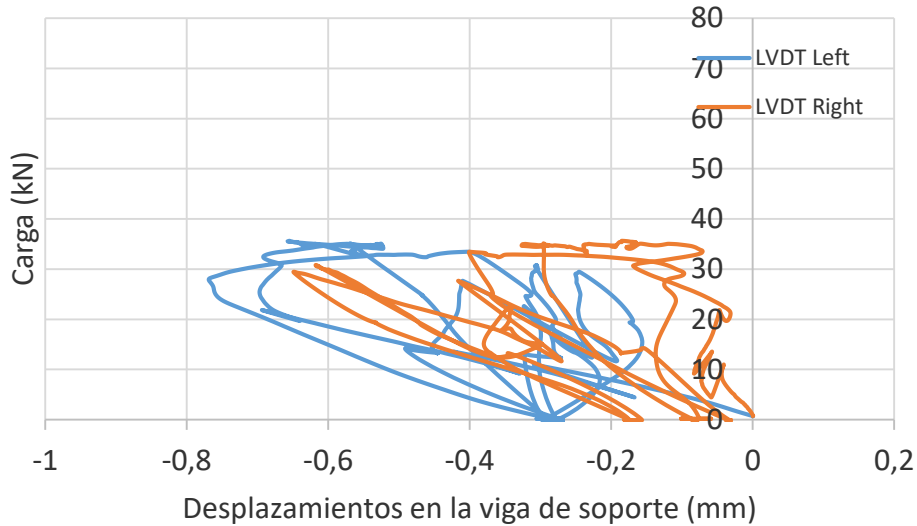


Figura 104. Grafica Desplazamientos de la viga soporte, lado derecho e izquierdo. Viga 3T13a

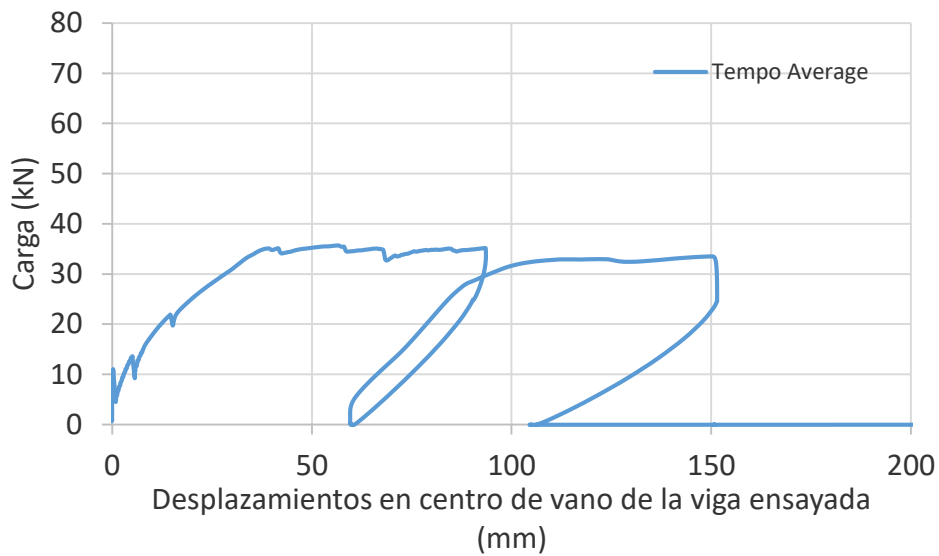


Figura 105. Grafica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3T13a

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 87 - (-0,345) = 87,345 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más el desplazamiento de la viga soporte, obtenida con los LVDT; resulta: 87,345mm

Viga 3T13b

Se trata de una viga armada con armadura de FRP de resina termoplásticas de un diámetro de 12,7 mm cada barra.

En cuanto a la **flecha de la viga**, como se ha comentado, necesitamos obtener los desplazamientos de la viga de soporte y la flecha central de viga ensayada, para así poder obtener la flecha real. Véase Figura 106 y Figura 107:

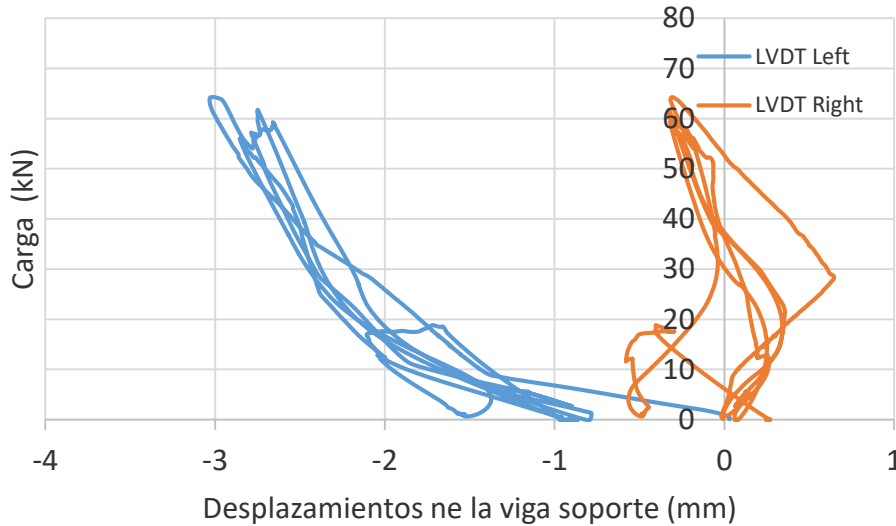


Figura 106. Gráfica Desplazamientos de la viga soportada, lado derecho e izquierdo. Viga 3T13b

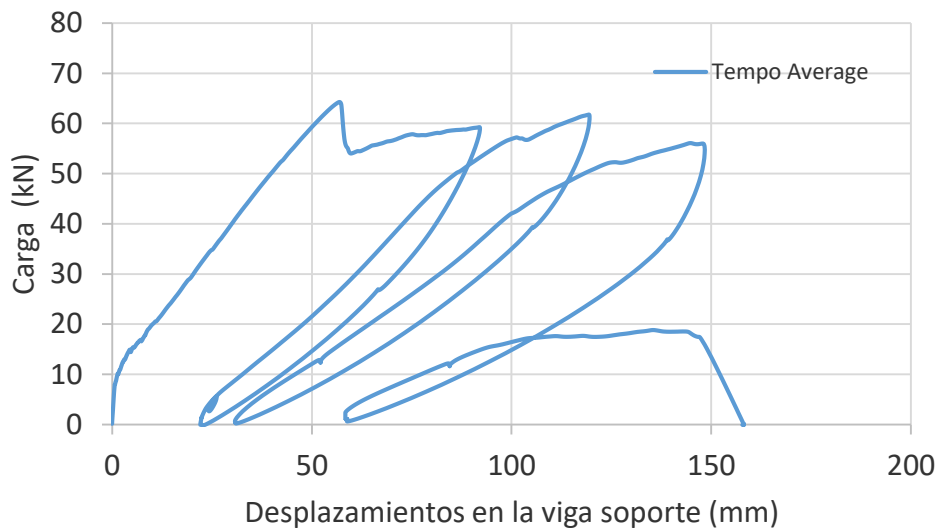


Figura 107. Gráfica Desplazamientos de la viga ensayada, en centro de vano. Viga 3T13b

Conociendo estas dos flechas se puede llegar a obtener la flecha real de la viga ensayada.

Los resultados de la flecha en la carga máxima:

$$\delta_{real} = \delta_2 - \delta_1 = 60 - (-1,5) = 61,5 \text{ mm}$$

La flecha que tomamos como real es la flecha de los tempos (la media aritmética), más la desplazamiento de la viga soportada, obtenida con los LVDT; resulta: 61,5 mm.

Comparación de la carga-desplazamientos

Primero se considera solo el primer ciclo, para poder analizar mejor los resultados hasta carga última:

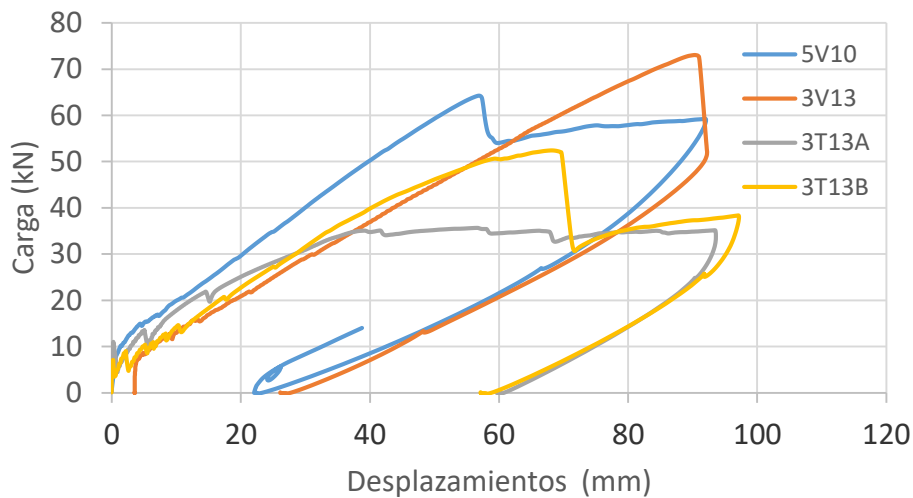


Figura 108. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Grupo 2.

En la Figura 108, se puede observar que las vigas con resina tipo termoestable (vigas 5V10 y 3V13) tienen un comportamiento elástico-lineal hasta los 10kN, seguida de una rama lineal, donde en el caso de la viga 5V10 se pierde esa linealidad, lo que parece indicar un fallo por adherencia como se había visto en el grupo 1. La diferencia de diámetro, tal y como indican el trabajo de A. Moncayo 2021, es una variable a tener en cuenta.

Como se puede observar en la Figura 109, la viga con barra de mayor diámetro tiene un comportamiento elástico-lineal hasta 10kN, seguido de una rama lineal, a diferencia de la viga con barras de menor diámetro (5V10) que su comportamiento es elástico-lineal hasta una carga aproximada de 10kN y después deja de tener un comportamiento lineal, debido a la pérdida de adherencia. Una respuesta diferente a la esperada, ya que como se había concluido en el trabajo de A. MONCAYO (2021), a menor diámetro de la barra la adherencia mejora, a diferencia de lo obtenido en estos ensayos.

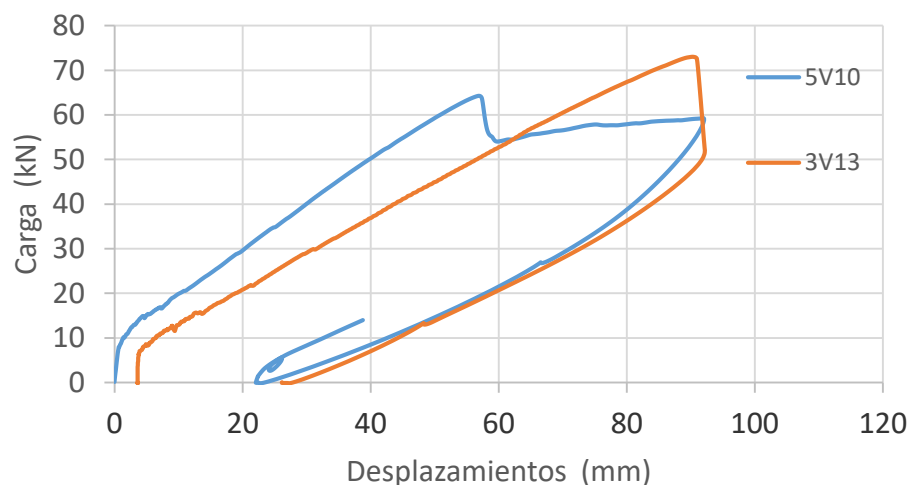


Figura 109. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Vigas 5V10 y 3V13. Grupo 2

En el caso de las barras armadas con barras con resina termoplástica, se puede observar en la Figura 110:

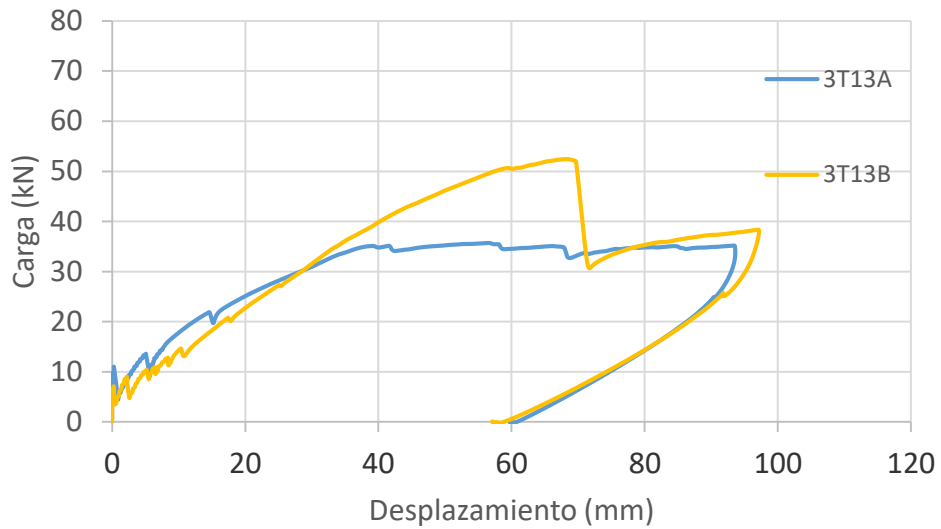


Figura 110. Gráfica carga-desplazamiento primer ciclo. Vigas 3T13a y 1T13b. Grupo 2

En esta grafica se puede observar que hay un comportamiento elástico lineal hasta los 10kN, pero la rama siguiente no tiene un comportamiento lineal, en ninguna de las vigas debido a la perdida de la adherencia.

En cuanto al análisis de los ciclos posteriores, en la Figura 111 se puede observar:

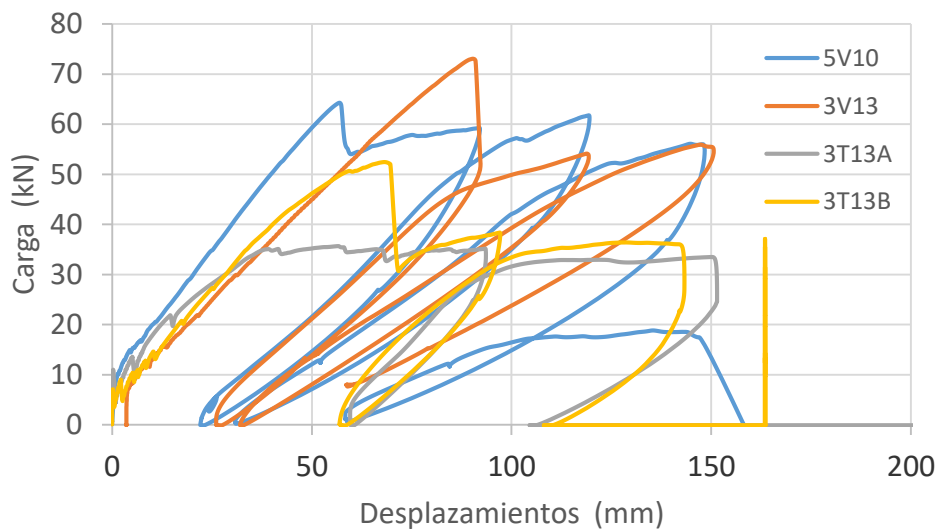


Figura 111. Gráfica carga-desplazamientos. Grupo 2

En esta figura se mantiene la no linealidad de las vigas con resina termoplástica y el desplazamiento permanente debido a la perdida de adherencia.



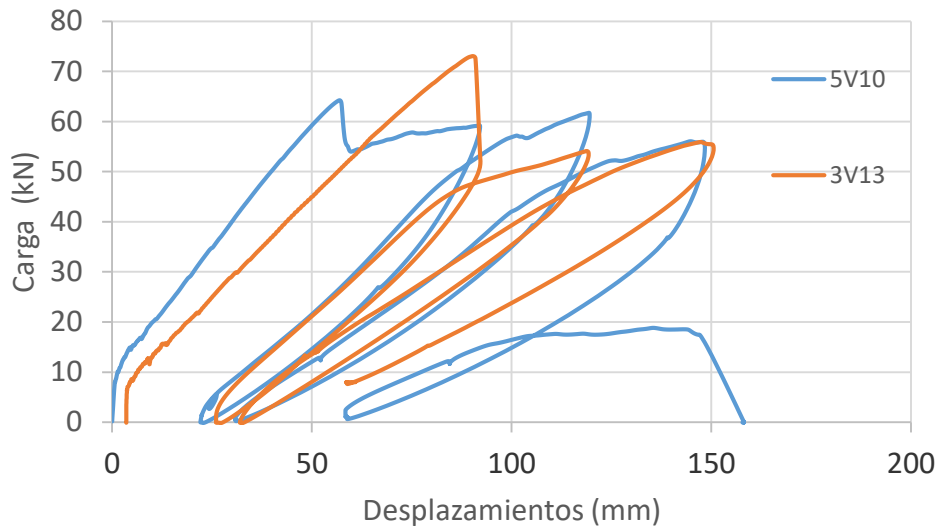


Figura 112. Gráfica carga-desplazamientos. Viga 5V10 y 3V13. Grupo 2

Como se puede apreciar en la Figura 112, las vigas con armaduras de resina termoestable, tienen desplazamientos permanente similares y parecen tener comportamientos elástico-lineales similares, en el caso de la viga 3V13 fisura antes ya que la carga hasta la que llega esa rama elástico- lineal es un poco menor.

En cuanto a la flecha en la carga máxima de las vigas tenemos la siguiente tabla resumen en la Tabla 27:

Vigas	Flecha en centro de vano
<b>3V13</b>	77,25 mm
<b>5V10</b>	74,46 mm
<b>3T13a</b>	87,345 mm
<b>3T13b</b>	61,5 mm

Tabla 27. Resumen de los valores de Flecha. Grupo 2

No se puede observar una relación consistente en cuanto a los valores obtenidos de las flechas con los diferentes tipos de armaduras de las vigas.

### Carga – Deformaciones

La carga la podemos relacionar con la deformación medido por las galgas, primero se analizará cada viga por separado seguidamente se compararán los resultados:

#### Viga 5V10

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 113 y Figura 114:

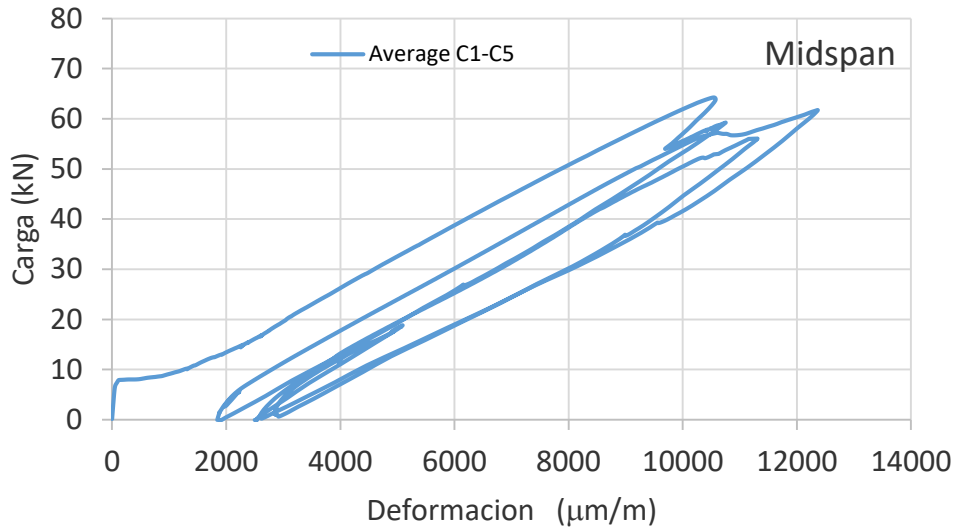


Figura 113. Grafica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 5V10

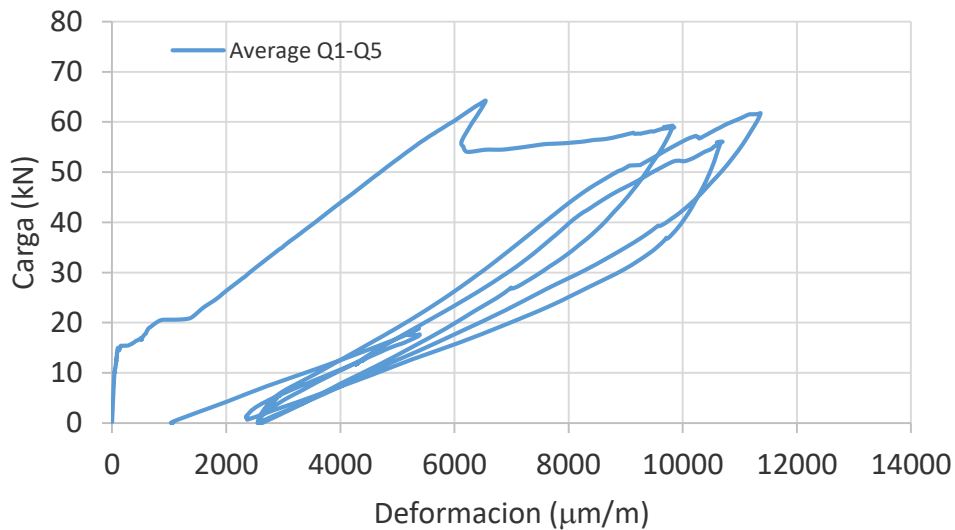


Figura 114. Grafica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 5V10

Lo primero se puede observar que, si existe una menor elongación registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre la elongación máxima del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{9300}{10571,43} = 0,879$$

Viga 3V13

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 115 y Figura 116:

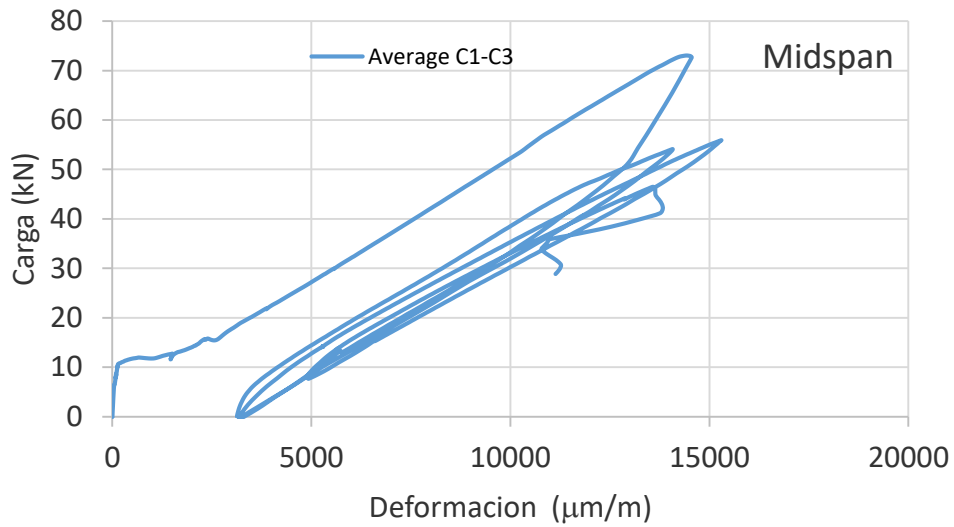


Figura 115. Gráfica deformación -carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3V13

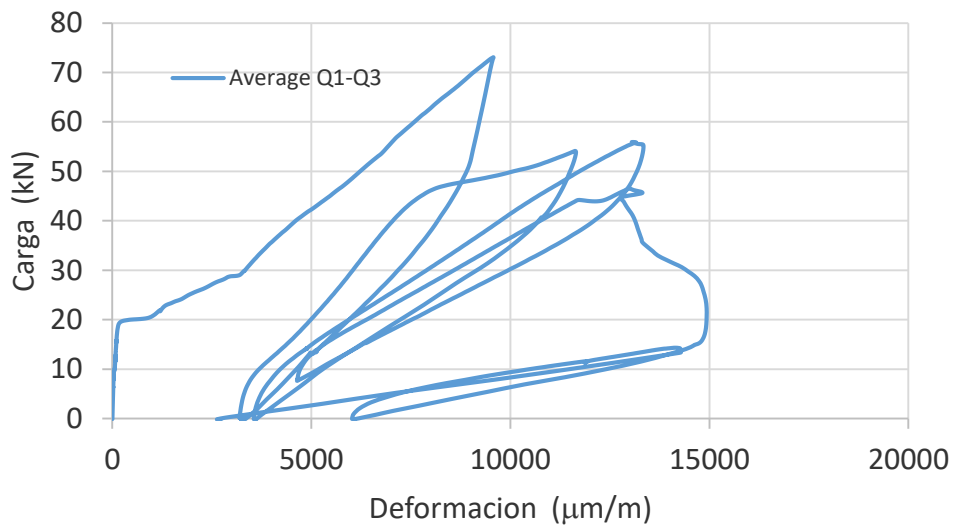


Figura 116. Gráfica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3V13

Lo primero se puede observar que, si existe una menor elongación registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre la elongación máxima del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{9500}{1370} = 0,70$$

Viga 3T13a

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 117 y Figura 118:

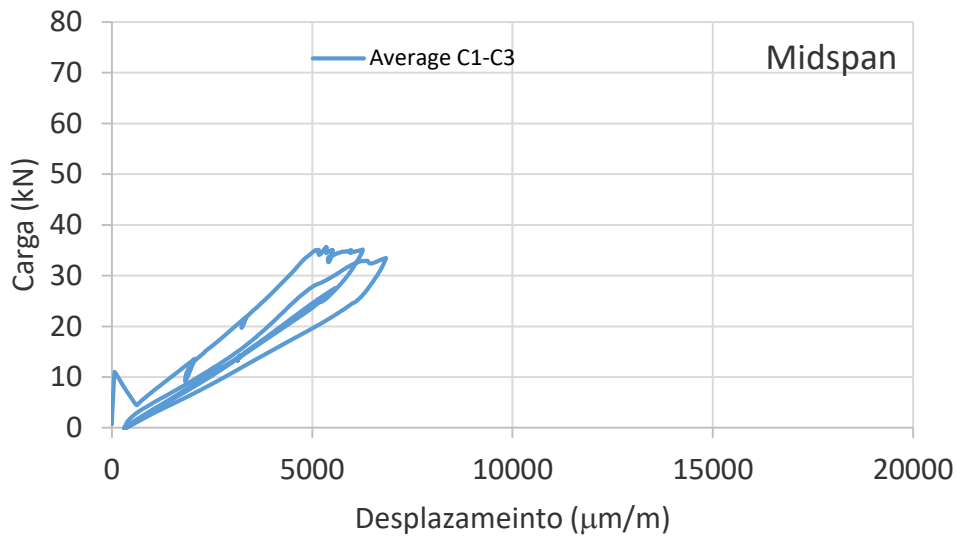


Figura 117. Gráfica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3T13a

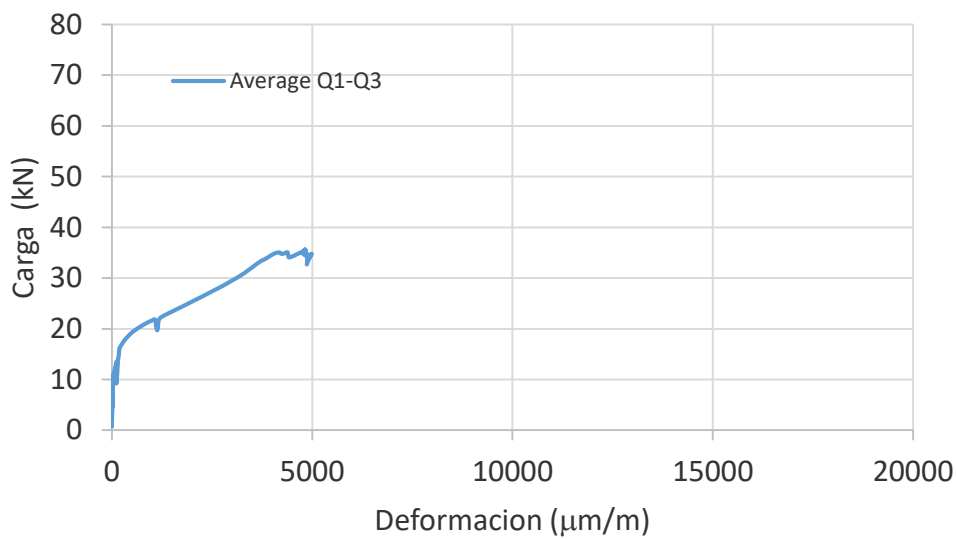


Figura 118. Gráfica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3T13a

Lo primero se puede observar que, si existe una menor elongación registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre la elongación máxima del punto  $\frac{1}{2}l$  y el punto  $\frac{1}{4}l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4}l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2}l} = \frac{4998}{6970} = 0,72$$

Viga 3T13b

Se trata de una viga armada con armadura de FRP de resina termoplásticas de un diámetro de 12,7 mm cada barra.

En cuanto los resultados obtenidos por **las galgas**, tenemos las siguientes gráficas, en este caso las 3 galgas funcionaron obteniendo, véase Figura 119 y Figura 120:

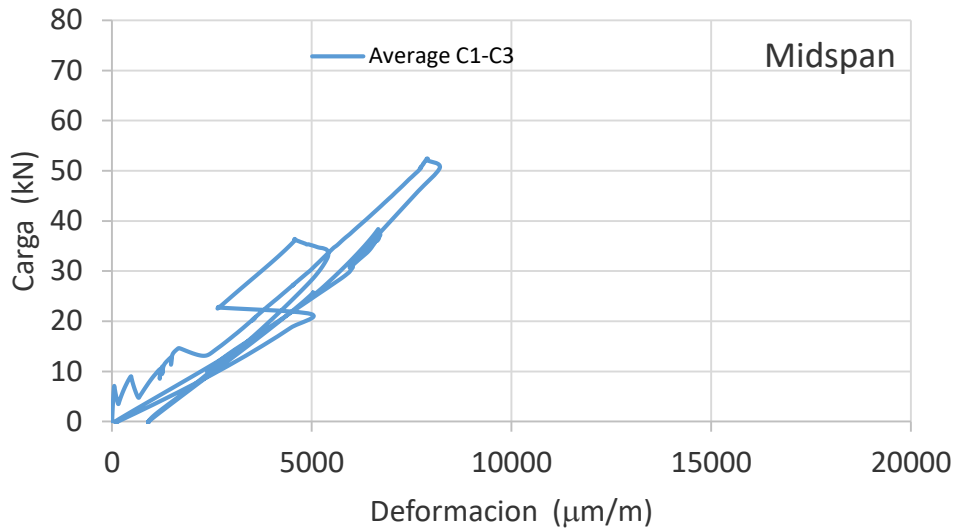


Figura 119. Gráfica deformación-carga de las galgas. En centro de vano. Viga 3T13a

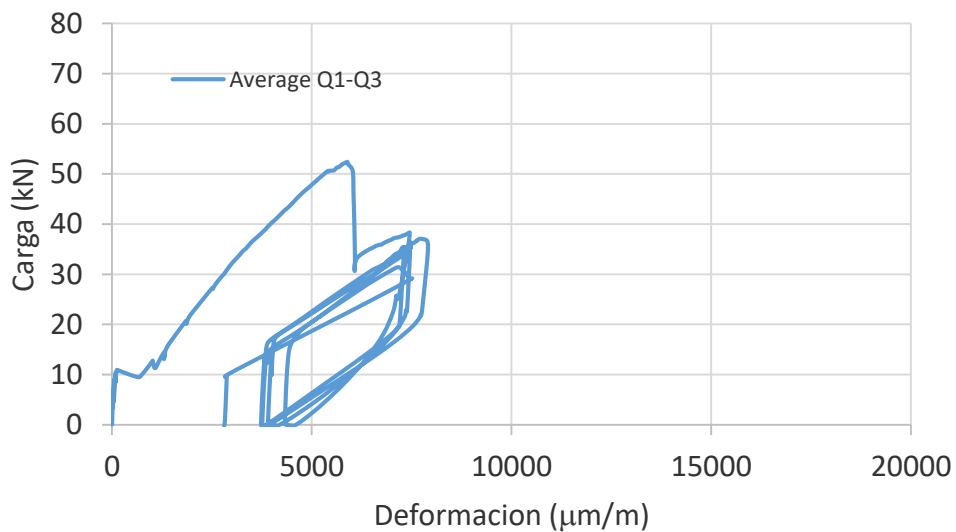


Figura 120. Gráfica deformación-carga de las galgas. Cuarto de luz. Viga 3T13a

Lo primero se puede observar que, si existe una menor elongación registradas por las galgas a  $\frac{1}{4}$  de la luz, que por las galgas situadas en el centro de vano. La relación que hay entre la elongación máxima del punto  $\frac{1}{2} l$  y el punto  $\frac{1}{4} l$  es:

$$\frac{\text{elongación máxima en } \frac{1}{4} l}{\text{elongación máxima en } \frac{1}{2} l} = \frac{6010}{7680} = 0,78$$

*Comparación de la carga-deformaciones*

Para poder comparar las deformaciones de las galgas utilizamos las relaciones entre las galgas a  $\frac{1}{4}$  del vano y a  $\frac{1}{2}$  del vano, la tabla resume los valores hallados, ver Tabla 28:

Viga	Relación deformación entre galgas
5V10	0,879
3V13	0,70
3T13a	0,72
3T13b	0,78

Tabla 28. Resumen deformación Galgas. Grupo 2.

No se puede observar una diferencia de las vigas armadas con barras FRP con resina termoplásticas y las barras de resina termoestables y barras de acero. Para ver en mayor detalle los resultados ver las siguientes Figura 121:

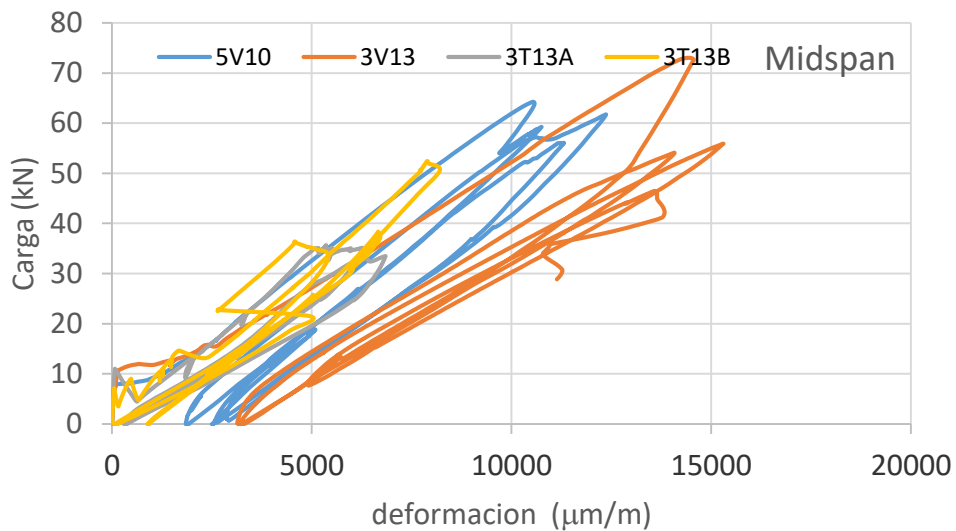


Figura 121. Grafica carga-deformación  $\frac{1}{2}$  de vano. Grupo 2.

En a la Figura 121, se puede observar que la viga con mayores deformaciones es la viga 3V13, seguida de la viga 5V13, ambas con resina termoestable; seguidas por la viga 3T13a y la viga 3T13b fabricadas con resina termoplásticas.



En cuanto a las deformaciones a  $\frac{1}{4}$  del vano, se puede observar en la Figura 122:

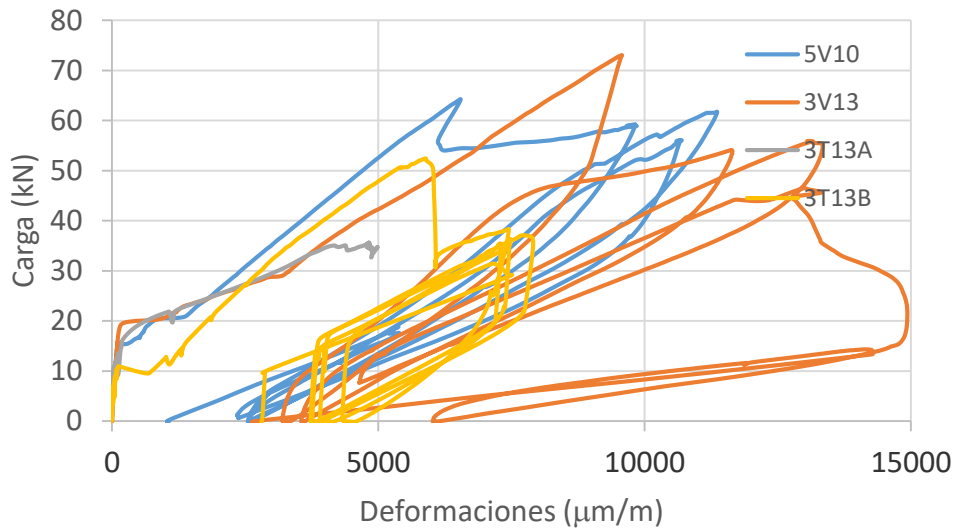


Figura 122. Gráfica carga-deformación  $\frac{1}{4}$  de vano. Grupo 2.

En la gráfica se puede observar que se mantiene el patrón, las vigas de control es la que mayor deformación presentan, seguida por las vigas armadas con FRP resina termoplásticas.

### 4.3 Conclusiones de los resultados

En resumen, se ha podido observar que el comportamiento de la viga armada con acero, la viga de control del grupo 1, ha sido esperable, aunque no han aparecido fisuras de cortante.

En cuanto a las vigas armadas con resina termoestables, se han visto mayor cantidad de fisuras que respecto a las vigas termoplásticas, como indica el trabajo de H.SAADATMANESH y M.R.EHSANI (1991), es debido a una mejor adherencia. En cuanto a la adherencia, en el trabajo de A. MONCAYO (2021), se concluya que el diámetro afecta a esta de manera inversa, a menor diámetro mayor adherencia, en el caso de las vigas 5V10 y 3V13 se ha podido observar que la viga con menor diámetro daba resultados que indicaban una menor adherencia, al contrario que los estudios de adherencia de A. MONCAYO (2021). También destaca que las cargas últimas obtenidas en las vigas termoestables se encontraban en entornos superiores a las calculadas por programas no lineales.

En cuanto a las vigas armadas con resina termoplástica, presentan problemas en la adherencia, que se ha podido observar por la falta de fisuras, comparadas con las vigas de control, en ambos grupos; así como por las gráficas carga-deformación y carga-desplazamiento. Los valores obtenidos de carga última se encuentran en entornos inferiores a las calculadas por programas lineales, también cabe destacar las diferencias entre los resultados obtenidos en las vigas armadas con esta resina termoplástica, tanto en carga última como las gráficas carga-deformación y carga-desplazamiento.

## 5. Conclusiones

El uso de barras FRP como armadura activa o pasiva en elementos estructurales, es muy reciente y posee varias ventajas; como las propiedades químicas, por la cuales no se ve afectado por la corrosión, así como las propiedades mecánicas con una resistencia a tracción mayor que el acero, pero con un módulo de elasticidad incluso cuatro veces inferior en función del tipo de fibras.

También el uso de barras termoplásticas es novedoso, ya que no está todavía en el mercado, y aporta nuevas ventajas al permitir que las barras se pueden volver a transformar una vez ensambladas, así como ser recicladas después del uso.

En este documento se ha tratado las propiedades estructurales instantáneas de elementos armados con barras FRP. En relación a las propiedades estructurales de vigas, se ha podido observar que la **viga armada con acero**, como viga de control, en base a las diferencias observadas en las relaciones de carga-desplazamiento, en el centro de vano de las vigas. En la viga armada con acero se ha podido observar una rama elástica hasta que fisuran, una rama post fisurada donde disminuye la rigidez y finalmente una rama plástica o de pre-rotura una vez plastifica el acero; a diferencia de las vigas armadas con barras FRP las cuales tienen una rama elástica y una rama fisurada pero no tienen una rama plástica como se ha visto en el acero. Esto es debido a que las vigas de FRP son menos rígidas, las pendientes observadas son menos inclinadas, ya que las armaduras de FRP que su módulo elástico es una  $\frac{1}{4}$  el módulo del acero.

Las vigas con armadura pasiva de FRP presentan características diferentes dependiendo de la resina. En el caso de las **vigas armadas con barras de resina termoestable** los resultados de la campaña que se recoge a en este trabajo, dan a entender que se trata de un material bien caracterizado debido a que los resultados del ensayo conciden con los comportamientos descritos en la literatura; como las gráficas carga-deformación y las gráficas carga-desplazamiento las cuales mostraron comportamientos predecibles y similares entre las diferentes vigas; también destacar la fisuración de estas vigas que indica una buena adherencia. Aun así, a la hora de hormigonar se debe tener en cuenta la flotabilidad de las barras, durante el ensayo se pudo observar cómo debido a este fenómeno el canto útil de las vigas se vio afectado. Solo se obtuvieron valores que diferían de los antecedentes estudiados, a la hora de comparar vigas por el diámetro de barra: en el grupo 2 las dos vigas de resina termoestable dan a entender que la relación inversa entre el diámetro y la tensión de adherencia, menor diámetro mayor resistencia A. MONCAYO (2021), no se cumple.

En el caso de las **vigas armadas con barras de resina termoplástica**, los resultados obtenidos en esta campaña ponen de manifiesto la necesidad de continuar estudiando este material, ya que las cargas finales resultantes diferían de las cargas calculadas con modelos no lineales, así como las gráficas carga-deformación y las gráficas carga-desplazamiento, que presentaban un comportamiento asociado a la pérdida de adherencia de las barras. También es necesario destacar que entre las vigas armadas con las mismas barras no se ha podido ver una relación consistente, sino que los valores obtenidos de cada viga diferían entre si.

En cuanto a las propiedades estructurales de vigas con armadura activa de FRP, aunque en este trabajo no se ha podido analizar la campaña experimental con armadura activa de FRP, los antecedentes indican que existen muchas lagunas de conocimiento en el uso de barras de FRP como armadura activa, como el mecanismo de anclaje de estas barras así, como la fuerza de pretensado, como la relajación o las propiedades a largo termino.

## 5. 1 Futuras líneas de investigación

EL tema de las propiedades estructurales instantáneas de elementos armados con barras FRP es muy amplio, puede ser incluso más amplio que de las barras de acero, como indica FEDERATION OF STRUCTURAL CONCRETE en el FIB Bull 40 (2007); y este estudio ha aportado solo una pequeña cantidad de conocimiento con la esperanza de seguir investigando este tema.

- Se requiere más ensayos experimentales de elementos con armadura pasiva de FRP para poder validar los modelos vigentes y así conseguir que de las guías de diseño se puede llegar a incorporar en los códigos e instrucciones de diseño.
- Como se ha podido observar en la campaña, se requiere un mayor conocimiento del comportamiento adherente de las barras de FRP, en especial de las barras con resina termoplástica.
- Existen una laguna de conocimiento en cuanto al uso de barras de FRP en elementos pretensados.

Este estudio, en el marco del proyecto de investigación del Plan Nacional Straduravius, coordinado por la universidad politécnica de Catalunya y la Universidad de A Coruña; ha aportado una pequeña porción de conocimiento y una línea de investigación abierta en cuanto al uso de barras FRP en elementos pretensados, que se continuará en la tesis doctoral del estudiante Galo Ortiz en la cual se realizará la campaña experimental con armadura activa de FRP.

## 6. Bibliografía

- (1) FEDERATION OF STRUCTURAL CONCRETE, FRP FIB Bulletin 40, (2007). *“Reinforcement in RC structures”*
- (2) A. GUNNARSSON (2013) *“Bearing capacity, relaxation and finite elementsimulation for prestressed concrete beamsreinforced with BFRP tendons”* Master Tesis Reykjavík University, Iceland.
- (3) J.M. JONES (1999). *“Mechanics of composite materials”* Taylor & Francis, Philadelphia, USA.
- (4) D. AGARWAL y J. BROUTMAN, (1990). *“Analysis and performance of fiber composites”*. Pg 1-67.
- (5) J. HENRÍQUEZ (2018). <https://docplayer.es/95585799-Ensayo-de-compresion.html> a dia 14 de junio del 2021.
- (6) I. DANIEL y O. ISHAI. (1994). *“Engineering Mechanics of Composite Materials”*, Oxford UniversitynPress, Oxford.
- (7) P. K. MALLICK, (1988). *“Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design”*, Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- (8) E. GUDONISA, E.TIMINSKASA, V.GRIBNIAKAB, G. KAKLAUSKASA, A. K. ARNAUTOVC and V.TAMULÉNASA (2013). *“FRP reinforcement for concrete structures: State-of-the-art review of application and design”*
- (9) E.G. NAWY y G.E. NEUWERTH, (1971) *“Behavior of Fiber Glass Reinforced Concrete Beams,”* Journal of the Structural Division, ASCE, September, pp. 2203-2215.
- (10)H. SAADATMANESH y M.R. EHSANI (1991).*“Fiber Composite Bar for Reinforced Concrete Construction,”* Journal of Composite Materials, V. 25, February, pp. 188-203.
- (11)J. LARRALDE; L. RENBAUM; y A. MORSI (1988)*“Fiberglass Reinforced Plastic Rebars in Lieu of Steel Rebars,”* TRB Annual Meeting, Task Force A2C51—Structural Applications of Fiber Reinforced Plastics, August.
- (12) R.KOTYNIA (2014). *“Analytical models for reinforced concrete members shear strengthened with frp composites”*
- (13) C.J. BURGOYNE (1992). *“Tets on beams prestressed with polyaraimd ropes”*
- (14) T.DONECHEV (2016) *“Deformability of pretensioned pc beams with bfrp reinforcement”*
- (15) S.H. GUÐMUNDSSON (2012). *“Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups”*.

- (16) M.PEARSON and T.DONECH ( 2013) “Experimental Study on the Behavior of Prestressed Concrete Beams with Internal BFRP Reinforcement.” Kingston University, London.
- (17) E.THORHALLSSON. (2015) “Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars”
- (18) M.MIRSHEKARI (2016). “Deformability of pretensioned pc beams with bfrp reinforcement”.
- (19)A. MONCAYO (2021) “Estudio de la adherencia de armaduras de polímeros reforzados con fibras con resinas termoplásticas” TFM, UPC, 2021.
- (20)G. ORTIZ, (2020) “Campaña experimental, Proyecto Straduravius.” Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona,
- (21) Aenor ed., UNE-EN-12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. Asociación Española de Normalización y Certificación, 2009.
- (22) Aenor ed., UNE-EN-12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas, 2010.
- (23) Aenor ed., UNE-EN 12350-8:2020 Ensayos de hormigón fresco. Ensayo de asentamiento, 2020.
- (24) M.MONTERO(2021),<https://tecnoticias.net/2021/05/introduccion-a-los-transformadores-diferenciales-variables-lineales-lvdt/>
- (25) R.PALLÁS-ARENY y J. G. WEBSTER, “Sensores y acondicionamiento de señales”