

Refuerzo a cortante de estructuras de hormigón armado con laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP). Verificación experimental

Realizada por:

Mireia Pujol

Dirigida por:

Eva Oller Ibars

Antonio Marí Bernat

Barcelona, [Maig de 2018](#)

Programa de doctorat Enginyeria de la Construcció

Universitat Politècnica de Catalunya

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Al meu fill i al meu avi,
dels qui he après, malgrat l'edat que els separa,
que a la vida guanya qui no es rendeix.

La present tesi s'ha pogut desenvolupar gràcies a la beca que em va concedir la Universitat Politècnica de Catalunya. Voldria agrair també l'oportunitat, tan a nivell acadèmic com personal, que m'ha brindat en Toni Marí, el meu tutor i un pou de ciència. Si alguna cosa he après és que tot ha de convergir. A través d'ell he conegut dues persones sense les quals aquesta tesi no s'hagués finalitzat que són en Jesús Bairán, una ment privilegiada i millor persona i l'Eva Oller, la meva tutora. Una tutora per la que tots els elogis es quedarien curts per la seva tenacitat, eficiència, capacitat de treball non-stop, intel·ligència i tot contrastat amb una gran intel·ligència emocional carregada de bons valors que són d'agrair en moments en què et sents perdut. L'Eva ha fet possible aquesta tesi i m'ha ensenyat a no desviar-me del rigor, perseverar i reconduir-me al camí quan em desviava.

Haig d'agrair a l'Álvaro Otero que m'ajudés a superar les batalletes al Laboratori i la feinada que tots els assajos comportaven. Dins d'aquest àmbit també m'agradaria destacar-hi a en Joan Ramon Casas amb el qui no tan sols vaig aprendre estadística sinó que vaig compartir moments de gran diversió alhora que m'animava a tancar la tesi.

Gràcies al doctorat els companys s'han tornat amics, molt bons amics com en Carles Camós que sempre m'ha assessorat i del qui en valoro molt el seu punt de vista i la seva ment estructurada per desgranar el gra de la palla. I quan penso en ments estructurades em venen al cap amics de trajecte que han estat fonamentals com la Maria Calix, en Cesc Ventura i en Joan Carles Adell. Sempre positius i sempre disposats a ser consultats per a donar el millor d'ells mateixos en cada resposta apassionadament. No parlo només de la tesi però si del màster i de qualsevol cosa on les matemàtiques i la física hi juguessin un paper destacat que m'ha portat fins aquí. I d'aquests contactes n'han sortit d'altres que han sigut essencials per a sortir de moments delicats com la Roser Mateu. Gràcies per ser-hi.

Haig de donar les gràcies a en Mañá i la Marisa que amb el seu suport, que mai podré agrair prou, vaig reprendre la tesi. Treballant des de casa seva del maresme en Mañá em feu recuperar la confiança i determinació.

També han estat importants noves figures que han entrat a la meva vida com en Ferran, la Mari, la Laura i en Gerard i d'altres que ja hi eren però amb les qui hem reprès el camí com l'Elena Arcos, la Clàudia Morales, l'Encarnació i la Genciana. Sense el vostre suport això hagués estat molt més difícil.

I no se m'oblida de citar als amics de sempre, als indispensables, Anna Rabassa, Esperança, Joana amb la qui per sort hem sabut persistir i retrobar-nos, Joan de Núria, Núria Baqué, Vanesa, Roger Vila i Josep Palmarola, sempre disposats a ajudar i a animar.

En cap cas em puc oblidar de donar les gràcies més efusives a l'Àlícia Soler, la persona que pot abastar més volum de treball i assolir-lo amb gran èxit sense fer soroll, alhora que és capaç de fer sentir còmode i especial a tothom. Gràcies per tantes coses....

I m'he reservat pel final aquesta especial menció. Si aquesta tesi està aquí i jo també és gràcies a tu Alba Garriga. Vas saber trobar les paraules exactes i la persistència adient. La teva intel·ligència emocional és veritablement espectacular. Sempre modules la quantitat justa. Mai, mai, mai, t'ho podré agrair prou, però avui en tinc una oportunitat que no vull desaprovechar. Gràcies per alliberar-me i fer això possible.

Finalment voldria donar les gràcies a la meva família que no m'han deixat abandonar. Gràcies iaia, tieta, Carles i Lola. I també moltes gràcies a tu mama que sempre et critico la teva duresa però sense la qual no hagués pogut fer realitat aquest doctorat. I gràcies a tu fill meu que no

m'has deixat abaixar la guàrdia. Gràcies Arnau. I sobretot gràcies a tu avi que m'has transmès els valors més importants dels que dispo.

Sou magnífics i ara era el moment de donar-vos-en les gràcies.

Esta tesis se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación:

- BIA2015-64672-C4-1-R. "Evaluación de la capacidad resistente frente a esfuerzos tangentes de estructuras de hormigón mediante modelos mecánicos para la extensión de su vida útil". Ministerio de Economía y Competitividad. Investigador Principal: Antonio R. Marí Bernat, Jesús M. Bairán García. (2016-2018).
- BIA2012-36848 "Proyecto basado en prestaciones de estructuras de hormigón parcialmente pretensadas. Propuesta de una nueva metodología, verificación experimental y criterios de proyecto". Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y FEDER. Universitat Politècnica de Catalunya. Investigador Principal: Jesús M. Bairán. (2013-2015)
- BIA2009-11764 "Evaluación de los efectos del deterioro, reparación y refuerzo en estructuras, modelo teórico y verificación". Ministerio de Ciencia e Innovación. Universitat Politècnica de Catalunya. Investigador Principal: Antonio R. Marí. (2010-2013).

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 1

INTRODUCCIÓN 1

- 1.1. Motivación e identificación del problema..... 1
- 1.2. Objetivos 2
- 1.3. Estructura de la tesis 2

CAPÍTULO 2 4

ESTADO DEL CONOCIMIENTO RELATIVO AL REFUERZO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE LAMINADOS FRP ADHERIDOS EXTERNAMENTE 4

- 2.1 Técnicas de refuerzo estructural 4
- 2.2 Refuerzo externo mediante laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP)..... 5
 - 2.2.1. Materiales 6
 - 2.2.2. Propiedades de la lámina de FRP 9
 - 2.2.3. Disposición de los laminados como refuerzo externo a cortante 12
- 2.3. Modelos teóricos existentes para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante 13
- 2.4. Formulaciones incluidas en las guías de diseño para determinar la contribución del FRP a la resistencia a cortante 15
 - 2.4.2. Contribución a cortante de los laminados FRP según el FIB Bulletin 14 (2001) 17
 - 2.4.3. Contribución a cortante de los laminados FRP según la ACI 440.2R-08 (2008) 19
 - 2.4.4. Contribución a cortante de los laminados FRP según el TR 55 (2012) 19
 - 2.4.5. Contribución a cortante de los laminados FRP según el CNR-DT200/2004 (2004) 20
 - 2.4.6. Contribución a cortante de los laminados FRP según DAfStb (2013) 22

CAPÍTULO 3 24

ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE LAS GUÍAS DE DISEÑO EXISTENTES PARA EVALUAR LA CONTRIBUCIÓN DEL FRP A LA RESISTENCIA A CORTANTE 24

- 3.1. Introducción 24
- 3.2. Base de datos de ensayos experimentales..... 24
- 3.3. Análisis comparativo de las formulaciones recogidas en las guías de diseño 26
 - 3.3.1. Análisis según la clasificación de puntos de demérito de Collins (2001) 35
 - 3.3.2. Conclusiones del análisis de los modelos existentes 37

CAPÍTULO 4 38

CAMPAÑA EXPERIMENTAL 38

- 4.1. Objetivos 38
- 4.2. Descripción de la campaña experimental 39
 - 4.2.1. Descripción de las vigas 39
 - 4.2.2. Predicción del cortante último siguiendo las guías de diseño existentes 43
 - 4.2.3. Caracterización de los materiales 43
 - 4.2.4. Sistemas de anclaje para los laminados FRP 53
 - 4.2.5. Método de aplicación de los polímeros reforzados con fibras FRP 54
 - 4.2.6. Configuración de los ensayos y equipos técnicos 56
 - 4.2.7. Instrumentación 58

CAPÍTULO 5 64

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES 64

- 5.1 Resumen de resultados de la campaña experimental 65
 - 5.1.1. Vigas de control 69
 - 5.1.2. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP baja (tipo 1) y sin anclaje 73
 - 5.1.3. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 2) y sin anclaje 77

5.1.4. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP baja (tipo 1) y anclaje del FRP	81
5.1.5. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 2) y anclaje del FRP	83
5.1.6. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 3) y anclaje del FRP	87
5.2. Influencia de la cuantía de refuerzo externo, de armadura longitudinal, y del anclaje.....	89
5.3. Ángulo de la fisura crítica de cortante	91
5.4. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga	94
5.5. Cortante - deformaciones en la armadura longitudinal, armadura transversal y refuerzo FRP.....	98
5.6. Contribución a la resistencia de cortante del hormigón, de la armadura transversal, del refuerzo externo de FRP y del ala de la sección en T	105
5.7. Comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos de las guías de diseño	118
5.8. Conclusiones del análisis de resultados	122
CAPÍTULO 6	126
CONCLUSIONES	126
6.1 Conclusiones.....	126
6.1.1. Conclusiones del análisis de los modelos existentes para obtener la contribución del FRP	126
6.1.2. Conclusiones de la campaña experimental	127
6.2 Líneas futuras de investigación	129
REFERENCIAS	130
Referencias	131
ANEJOS	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Refuerzo de estructuras de hormigón armado con FRP. (a), (b) y (c) Refuerzos a flexión de losas y viga con FRP; (d) y (e) Confinamiento de pilares con FRP (Fib Bulletin 14 2001, BASF).....	5
Figura 2.2.	Diagrama tensión-deformación de tracción uniaxial para diferentes FRPs unidireccionales y aceros. CFRP, AFRP y GFRP (FIB Bulletin 14, 2001).....	11
Figura 2. 3.	Diagrama tensión-deformación correspondiente al efecto del porcentaje de fibras aplicadas al compuesto, (FIB Bulletin 14, 2001).	11
Figura 2. 4.	Tipos de refuerzos en sección de vigas con FRP: W (wrapping): Sección totalmente envuelta, U: Sección reforzada en U, S (sides): Sección reforzada sólo en los laterales, W+ (wrapping): Sección totalmente envuelta más anclajes, U+: Sección reforzada en U más anclajes, S+ (sides): Sección reforzada sólo en los laterales más anclajes. (Leung et al. 2004)	12
Figura 2. 5.	Tipos de refuerzos en vigas con FRP. Alzado. Fibras dispuestas discontinuas discretizadas como estribos: (a) orientación de las fibras perpendicular al eje de la viga, (b) orientación de las fibras cosiendo las fisuras de cortante. Fibras dispuestas como láminas continuas: (c) orientación de las fibras cosiendo las fisuras de cortante, (d) fibras orientadas en múltiples direcciones. (Leung et al. 2004)	12
Figura 2. 6.	Nomenclatura utilizada para definir las propiedades geométricas de los refuerzos externos con FRP.	15
Figura 2. 7.	Deformación longitudinal en el alma.....	17
Figura 2. 8.	Diagrama de parámetros para el cálculo de la resistencia a cortante del FRP según el modelo DAfStb (2013) [6].....	23
Figura 3.1.	Contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 (2001) para vigas con sección transversal rectangular	30
Figura 3.2.	Contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 (2001) para vigas con sección transversal en T.....	30
Figura 3.3.	Contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT200/2004 (2004) para vigas con sección transversal rectangular	31
Figura 3.4.	Contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT200/2004 (2004) para vigas con sección transversal en T.....	31

Figura 3.5.	Contribución del FRP a cortante según el modelo ACI-440.2R-08 (2008) para vigas con sección transversal rectangular	32
Figura 3.6.	Contribución del FRP a cortante según el modelo ACI-440.2R-08 (2008) para vigas con sección transversal en T	32
Figura 3.7.	Contribución del FRP a cortante según el modelo TR-55 (2012) para vigas con sección transversal rectangular.....	33
Figura 3.8.	Contribución del FRP a cortante según el modelo TR-55 (2012) para vigas con sección transversal en T	33
Figura 3.9.	Contribución del FRP a cortante según el modelo DAFStb (2013) para vigas con sección transversal rectangular.....	34
Figura 3.10.	Contribución del FRP a cortante según el modelo DAFStb (2013) para vigas con sección transversal en T	34
Figura 3. 11.	Puntuación del método <i>Demerit Points Classification</i> de Collins (2001) [7] frente al porcentaje de ensayos respecto al total que se encuentra dentro del intervalo estudiado.	36
Figura 4. 1.	Sección transversal de las vigas de las series M y A.....	39
Figura 4. 2.	Sección longitudinal de las vigas de las series M y A	40
Figura 4. 3.	Cuantías de FRP tipo 1, 2 y 3 respectivamente	42
Figura 4. 4.	Esquema de carga de los dos ensayos realizados por viga	42
Figura 4.5.	Proceso de hormigonado	44
Figura 4. 6.	Ejecución de las probetas de hormigón para cada una de las cinco amasadas.....	44
Figura 4.7.	Instrumentación y montaje de las probetas para obtener el módulo de elasticidad	46
Figura 4.8.	Ensayo a compresión simple de probetas de hormigón y probetas después del ensayo	46
Figura 4.9.	Dispositivo utilizado para ejecutar ensayos brasileños	47
Figura 4.10.	Probetas ensayadas a tracción indirecta mediante el ensayo brasileño	47
Figura 4.11.	Tensión-Deformación de las armaduras de la campaña experimental	48
Figura 4.12.	Disposición de las galgas extensométricas para el ensayo de probetas CFRP según ASTM D3039	50
Figura 4.13.	Probetas de FRP con su disposición de galgas antes de ensayar. Probetas de FRP y de únicamente fibras una vez ensayadas.....	53
Figura 4.14.	Sistemas de anclaje utilizados.....	54
Figura 4.15.	Retirada lechada de cemento mediante pulido.....	55

Figura 4.16.	Aplicación de la resina epoxi y el tejido de fibra de carbono.	55
Figura 4.17.	Viga reforzada con cuantía 1, 2 y 3 de FRP respectivamente	55
Figura 4.18.	Pórtico de carga con actuador hidráulico MTS.	56
Figura 4.19.	Izq. Sección longitudinal del actuador MTS Series 243.60. Der. Sección transversal de la placa de anclaje de la rótula del actuador.....	57
Figura 4.20.	Software del controlador MTS Flextest 60	58
Figura 4.21.	Sistema de adquisición de datos HBM MGC Plus	58
Figura 4.22.	Esquema de funcionamiento de los transductores de desplazamiento (temposonics) (MTS System, http://machinedesign.com/archive/good-positioning)	59
Figura 4.23.	Izq. Temposonics dispuestos en roseta para un lado de la viga. Der. Descripción de los temposonics dispuestos para un lado de la viga	59
Figura 4.24.	Izq. Disposición de cuatro LVDT para medir el deslizamiento relativo entre el hormigón y el FRP. Der. Sección transversal de un LVDT de accionamiento por muelle	60
Figura 4.25.	Izq. Esquema de funcionamiento de los láseres Acuity AR200-50M. Der. Disposición de un láser sobre la vertical del punto de apoyo	60
Figura 4.26.	Proceso de aplicación de las galgas en el acero.....	62
Figura 4.27.	Disposición final de galgas en el FRP.....	62
Figura 4.28.	Galgas dispuestas en las armaduras longitudinales y transversales.....	63
Figura 4.29.	Galgas dispuestas en tres bandas de FRP. Disposición simétrica en el lado opuesto	63
Figura 5. 1.	Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo M0Sa	69
Figura 5. 2.	Fisuras producidas en el ensayo M0Sa en el vano de cortante	69
Figura 5. 3.	Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo M0Sb.....	70
Figura 5. 4.	Fisuras producidas en el ensayo M0Sb	70
Figura 5. 5.	Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo A0Sa	71
Figura 5. 6.	Fisuras producidas en el ensayo A0Sa	71
Figura 5. 7.	Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo A0Sb.....	72
Figura 5. 8.	Fisuras producidas en el ensayo A0Sb	72

Figura 5. 9.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1Sa	73
Figura 5. 10.	Fisuras producidas en el ensayo M1Sa	73
Figura 5. 11.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1Sb.....	74
Figura 5. 12.	Fisuras producidas en el ensayo M1Sb	74
Figura 5. 13.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A1Sa	75
Figura 5. 14.	Fisuras producidas en el ensayo A1Sa	75
Figura 5. 15.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A1Sb	76
Figura 5. 16.	Fisuras producidas en el ensayo A1Sb	76
Figura 5.17.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2Sa	77
Figura 5.18.	Fisuras producidas en el ensayo M2Sa	77
Figura 5. 19.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2Sb.....	78
Figura 5. 20.	Fisuras producidas en el ensayo M2Sb	78
Figura 5. 21.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2Sa	79
Figura 5. 22.	Fisuras producidas en el ensayo A2Sa	79
Figura 5. 23.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2Sb.....	80
Figura 5. 24.	Fisuras producidas en el ensayo A2Sb	80
Figura 5.25.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1B.....	81
Figura 5.26.	Fisuras producidas en el ensayo M1B.....	81
Figura 5. 27.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1A	82
Figura 5. 28.	Fisuras producidas en el ensayo M1A.....	82
Figura 5.29.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2B.....	83
Figura 5.30.	Fisuras producidas en el ensayo M2B.....	83
Figura 5. 31.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2A	84

Figura 5. 32.	Fisuras producidas en el ensayo M2A.....	84
Figura 5.33.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2B.....	85
Figura 5. 34.	Fisuras producidas en el ensayo A2B	85
Figura 5. 35.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2A.....	86
Figura 5. 36.	Fisuras producidas en el ensayo A2A.....	86
Figura 5. 37.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A3B.....	87
Figura 5. 38.	Fisuras producidas en el ensayo A3B	87
Figura 5. 39.	Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A3A.....	88
Figura 5. 40.	Fisuras producidas en el ensayo A3A.....	88
Figura 5. 41.	Efecto de la cuantía transversal de FRP y del anclaje	90
Figura 5. 42.	Efecto de la cuantía longitudinal de acero y del anclaje.....	91
Figura 5.43.	Cortante-Desplazamiento de las vigas de la serie M	95
Figura 5.44.	Cortante-Desplazamiento de las vigas de la serie A	96
Figura 5.45.	Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Vigas M; Dcha: Vigas A.....	96
Figura 5.46.	Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Anclaje tipo A; Dcha: Anclaje tipo B.....	97
Figura 5.47.	Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Cuantía de FRP1; Dcha: Cuantía de FRP2; Abajo: Cuantía de FRP3	97
Figura 5.48.	Posición de las galgas en la armadura de acero.....	98
Figura 5.49.	Posición de las galgas en el refuerzo de FRP.....	98
Figura 5.50.	Deformación-Cortante para los ensayos M0S, M2S y M2B.....	99
Figura 5.51.	Deformación-Cortante para los ensayos A0S, A2S y A2A	100
Figura 5.52.	Deformación-Cortante para los ensayos anclados A2A y A3A.....	101
Figura 5.53.	Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: M2Sa. Der: M1Sa. Medio: Cortante - Deformación en armaduras transversales de acero. Izq: M2Sa. Der: M1Sa. Abajo: Cortante - Deformación en refuerzos FRP. Izq: M2Sa. Der: M1Sa.....	102
Figura 5.54.	Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: M2B. Der: M1B. Medio: Deformación-Cortante en armaduras transversales de acero. Izq:	

	M2B. Der: M1B. Abajo: Deformación-Cortante en refuerzos FRP. Izq: M2B. Der: M1B.....	103
Figura 5.55.	Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: A2Sb. Der: A1Sa. Medio: Deformación-Cortante en armaduras transversales de acero. Izq: A2Sb. Der: A1Sa. Abajo: Deformación-Cortante en refuerzos FRP. Izq: A2Sb. Der: A1Sa.....	104
Figura 5.56.	Cortante-deformación de las armaduras longitudinales. Primero: ejemplares M0Sa y A0Sa. Segundo: ejemplares M1Sa y A1Sa. Tercero: ejemplares M2Sa y A2Sa. Cuarto: ejemplares M2A, A2A, A3A, M2B, A2B y A3B.	105
Figura 5. 57.	Secciones de estudio definidas	106
Figura 5.58.	Secciones analizadas con su correspondiente esquema de fuerzas, diagrama de cortantes y de momentos flectores	108
Figura 5.59.	Criterio para determinar los estribos que intersectan la fisura de cortante y medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura.	109
Figura 5. 60.	Distribución de las bandas para la cuantía de FRP 1.....	110
Figura 5. 61.	Distribución de las bandas para la cuantía de FRP 2.....	110
Figura 5. 62.	Criterio para determinar las bandas de FRP que intersectan la fisura de cortante y medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura.	110
Figura 5. 63.	Agrupación de galgas de la armadura transversal de acero y del FRP para las tres secciones de estudio. Cada sección corresponde a una fila de la imagen.....	113
Figura 5. 64	Contribución a cortante del acero y del FRP según las galgas dispuestas en estos materiales respecto al cortante total del ejemplar M1Sa	117
Figura 5. 65.	Componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero, FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A2A.....	118
Figura 5. 66.	Cortante último experimental respecto al cortante último teórico según Zararis más las diferentes guías de diseño de FRP.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Comparativa de las propiedades más comunes de adhesivos epoxis, hormigón y acero (<i>Täljsten 1994</i>).....	7
Tabla 2. 2	Propiedades características de las fibras (Feldman 1989, Kim 1995).....	9
Tabla 2. 3	Propiedades mecánicas de los laminados de FRP prefabricados en contraste con el acero. FIB Bulletin 14 (2001).	10
Tabla 2. 4	Coeficientes de seguridad parcial, γ_f , para materiales compuestos de FRP según FIB Bulletin 14 (2001).	18
Tabla 3. 1	Resumen de algunas características geométricas y mecánicas de la base de datos.....	26
Tabla 3. 2	Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular	27
Tabla 3. 3	Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal en T	28
Tabla 3. 4	Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en W	28
Tabla 3. 5	Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en U	29
Tabla 3. 6	Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en S.....	29
Tabla 3. 7	Puntuación del método <i>Demerit Points Classification</i> de Collins (2001).....	35
Tabla 3. 8	Puntuación siguiendo la Clasificación de Collins (2001) para los distintos modelos estudiados.	35
Tabla 4. 1	Descripción de las vigas de ensayo	41
Tabla 4. 2	Resultados de las predicciones analíticas según las instrucciones y recomendaciones vigentes	43
Tabla 4. 3	Características mecánicas del hormigón de las vigas de la campaña experimental	45
Tabla 4. 4	Resistencia promedio de los diámetros de acero utilizados	49
Tabla 4. 5	Datos técnicos y propiedades mecánicas del fabricante para la fibra de carbono	49

Tabla 4. 6	Datos técnicos y propiedades mecánicas del fabricante para la resina epoxi.....	50
Tabla 4. 7	Resultados de las probetas de fibras de carbono (sin resina)	51
Tabla 4. 8	Resultados de las probetas del compuesto de FRP (fibras+resina)	52
Tabla 4. 9	Características principales del actuador MTS Series 243.60.....	57
Tabla 5. 1	Resumen de resultados para las vigas de la serie M.....	66
Tabla 5. 2	Resumen de resultados para las vigas de la serie A.....	67
Tabla 5. 3	Resistencia a tracción del hormigón, momento teórico de fisuración, cortante teórico de fisuración y cortante real de fisuración de los ensayos realizados en la campaña experimental	68
Tabla 5. 4	Cortante de plastificación de las armaduras transversales	69
Tabla 5. 5	Cortante de plastificación de las armaduras transversales	70
Tabla 5. 6	Cortante de plastificación de la armadura transversal	71
Tabla 5. 7	Cortante de plastificación de la armadura transversal	72
Tabla 5. 8	Cortante de plastificación de la armadura transversal	73
Tabla 5. 9	Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP	74
Tabla 5. 10	Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP	75
Tabla 5. 11	Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP	76
Tabla 5. 12	Cortante de plastificación de la armadura transversal y desprendimiento FRP.....	77
Tabla 5. 13	Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP	78
Tabla 5. 14	Cortante de plastificación de la armadura de acero.....	79
Tabla 5. 15	Cortante de plastificación de la armadura transversal y desprendimiento FRP.....	80
Tabla 5. 16	Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero	81
Tabla 5. 17	Cortante de plastificación de la armadura transversal y desprendimiento FRP.....	82
Tabla 5. 18	Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero	83
Tabla 5. 19	Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero	84
Tabla 5. 20	Cortante de plastificación de la armadura de acero.....	85
Tabla 5. 21	Cortante de plastificación de la armadura de acero transversal	86

Tabla 5. 22	Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero	87
Tabla 5. 23	Cortante de plastificación de la armadura de acero.....	88
Tabla 5. 24	Resistencia media del hormigón a compresión, ángulos de las fisuras críticas en el alma, ala y promedio de los dos ángulos anteriores y cortante último de las vigas de la serie de cuantía de armadura longitudinal media.....	91
Tabla 5. 25	Resistencia media del hormigón a compresión, ángulos de las fisuras críticas en el alma, ala y promedio de los dos ángulos anteriores y cortante último de las vigas de la serie de cuantía de armadura longitudinal alta.....	92
Tabla 5. 26	Propiedades mecánicas del armado longitudinal y transversal.....	107
Tabla 5. 27	Propiedades mecánicas de los laminados de FRP.....	111
Tabla 5. 28	Contribución a cortante promedio del hormigón, del acero y del FRP de las vigas con cuantía longitudinal media.....	111
Tabla 5. 29	Contribución a cortante promedio del hormigón, del acero y del FRP de las vigas con cuantía longitudinal alta.....	112
Tabla 5. 30	Combinación de los cortantes máximos para cada sección de estudio.....	114
Tabla 5. 31	Contribución del hormigón, del acero, del FRP y del ala a la resistencia de cortante en kN de acuerdo con los datos proporcionados por las galgas extensométricas.....	115
Tabla 5. 32	Porcentaje de la máxima contribución del hormigón, del acero, del FRP y del ala a la resistencia de cortante	116
Tabla 5. 33	Comparación del cortante último experimental con las predicciones teóricas.....	119
Tabla 5. 34	Cortante último experimental y teórico para las diferentes guías de diseño de FRP calculando V_c+V_s de acuerdo con Zararis et al. (2006).....	120
Tabla 5. 35	Relación entre el cortante último experimental y el cortante último teórico según Zararis más las diferentes formulaciones estudiadas	121
Tabla 5. 36	Promedio y coeficiente de variación para las combinaciones Zararis más FIB14, ACI440, TR55, CNR-DT-200/2004 o DAfStb.....	121

NOTACIÓN

β	Ángulo entre la dirección de la fibra primaria del FRP y el eje longitudinal de la viga
β	Ángulo de inclinación de los refuerzos a cortante de FRP
ε	Deformación
ε_{fed}	Deformación de cálculo efectiva del FRP
ε_{fe}	Deformación media efectiva del FRP
ε_{fu} o ε_u	Deformación última del FRP
ε_x	Deformación longitudinal en el alma, expresada en tanto por mil
ε_y	Deformación asociada al límite elástico del acero
Φ	Diámetro armadura
ϕ	Factor de reducción de la resistencia de cortante
γ_f	Coefficiente de seguridad para el refuerzo con FRP
γ_{Rd}	Coefficiente parcial de seguridad que para modelos en estado límite último toma el valor de 1,20 para el esfuerzo de cortante
μ	Valor medio
θ	Ángulo entre las bielas de compresión de hormigón y el eje de la pieza.
θ	Ángulo de inclinación de las fisuras (normalmente 45°)
θ_e	Ángulo de referencia de inclinación de las fisuras, por el cual puede adoptarse la expresión: $\theta_e = 29 + 7\varepsilon_x$
ρ	Cuantía de armadura
ρ_f	Cuantía del refuerzo externo con FRP
ρ_l	Cuantía geométrica de la armadura longitudinal principal de tracción, pasiva y/o activa adherente, anclada a una distancia igual o mayor que d a partir de la sección de estudio
σ_{st}	Desviación estándar
σ	Tensión en la armadura longitudinal
σ'_{od}	Tensión axial media en el alma de la sección
σ_{p0}	Tensión de los tendones de pretensado cuando la deformación del hormigón que los envuelve es igual a 0
σ_s	Tensión de la armadura transversal
ξ	Factor que tiene en cuenta el efecto tamaño

ψ_f	Coeficiente de seguridad adicional para las fibras de FRP
A_{FRP}	Área de refuerzo externo con FRP
A_s	Área de armadura longitudinal traccionada
A_α	Área por unidad de longitud de cada grupo de armaduras transversales que forman un ángulo α con la directriz de la pieza (en mm^2/mm).
b	Ancho total de la sección (mm)
b_f	Ancho eficaz del FRP tomando el siguiente valor $\min \{0,9 \cdot d, h_w\}$
b_0	Ancho del alma según el punto 44.2.1 de la Instrucción EHE-08 (1)
C.O.V.	Coeficiente de variación
d	Distancia desde la fibra más comprimida de hormigón hasta el centro de gravedad de la armadura traccionada. Canto efectivo de la sección (mm). Corresponde también a la longitud efectiva del FRP (mm)
$E_{cm, \text{día ensayo}}$	Valor medio del módulo de deformación longitudinal secante del hormigón el día en que se realiza el ensayo
E_f o E_{Lm} o E_{FRP}	Módulo de elasticidad del laminado de FRP en la dirección de las fibras
E_{fib}	Módulo de elasticidad de las fibras
E_m	Módulo de elasticidad de la matriz (resinas)
E_s	Módulo de elasticidad del acero
$f_{blk, max}$	Resistencia del laminado frente a desprendimiento prematuro
f_{ck}	Resistencia característica del hormigón a compresión.
f_{cm}	Resistencia media del hormigón a compresión a 28 días
$f_{cm, \text{día ensayo}}$	Resistencia media del hormigón a compresión el día de ensayo
$f_{ct, m}$	Resistencia media del hormigón a tracción
$f_{ct, m, \text{día ensayo}}$	Resistencia media del hormigón a tracción el día del ensayo
f_{cv}	Resistencia efectiva del hormigón a cortante de valor $f_{cv}=f_{ck}$ con f_{cv} no mayor que 15 N/mm^2 en el caso de control indirecto del hormigón
f_f	Resistencia a tracción del compuesto de FRP en la dirección de las fibras.
f_{fib} o f_{fu}	Resistencia a tracción de las fibras FRP
f_m	Resistencia a tracción de la matriz (resinas)
$f_{máx, m}$	Resistencia última del acero
$f_{y\alpha, d}$	Límite elástico de la armadura A_α
$f_{y, m}$ ($\varepsilon=2\text{‰}$)	Límite elástico del acero asociada a una deformación del 2‰
f_u	Resistencia última de los laminados de FRP
h_w	Altura del laminado FRP adherido en el alma desde su fibra inferior

K	Factor de galga (característico del tipo de galga)
k_v	Coefficiente de seguridad por adherencia
k_1	Factor de modificación en relación a la resistencia del hormigón
k_2	Factor de modificación en relación a la configuración del refuerzo del FRP
l_e	Longitud de adherencia efectiva del refuerzo de FRP
M	Momento flector
m_{LW}	Ratio $l_{bl,max}/s_{LW}$
n	Número de láminas de FRP que forman un laminado
n_{LW}	Ratio d/s_{LW}
R	Resistencia de la galga
ΔR	Variación en la resistencia de la galga provocada por deformación
r	Factor de reducción proporcionado por el fabricante
r_c	Radio de redondeo de los cantos de la sección de hormigón
S (side)	Sección reforzada según configuración del FRP sólo en los laterales
S+ (side)	Sección reforzada según configuración del FRP sólo en los laterales más anclajes
s_f, s_{FRP} o s_{LW}	Separación entre los ejes de las bandas FRP
s_{Lok}	Deslizamiento relativo máximo de la relación bond-slip de valor 0,201 mm
t_f, t_{FRP} o t_L	Espesor del laminado FRP
t_{fib}	Espesor de la lámina u hoja de fibras
T	Esfuerzo de tracción
U	Sección reforzada según configuración del FRP en U
U+	Sección reforzada según configuración del FRP en U más anclajes
V_c	Contribución del hormigón a la resistencia de esfuerzo cortante
V_f	Contribución de las fibras FRP al esfuerzo de cortante.
V_{fib}	Volumen de fibras
$V_{FRP}, V_{fd}, V_{f,th}$	Contribución teórica de la armadura de FRP a la resistencia de esfuerzo cortante según los modelos de las distintas recomendaciones
$V_{FRP,exp}, V_{f,exp}$	Contribución del compuesto de FRP al esfuerzo de cortante. Esfuerzo medido en el laboratorio*.
V_m	Volumen de la matriz
V_{Mu}	Valor del esfuerzo cortante asociado a la rotura por flexión
$V_{peeling}$	Esfuerzo cortante a partir del que se produce el desprendimiento del refuerzo de FRP

V_s	Contribución de la armadura de acero transversal a la resistencia de esfuerzo cortante
V_u	Esfuerzo cortante último
V_{u2}	Esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma
W (wrapping)	Sección reforzada según configuración del FRP que envuelve totalmente a la sección (wrapping)
$W+$ (wrapping)	Sección reforzada según configuración del FRP que envuelve totalmente a la sección más anclajes
w, w_f, w_{FRP}	Ancho de las bandas de FRP

RESUMEN

El refuerzo de vigas o pilares de hormigón armado mediante polímeros reforzados con fibras (FRP, de las siglas en inglés) constituye una alternativa a otras técnicas de refuerzo tradicionales, por su elevada relación resistencia-peso, rigidez-peso, así como por su mejor durabilidad en relación al acero. En refuerzos a cortante, esta técnica no se encuentra tan extendida como en refuerzos a flexión o confinamiento de pilares, entre otras razones porque los mecanismos resistentes son en sí mismos más complejos, y porque todavía no existe un modelo universalmente aceptado para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante del elemento reforzado, puesto que ésta depende del nivel de tensión o deformación en el refuerzo, que no plastifica a diferencia del acero.

La resistencia a esfuerzo cortante procede de las aportaciones del hormigón, de la armadura longitudinal y transversal de acero y del refuerzo externo de FRP. La contribución de cada una de las partes es difícil de evaluar puesto que existe una interacción entre ellas. Este efecto de acoplamiento no se tiene en cuenta en gran parte de los modelos actuales, que son aditivos sin considerar la posible modificación de las componentes de cortante resistido por el hormigón V_c y por la armadura V_s debido al refuerzo de FRP, V_{FRP} .

La presente tesis doctoral pretende identificar y cuantificar la contribución de cada una de las componentes que contribuyen a resistir el esfuerzo cortante de elementos reforzados externamente a cortante con FRP. Para ello se ha realizado una serie de 20 ensayos a cortante de vigas de hormigón armado de sección en T, bajo carga puntual creciente hasta rotura. Se ha estudiado la influencia de diferentes cuantías de refuerzo a cortante con FRP en forma de U y de dos cuantías de armadura longitudinal de acero. El espesor del laminado FRP se ha mantenido constante, así como la separación longitudinal entre refuerzos externos que coincide con la separación de los cercos. Las diferentes cuantías estudiadas corresponden con distintos anchos de laminado (discontinuos de 50 o 100 mm de ancho, o continuos). En las vigas de control, bajo un cierto estado de carga se produjo la formación de una fisura crítica de cortante con una cierta inclinación en el alma. La rotura se produjo cuando esta fisura se propagó a través del ala con una menor inclinación. En los ensayos con refuerzo FRP en forma de U, se observó el desprendimiento prematuro del refuerzo cuando se abrió la fisura crítica de cortante en el alma. Una vez se fueron desprendiendo los laminados atravesados por la fisura crítica, la rotura se produjo cuando la fisura se propagó a través del ala de la viga hasta el punto de aplicación de la carga. En algunos ensayos, especialmente los que disponían de una mayor cuantía de refuerzo transversal la carga última obtenida fue similar a la de la viga de control. Para evitar el desprendimiento prematuro del refuerzo, se diseñaron dos tipos de anclaje que se aplicaron en algunos de los ensayos realizados para la presente tesis. Los anclajes sostuvieron al refuerzo transversal al abrirse la fisura crítica de cortante, y retardaron la rotura, que se produjo de forma similar pero para una carga última superior a la de las vigas sin anclaje.

A fin de cuantificar las distintas contribuciones del hormigón, del acero transversal y del refuerzo FRP, las vigas se instrumentaron con galgas extensométricas y con transductores de desplazamiento. El análisis de la información proporcionada por la instrumentación ha permitido estimar la contribución a la resistencia a cortante del alma de hormigón, del ala de la sección transversal, de la armadura longitudinal, de la armadura transversal y del FRP.

ABSTRACT

The use of externally bonded fibre reinforced polymers, FRP, for strengthening reinforced concrete (RC) beams or columns is an alternative to other traditional strengthening techniques due to its high strength-to-weight ratio, stiffness-to-weight ratio, and improved durability in comparison to steel. The use of FRP for shear strengthening is not as widespread as flexural strengthening or column confinement. One of the main reasons is that the shear resisting mechanisms of FRP strengthened elements are more complex. In addition, there is still no universally accepted model to evaluate the contribution of the FRP to the shear strength of the reinforced element, because this contribution is strongly related to the stress level of the external reinforcement, which is linear elastic up to failure and does not yield as conventional steel.

The total shear strength of an structural element is given by several components: concrete, longitudinal and transverse steel reinforcement and external FRP reinforcement. The contribution of each part is difficult to evaluate, since there is an interaction between them. This coupling effect is not taken into account in the major part of the current models, which are additive without considering the possible modification of the shear component resisted by the concrete, V_c , and by the steel, V_s , due to the existence of the FRP, V_{FRP} .

The present thesis aims to identify and quantify the contribution of each component that contributes to resist the shear force of RC elements externally strengthened in shear by FRP, as well as the interaction between them. For this purpose, 20 shear tests of RC beams with a T-section, externally strengthened by FRP sheets have been performed. The influence on the shear strength of different FRP reinforcement ratios in a U-shaped configuration and the influence of two longitudinal steel reinforcement ratios have been analysed. The thickness of the FRP laminate has been kept constant, as well as the spacing between the sheets which is the same as the stirrups spacing. The different FRP reinforcement ratios correspond to different widths of the sheets applied to the beams (discontinuous of 50 or 100 mm wide, or continuous).

In the control beams, upon a certain load level, a critical shear crack appears in the web with a certain inclination. Failure occurred when this critical shear crack propagated through the flanges with less inclination up to the load application point. In the tests with U-shaped FRP sheets, a premature debonding of the reinforcement was observed once the critical shear crack opened. Failure occurred in a similar manner when the critical shear crack propagated through the beam flanges to the load application point. In some tests, especially those with a greater longitudinal reinforcement ratio, the ultimate load was similar to that of the control beam. In order to avoid premature debonding of the reinforcement, two types of anchorage were designed and applied in some of the tests. The anchors held the transverse FRP sheets once the critical shear crack opened and propagated, delaying debonding. Failure occurred in a similar manner but for a higher ultimate load in comparison to the unanchored beams.

In order to quantify the different contributions of concrete, transverse steel and FRP reinforcement to the shear strength, the beams were instrumented with strain gauges and displacement transducers. The analysis of the information provided by the instrumentation has allowed to estimate the contribution to the shear strength of the concrete web, concrete flanges, the longitudinal and transverse steel reinforcement and the FRP sheets.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación e identificación del problema

En los últimos años, la adhesión de laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo a cortante, en elementos de hormigón armado o pretensado, se ha convertido en una técnica alternativa a otras soluciones más convencionales en el campo de la reparación y refuerzo de estructuras. Esto se debe, principalmente, a las buenas prestaciones mecánicas que ofrece el FRP, especialmente su elevada relación resistencia/peso y rigidez/peso, que facilita su aplicación, permitiendo reducir medios auxiliares. Además estos materiales presentan una buena resistencia a la corrosión y permiten realizar un refuerzo estructural sin apenas aumentar las dimensiones de la sección del elemento a reforzar.

El refuerzo a cortante no está tan extendido como los refuerzos a flexión y a confinamiento, entre otros motivos porque no existe consenso de cómo evaluar la resistencia a cortante aportada por el FRP, por la dificultad de la definición de los mecanismos resistentes. Además, se observa una gran dispersión entre los resultados de campañas experimentales existentes y las predicciones que proporcionan diferentes recomendaciones o guías de diseño, como son el FIB Bulletin 14 (2001), CNR-DT200/2004 (2004), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012), DAFStb (2013). Este desajuste abre la discusión sobre la fiabilidad de las recomendaciones o guías de

diseño vigentes para predecir la contribución del FRP a la resistencia de cortante en vigas de hormigón armado reforzadas con esta técnica.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es contribuir al estado del conocimiento sobre el comportamiento a cortante de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante con laminados de polímeros reforzados con fibras, y en particular identificar y cuantificar la contribución a la resistencia a cortante del refuerzo externo de FRP.

Para lograr el objetivo principal se plantea utilizar la siguiente metodología:

- 1) Estudio comparativo de las formulaciones existentes para evaluar analíticamente tanto la contribución del refuerzo con FRP a la resistencia a cortante como el cortante último del elemento reforzado.
- 2) Planteamiento, diseño y desarrollo de campaña experimental de vigas de hormigón armado de sección en T con diferentes configuraciones de refuerzo a cortante con FRP. Definición de instrumentación para obtener información sobre la contribución de las diferentes componentes a la resistencia a cortante.
- 3) Desarrollo de un sistema de anclaje para retardar el desprendimiento prematuro del refuerzo externo a cortante.
- 4) Análisis de resultados de la campaña experimental. Interpretación de resultados relativos a deformaciones en armaduras pasivas longitudinales y transversales, refuerzo exterior, carga última, flechas, identificación de fisura crítica, inclinación de las fisuras.
- 5) Identificación de las contribuciones del hormigón, de la armadura transversal y del refuerzo de FRP a la resistencia a cortante.

1.3. Estructura de la tesis

El presente documento se estructura en seis capítulos y cinco anejos.

En el primer capítulo se realiza la introducción, en la que se identifica el problema y se indica la motivación del trabajo realizado. Seguidamente, se describe el objetivo principal la metodología de trabajo seguida en esta tesis. Por último, se describe el contenido del documento.

En el segundo capítulo se sintetiza el estado del conocimiento actual. En primer lugar se presentan las técnicas de refuerzo estructural, y en particular la técnica de refuerzo externo a cortante mediante laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP). Seguidamente, se recogen los modelos teóricos que evalúan la contribución de los laminados FRP a la resistencia a cortante de elementos de hormigón armado reforzados con esta técnica.

En el tercer capítulo se analiza el comportamiento de los modelos teóricos existentes mediante la comparación de los resultados experimentales y las predicciones teóricas de la contribución del FRP a la resistencia a cortante. Para ellos, se ha elaborado una extensa base de datos que recoge los ensayos a cortante publicados en la literatura hasta el momento.

En el cuarto capítulo, se describe la campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC, que consiste en 20 ensayos a cortante de vigas de hormigón armado de sección en T con armadura transversal reforzadas externamente

mediante laminados de fibra de carbono, en configuración en forma de U. En la campaña experimental, se ha estudiado la influencia de dos cuantías de armadura longitudinal, diferentes cuantías y configuraciones (continua y discontinua) de refuerzo transversal con FRP, y la aplicación o no de sistemas de anclaje de los laminados.

En el quinto capítulo se realiza un análisis e interpretación de los resultados experimentales obtenidos durante la campaña. Se estudia el efecto de la cuantía transversal de FRP, de la cuantía longitudinal de acero y del anclaje en relación al cortante último. Se analiza el ángulo de inclinación de las fisuras de cortante, los desplazamientos, las deformaciones en la armadura longitudinal y transversal de acero y las deformaciones en los laminados de FRP. Se estudia la relación entre el desprendimiento del FRP y la plastificación de la armadura transversal de acero. A partir de los datos de la instrumentación, se obtiene la contribución a la resistencia a cortante del hormigón, del acero, del FRP y del ala. Finalmente se comparan los resultados experimentales con los modelos teóricos recogidos en las guías de diseño existentes.

Finalmente, en el sexto capítulo se resumen las conclusiones obtenidas del trabajo realizado y se proponen futuras líneas de investigación.

En el Anejo 1 se incluyen las características geométricas y mecánicas de los ensayos de la base de datos. En el Anejo 2 se proporciona documentación adicional de la campaña experimental analizando las fisuras producidas y estudiando la contribución del hormigón, del acero, y del FRP a la resistencia a cortante.

En el Anejo 3 se incluyen gráficos que relacionan la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total. Se indica también cuando plastifica el acero y cuando se produce el desprendimiento del FRP.

En el Anejo 4 se exponen las resistencias a cortante del hormigón, del acero, del FRP y del ala respecto al cortante último de la rotura de la viga con el valor del cortante para la plastificación del acero y para el desprendimiento del refuerzo FRP.

En el Anejo 5 se aportan gráficos de la contribución a cortante del acero y del FRP respecto al cortante total.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO RELATIVO AL REFUERZO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE LAMINADOS FRP ADHERIDOS EXTERNAMENTE

2.1 Técnicas de refuerzo estructural

El refuerzo, reparación y rehabilitación de las infraestructuras existentes, tanto en el campo de la ingeniería civil como en el de la edificación, es un tema de vigente actualidad. Los principales motivos por los que se lleva a cabo un refuerzo son el aumento de las solicitaciones asociado a un cambio de uso o bien la restitución de la capacidad portante de una estructura ya sea por deterioro de la misma por factores ambientales, errores de proyecto o de construcción, o incluso por situaciones accidentales como impactos o terremotos.

Entre los refuerzos convencionales de las estructuras de hormigón se encuentran los recrecidos de sección con aporte o no de armadura, los encamisados metálicos, así como las platabandas de acero adheridas externamente. El recrecido del elemento a reforzar se realiza con aporte de hormigón o de morteros de alta resistencia sin retracción con o sin aportaciones de armadura pasiva. Esta técnica resulta muy eficaz respecto al incremento de resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura, pero puede llegar a poner fuera de servicio temporalmente la estructura. Además, hay que contemplar que este tipo de refuerzo implica el aumento del peso propio de la estructura, lo que implica un incremento de esfuerzos.

Otra técnica para el refuerzo de estructuras de hormigón se basa en el pegado externo de una platabanda de acero con resinas epoxídicas. Este método, introducido en los años 60, ha resultado sencillo y eficaz respecto al rendimiento mecánico y a los costes pero ha comportado ciertos inconvenientes como pueden ser la corrosión de las placas de acero (que deteriora la adherencia de las resinas), la dificultad de manipulación de chapas de acero más gruesas (por su elevado peso), la necesidad de andamios, y la limitación de la longitud de las platabandas de acero (que provoca la necesidad de disponer juntas).

Para solucionar los inconvenientes que comportan los refuerzos convencionales, en los años 90, se introdujeron los materiales compuestos en el campo del refuerzo y reparación de estructuras. Desde entonces, ha tenido lugar una rápida aceptación del uso de estos materiales, que ofrecen aplicaciones en múltiples elementos estructurales como son vigas, losas, pilares, etc. El empleo de laminados FRP en lugar de platabandas de acero (ver Figura 2.1) ha resultado una solución satisfactoria a los problemas anteriormente descritos. La aplicación de laminados de polímeros reforzados con fibras supone una mejora de la estructura incrementando su resistencia a esfuerzo axial, cortante, de flexión, y/o de torsión en función de su aplicación, a la vez que aportan ductilidad sin afectar prácticamente la rigidez ni el peso propio del elemento.



Figura 2.1. Refuerzo de estructuras de hormigón armado con FRP. (a), (b) y (c) Refuerzos a flexión de losas y viga con FRP; (d) y (e) Confinamiento de pilares con FRP (Fib Bulletin 14 2001, BASF)

2.2 Refuerzo externo mediante laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP)

Los laminados de polímeros reforzados con fibras, FRP, consisten en la agrupación de filamentos de fibras, generalmente de vidrio, carbono o aramida continuas mezcladas en una matriz polimérica, generalmente epoxi, viniléster o poliéster termoestable. La función de la matriz es proteger las fibras y distribuir uniformemente la carga entre éstas.

En el marco del refuerzo estructural, el término *material compuesto*, se refiere a aquellos materiales que resultan de la unión de dos o más materiales homogéneos con propiedades diferentes que derivan en un producto final en el que se alcanzan las propiedades mecánicas

deseadas de la combinación de ambos. En la categoría específica de los FRP, la inclusión de las fibras a la matriz supone la mejora mecánica de la resistencia y rigidez de ésta. La medida en la que la resistencia y la rigidez se incrementan en un polímero reforzado con fibras depende de las propiedades mecánicas de la fibra, de la matriz, del volumen relativo de fibras, y de la longitud y orientación de la fibra dentro de la matriz.

2.2.1. Materiales

La selección de los materiales que constituyen el material compuesto es relevante, ya que cada sistema es único, puesto que la resina y las fibras están diseñadas para trabajar de forma conjunta. Este hecho implica que una misma matriz no tiene por qué funcionar correctamente para otro tipo de fibra para la que no ha sido diseñada. Es más, el sistema de resinas tiene que presentar una buena adherencia al soporte de hormigón.

Los sistemas de FRP se pueden clasificar según su fabricación en:

- Sistemas de laminados realizados in situ mediante la técnica del “wet lay-up” (sucesión de láminas de fibras y capas de resina que forman el laminado al fraguar la matriz).
- Sistemas de laminados FRP prefabricados mediante la técnica de pultrusión.
- Otros sistemas especiales (ej.: filament winding, etc).

Los laminados fabricados mediante wet lay-up se adhieren a la superficie de refuerzo directamente a través de la propia resina del laminado. Sin embargo, los laminados prefabricados requieren de un adhesivo para aplicar el refuerzo al soporte.

Las condiciones de contorno (limpieza y temperatura, etc...) son muy importantes para alcanzar una buena adherencia entre los dos materiales.

A continuación se describen brevemente los dos principales componentes: matrices y fibras.

2.2.1.1. Adhesivos y matrices

2.2.1.1.1. Adhesivos

Los adhesivos transmiten los esfuerzos de tracción entre el soporte y el refuerzo mediante tensiones tangenciales, de manera que se pueda desarrollar la acción del refuerzo.

El adhesivo más común en el marco del refuerzo estructural son las resinas de origen epoxídico que son resultado de la mezcla entre una resina epoxi (polímero) con un componente endurecedor. Dependiendo de los requisitos de la aplicación, el adhesivo puede contener rellenos especiales o aditivos de endurecimiento entre otros (Fib Bulletin 14, 2001). Para su correcta aplicación se necesita la preparación de las cantidades indicadas, buena calidad de los materiales adherentes, control de la temperatura a la que se hace la mezcla, la aplicación y el curado. La disposición del adhesivo requiere también unas técnicas apropiadas para el tratamiento de la superficie antes de la aplicación del compuesto, y unas correctas propiedades de expansión térmica, fluencia y resistencia química a la abrasión.

Los adhesivos epoxis tienen diversas ventajas respecto a otros polímeros como agentes adhesivos para su uso en ingeniería civil, como por ejemplo (*Hollaway and Leeming 1999*):

- Alta actividad superficial y buenas propiedades de humectación para una variedad de sustratos.
- Se pueden formular para tener un largo “tiempo de apertura”.
- Alta resistencia de cohesión del compuesto curado.

- Posibilidad de endurecimiento por inclusión de una fase de adhesivo disperso.
- La ausencia de subproductos durante la reacción de curado minimiza la retracción y permite la adherencia de grandes áreas simplemente por presión de contacto.
- Baja retracción comparada con los poliésteres, acrílicos y vinílicos.
- Baja fluencia y mayor resistencia en la aplicación de cargas de larga duración.
- Posibilidad de composición tixotrópica para la aplicación en superficies verticales.
- Adaptación a líneas de contorno irregulares.

Los valores típicos de las propiedades más comunes de los adhesivos epoxis utilizados en ingeniería civil y arquitectura se facilitan en la Tabla 2. 1. Para poder contrastarlas se presentan en comparación con las propiedades del acero y del hormigón tipo.

Tabla 2. 1 Comparativa de las propiedades más comunes de adhesivos epoxis, hormigón y acero (Täljsten 1994)

Propiedad (a 20° C)	Adhesivo epoxi curado	Hormigón	Acero
Densidad (Kg/m ³)	1100 – 1700	2350	7800
Módulo de elasticidad (GPa)	0.5 – 20	20 – 50	205
Módulo de deformación tangencial (GPa)	0.2 – 8	8 – 21	80
Coefficiente de Poisson	0.3 – 0.4	0.2	0.3
Resistencia a tracción (MPa)	9 – 30	1 – 4	200 – 600
Resistencia a cortante (MPa)	10 – 30	2 – 5	200 – 600
Resistencia a compresión (MPa)	55 – 110	25 – 150	200 – 600
Deformación de tracción en rotura (%)	0.5 – 5	0.015	25
Energía de fractura (aprox) (Jm ⁻²)	200 – 1000	100	10 ⁵ - 10 ⁶
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	25 – 100	11 – 13	10 – 15
Absorción de agua: 7 días – 25°C (% w/w)	0.1 – 3	5	0
Temperatura de transición vítrea (°C)	45 - 80	---	---

2.2.1.1.2. Matrices

Las matrices para un compuesto FRP pueden ser termoestables o termoplásticas, siendo el primer tipo el más común. La función de la matriz es proteger las fibras contra la abrasión o la corrosión del medio ambiente, unir las fibras entre sí y distribuir la carga, y tiene una gran influencia sobre diversas propiedades mecánicas del material compuesto, como son el módulo transversal y las resistencias a cortante y a compresión.

Para escoger la matriz del compuesto se debe tener en cuenta que las características físicas y químicas de la matriz, como la temperatura de fusión o de curado, la viscosidad y la reactividad de las fibras, influyen en la elección del proceso de fabricación.

Las resinas epoxi, el poliéster y el viniléster son los materiales más comunes de matrices poliméricas. Se trata de polímeros termoestables con buena resistencia química. Las resinas

epoxis tienen, en general, mejores propiedades mecánicas que los poliésteres y los vinilésteres, y una excelente durabilidad, mientras que los poliésteres y los vinilésteres son más baratos.

2.2.1.2. Fibras

Las fibras son resistentes y rígidas. La alta relación longitud/diámetro de las fibras permite una transferencia de carga efectiva entre resina y fibras. Su diámetro aproximado es de 5-20 μm , y pueden fabricarse de manera continua o discontinua, como refuerzos unidireccionales, bidireccionales, y actualmente ya existen en formato multidireccional. Las fibras tienen un comportamiento elástico-lineal hasta rotura y por lo tanto, no tienen ductilidad, a diferencia del acero. Los tipos de fibras más utilizados para el refuerzo de estructuras son tres: carbono (que conforma el CFRP, siglas de carbon fibre reinforced polymer), vidrio (GFRP) y aramida (AFRP). Las características de las fibras, en función de cual sea su material, tienen un rango de oscilación muy amplio.

Las fibras de carbono están basadas en *pitch* (resinas) o en poliacrilonitril (PAN) como primeras materias. Los *pitch* son resinas derivadas del petróleo o de la brea, ambos estabilizados mediante calor, mientras que el poliacrilonitril (PAN) se carboniza. El diámetro de las fibras provenientes de las resinas oscila entre 9 y 18 μm , mientras que el de las fibras provenientes del poliacrilonitrilo va de los 5 a los 8 μm . La dimensión de estos diámetros varía en función de la orientación en que cristalizan. En la Tabla 2. 2 se pueden observar valores típicos de algunas de las propiedades de diferentes tipos de fibras (Feldman 1989, Kim 1995). Hay que tener en cuenta que la tabla sólo comprende los valores de las fibras y que para dimensionar el refuerzo hay que hacer la estimación del compuesto, añadiendo las resinas, y reducir estos valores para cargas de larga duración, factores de corrosión ambiental, etc.

Uno de los aspectos más destacables de las fibras de vidrio es su bajo coste económico. Se clasifican en tres tipos: fibras *E-glass*, fibras *S-glass* y fibras *AR-glass*. Las fibras *E-glass*, tienen altas cantidades de ácido bórico y aluminato y su principal problema es su baja resistencia a los álcalis. Lo mismo sucede con las fibras *S-glass* que aun siendo más resistentes y rígidas que las fibras *E-glass*, tampoco son resistentes a los álcalis. Una solución para evitar que la fibra de vidrio sea erosionada por el cemento alcalino, son las fibras *AR-glass*, en las que se añaden grandes cantidades de zirconio.

Las fibras de aramida fueron introducidas por primera vez en 1971. La estructura de la fibra de aramida es anisotrópica y proporciona mayor resistencia y módulo en la dirección longitudinal de la fibra. El diámetro de la fibra de aramida es de aproximadamente 12 μm . Éstas responden a un comportamiento elástico a tracción, mientras que a compresión son no-lineales y dúctiles; también presentan alta tenacidad, tolerancia al daño y buenas características de fatiga.

Tabla 2. 2 Propiedades características de las fibras (Feldman 1989, Kim 1995)

Material	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Deformación última (a tracción) (%)
Carbono			
Alta resistencia	215 – 235	3500 – 4800	1.4 - 2.0
Ultra alta resistencia	215 - 235	3500 – 6000	1.5 – 2.3
Alto Módulo	350 - 500	2500 – 3100	0.5 – 0.9
Ultra alto Módulo	500 - 700	2100 – 2400	0.2 – 0.4
Vidrio			
E	70	1900 – 3000	3.0 – 4.5
S	85 - 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5
Aramida			
Bajo Módulo	70 - 80	3500 – 4100	4.3 – 5.0
Alto Módulo	115 - 130	3500 - 4000	2.5 – 3.5

2.2.2. Propiedades de la lámina de FRP

El volumen de fibras en un compuesto oscila entre el 25 y el 70 %. Las propiedades mecánicas de las láminas FRP se pueden estimar si se conocen las de sus materiales constituyentes y el porcentaje de cada uno de ellos, según las ecuaciones de la teoría de mezclas:

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m \quad (2.1)$$

$$f_f = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m \quad (2.2)$$

$$V_{fib} + V_m = 1 \quad (2.3)$$

donde:

- E_f : Módulo de elasticidad del FRP en la dirección de las fibras.
- E_{fib} : Módulo de elasticidad de las fibras.
- E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.
- V_{fib} : Volumen de fibras.
- V_m : Volumen de la matriz.
- f_f : Resistencia a tracción del FRP en la dirección de las fibras.
- f_{fib} : Resistencia a tracción de las fibras.
- f_m : Resistencia a tracción de la matriz.

En el caso de los FRP elaborados *in situ* o wet lay-up, estas formulaciones proporcionan un resultado aproximado dado el elevado grado de incertidumbre respecto al espesor final y el volumen real de fibras. Alternativamente en el cálculo, se pueden emplear las propiedades de las fibras con el espesor de éstas (FIB Bulletin 14 2001). En este caso, las propiedades

mecánicas de las fibras se multiplican por un factor de reducción r proporcionado por el fabricante. Como alternativa, el proveedor de FRP puede facilitar directamente las propiedades mecánicas y geométricas del sistema *in situ*, obtenidas mediante ensayos experimentales. La equivalencia de este método con el anterior se basa en la ecuación:

$$t_{fib} \cdot E_{fib} \cdot r = t_f \cdot E_f \tag{2.4}$$

donde:

- t_{fib} : Espesor de las fibras.
- t_f : Espesor del compuesto (fibras más resina)
- r : Factor de reducción proporcionado por el fabricante.

Un laminado está formado por un conjunto de láminas con diferentes orientaciones que hace que sus propiedades mecánicas no sean ortotropicas y dependan del contenido y orientación de las fibras.

La Tabla 2. 3 compara características mecánicas típicas del FRP prefabricado y del acero convencional.

Tabla 2. 3 Propiedades mecánicas de los laminados de FRP prefabricados en contraste con el acero. FIB Bulletin 14 (2001).

Material	Módulo Elástico (GPa) E_f	Resistencia a tracción (MPa) f_f	Deformación última (a tracción) (%) ϵ_{fu}
Laminados prefabricados de CFRP			
Bajo Módulo Elástico	170	2800	1.6
Alto Módulo Elástico	300	1300	0.5
Acero Convencional	200	400	25
(Def. límite elástico 0,2 %)			

La tabla adjunta muestra que la resistencia a tracción del FRP es claramente de 3,25 a 7 veces la de un acero convencional, mientras que en el caso del módulo de elasticidad, la dispersión oscila considerablemente. La relación tensión-deformación de ambos materiales es muy diferente, ya que mientras el acero tiene una gran rama plástica y en consecuencia ductilidad, en el caso del FRP, cuando éste finaliza la rama elástica se produce la rotura, que es frágil.

A pesar de que esto podría ser interpretado como una desventaja severa, los elementos estructurales a reforzar (vigas, pilares, muros, etc) pueden conservar o incrementar su ductilidad si el refuerzo FRP se diseña apropiadamente.

Los tejidos de fibra de vidrio y de aramida, y en algunos casos también los tejidos de fibra de carbono, presentan un módulo elástico inferior al del acero (aprox. 200.000 N/mm²), aunque su resistencia es significativamente mayor tal y como se puede ver en la Figura 2.2, que compara el acero respecto típicos diagramas de tensión-deformación de materiales compuestos unidireccionales bajo cargas bajas monotónicas (FIB Bulletin 14, 2001).

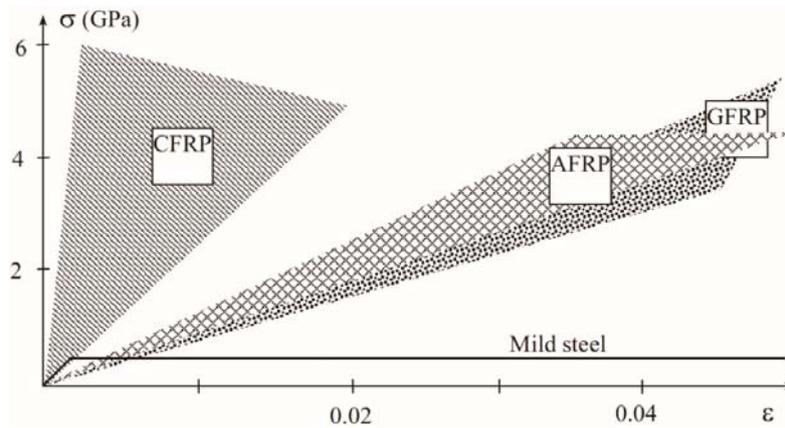


Figura 2.2. Diagrama tensión-deformación de tracción uniaxial para diferentes FRPs unidireccionales y aceros. CFRP, AFRP y GFRP (FIB Bulletin 14, 2001).

La resistencia y rigidez de las fibras es mucho más elevada que la de las resinas, motivo por el cual el compuesto adquiere unas propiedades mecánicas inferiores a las de su principal componente. En la Figura 2. 3 se aprecia el efecto del porcentaje de fibras aplicadas respecto al total del compuesto.

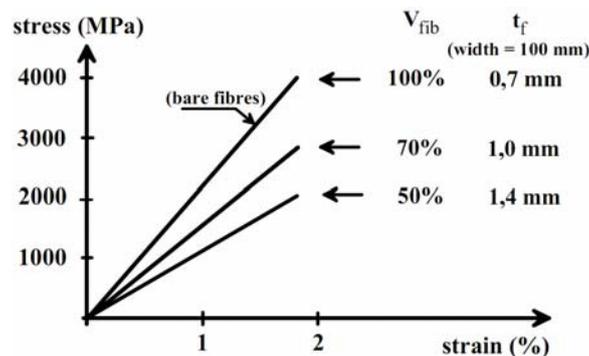


Figura 2. 3. Diagrama tensión-deformación correspondiente al efecto del porcentaje de fibras aplicadas al compuesto, (FIB Bulletin 14, 2001).

En resumen, para el refuerzo de estructuras, los materiales compuestos resultan interesantes por los siguientes motivos:

- Resistencia a la corrosión.
- Bajo peso (aprox. $\frac{1}{4}$ del acero) lo que facilita su aplicación en espacios reducidos.
- Reducción de medios auxiliares de la obra y reducción de los costes de mano de obra.
- Elevada resistencia a la tracción
- Rigidez adaptable al diseño prescrito.
- Alta capacidad de deformación.
- Disponibilidad prácticamente ilimitada de tamaños, geometrías y dimensiones de FRP.

Los materiales compuestos, sin embargo, también presentan inconvenientes:

- Comportamiento elástico-lineal hasta rotura sin deformaciones plásticas significativas, dando lugar a una baja ductilidad, a pesar de que la rotura sucede a grandes deformaciones (a diferencia del acero que tiene un comportamiento elastoplástico).
- Alta relación precio/peso de los materiales compuestos (aunque el alto precio se compensa con la reducción del coste de medios auxiliares de la obra debido a su bajo peso).

- Los AFRP y CFRP (aramida y carbono respectivamente) tienen coeficientes de expansión térmica incompatibles con el hormigón.
- Degradación prematura y colapso si se expone a elevadas temperaturas (ablandamiento de las resinas a 45-70 ° C).

Las citadas razones hacen que los materiales compuestos no puedan ser concebidos como un sustituto total del acero ni de otros materiales en reparaciones estructurales, pero sí que debe hacerse un balance entre sus ventajas e inconvenientes para cada caso concreto.

2.2.3. Disposición de los laminados como refuerzo externo a cortante

Los laminados de FRP se pueden utilizar como refuerzo externo a flexión, cortante y/o para confinamiento de pilares. En el caso del refuerzo a cortante, las configuraciones de refuerzo más comunes se muestran en la Figura 2. 4.

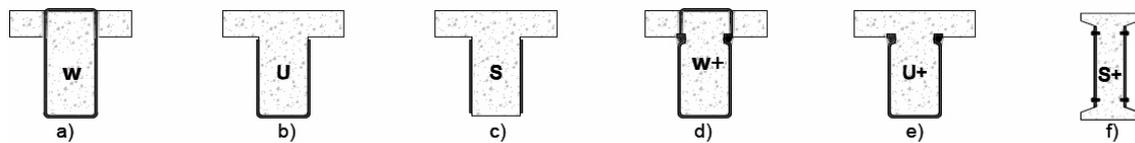


Figura 2. 4. Tipos de refuerzos en sección de vigas con FRP: W (wrapping): Sección totalmente envuelta, U: Sección reforzada en U, S (sides): Sección reforzada sólo en los laterales, W+ (wrapping): Sección totalmente envuelta más anclajes, U+: Sección reforzada en U más anclajes, S+ (sides): Sección reforzada sólo en los laterales más anclajes. (Leung et al. 2004)

Las fibras pueden colocarse con diferentes orientaciones, y de forma continua o discontinua, tal y como se muestra en la Figura 2. 5.

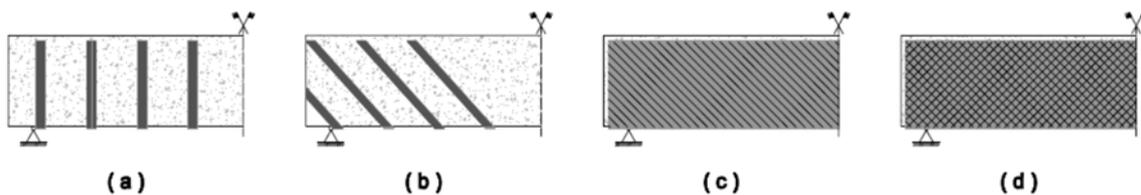


Figura 2. 5. Tipos de refuerzos en vigas con FRP. Alzado. Fibras dispuestas discontinuas discretizadas como estribos: (a) orientación de las fibras perpendicular al eje de la viga, (b) orientación de las fibras cosiendo las fisuras de cortante. Fibras dispuestas como láminas continuas: (c) orientación de las fibras cosiendo las fisuras de cortante, (d) fibras orientadas en múltiples direcciones. (Leung et al. 2004)

Para las configuraciones del refuerzo en forma de U o colocado en el alma (S), uno de los principales problemas es que no se llega a agotar sus prestaciones mecánicas, al producirse su desprendimiento prematuro del material de soporte. Este fenómeno no ocurre en vigas donde el refuerzo a cortante se disponga envolviendo el perímetro de la sección (en W).

Se han desarrollado diferentes sistemas de anclajes mecánicos para evitar este fenómeno, sujetando los extremos libres de los laminados, con la finalidad de aumentar el anclaje de éstos (Mofidi y Chaallal, 2011).

2.3. Modelos teóricos existentes para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante

Existe un gran número de estudios de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante con laminados de fibra de carbono desarrollados con el fin de evaluar la contribución a la resistencia a cortante. A pesar de todo, todavía no están perfectamente definidos los mecanismos resistentes a cortante. En una viga de hormigón armado, el cortante de agotamiento del alma se calcula sumando la contribución del hormigón (V_c) y el acero de la armadura transversal (V_s). Para calcular la resistencia a cortante de vigas reforzadas externamente con laminados FRP, se utiliza el mismo procedimiento en la mayoría de casos, sumando la contribución del FRP (V_{FRP}) al cortante de agotamiento del alma de la viga sin reforzar.

Mientras que las ecuaciones semiempíricas del cálculo de la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado convencionales han sido contrastadas con numerosos resultados experimentales existentes, las ecuaciones para predecir la resistencia a cortante de vigas reforzadas con FRP se comparan con un número más reducido de ensayos.

Entre los primeros modelos teóricos que dimensionaban los refuerzos a cortante de FRP se encuentra Chaallal et al. (1998). Estos autores propusieron una ecuación para calcular la contribución a cortante del FRP equiparando este compuesto a cercos de acero en el interior de la viga, ya que consideraban que ambos materiales tenían un comportamiento similar. Posteriormente, los estudios se centraron en el desarrollo de nuevas teorías basadas en el campo real de la distribución de deformaciones.

Malek y Saadatmanesh (1998a, b) introdujeron en su formulación el comportamiento anisotrópico del FRP. Este comportamiento no se puede despreciar dada la influencia que tiene la orientación de las fibras en la inclinación de fisuras de cortante. La inclinación de éstas también depende del espesor del laminado, del porcentaje de estribos de acero existentes, de la calidad del hormigón y del porcentaje y diámetro de las barras de acero longitudinales a tracción.

Triantafillou (1998), y Triantafillou y Antonopoulos (2000), desarrollaron un modelo a partir de una campaña experimental donde se demuestra que la contribución del FRP se ve limitada por la deformación efectiva en el compuesto. Más adelante, Khalifa et al. (1998, 2000) modificaron el modelo de Triantafillou (1998) definiendo la tensión máxima del laminado como un porcentaje de la deformación última del FRP, que tiene en cuenta el posible desprendimiento del laminado, controla el ancho de fisuras a cortante y la pérdida del efecto de engranaje de los áridos.

El *FIB Task Group 9.3*, en el FIB Bulletin 14 (2001) desarrolló un modelo teórico semiempírico para predecir la contribución de las láminas de FRP. Este modelo presenta algunas limitaciones, ya que sólo se puede utilizar para secciones completamente envueltas en CFRP o AFRP (W), y para configuraciones de CFRP laterales (S) y en U.

De acuerdo con Deniaud y Cheng (2001, 2003) las deformaciones en el FRP se distribuyen linealmente a lo largo de los laminados que atraviesan las fisuras. En Deniaud y Cheng (2003), evalúan el modelo de Loov (1998) con la campaña experimental desarrollada por los autores obteniéndose una buena concordancia entre las predicciones del modelo y los resultados. El modelo fue más refinado por los mismos Deniaud y Cheng (2004).

Pellegrino y Modena el año 2002 propusieron un modelo en el que se define una deformación efectiva del FRP que se mantiene adherido una vez se desprende el laminado. Según los estudios experimentales realizados por estos autores, la relación de rigideces entre la armadura transversal y la armadura de refuerzo con FRP tiene un efecto muy significativo sobre la mejora de este refuerzo a cortante. El modelo desarrollado por Pellegrino y Modena (2002, 2006) se limita a vigas reforzadas con FRP en los laterales (S) o en forma de U. A partir de una deformación efectiva del FRP, que permanece adherido una vez se desprende el laminado, se establece la contribución del FRP que se suma a la contribución de la armadura transversal a la resistencia a cortante.

Chen y Teng (2003 a, b, 2004) analizaron el fallo a cortante de las vigas de hormigón armado reforzadas con FRP y concluyeron que la distribución de tensiones en el FRP a lo largo del plano de fisura no es uniforme. Propusieron un modelo de vigas reforzadas con FRP que tiene en cuenta los modos de fallo por rotura de fibras y por desprendimiento de éstas. El modelo también asume una distribución de la tensión no uniforme en el FRP a lo largo de la fisura de cortante. La limitación de tensión es introducida por el coeficiente de la longitud de adherencia y el coeficiente de anchura de los estribos.

Carolin (2003) y Carolin y Täljsten (2005) propusieron una ecuación para predecir la contribución de los compuestos de FRP al esfuerzo cortante, limitando el fallo por tracción de las fibras. Se corroboró la distribución no uniforme de las deformaciones del FRP sobre la sección transversal. En el diseño se recomendó de un 55 a un 65 % del valor máximo de la deformación medida.

Adhikary et al. (2004) propusieron dos ecuaciones para determinar la resistencia a cortante de los refuerzos con laminados de fibras de carbono (CFRP) y de fibras de aramida (ARFP), calibrando el modelo propuesto por Triantafillou (1998).

El modelo de cortante propuesto por Zhang y Hsu (2005) siguió dos enfoques: la calibración del modelo ajustando la curva y el mecanismo de adherencia. Se sugirió que se utilizara el factor de reducción más pequeño para la deformación efectiva obtenida a partir de los dos métodos. El modelo desarrollado por Ye et al. (2005) tiene su teórico punto de partida en el modelo de Chen y Teng, y se utiliza en el borrador del Código de Diseño Chino.

Monti y Liotta (2007) propusieron un modelo para evaluar la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado reforzadas con FRP basado en el cálculo de las tensiones existentes en el FRP que atraviesa la fisura de cortante, en el momento en el que se produce el desprendimiento del FRP para las configuraciones en U o side-bonded, o en la rotura del FRP para la configuración wrapped. Este modelo se utiliza actualmente en las recomendaciones italianas CNR-DT 200/2004.

2.4. Formulaciones incluidas en las guías de diseño para determinar la contribución del FRP a la resistencia a cortante

A continuación se exponen las formulaciones analíticas para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante recogidas en las recomendaciones o guías de diseño existentes: FIB Bulletin 14 (2001), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012), CNR-DT200/2004 (2004) y DAfStb (2013).

El Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo cortante se puede alcanzar, ya sea por agotarse la resistencia a compresión del alma, o por agotarse su resistencia a tracción. Para las piezas reforzadas la comprobación del agotamiento por compresión oblicua en el alma se realiza de la misma forma que la pieza original.

Para el cortante de agotamiento por tracción en el alma, los modelos de diseño citados consideran que el cortante último de una pieza de hormigón armado reforzada con FRP se puede obtener como la suma de las contribuciones de los diferentes componentes (Ec. 2.5): la armadura transversal existente, V_s , y los refuerzos externos de FRP, V_{FRP} , y en algunos casos, si es que la consideran, la contribución del hormigón, V_c :

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{FRP} \quad (2.5)$$

donde V_c y V_s se calculan como si se tratara de una viga sin reforzar, independientemente del tipo de refuerzo de FRP adoptado. En la Figura 2.6 se indica la nomenclatura de la geometría de las vigas reforzadas que se utilizará en adelante en el documento.

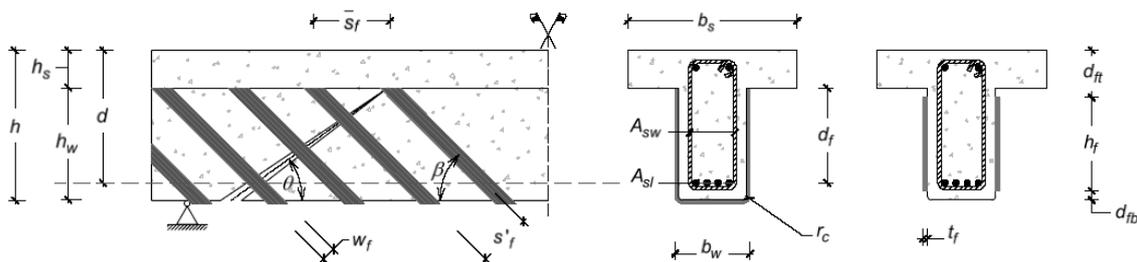


Figura 2. 6. Nomenclatura utilizada para definir las propiedades geométricas de los refuerzos externos con FRP.

De acuerdo con la normativa vigente española, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (2008), la contribución de la armadura transversal del alma a la resistencia de esfuerzo cortante, V_{su} , es:

$$V_{su} = 0,9 \cdot d \cdot A_{\alpha} \cdot f_{y_{\alpha,d}} \cdot \text{Cotg} \theta \quad (2.6)$$

donde:

d : distancia desde la fibra más comprimida de hormigón hasta el centro de gravedad de la armadura traccionada.

$f_{y_{\alpha,d}}$: Resistencia de cálculo de la armadura transversal A_{α} .

- θ : Ángulo entre las bielas de compresión de hormigón y el eje de la pieza. Debe verificar que: $0,5 \leq \cotg\theta \leq 2,0$
- $A\alpha$: Área por unidad de longitud de cada grupo de armaduras que forman un ángulo α con la directriz de la pieza (en mm^2/mm).

La contribución del hormigón a la resistencia de esfuerzo cortante según la Instrucción EHE-08 es:

$$V_{cu} = (0,15 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{1/3} + 0,15 \sigma_{cd}) \cdot \beta \cdot b_0 \cdot d \quad (2.7)$$

donde:

f_{cv} : Resistencia efectiva del hormigón a cortante en N/mm^2 de valor $f_{cv} = f_{ck}$ con f_{cv} no mayor que $15 \text{ N}/\text{mm}^2$ en el caso de control indirecto del hormigón.

f_{ck} : Resistencia a compresión del hormigón en N/mm^2 . Se adoptaran valores de f_{ck} de hasta $100 \text{ N}/\text{mm}^2$.

σ_{cd} : Tensión axial media en el alma de la sección.

$$\beta = \frac{2 \cotg\theta - 1}{2 \cotg\theta_e - 1} \quad \text{si } 0,5 \leq \cotg\theta < \cotg\theta_e \quad (2.8)$$

$$\beta = \frac{\cotg\theta - 2}{\cotg\theta_e - 2} \quad \text{si } \cotg\theta_e \leq \cotg\theta \leq 2,0 \quad (2.9)$$

θ_e : Ángulo de referencia de inclinación de las fisuras, por el cual puede adoptarse la expresión anteriormente citada:

$$\theta_e = 29 + 7\varepsilon_x \quad (2.10)$$

ξ : Coeficiente obtenido según: $\xi = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) < 2,0$ con d en mm.

ρ_l : Cuantía geométrica de la armadura longitudinal principal de tracción, pasiva y activa adherente, anclada a una distancia igual o mayor que d a partir de la sección de estudio.

$$\rho_l = \frac{A_s + A_p}{b_0 \cdot d} \leq 0,02 \quad (2.11)$$

b_0 : Ancho del alma según el punto 44.2.1 de la EHE-08 (2008).

ε_x : Deformación longitudinal en el alma, expresada en tanto por mil, y obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_x \approx \frac{\frac{M_d + V_{rd} - 0,5N_d - A_p \sigma_{p0}}{z}}{2(E_s A_s + E_p A_p)} \cdot 1000 \neq 0 \quad (2.12)$$

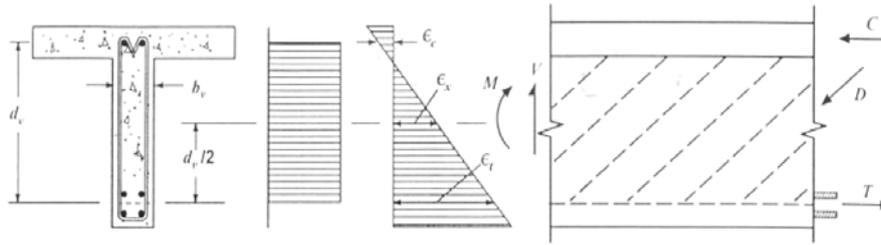


Figura 2. 7. Deformación longitudinal en el alma.

donde:

σ_{p0} : Tensión de los tendones de pretensado cuando la deformación del hormigón que los envuelve es igual a 0.

Para evaluar la deformación longitudinal del alma, ϵ_x , se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- V_{rd} y M_d se toman positivos y M_d no se tomará menor que $z \cdot V_{rd}$.
- N_d se considera positivo de compresión.
- Los valores de A_s y A_p son los de la armadura anclada en la sección de estudio. En caso contrario, se reducirá en proporción a su falta de longitud de anclaje.
- Si la tensión de tracción puede producir la fisuración de la cabeza comprimida, se doblará el valor de ϵ_x obtenido en la ecuación.

2.4.2. Contribución a cortante de los laminados FRP según el FIB Bulletin 14 (2001)

$$V_{FRP} = 0.9 \cdot \epsilon_{fed} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \sin\beta \quad (2.13)$$

donde:

Si el refuerzo se aplica:

· Discontinuo:
$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f} \quad (2.14)$$

· Continuo:
$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin\beta}{b_w} \quad (2.15)$$

$$\epsilon_{fed} = \frac{0.8 \cdot \epsilon_{fe}}{\gamma_f} \quad (2.16)$$

Tabla 2. 4 Coeficientes de seguridad parcial, γ_f , para materiales compuestos de FRP según FIB Bulletin 14 (2001).

Tipo de FRP	Aplicación tipo A ⁽¹⁾	Aplicación tipo B ⁽²⁾
CFRP	1,20	1,35
AFRP	1,25	1,45
GFRP	1,30	1,50

⁽¹⁾ Aplicación de sistemas prefabricados de refuerzos FRP adheridos externamente en condiciones normales de control de calidad. Aplicación de sistemas “*wet lay-up*” si se toman todas las previsiones necesarias para obtener un alto grado de control de la calidad tanto en las condiciones de aplicación como en el proceso de esta aplicación.

⁽²⁾ Aplicación de sistemas “*wet lay-up*” en condiciones normales de control de calidad. Aplicación de cualquier sistema en condiciones difíciles de aplicación.

- Configuración wrapped (W) en AFRP:

$$\varepsilon_{fe} = 0.048 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0.47} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (2.17)$$

- Configuración wrapped (W) en CFRP:

$$\varepsilon_{fe} = 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0.30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (2.18)$$

- Configuración en U (U) o en los laterales (S) para laminados CFRP:

$$\varepsilon_{fe} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0.56} \cdot 10^{-3} \\ 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \frac{\rho_f}{1000}} \right)^{0.30} \cdot \varepsilon_{fu} \end{array} \right. \quad (2.19)$$

2.4.3. Contribución a cortante de los laminados FRP según la ACI 440.2R-08 (2008)

$$V_{FRP} = \emptyset \cdot \Psi_f \cdot (2 \cdot t_f \cdot \frac{W_f}{S_f} \cdot f_{fe} \cdot (\sin\beta + \cos\beta)) \cdot d_f \quad (2.20)$$

donde: $\emptyset = 0,85$

Configuración W: $\Psi_f = 0,95$

Configuración U o en S: $\Psi_f = 0,85$

$$f_{FRP} = E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP} \quad (2.21)$$

Si el refuerzo de FRP se aplica:

· Configuración (W): $\varepsilon_{FRP} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{FRP,u}$ (2.22)

· Configuración en U (U) o en los laterales (S): $\varepsilon_{FRP} = k_v \cdot \varepsilon_{FRP,u} \leq 0,004$ (2.23)

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot l_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.24)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{ck}}{27}\right)^{2/3} \quad (2.25)$$

$$l_e = \frac{23300}{(t_f \cdot E_{FRP})^{0,58}} \quad (2.26)$$

Si el refuerzo de FRP se aplica:

· En U (U): $k_2 = \frac{d_f - l_e}{d_f}$ (2.27)

· En los laterales (S): $k_2 = \frac{d_f - 2 \cdot l_e}{d_f}$ (2.28)

2.4.4. Contribución a cortante de los laminados FRP según el TR 55 (2012)

$$V_{FRP} = E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP} \cdot A_{FRP} \cdot \frac{(d_f - \frac{n}{3} \cdot l_e)}{S_{FRP}} \cdot (\sin\alpha_{FRP} + \cos\alpha_{FRP}) \quad (2.29)$$

donde:

$$l_e = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{FRP} \cdot t_{FRP}}{f_{ctm}}} \quad (2.30)$$

$$S_{FRP} = 1 \quad (2.31)$$

Si el refuerzo de FRP se aplica:

· Configuración (W):

$$\varepsilon_{FRP} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_{FRP,u}}{2} \\ 0,64 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_{FRP} \cdot t_{FRP}}} \\ 0,004 \end{array} \right. \quad (2.32)$$

- Configuración en U o en las caras laterales (S):

$$\varepsilon_{FRP} = \min \begin{cases} \frac{\varepsilon_{FRP,u}}{2} \\ 0,64 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E_{FRP} \cdot t_{FRP}}} \\ 0,004 \end{cases} \quad (2.33)$$

2.4.5. Contribución a cortante de los laminados FRP según el CNR-DT200/2004 (2004)

La contribución se calcula diferenciando el tipo de sección transversal desde el principio de manera que:

Configuración en S:

$$V_{FRP} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min\{0,9 \cdot d, h_w\} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\theta} \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (2.34)$$

$$\frac{w_f}{s_f} = 1 \text{ en caso de refuerzo continuo}$$

$$f_{FRP} = f_{fdd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{\min\{0,9 \cdot d, h_w\}} \cdot \left(1 - 0,6 \cdot \sqrt{\frac{l_{eq}}{z_{rid,eq}}}\right)^2 \quad (2.35)$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (2.36)$$

$$\Gamma_{FK} = 0,03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (2.37)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad (2.38)$$

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + l_{eq} \quad (2.39)$$

$$z_{rid} = \min\{0,9 \cdot d, h_w\} - l_e \cdot \sin\beta \quad (2.40)$$

$$l_{eq} = \frac{s_f}{f_{fdd} / E_f} \cdot \sin\beta \quad (2.41)$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (2.42)$$

Configuración en U o W:

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot\beta + \cot\theta) \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (2.43)$$

$$\gamma_{Rd} = 1,20 \quad (2.44)$$

El valor f_{fed} depende del tipo de refuerzo:

Configuración en U:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin\beta}{\min\{0,9 \cdot d, h_w\}}\right] \quad (2.45)$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (2.46)$$

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (2.47)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{\frac{b_f}{2} - \frac{b}{b_f}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad (2.48)$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (2.49)$$

Configuración en W:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\Phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (2.50)$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (2.51)$$

$$\Gamma_{FK} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (2.52)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{\frac{b_f}{2} - \frac{b}{b_f}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad (2.53)$$

$$\Phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w} \quad (2.54)$$

donde r_c es el radio de redondeo de las esquinas de la sección. El cociente $\frac{r_c}{b_w}$ debe estar comprendido entre los valores 0 y 0,5.

$$f_{fd} = \eta \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m} \quad (2.55)$$

donde γ_m depende del tipo de rotura y de la certificación del FRP. Si se certifica el FRP, en caso de rotura de este toma el valor de 1,10 y en caso de desprendimiento 1,20. En cambio si no se certifica el FRP cuando se trata de rotura de este 1,25 y en caso de desprendimiento 1,50.

El resto de parámetros quedan definidos a continuación:

V_{fd} : resistencia a cortante aportada por el FRP (N).

γ_{Rd} : coeficiente de seguridad que toma el valor de 1,20.

d : canto efectivo de la sección (mm).

h_w : altura de la banda de FRP (mm).

t_f : espesor de las bandas de FRP (mm).

β : ángulo de inclinación de las bandas de FRP.

θ : ángulo de inclinación de la fisura (normalmente 45°).

w_f : ancho de las bandas de FRP (mm).

- s_f : separación de las bandas de FRP (mm).
 f_{ck} : resistencia característica del hormigón a compresión (MPa).
 f_{ctm} : resistencia media a tracción del hormigón (MPa).
 b_f : ancho eficaz del FRP tomando el siguiente valor $\min\{0,9 \cdot d, h_w\}$
 b : ancho total de la sección (mm).

2.4.6. Contribución a cortante de los laminados FRP según DAfStb (2013)

El cortante resistido por el FRP se calcula con la fórmula genérica siguiente.

$$V_{Rd,LW} = \frac{A_{LW}}{s_{LW}} \cdot z \cdot f_{Lwd} \cdot \cot\theta \quad (2.56)$$

Dependiendo de si se trata de una distribución continua o no:

$$\frac{A_{LW}}{s_{LW}} = \begin{cases} \frac{2 \cdot t_{LW} \cdot b_{LW}}{s_{LW}} & \text{Para el caso discontinuo} \\ 2 \cdot t_{LW} & \text{Para el caso continuo} \end{cases} \quad (2.57)$$

La tensión del laminado se calcula como:

$$f_{Lwd,GF} = k_R \cdot \alpha_{Zeit} \cdot f_{Ld} \quad (2.58)$$

$$k_R = \begin{cases} 0.5 \cdot \frac{r_c}{60mm} \left(2 - \frac{r_c}{60mm} \right) & r_c < 60mm \\ 0.5 & r_c \geq 60mm \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\alpha_{Zeit} = 0.75 \quad (2.60)$$

El valor f_{Ld} depende del modo de rotura siendo:

$$f_{Ld} = \min\{f_{bLwd}, f_{Lwd,G}\} \quad (2.61)$$

El valor de $f_{Lwd,G}$ corresponde a la resistencia de diseño del FRP con lo que esto hace referencia a rotura debido a rotura del FRP.

En el caso de $f_{Lwd,G}$ depende de la longitud de anclaje:

$$\text{Para } d \geq l_e; l_e \leq s_{LW} \leq d; f_{blwd} = \frac{f_{bLk,max}}{\gamma_{BA}} \quad (2.62)$$

$$\text{Para } d \geq l_e; s_{LW} \leq l_e; f_{blwd} = \frac{f_{bLk,max}}{\gamma_{BA}} \cdot \left(\left(1 - \frac{m_{LW}-1}{n_{LW}-1} \right) + \frac{m_{LW} \cdot (m_{LW}-1) \cdot s_{LW}}{2 \cdot (n_{LW}-1) \cdot l_e} \right) \quad (2.63)$$

$$\text{Para } d \leq l_e; s_{LW} \leq d; f_{blwd} = \frac{f_{bLk,max}}{\gamma_{BA}} \cdot \frac{n_{LW} \cdot s_{LW}}{2 \cdot l_e} \quad (2.64)$$

En la Figura 2. 8 se pueden apreciar los valores geométricos anteriormente expuestos.

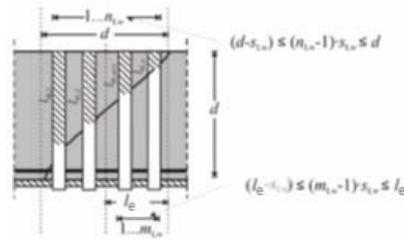


Figura 2. 8. Diagrama de parámetros para el cálculo de la resistencia a cortante del FRP según el modelo DAfStb (2013) [6]

Los valores $f_{blk,max}$ y l_e se calculan como:

$$f_{blk,max} = \sqrt{\frac{E_{Lm} \cdot s_{Lok} \cdot \tau_{L1k}}{t_L}} \quad (2.65)$$

$$l_e = \frac{2}{k_{Lb}} \sqrt{\frac{E_{Lm} \cdot t_L \cdot s_{Lok}}{\tau_{L1k}}} \quad (2.66)$$

$$\tau_{L1k} = 0.300 \cdot \sqrt{\alpha_{cc} \cdot f_{cm} \cdot \alpha_{ct} \cdot f_{ctm,surf}} \quad (2.67)$$

donde:

- E_{Lm} : Módulo de elasticidad del FRP (MPa).
- t_L : Espesor de las bandas de FRP (mm).
- s_{Lok} : Energía de fractura del adhesivo. Toma el valor de 0,201(mm).
- n_{Lw} : Ratio d/s_{Lw}
- m_{Lw} : Ratio $l_{e,max}/s_{Lw}$
- d : Longitud efectiva del FRP (mm).
- s_{Lw} : Separación entre bandas de FRP (mm).
- $f_{blk,max}$: Resistencia frente a desprendimiento (MPa).
- l_e : Longitud de adherencia efectiva del refuerzo de FRP (mm).

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE LAS GUÍAS DE DISEÑO EXISTENTES PARA EVALUAR LA CONTRIBUCIÓN DEL FRP A LA RESISTENCIA A CORTANTE

3.1. Introducción

El presente capítulo tiene por objeto la realización de un análisis comparativo del comportamiento de las diferentes formulaciones recogidas en guías de diseño para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante. Para ello se ha elaborado una base de datos de ensayos experimentales a cortante de vigas de hormigón armado de sección rectangular o en T reforzadas externamente con laminados FRP. Se han comparado las contribuciones de FRP a la resistencia a cortante obtenidas experimental y teóricamente, analizando el promedio entre el ratio de la contribución experimental y teórica del FRP a la resistencia a cortante y la dispersión las diferentes formulaciones de las guías de diseño existentes.

3.2. Base de datos de ensayos experimentales

Se ha recopilado una base de datos que contiene 536 vigas de hormigón armado convencional reforzadas a cortante con laminados de polímeros armados con fibras ensayadas a cortante en condiciones de laboratorio publicados en la literatura existente. En el Anejo 1 se recogen los detalles de geometría y propiedades mecánicas de los ensayos recopilados. Como se ha indicado anteriormente, esta base de datos ha servido de herramienta para contrastar la fiabilidad de los modelos teóricos existentes que se recogen en las guías de diseño citadas en

el capítulo anterior: FIB Bulletin 14 (2001), CNR-DT200/2004 (2004), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012) y DAfStb (2013).

De los ensayos experimentales recopilados, se han eliminado 32 ensayos que corresponden a vigas de control o a aquellos ensayos publicados donde no se han encontrado todos los parámetros críticos para evaluar la resistencia de cortante.

Finalmente, la base de datos analizada se compone de 433 vigas reforzadas a cortante con FRP de sección transversal rectangular, suponiendo un 80,6% del total de la base, y 104 vigas de sección transversal en T, que representa un 19,4%. Según la aplicación del tipo de refuerzo dispuesto la base se divide en 118 vigas reforzadas en configuración wrapped o con la sección completamente envuelta (W), que significan un 22,0% del total, 270 reforzadas en U, que suponen un 50,3 % y 149 reforzadas en las caras laterales o side-bonded (S), que representan un 27,7% del total. Los refuerzos aplicados de forma continua suponen 283 ejemplares de la base de datos (52,7% del total) y los discontinuos suponen 254 ejemplares (47,3% restante del total). La configuración de refuerzo a cortante más utilizada es en U, puesto que el refuerzo en S es poco efectivo y el refuerzo en W es el menos utilizado en un caso real, puesto que resulta de ejecución compleja en edificación debido a la presencia del forjado o de la losa de compresión.

El principal polímero para reforzar las vigas de la base de datos es la fibra de carbono, CFRP, que se utiliza en 457 ejemplares, suponiendo un 85,1% del total. La fibra de vidrio, GFRP, utilizada en 45 ejemplares supone un 8,4%, junto con la aramida, AFRP, aplicada a 34 ejemplares, que suponen el 6,3% del total de ensayos.

La mayoría de los modelos teóricos disponibles no simulan el efecto de los sistemas de anclaje y, en consecuencia, las predicciones de rotura no son realistas. Al aplicar las formulaciones cuando se dispone de anclajes mecánicos se han considerado como sección completamente envuelta o wrapped, puesto que en este caso no se producirá el desprendimiento prematuro del refuerzo.

Los ejemplares de canto inferior a 100 mm se han excluido del análisis, ya que, por un efecto de escala los resultados obtenidos pueden no ser representativos del comportamiento real a cortante del refuerzo de FRP. La longitud de anclaje efectiva del FRP se ha determinado en aproximadamente 200-250 mm (Täljsten 1994; Brosens y Van Gemert 1997), por lo que no se puede asegurar disponer de suficiente longitud de anclaje en vigas con poco canto y el refuerzo sería ineficaz.

En la Tabla 3. 1 se detallan resumidamente las propiedades mecánicas de los materiales y la geometría de los ensayos analizados.

Se han utilizado valores medios de las propiedades mecánicas y no característicos puesto que se trata de ensayos de laboratorio. Por ello también los coeficientes de seguridad se toman iguales a la unidad. Como ángulo de inclinación de las bielas se supone 45° si este no se define en la literatura, ya que en algunas de las formulaciones se fija dicho valor.

Tabla 3. 1 Resumen de algunas características geométricas y mecánicas de la base de datos

Parámetro	Mín	Promedio	Máx	Mediana	Desviación estándar	C.O.V.
Canto (mm)	102	342,5	720	305	126,1	36,8 %
Luz viga (mm)	680	3363	6845	2900	995,7	29,6 %
f_{cm} (MPa)	16,6	37,4	71,4	36,9	11,1	29,7 %
E_f (GPa)	5,3	199,3	392,0	230,0	88,4	44,4 %
a/d	0,9	2,8	6,6	2,8	0,7	25,0 %
A_w (mm ² /mm)	0,06	0,4	1,3	0,3	0,2	50,0 %
A_s (mm ²)	100,5	1503,6	11259,5	289,2	111,7	7,4 %

3.3. Análisis comparativo de las formulaciones recogidas en las guías de diseño

En este apartado se analiza la fiabilidad de los modelos analíticos de las guías de diseño FIB Bulletin 14 (2001), CNR-DT200/2004 (2004), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012) y DAfStb (2013), para predecir la contribución de los polímeros armados con fibras como refuerzos a cortante en vigas de hormigón armado.

En la primera parte del análisis se comparan los diferentes valores que toman los cocientes entre la contribución del FRP a cortante experimental y teórica $V_{f,exp}/V_{f,th}$. A continuación se realiza un estudio de la gráfica de dispersión de cada modelo y finalmente se aplica la clasificación de puntos de demérito de Collins (2001) en el que se otorga una puntuación a cada modelo basada en el número de ensayos que tiene en diferentes rangos con distintos niveles de seguridad, desde extremadamente inseguros hasta muy conservadores. El modelo con mayor puntuación es el que se comporta peor de acuerdo con dicha clasificación.

A continuación, se compara el cociente entre el valor experimental y teórico de la contribución del FRP a la resistencia a cortante ($V_{f,exp}/V_{f,th}$). Este cociente indica el ajuste de la formulación teórica a los resultados experimentales.

La contribución experimental del FRP se ha obtenido como la diferencia entre el cortante último de la viga reforzada con FRP y el cortante último de la viga de control sin refuerzo. Pese a que ésta es la manera como la mayor parte de autores evalúan la contribución experimental del FRP, con este cálculo se obvian tanto la interacción entre los distintos materiales y entre las distintas componentes que contribuyen a la resistencia de cortante como la posible modificación de los mecanismos resistentes debido a la presencia del refuerzo FRP. Todas estas componentes estarían directamente contempladas en la contribución del FRP.

Cabe mencionar, que los modelos no contemplan todos los casos disponibles en la base de datos como se ha visto en el párrafo anterior, puesto que hay particularidades como por ejemplo en el caso del FIB bulletin14 en el que no se considera el refuerzo aplicado en S (*side*

bonded). Cuando en los ensayos se dan estas particularidades, éstos se obvian del análisis para no distorsionarlo.

Si el cociente entre la contribución experimental y teórica a la resistencia a cortante del FRP es inferior a la unidad el modelo resulta inseguro para ese ensayo en particular. Por el contrario, si el cociente es superior a la unidad se trata de una formulación conservadora que subestima la respuesta estructural del elemento reforzado. Según las recomendaciones del FIB Bulletin 14 (2001) esto se da para 284 ensayos de los 334 que contempla la base de datos, según el CNR-DT200/2004 (2004) para 213 ensayos de los 515 disponibles, según el ACI 440.2R-08 (2008) para 105 ensayos de 242, según el TR 55 (2012) para 206 ensayos de 515 y según el DAfStb (2013) para 181 ensayos de 320. Así pues los modelos que mejor se comportan son aquellos cuyos cocientes se parezcan más a la unidad con un bajo coeficiente de variación, puesto que esto indica homogeneidad y mínima dispersión del modelo.

De la Tabla 3. 2 a la Tabla 3. 6 se resume el análisis estadístico comparativo de los modelos teóricos estudiados. Las Tabla 3. 2 y Tabla 3. 3 muestran el comportamiento de las formulaciones diferenciando la geometría de la sección según se trate de vigas de sección transversal rectangular o en T. Estas dos tablas muestran que todos los modelos presentan un coeficiente de dispersión muy elevado, ya que en todos los casos es superior al 70 %.

En la Tabla 3. 2 en la que se estudian secciones transversales rectangulares, se muestra que el modelo analítico más realista es el ACI 440.2R-08, ya que su media es de 1,04 y su coeficiente de variación del 83 % a pesar de indicar que la muestra es muy dispersa es el segundo con mejor comportamiento. El modelo más conservador es el FIB bulletin14, con una media de 4,92 que se aleja mucho de las otras medias próximas a la unidad. A pesar de ser el modelo que presenta los resultados menos realistas es el que más homogeneidad tiene con un coeficiente de variación del 76 %.

Tabla 3. 2 Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular

Modelo	Núm	Mín	Prome dio	Máx	Mediana	Desv estd	C.O.V.
FIB Bulletin 14 (2001)	257	0,09	4,92	17,06	4,40	3,75	76%
CNR-DT200/2004 (2004)	421	0,03	1,96	52,94	0,94	4,53	231%
ACI 440.2R-08 (2008)	211	0,03	1,04	5,03	0,87	0,86	83%
TR 55 (2012)	421	0,02	1,30	14,04	0,77	1,84	141%
DAfStb (2013)	282	0,05	1,60	10,99	1,20	1,54	96%

En la Tabla 3. 3, en la que se estudian secciones transversales en T, se observa que los modelos analíticos con promedio más cercano a la unidad, son el alemán DAfStb (2013) y el italiano CNR-DT200/2004, con una media de 1,04 y 0,97 respectivamente. De estos dos modelos el que presenta mejor comportamiento es el DAfStb (2013), no solo porque es más seguro que el modelo italiano sino porque además tiene más homogeneidad con un coeficiente de dispersión del 71 % frente a la altísima dispersión del CNR-DT200/2004 con un 428 %.

Tabla 3. 3 Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal en T

Modelo	Núm	Mín	Prome dio	Máx	Mediana	Desv. estd	C.O.V.
FIB Bulletin 14 (2001)	77	0,19	4,48	14,83	3,52	3,11	70%
CNR-DT200/2004 (2004)	94	0,02	0,97	40,72	0,44	4,16	428%
ACI 440.2R-08 (2008)	31	0,13	1,28	5,17	0,85	1,20	94%
TR 55 (2012)	94	0,03	1,74	22,61	0,84	3,57	206%
DAfStb (2013)	38	0,15	1,04	3,51	0,84	0,74	71%

La Tabla 3. 4, Tabla 3. 5 y Tabla 3. 6 muestran los resultados estadísticos de los ensayos experimentales de la base de datos para vigas rectangulares según su configuración del refuerzo de FRP sea en W, U y S respectivamente. No se ha realizado este mismo estudio para secciones transversales en T debido a que la cantidad de datos disponible no es suficiente como para que los resultados estadísticos resulten significativos.

Este segundo apartado de análisis estadístico, que se centra en vigas rectangulares, muestra que para la configuración de refuerzo de FRP total, en W, la recomendación italiana CNR-DT200/2004 es la que ajusta más las predicciones de resistencia a la resistencia real de cortante con un promedio de 1,31 y un coeficiente de variación del 68%. El coeficiente que presenta una menor variación es el de la guía ACI 440.2R-08 pero su media se aleja más de la unidad con un 1,65.

Tabla 3. 4 Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en W

Modelo	Núm	Mín	Prome dio	Máx	Mediana	Desv. estd	C.O.V.
FIB Bulletin 14 (2001)	106	0,09	2,74	15,91	1,60	3,34	122%
CNR-DT200/2004 (2004)	118	0,07	1,31	4,55	1,18	0,90	68%
ACI 440.2R-08 (2008)	60	0,07	1,65	5,03	1,73	1,08	65%
TR 55 (2012)	118	0,09	2,77	14,04	1,85	2,88	104%
DAfStb (2013)	118	0,08	2,48	10,99	1,94	1,99	80%

Las predicciones para vigas rectangulares con configuración del FRP en U, como se muestra en la Tabla 3. 5, que mejor se ajustan a los ensayos experimentales son las de ACI 440.2R-08, con un promedio de 1,04 y con un coeficiente de variación del 55 %. La siguiente guía que ajusta más las predicciones a la realidad es la TR 55 con un promedio de 0,93 y con una dispersión del 61 %, mayor que en el caso anterior.

Tabla 3. 5 Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en U

Modelo	Núm	Mín	Media	Máx	Mediana	Desv. estd	C.O.V.
FIB Bulletin 14 (2001)	153	0,32	6,46	17,06	6,13	3,22	50%
CNR-DT200/2004 (2004)	165	0,03	0,80	2,16	0,72	0,44	55%
ACI 440.2R-08 (2008)	89	0,10	1,04	2,75	1,00	0,58	55%
TR 55 (2012)	165	0,03	0,93	2,55	0,82	0,57	61%
DAfStb (2013)	96	0,10	1,13	2,70	1,12	0,55	48%

Las guías estudiadas no ajustan bien sus predicciones de resistencia de cortante para vigas rectangulares reforzadas en S. Todas ellas presentan medias que se alejan mucho de la unidad por el lado de la inseguridad, excepto la CNR-DT200/2004 que lo hace por el lado de la seguridad.

Tabla 3. 6 Valores estadísticos del ratio experimental y analítico del cortante resistido por el FRP para vigas con sección transversal rectangular reforzadas con configuración en S

Modelo	Núm	Mín	Media	Máx	Mediana	Desv. estd	C.O.V.
FIB Bulletin 14 (2001)	--	--	--	--	--	--	--
CNR-DT200/2004 (2004)	140	0,09	3,86	52,94	1,29	7,44	193%
ACI 440.2R-08 (2008)	62	0,03	0,45	2,00	0,24	0,49	109%
TR 55 (2012)	140	0,02	0,50	2,19	0,34	0,41	82%
DAfStb (2013)	--	--	--	--	--	--	--

A continuación, se analiza la dispersión entre el cortante resistido experimentalmente y el cortante teórico resistido por el FRP según los distintos modelos estudiados. Se distingue entre vigas de sección transversal rectangular y en T.

En la Figura 3.1 se muestra la dispersión de la contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 (2001) para vigas con sección transversal rectangular. Se aprecia que se trata de un modelo conservador debido a que la mayoría de los ensayos se sitúan debajo de la línea indicada en rojo que corresponde a un ratio teórico-experimental igual a la unidad. Pese a que los resultados, sean en general conservadores, se observa una dispersión elevada de los mismos.

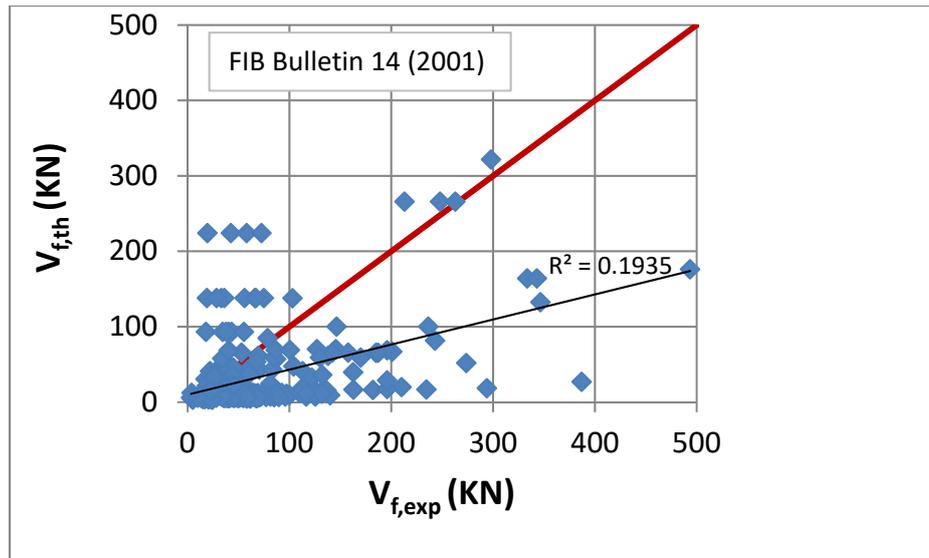


Figura 3.1. Contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 (2001) para vigas con sección transversal rectangular

En el gráfico de la Figura 3.2, se muestra la dispersión de la contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 para vigas con sección transversal en T, se acentúa la característica conservadora del modelo al situarse prácticamente todos los ensayos muy por debajo de la línea en la que los resultados experimentales se igualan a los teóricos. Se verifica que el modelo de FIB Bulletin 14 es conservador y lo es mucho más para vigas con sección transversal en T que para vigas con sección transversal rectangular.

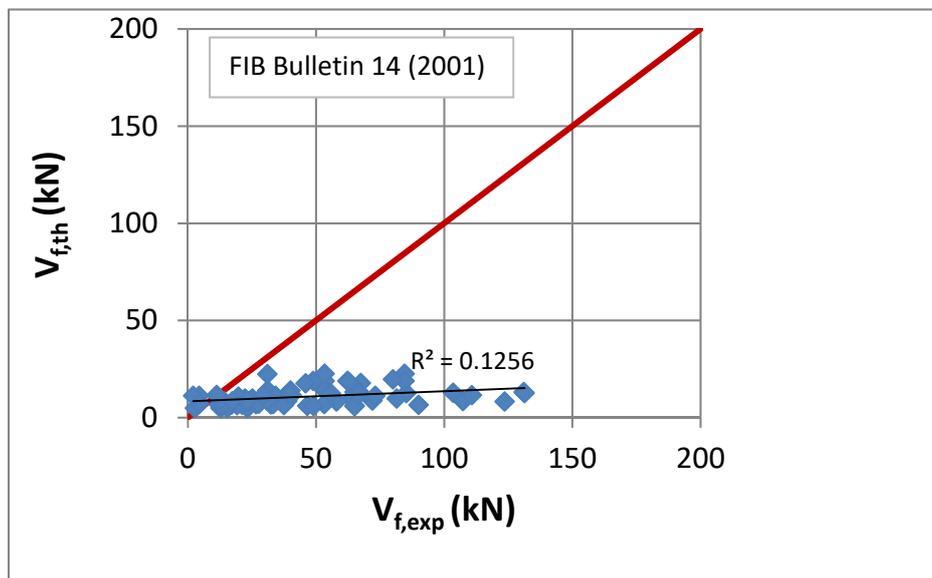


Figura 3.2. Contribución del FRP a cortante según el modelo FIB Bulletin 14 (2001) para vigas con sección transversal en T

La Figura 3.3 muestra la contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT-200/2004 para vigas con sección transversal rectangular. Pese a la elevada dispersión, se observa que los resultados teóricos de este modelo están más cerca de los resultados experimentales. Así lo demuestra la correlación existente alrededor de la recta teórica perfecta indicada en rojo. Se observa a la vez como muchos de los ensayos se sitúan del lado de la inseguridad.

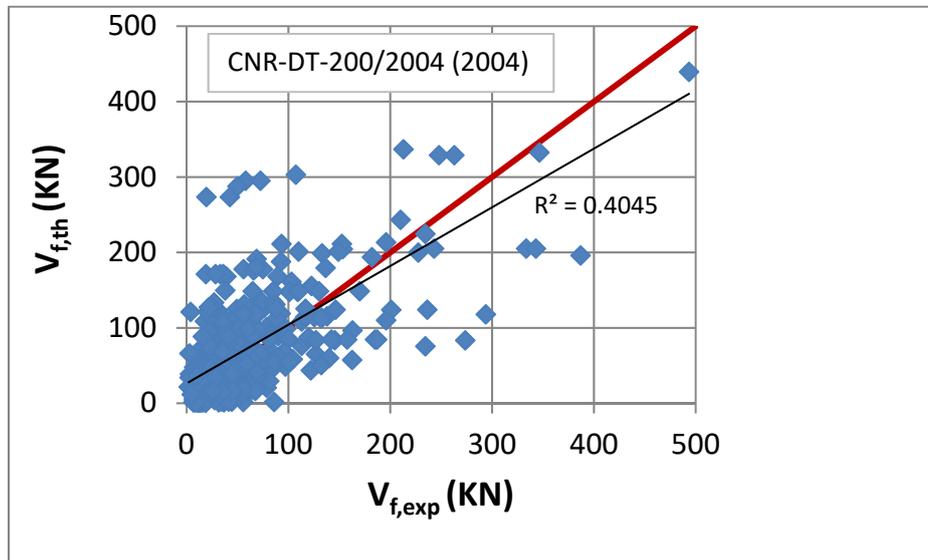


Figura 3.3. Contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT200/2004 (2004) para vigas con sección transversal rectangular

La Figura 3.4 también analiza la dispersión de la contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT-200/2004 pero para vigas con sección transversal en T. Para este tipo de sección transversal la mayoría de los ensayos se sitúan del lado de la inseguridad con una dispersión muy elevada.

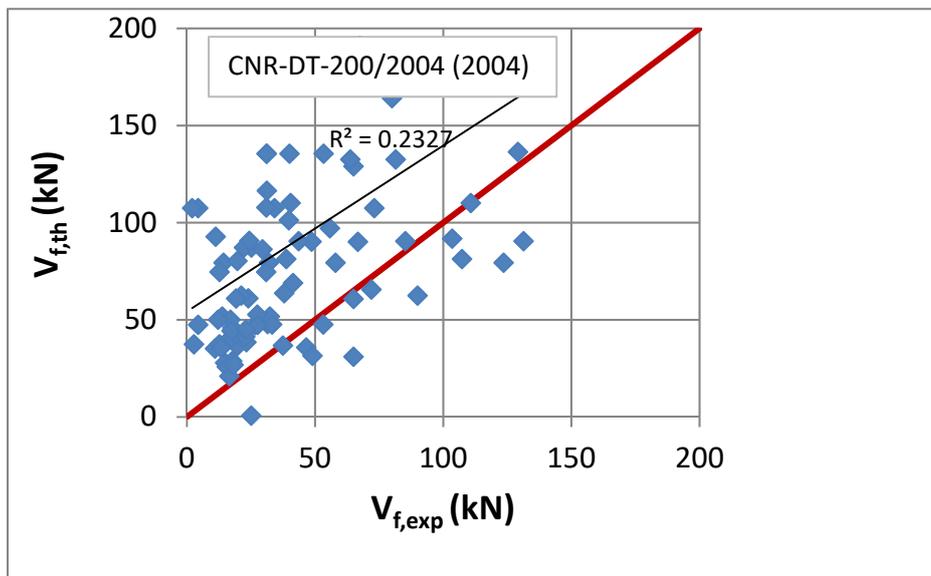


Figura 3.4. Contribución del FRP a cortante según el modelo CNR-DT200/2004 (2004) para vigas con sección transversal en T

En la Figura 3.5 se muestra la contribución del FRP a cortante según el modelo ACI-440.2R-08 para vigas con sección transversal rectangular. Se observa como hay bastantes ensayos que quedan del lado de la inseguridad con predicciones más elevadas que el cortante último obtenido experimentalmente.

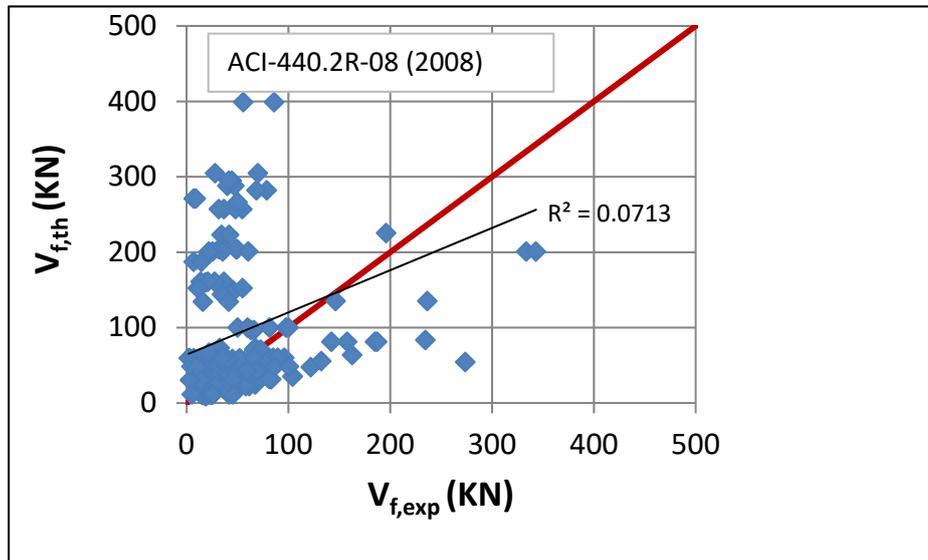


Figura 3.5. Contribución del FRP a cortante según el modelo ACI-440.2R-08 (2008) para vigas con sección transversal rectangular

Para secciones en T, tal y como se muestra en la Figura 3.6, se presenta una gran dispersión, y muchos de los ensayos se sitúan del lado de la inseguridad.

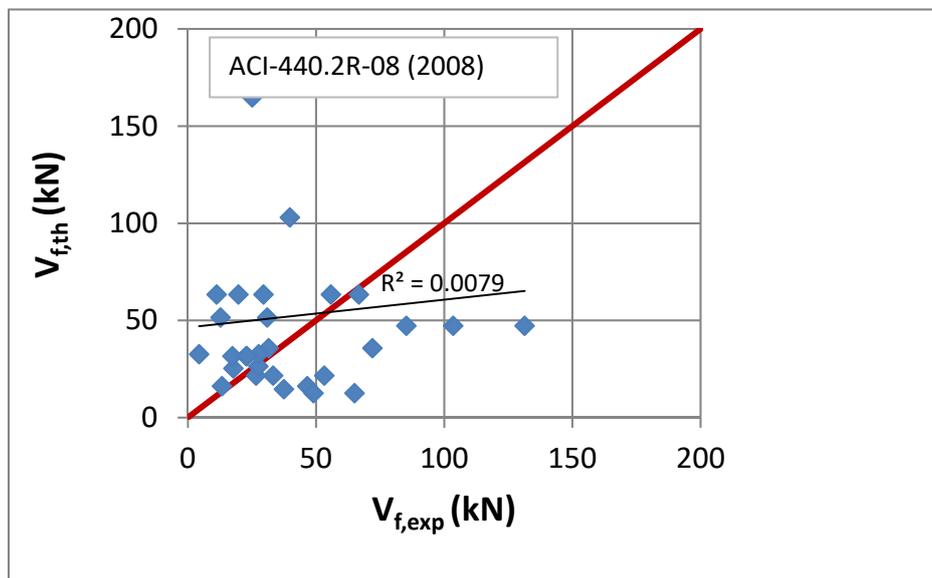


Figura 3.6. Contribución del FRP a cortante según el modelo ACI-440.2R-08 (2008) para vigas con sección transversal en T

El análisis de la dispersión de la contribución del FRP a cortante según el modelo TR-55 para vigas con sección transversal rectangular se muestra en la Figura 3.7. Este modelo es penalizado debido a que se observa una elevada dispersión junto a que la mayor parte de resultados se encuentran en la zona de inseguridad.

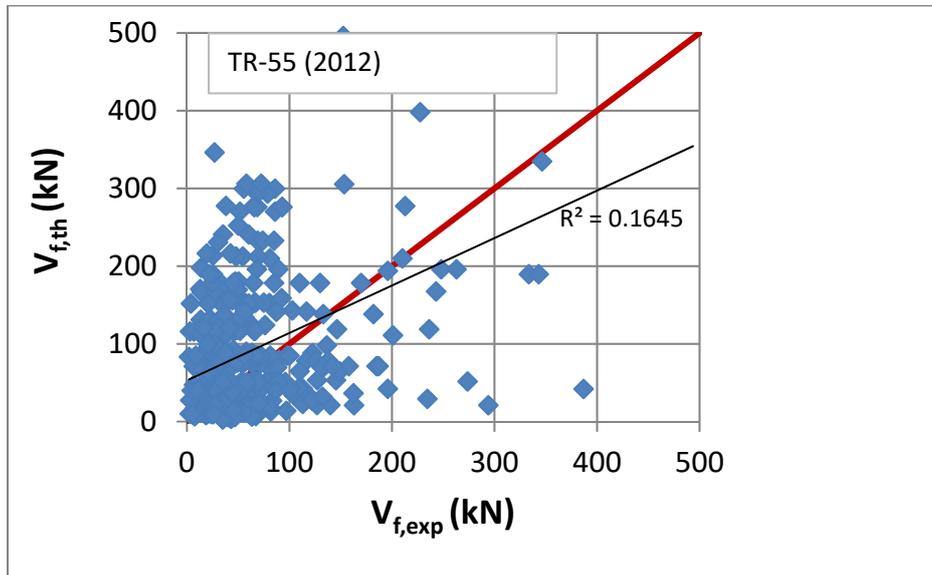


Figura 3.7. Contribución del FRP a cortante según el modelo TR-55 (2012) para vigas con sección transversal rectangular

La Figura 3.8 realiza el mismo análisis anterior pero para secciones transversales en T mostrando gran dispersión, poca correlación con la recta teórica en que coinciden resultados experimentales con teóricos y la ubicación de un gran porcentaje de ensayos en la zona de inseguridad.

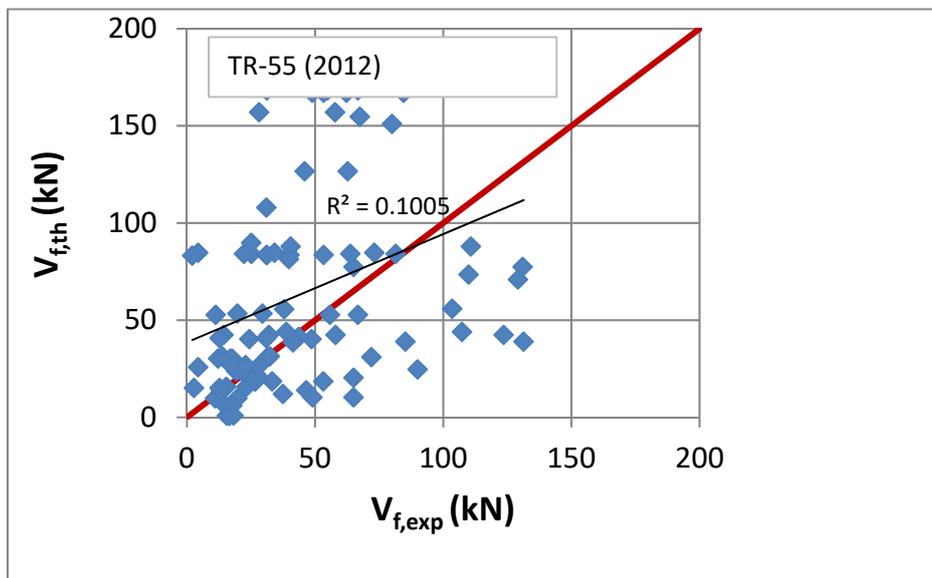


Figura 3.8. Contribución del FRP a cortante según el modelo TR-55 (2012) para vigas con sección transversal en T

En la Figura 3.9 en la que se estudia la dispersión de la contribución del FRP a cortante según el modelo alemán DAfStb para vigas con sección transversal rectangular se aprecia que para

valores bajos de cortante existe una buena correlación alrededor de la recta teórica roja en la que coinciden resultados experimentales con teóricos con una baja dispersión. Cuando los valores aumentan se pierde la correlación y aumenta la dispersión. Aun así gran parte de los resultados se sitúan en la zona de inseguridad.

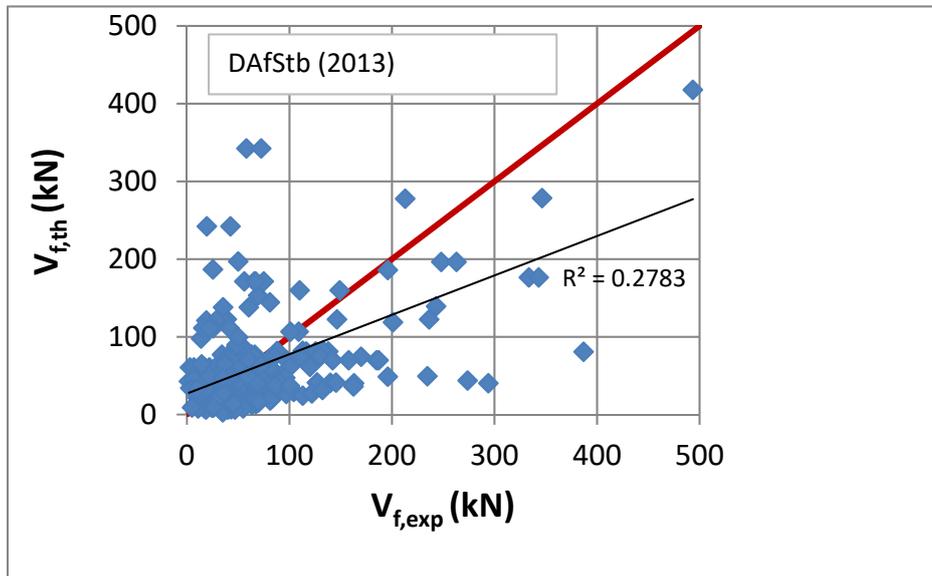


Figura 3.9. Contribución del FRP a cortante según el modelo DAfStb (2013) para vigas con sección transversal rectangular

Para el mismo estudio que se realiza en la Figura 3.10, pero para vigas con sección transversal en T la dispersión es menor que para el caso anterior pero continua siendo elevada y existe poca correlación con la recta teórica óptima.

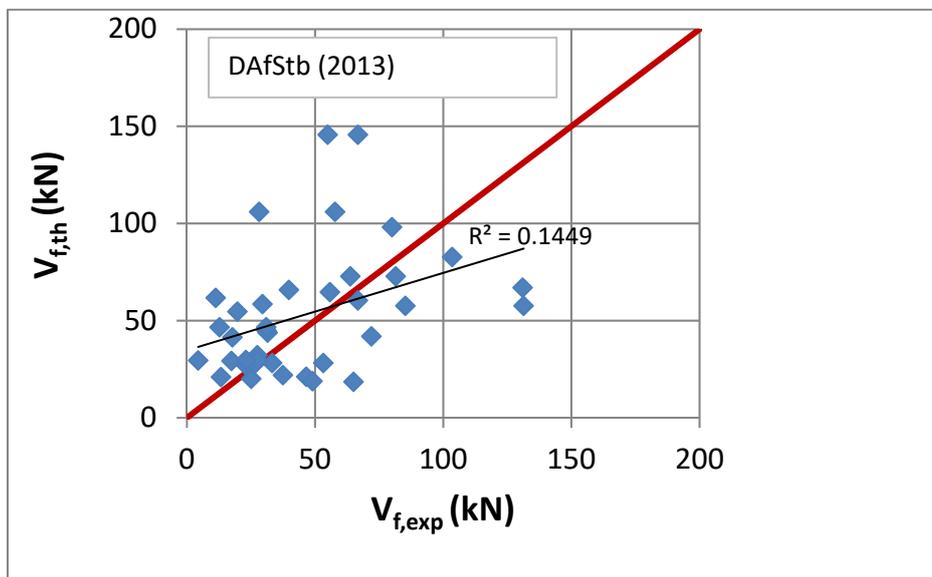


Figura 3.10. Contribución del FRP a cortante según el modelo DAfStb (2013) para vigas con sección transversal en T

3.3.1. Análisis según la clasificación de puntos de demérito de Collins (2001)

En este apartado se analiza la base de datos recopilada mediante el método “*Demerit Points Classification*” de Collins (2001). Este método permite clasificar las distintas formulaciones de la contribución del FRP a la resistencia de cortante según la asignación de una puntuación de demérito (*Demerit Point*) a cada rango de cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$. La puntuación total se calcula sumando los productos del porcentaje de cada rango multiplicado por los puntos que le asigna esta clasificación a ese rango. Los intervalos en los que se divide esta clasificación así como la puntuación que se le asigna a cada intervalo se muestran en la Tabla 3. 7.

Tabla 3. 7 Puntuación del método *Demerit Points Classification* de Collins (2001)

Intervalo	Clasificación	Puntuación Demerit asociada
$V_{f,exp}/V_{f,th} < 0,50$	Extremadamente insegura	10
$0,50 < V_{f,exp}/V_{f,th} < 0,65$	Insegura	5
$0,65 < V_{f,exp}/V_{f,th} < 0,85$	Poca seguridad	2
$0,85 < V_{f,exp}/V_{f,th} < 1,30$	Seguridad apropiada	0
$1,30 < V_{f,exp}/V_{f,th} < 2,00$	Conservadora	1
$V_{f,exp}/V_{f,th} > 2,00$	Extremadamente conservadora	2

La Clasificación de Puntos de Demérito se fundamenta en penalizar a los cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ menores a 0,50 así como a los superiores a 2,0. Los cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ menores que la unidad y por lo tanto inseguros son penalizados con una puntuación más alta que los que están igual de alejados de la unidad pero del lado conservador. El modelo más fiable es el que obtiene una puntuación menor. Este método es el que se utiliza en la Tabla 3. 8 para comparar las diferentes formulaciones estudiadas. Se especifica en cada celda el porcentaje de ensayos que se encuentran en aquel intervalo para cada modelo.

Tabla 3. 8 Puntuación siguiendo la Clasificación de Collins (2001) para los distintos modelos estudiados.

Intervalo	FIB Bull. 14 (2001)	CNR-DT200/2004 (2004)	ACI440.2R-08 (2008)	TR 55 (2012)	DAfStb (2013)
<0,5	5,65 %	29,03 %	33,05 %	36,15 %	18,12 %
0,5 - 0,65	3,27 %	11,73 %	7,02 %	8,08 %	9,06 %
0,65 - 0,85	2,97 %	11,92 %	9,92 %	10,00 %	8,43 %
0,85 - 1,30	4,46 %	18,07 %	16,53 %	16,35 %	21,25 %
1,30 – 2,0	8,03 %	13,65 %	18,18%	14,23 %	22,18 %
> 2,0	75,59 %	15,57 %	15,29 %	15,19 %	20,93 %
PUNT. TOTAL	238,09	417,69	434,30	466,54	307,50

En la Figura 3. 11 se indica en las abscisas la puntuación del método *Demerit Points Classification* para cada modelo estudiado y en las ordenadas el porcentaje de ensayos respecto al total que se encuentra dentro del intervalo estudiado ($\% X_{exp}/X_u$).

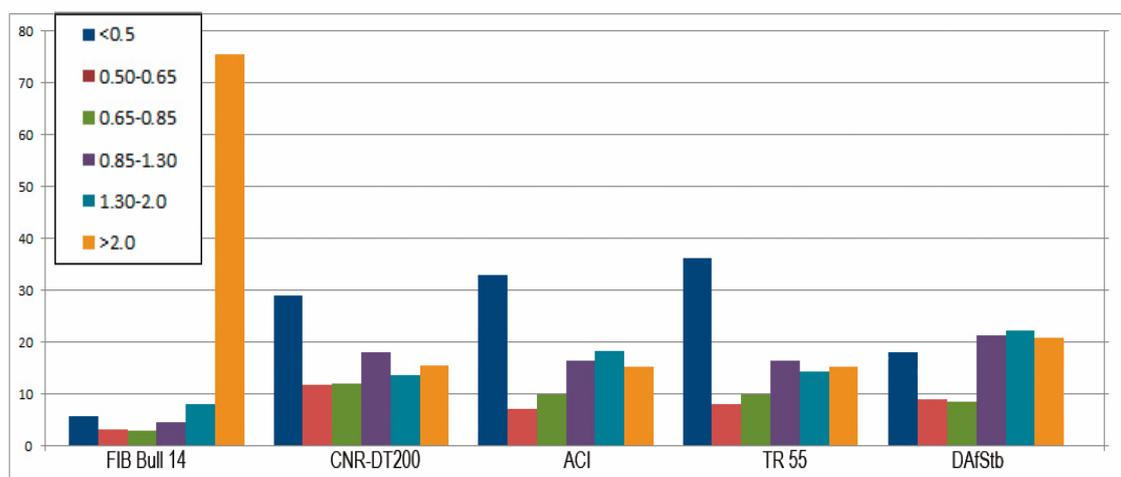


Figura 3. 11. Puntuación del método *Demerit Points Classification* de Collins (2001) [7] frente al porcentaje de ensayos respecto al total que se encuentra dentro del intervalo estudiado.

El modelo que ha obtenido mejores resultados según el método *Demerit Points Classification* es el FIB Bulletin 14 (2001) ya que ha obtenido la menor puntuación con 238 puntos. Esto se debe a que esta clasificación penaliza más a los modelos inseguros y la mayoría de cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ de este modelo se sitúan en el intervalo superior a 2,0 (concretamente un 75,59 % de los cocientes totales de este modelo). Así pues se observa que el modelo de FIB Bulletin 14 (2001) es excesivamente conservador.

El modelo que presenta más cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ en el intervalo óptimo, de 0,85 a 1,30, y que por lo tanto según esta clasificación se premia con 0 puntos de penalización, es el modelo alemán DAfStb con un 21,25 % de cocientes en este intervalo, frente a los 4,46 % de FIB Bulletin 14 (2001) que es el que se considera el mejor modelo según esta clasificación. DAfStb (2013) ha obtenido la segunda mejor puntuación, con 307,5 puntos de demérito.

El modelo que presenta un peor comportamiento estadístico según este método es el TR 55 (2012) con una puntuación de 466,5 puntos de demérito. En este caso, al contrario que para el modelo de FIB Bulletin 14 (2001), esto se debe a que la mayoría de cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ de este modelo son inferiores a 0,5, concretamente un 36,15 % de cocientes, y por lo tanto se sitúan en la zona más insegura que es penalizada con 10 puntos, la mayor puntuación. Un comportamiento parecido al del modelo TR 55 (2012) son los modelos CNR-DT200/2004 (2004) y ACI-440.2R-08 (2008) que tienen puntuaciones altas de 418 y 434 puntos de demérito respectivamente. Estos dos modelos obtienen puntuaciones tan altas debido también a que la mayoría de cocientes $V_{f,exp}/V_{f,th}$ son inferiores a 0,5. CNR-DT200/2004 presenta un 29 % de cocientes en este intervalo y ACI un 33 %.

3.3.2. Conclusiones del análisis de los modelos existentes

Las formulaciones de las recomendaciones existentes analizadas no ajustan bien sus resultados teóricos a los obtenidos experimentalmente, presentando una dispersión elevada. Aun así el análisis comparativo realizado demuestra que el modelo del ACI 440-2R-08 es más fiable que otros, ya que su media es de 1,04 y su coeficiente de variación del 83 % que a pesar de ser alto es el segundo con menor dispersión. Aunque según el método de *Demerit Points Classification* de Collins (2001) el modelo de FIB Bulletin 14 (2001) es el que obtiene una menor puntuación.

Los resultados expuestos muestran que aunque en todas las formulaciones el valor medio es cercano a la unidad, excepto para el modelo de FIB Bulletin 14 (2001) que es excesivamente conservador y las medias llegan a valores de 4, el coeficiente de variación es elevado para todos ellos, lo que demuestra incertidumbre en la predicción de la resistencia a cortante en vigas de hormigón armado reforzadas con FRP.

Las razones por las cuales los modelos no se ajustan a la realidad pueden ser varias. Entre éstas se destaca que aunque los modelos contemplen el efecto del desprendimiento prematuro del refuerzo de FRP, debido a que se limitan las tensiones del refuerzo limitando sus deformaciones, el mecanismo de fallo es complejo y no acaba de estar bien modelizado.

El valor experimental de la contribución del FRP a cortante se obtiene como la diferencia entre el cortante último experimental de la viga reforzada respecto a la viga de control. Debido a este motivo no se considera que el refuerzo a cortante pueda modificar el ángulo de inclinación de las bielas de compresión a causa del aumento de los elementos que resisten la tracción del alma (FRP y armadura transversal) y aumentar así la componente resistida por el hormigón, de manera que la componente absorbida por el FRP sería diferente a la obtenida. El cálculo independiente de las distintas componentes que contribuyen en la resistencia de esfuerzo cortante, V_s , V_c y V_f , es otro factor a tener en cuenta en la elevada dispersión que presentan los resultados estadísticos, ya que el refuerzo de FRP posiblemente modifique las contribuciones a cortante del acero (V_s) y del hormigón (V_c).

CAPÍTULO 4

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1. Objetivos

Actualmente no se dispone de un modelo universalmente aceptado para el cálculo de la aportación del refuerzo externo con FRP a la resistencia a cortante del elemento reforzado debido a la complejidad de los mecanismos que lo definen. Esto, unido al estudio comparativo descrito en el capítulo anterior, en que se pone de relieve la existencia de una gran dispersión entre los resultados obtenidos experimental y analíticamente siguiendo las diferentes formulaciones existentes de contribución a esfuerzo cortante de los FRP de recomendaciones o guías de diseño, justifican la necesidad de realizar esta campaña experimental, que ayude a clarificar los aspectos anteriores.

La resistencia a esfuerzo cortante procede de las aportaciones del hormigón (cabeza comprimida, engranamiento de los áridos a lo largo de la fisura, tracciones en la misma, efecto pasador), de la armadura transversal interna y del refuerzo externo de FRP. La contribución de cada una de las partes por separado es difícil de evaluar, ya que realmente existe una interacción entre ellas. Este efecto de acoplamiento no se tiene en cuenta en los modelos actuales, que mayoritariamente no consideran la interacción entre la componente de cortante resistida por el hormigón V_c , la resistida por la armadura transversal V_{sT} , y la resistida por el refuerzo V_{FRP} .

Con el fin de identificar los mecanismos resistentes, así como cuantificar la contribución real a la resistencia a cortante de los laminados FRP y evaluar la interacción entre las diferentes componentes que contribuyen a esta resistencia, se ha realizado una campaña experimental de diez vigas reforzadas con cuatro cuantías distintas de FRP mediante laminados de fibra de

carbono adheridos en forma de U. Se han realizado dos series con dos cuantías de armadura longitudinal para evaluar su influencia.

Esta campaña experimental pretende ser representativa de los casos más habituales de refuerzo en forjados de edificación, motivo por el cual las vigas de estudio presentan una sección en T correspondiente a nervio más el forjado.

En los ensayos existentes con refuerzo externo en forma de U se aprecia el fallo de muchos ejemplares por el desprendimiento prematuro del refuerzo. Para evitar o al menos retardar este fenómeno, en esta tesis se ha diseñado un sistema de anclaje de los refuerzos FRP. En esta campaña se ensayan vigas con y sin anclaje los refuerzos a cortante de FRP, con el fin de comprobar la eficiencia del anclaje.

Los diferentes ejemplares han sido sometidos a una carga puntual descentrada, monotónicamente creciente hasta rotura, de manera que se alcance el agotamiento por cortante antes que por flexión.

Se ha colocado una instrumentación exhaustiva, de modo que se han registrado las deformaciones de a diferentes alturas de algunos cercos de la armadura transversal, del refuerzo externo de FRP y de la armadura longitudinal traccionada en diferentes secciones. Se han medido deformaciones verticales bajo el punto de aplicación de la carga y en apoyos para los diferentes estadios de carga introducidos con el fin de disponer de suficiente información para estimar, mediante cálculos posteriores, las diferentes contribuciones a la resistencia a cortante.

4.2. Descripción de la campaña experimental

4.2.1. Descripción de las vigas

La campaña experimental desarrollada consiste en el ensayo de 10 vigas de hormigón armado con sección transversal en T, con dos cuantías distintas de armadura longitudinal, cuatro cuantías de refuerzo CFRP a cortante en forma de U y con disposición o no de anclaje en los extremos del refuerzo.

La sección transversal de las vigas es en T presenta un canto total de 550 mm siendo el espesor del ala de 150 mm. El ancho del ala es de 600 mm. y el del alma de 200 mm. (Ver Figura 4. 1 y Figura 4. 2).

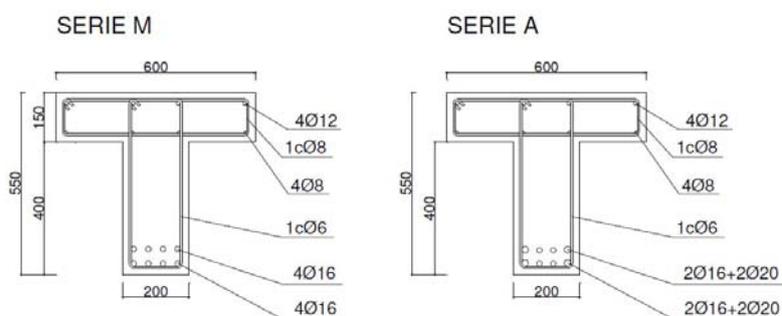


Figura 4. 1. Sección transversal de las vigas de las series M y A

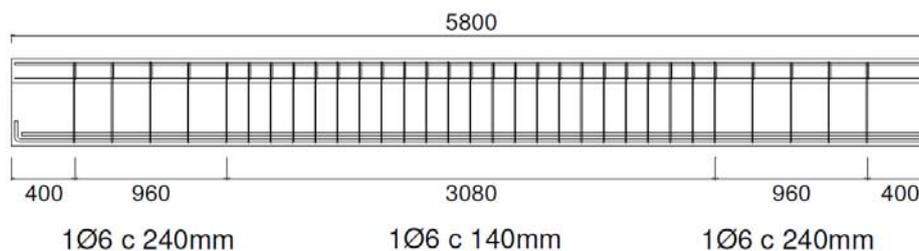


Figura 4. 2. Sección longitudinal de las vigas de las series M y A

La diferencia entre las dos series de vigas es la cuantía de armadura longitudinal inferior dispuesta. Las vigas de la serie A (cuantía alta) presentan dos filas de $2\phi 16+2\phi 20$ cada una y las de la serie M (cuantía media) presentan dos filas de $4\phi 16$ cada una. Para todas las vigas, la armadura longitudinal de compresión está formada por $4\phi 12$. Los cercos de cortante son $\phi 6$ cada 140 mm, en los 3,08 m. centrales y cada 240 mm en el resto de la viga (ver Figura 4. 2). Los cercos de las alas son $\phi 8$ que guardan la misma separación que los del alma. El recubrimiento nominal es de 20 mm.

Las vigas se instrumentaron y fabricaron en las instalaciones de Prefabricados Pujol y una vez transportadas a la Universitat Politècnica de Catalunya, se realizaron los refuerzos externos a cortante con FRP.

El refuerzo a cortante de los distintos ejemplares se realizó mediante laminados de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) en forma de U con una separación entre ejes 240 mm y un espesor medio de 0,17 mm. Se dispusieron cuatro cuantías distintas de FRP (ver Figura 4. 3): vigas 0: sin refuerzo que son las denominadas vigas de control; vigas tipo 1: con laminados de 50 mm de ancho ($A_{FRP\ 1} = 70,8\text{ mm}^2/\text{m}$); vigas tipo 2: con laminados de 100 mm de ancho ($A_{FRP\ 2} = 141,7\text{ mm}^2/\text{m}$); y vigas tipo 3: con refuerzo continuo ($A_{FRP\ 3} = 340\text{ mm}^2/\text{m}$ (Ver Figura 4.3)).

En la Tabla 4.1 se describen las características de las vigas a ensayar indicando la nomenclatura, cuantía de armadura longitudinal, cuantía de armadura transversal, cuantía de refuerzo a cortante con FRP y disposición y tipo de anclaje.

Tabla 4. 1 Descripción de las vigas de ensayo

Ensayo	Cuantía armado longitudinal	Cuantía arm. transversal (estribos c240mm)	Cuantía arm. transversal (estribos c140mm)	Cuantía FRP	Anclaje
	ρ_s	ρ_α	ρ_α	ρ_{FRP}	
M0Sa	0,0163	0,00118	0,00202	--	--
M0Sb	0,0163	0,00118	0,00202	--	--
A0Sa	0,0209	0,00118	0,00202	--	--
A0Sb	0,0209	0,00118	0,00202	--	--
M1Sa	0,0163	0,00118	0,00202	0,00233	--
M1Sb	0,0163	0,00118	0,00202	0,00233	--
A1Sa	0,0209	0,00118	0,00202	0,00233	--
A1Sb	0,0209	0,00118	0,00202	0,00233	--
M2Sa	0,0163	0,00118	0,00202	0,00467	--
M2Sb	0,0163	0,00118	0,00202	0,00467	--
A2Sa	0,0209	0,00118	0,00202	0,00467	--
A2Sb	0,0209	0,00118	0,00202	0,00467	--
M1B	0,0163	0,00118	0,00202	0,00233	Anclaje B
M1A	0,0163	0,00118	0,00202	0,00233	Anclaje A
M2B	0,0163	0,00118	0,00202	0,00467	Anclaje B
M2A	0,0163	0,00118	0,00202	0,00467	Anclaje A
A2B	0,0209	0,00118	0,00202	0,00467	Anclaje B
A2A	0,0209	0,00118	0,00202	0,00467	Anclaje A
A3B	0,0209	0,00118	0,00202	0,01120	Anclaje B
A3A	0,0209	0,00118	0,00202	0,01120	Anclaje A

Los laminados de fibra de carbono se aplicaron in situ mediante la técnica del wet lay-up con una sola capa de tejido de fibras unidireccionales formando un ángulo de 90° con la directriz de la pieza. La hoja de fibra de carbono unidireccional, MBrace® Fibre CF 230/4900 300/30, de ancho 300 mm y espesor nominal 0,117 mm, y las resinas epoxis, MBrace® Primer y MBrace® Fibre Saturant, fueron suministradas por gentileza de BASF.

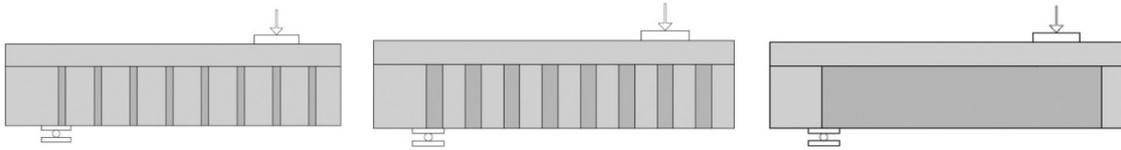


Figura 4. 3. Cuantías de FRP tipo 1, 2 y 3 respectivamente

Para evitar el desprendimiento prematuro del refuerzo, se utilizaron en algunos ensayos dos tipos de anclajes que quedan detallados en el apartado 4.2.4.

Sobre cada viga de 5,80 m de longitud se realizaron dos ensayos a cortante (20 ensayos en total), con una configuración de viga biapoyada de 3,30 m de luz y un voladizo de 2,25 m. En el primer ensayo, se aplicó una carga puntual a una distancia de 1,48 m desde el apoyo izquierdo, que se corresponde aproximadamente a 3 veces el canto útil ($d=494$ mm). En el segundo ensayo, se modifica la posición de los apoyos y de la carga puntual de modo que la configuración resulta simétrica en relación a la del primer ensayo, aplicando la carga en la zona no dañada por el primer ensayo, al situarse en lo que era el voladizo (ver Figura 4. 4).

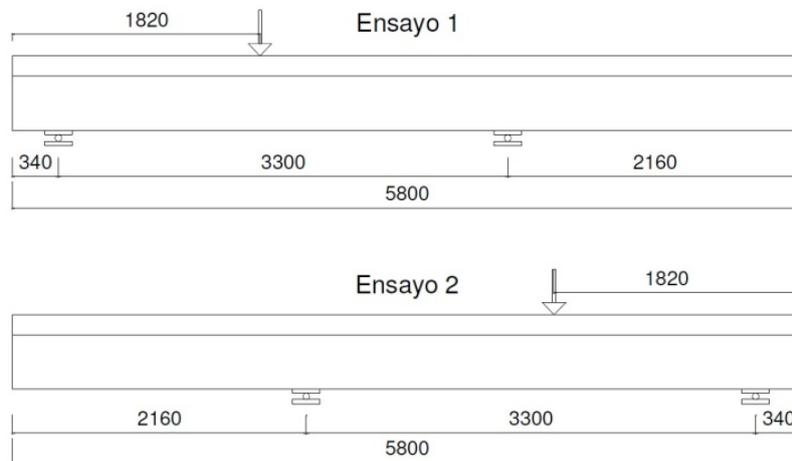


Figura 4. 4. Esquema de carga de los dos ensayos realizados por viga

4.2.2. Predicción del cortante último siguiendo las guías de diseño existentes

En la Tabla 4.2 se resumen las predicciones de la predicción del cortante último de los diferentes especímenes aplicando la Instrucción EHE-08 para las contribuciones del hormigón y del acero y algunas guías de diseño para el FRP.

Tabla 4. 2 Resultados de las predicciones analíticas según las instrucciones y recomendaciones vigentes

Ensayo	θ	V_c (KN)	V_s (KN)	V_c+V_s (KN)	V_{FRP} (KN)			V_{TOTAL} (KN)		
					FIB	ACI	TR55	FIB	ACI	TR-55
M0S	36,9°	91,5	76,7	168,2	--	--	--	168,2	168,2	168,2
A0S	35,6°	98,0	80,6	178,6	--	--	--	178,6	178,6	178,6
M1S	40°	91,5	68,7	160,2	72,5	53,4	38,5	232,8 (38,4%)	213,7 (35,1%)	198,7 (30,5%)
A1S	38,1°	98,0	73,4	171,4	77,4	53,4	38,5	248,8 (70,2%)	224,8 (46,2%)	209,8 (31,2%)
M2S	40,9°	91,5	66,5	158,0	95,1	81,3	76,9	253,1 (84,9%)	239,3 (71,1%)	234,9 (66,7%)
A2S	39,0°	98,0	71,2	169,3	101,9	81,3	76,9	271,2 (92,6%)	250,5 (71,9%)	246,1 (67,5%)

4.2.3. Caracterización de los materiales

Los ensayos de caracterización de los materiales determinaron las propiedades mecánicas reales del hormigón, del acero de las armaduras longitudinales y transversales, y de los polímeros reforzados con fibras de carbono.

4.2.3.1. Hormigón

El hormigón de las vigas se definió como un HA-25/B/12/IIa y se fabricó en 5 amasadas distintas que correspondían a la ejecución de dos vigas por día (Figura 4.5). Se ensayaron 12 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura (véase Figura 4. 6) por cada amasada. A los 28 días, se realizaron tres ensayos de probetas a compresión simple. El primer día de ensayo de cada viga se realizaron ensayos de compresión simple, módulo de elasticidad y tracción indirecta. El día del segundo ensayo de cada viga se realizó un ensayo a compresión simple y de módulo de elasticidad de las probetas.

Las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas se detallan en la Tabla 4. 3. Tal y como se observa en esta tabla, la resistencia media a compresión a 28 días osciló entre 32 y 41 N/mm², pese a que el hormigón teóricamente tenía la misma dosificación de proyecto.



Figura 4.5. Proceso de hormigonado



Figura 4.6. Ejecución de las probetas de hormigón para cada una de las cinco amasadas

Tabla 4. 3 Características mecánicas del hormigón de las vigas de la campaña experimental

Ensayo	Fecha ensayo	Fecha hormigonado	$f_{cm,28d}$ (MPa)	$f_{cm, día ensayo}$ (MPa)	$f_{ct,m, día ensayo}$ (MPa)	$E_{cm,día ensayo}$ (MPa)
M0Sa	29/09/11	28/06/2011	32,93	40,19	3,70	31632
M0Sb	04/10/11	28/06/2011	32,93	40,19	3,70	31632
A0Sa	20/09/11	01/07/2011	38,44	42,63	3,84	33060
A0Sb	27/09/11	01/07/2011	38,44	42,63	3,84	33060
M1Sa	21/10/11	30/06/2011	37,41	42,82	3,59	33609
M1Sb	03/11/11	30/06/2011	37,41	42,82	3,59	33609
A1Sa	27/01/12	30/06/2011	37,41	44,46	3,59	34857
A1Sb	18/05/12	27/06/2011	41,24	49,75	4,55	27004
M2Sa	08/11/11	29/06/2011	33,17	39,84	3,32	30162
M2Sb	10/11/11	29/06/2011	33,17	39,84	3,32	30162
A2Sa	23/01/12	30/06/2011	37,41	44,46	3,59	34857
A2Sb	30/05/12	27/06/2011	41,24	49,75	4,55	27004
M1B	17/09/12	29/06/2011	33,17	38,49	3,32	30861
M1A	26/04/12	28/06/2011	32,93	39,00	3,70	31632
M2B	26/07/12	29/06/2011	33,17	38,49	3,32	30861
M2A	07/05/12	28/06/2011	32,93	39,00	3,70	31632
A2B	21/09/12	27/06/2011	41,24	49,64	4,55	36913
A2A	11/07/12	01/07/2011	38,44	44,68	3,84	33060
A3B	27/09/12	27/06/2011	41,24	49,64	4,55	36913
A3A	18/07/12	01/07/2011	38,44	44,68	3,84	33060

Los ensayos de módulo de elasticidad correspondientes a cada día de ensayo se realizaron en 3 probetas mediante la máquina Ibertest de 2,0 MN de capacidad. Los desplazamientos verticales se midieron con tres transductores de desplazamiento tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) de ± 5 mm de rango, distribuidos cada 120° alrededor de la probeta de hormigón. Las deformaciones longitudinales se obtuvieron como el promedio de los desplazamientos verticales para cada estado de carga entre los 150 mm de altura que separaban dos cinturones metálicos que encerraban la probeta en los que había dispuestos los LVDT (ver figura Figura 4.7).

Se determinó el módulo de elasticidad cargando la probeta hasta un tercio de su resistencia última según tres ciclos de carga y descarga que describen la curva σ - ϵ . La velocidad de carga

fue de $0,5 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2/\text{seg}$. Para el cálculo del módulo, se obvió el primer ciclo de carga para evitar distorsiones debidas a la estabilización de las deformaciones y se determinó como el promedio entre la pendiente de carga ascendiente del segundo y tercer ciclo. Las deformaciones ΔL_2 y ΔL_3 correspondientes a las deformaciones medidas cuando la tensión aplicada era de un tercio de la tensión de rotura para los ciclos consecutivos 2 y 3, no difirieron en más de un 10%.

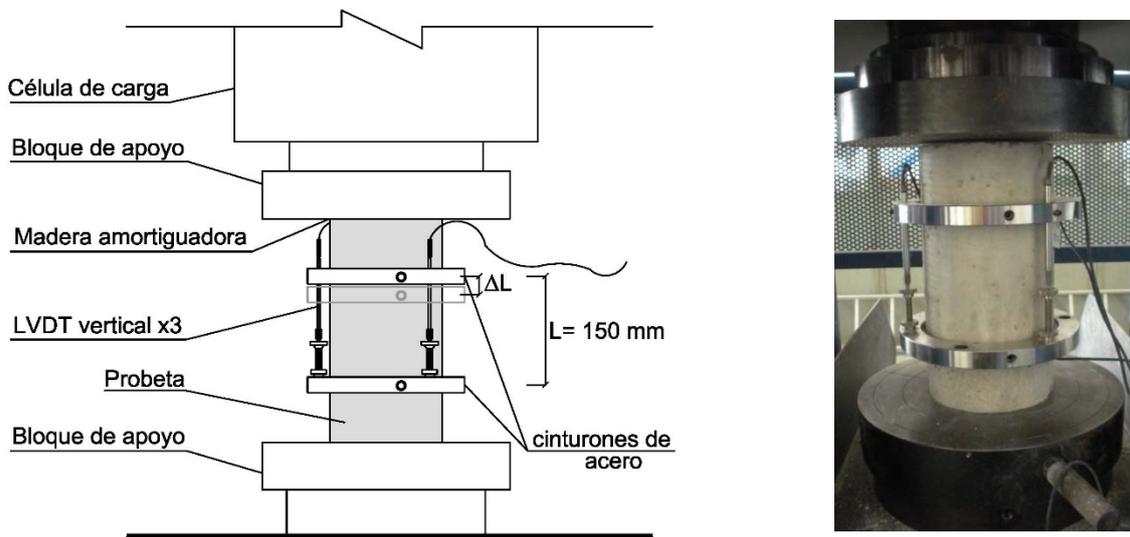


Figura 4.7. Instrumentación y montaje de las probetas para obtener el módulo de elasticidad

Los módulos de elasticidad obtenidos para los días de ensayo se muestran en la Tabla 4. 3.

En los ensayos a compresión simple, la lectura de la carga de compresión se realizó con una célula de carga de 2.0 MN clase 05 incorporada en la *Ibertest*, que realizaba un control retroalimentado según una función que combinaba la deformación longitudinal y la carga axil. La velocidad de aplicación de la carga axil a partir del 50 % de la carga de rotura osciló entre 2,5 y 6 KN/s para probetas de 15 cm de diámetro.

En la Tabla 4. 3 se describen los resultados a compresión simple para 28 días, para el día del primer extremo de la viga y para el día del segundo extremo de la viga.



Figura 4.8. Ensayo a compresión simple de probetas de hormigón y probetas después del ensayo

Mediante el ensayo a tracción indirecta o brasileño se determinó la resistencia a tracción del hormigón. Este ensayo consiste en aplicar sobre la probeta cilíndrica una fuerza de compresión en una banda estrecha en toda su longitud que originando una tracción ortogonal al plano de aplicación de la carga que provoca la rotura de la misma. La carga se aplicó con un incremento de presión constante de entre 4 y 6 MPa/s hasta la rotura.

Las normas de referencia para este tipo de ensayos son la UNE 83-306-85 (1985) y la UNE-EN 12390-6:2010 (2010).

En la Tabla 4. 3 se describen los resultados a tracción indirecta para el día del ensayo del primer lado de la viga.

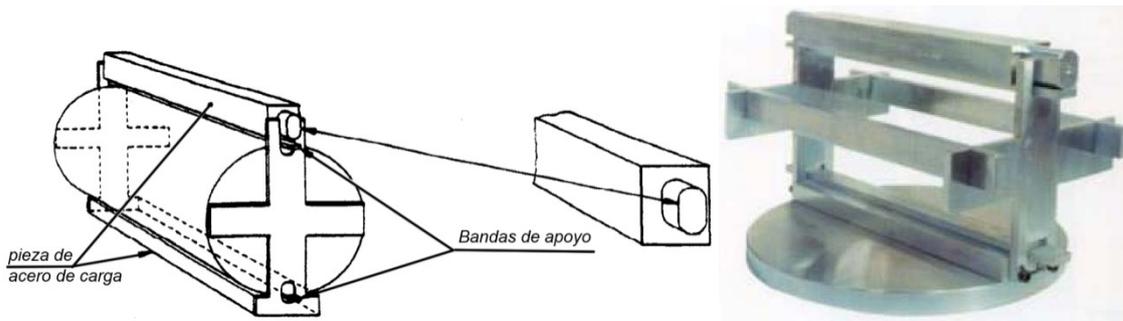


Figura 4.9. Dispositivo utilizado para ejecutar ensayos brasileños



Figura 4.10. Probetas ensayadas a tracción indirecta mediante el ensayo brasileño

4.2.3.2. Acero

Las propiedades mecánicas reales de las armaduras longitudinales y transversales, definidas en proyecto como B500 SD, se obtuvieron con ensayos de tracción UNE-EN ISO 6892-1:2010 (2010) sobre 3 muestras para cada uno de los diámetros utilizados. En la Figura 4.11 se pueden ver las curvas características de los distintos diámetros de acero empleados (6, 8, 12, 16, 20 mm) y en la Tabla 4. 4 se muestran sus propiedades mecánicas.

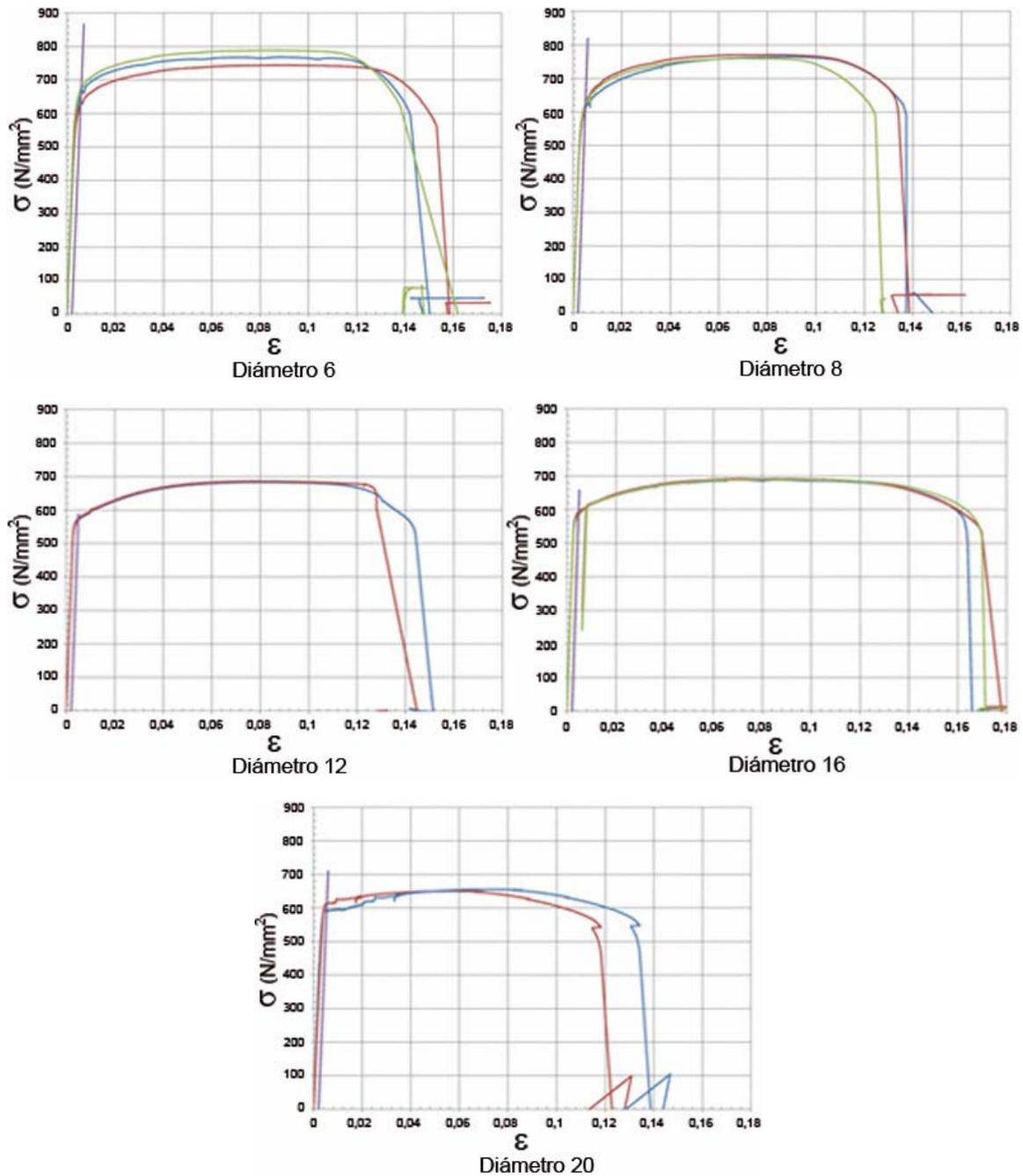


Figura 4.11. Tensión-Deformación de las armaduras de la campaña experimental

Tabla 4. 4 Resistencias promedio de los diámetros de acero utilizados

ϕ	$f_{y,m}$ ($\epsilon=2\%$) (MPa)	$f_{máx,m}$ (MPa)	ϵ_u	ϵ_y	Es (MPa)
6	645,73	767,91	0,1444	0,0034	189956
8	642,26	765,65	0,1316	0,0069	204750
12	590,40	690,45	0,1680	0,0043	219270
16	572,24	685,27	0,1357	0,0029	196121
20	603,65	652,48	0,1262	0,0034	175084

4.2.3.3. Polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP)

El material compuesto dispuesto como refuerzo estructural a cortante, es del sistema MBrace® [BASF 2010], suministrado por gentileza de la compañía BASF. Este compuesto está formado por fibras de carbono (MBrace® FIBRE CF 230/4900 300/30) que se adhieren y homogeneizan mediante resinas (MBrace® PRIMER y MBrace® FIBRE SATURANT). En la Tabla 4. 5 se detallan las características y propiedades mecánicas del fabricante de las fibras de carbono y en la Tabla 4. 6 se detallan las características de la resina.

Tabla 4. 5 Datos técnicos y propiedades mecánicas del fabricante para la fibra de carbono

	MBrace® FIBRE CF 230/4900 300/30
Espesor diseño (mm)	0,170
Peso hoja (g/m ²)	300
Ancho hoja (mm)	300
Densidad fibra (g/cm ³)	1,76
Módulo elasticidad mínimo (GPa)	221
Resistencia a tracción mínima (MPa)	4510
Elongación mínima última (%)	1,9
Densidad fibra mínima (g/cm ³)	1,76

Tabla 4. 6 Datos técnicos y propiedades mecánicas del fabricante para la resina epoxi

	Resina epoxi saturante para MBrace® FIBRE
Densidad (g/cm ³)	1,04
Resistencia al arrancamiento (N/mm ²)	> 14
Resistencia a la cizalla (N/mm ²)	≥ 12
Módulo de elasticidad en compresión (N/mm ²)	≥ 2000
Módulo de elasticidad en flexión (N/mm ²)	≥ 2000

Los datos facilitados solo hacen referencia a las fibras y a la resina por separado, ya que las propiedades mecánicas del compuesto dependen del volumen de fibras y matriz empleados. Para corroborar las propiedades mecánicas de las fibras, así como para determinar las propiedades mecánicas del compuesto formado por las fibras más la matriz de resina epoxi, se realizaron ensayos a tracción de probetas siguiendo la ASTM D3039/D3039M-08 (2008). Se fabricaron tres muestras de únicamente fibras y seis muestras del material de refuerzo de los ensayos formado por una sola capa de fibras más la resina epoxi. Las muestras tenían una longitud de 26 cm de los cuales los 16 cm centrales eran libres, ya que en los extremos se adhirieron unas platabandas en ambos lados y extremos de la probeta de 5 cm de longitud para evitar la rotura de la muestra en la zona de las mordazas. (Véase Figura 4.13). Las deformaciones se midieron colocando 3 galgas en cada probeta en la mitad de su longitud; dos de ellas en la cara frontal a 1/8 de la anchura de la probeta desde cada uno de los extremos opuestos y la otra en la cara posterior centrada en su anchura tal y como se ve en la Figura 4.12. Las características y propiedades mecánicas de las probetas del material compuesto FRP (fibras+resinas) se muestran en la Tabla 4. 8 y de las fibras únicamente en la Tabla 4. 7.

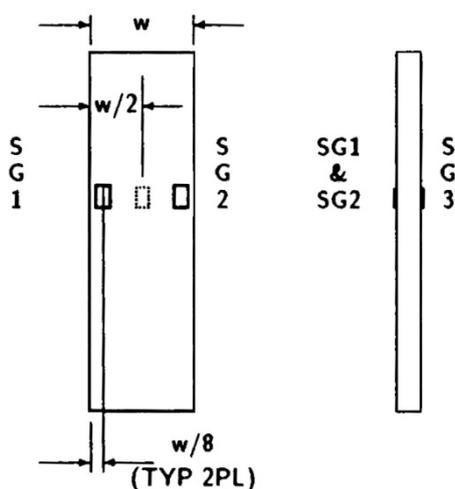


Figura 4.12. Disposición de las galgas extensométricas para el ensayo de probetas CFRP según ASTM D3039

Tabla 4. 7 Resultados de las probetas de fibras de carbono (sin resina)

PROBETAS DE FIBRAS DE CARBONO (SIN RESINA)	Ancho w (mm)	ϵ_{FRP} ($\mu\epsilon$)	E (MPa)	f_u (MPa)
PROBETA 01	28,0	5774	236650	957
PROBETA 02	16,25	3305	203033	617
PROBETA 03	15,5	4660	146867	857

ϵ_{FRP} ($\mu\epsilon$)	4580	Valor medio (μ)	4580
		Desviación estándar (σ_{st})	1236
		C.O.V.	27 %

Módulo de elasticidad (E) ^(a) (MPa)	195517	Valor medio (μ)	195517
		Desviación estándar (σ_{st})	45361
		C.O.V.	23 %

Tensión de rotura (f_u) ^(a) (MPa)	810	Valor medio (μ)	810
		Desviación estándar (σ_{st})	175
		C.O.V.	22 %

^(a) Datos calculados con el espesor nominal de la fibra de carbono (0,17 mm).

Tabla 4. 8 Resultados de las probetas del compuesto de FRP (fibras+resina)

PROBETAS CFRP (FIBRAS + RESINA)	Ancho w (mm)	ϵ_{FRP} ($\mu\epsilon$)	E (MPa)	f_u (MPa)
PROBETA 1	26,75	10121	214750	1939
PROBETA 2	28,25	12134	259200	2972
PROBETA 3	28	9879	227700	2259
PROBETA 4	25	10721	303367	3448
PROBETA 5	27,33	11080	274500	3011
PROBETA 6	24,9	9931	298267	2808

ϵ_{FRP} ($\mu\epsilon$)	10645	Valor medio (μ)	10645
		Desviación estándar (σ_{st})	870
		C.O.V.	8 %

Módulo de elasticidad (E) ^(a) (MPa)	262964	Valor medio (μ)	262964
		Desviación estándar (σ_{st})	36315
		C.O.V.	14 %

Tensión de rotura (f_u) ^(a) (MPa)	2739	Valor medio (μ)	2739
		Desviación estándar (σ_{st})	549
		C.O.V.	20 %

^(a) Datos calculados con el espesor nominal de la fibra de carbono (0,17 mm).

El módulo de elasticidad promedio de las probetas de fibras de carbono es un 12% inferior al valor facilitado por el fabricante, mientras que el módulo del material compuesto, fibras más resina, es un 19% superior al módulo de únicamente las fibras facilitado por el fabricante.

La tensión de rotura promedio de las fibras de carbono es un 82% menor al valor facilitado por el fabricante, presentando un valor muy por debajo del estimado. La tensión de rotura del material compuesto, fibras más resina, no presenta tanta dispersión siendo un 39% menor al valor facilitado por el fabricante de únicamente las fibras.

La gran dispersión que existe entre el valor facilitado por el fabricante y las probetas ensayadas a tensión de rotura última y a deformación última, se puede deber al volumen de fibras así como a concentraciones de tensiones entre otros motivos.

En la Figura 4.13 se puede apreciar el estado de las probetas antes y después de ser ensayadas a tracción.



Figura 4.13. Probetas de FRP con su disposición de galgas antes de ensayar. Probetas de FRP y de únicamente fibras una vez ensayadas

4.2.4. Sistemas de anclaje para los laminados FRP

Para evitar el desprendimiento prematuro del refuerzo, se utilizaron dos tipos de anclaje: Anclaje tipo A y anclaje tipo B. Ambos se basan en la utilización de pernos pasantes, pero en un caso (A) éstos perforan a los laminados de refuerzo y en el otro caso (B), los pernos se colocan en el espacio entre los laminados.

El sistema de anclaje A consistió en el empleo de pernos pasantes que unen los extremos del refuerzo FRP realizado en las dos caras de la viga. Para reducir el daño provocado en el laminado por el perno pasante, se colocó un laminado multidireccional paralelo a la directriz de la pieza (suministrado por Betec), justo debajo del ala, en la zona de anclaje de los refuerzos de FRP (ver Figura 4.14). El laminado multidireccional prefabricado tiene un espesor de 3 mm. El laminado multidireccional se adhiere a los refuerzos FRP y a la superficie del hormigón mediante una resina epoxi suministrada por gentileza de Betec. Los pernos pasantes de 10 mm de diámetro cada 240 mm se colocan coincidiendo con los ejes de los refuerzos verticales de FRP en U. Los pernos se colocan a 100 mm de la cara inferior del ala. Cada perno perfora el hormigón, una banda de FRP en U por los dos extremos y el mismo laminado multidireccional dispuesto para el anclaje. Para reducir la posible acumulación de tensiones, se dispusieron unas platabandas metálicas de reparto de 4 mm de espesor en los extremo de cada perno sobre el laminado multidireccional.

El sistema de anclaje B consistió en el empleo de pernos pasantes de 10 mm de diámetro, situados a 100 mm de la cara inferior del ala, separados 240 mm entre sí, situados en el punto medio entre dos refuerzos de FRP. De forma similar al caso anterior, se adhirió una platabanda que en este caso fue metálica de 4 mm de espesor, que se colocó paralela a la directriz de la pieza por debajo del ala. Los pernos atravesaron la platabanda metálica sin atravesar el FRP. Además, los refuerzos a cortante de FRP se anclaron a esta platabanda enrollados en su extremo a la platabanda durante el proceso de ejecución (ver Figura 4.14).

La principal diferencia entre ambos sistemas, es que en el anclaje tipo A los refuerzos a cortante de CFRP son perforados por los pernos que sostienen el FRP multidireccional de anclaje, mientras que en el anclaje tipo B se evita que estos sean perforados y el refuerzo a

cortante se ancla en la platabanda. Este sistema es parecido al que utiliza Mofidi et al. (2013), en el que enrollan los refuerzos a cortante entorno a una barra que embeben en la parte inferior del ala de la sección en T.

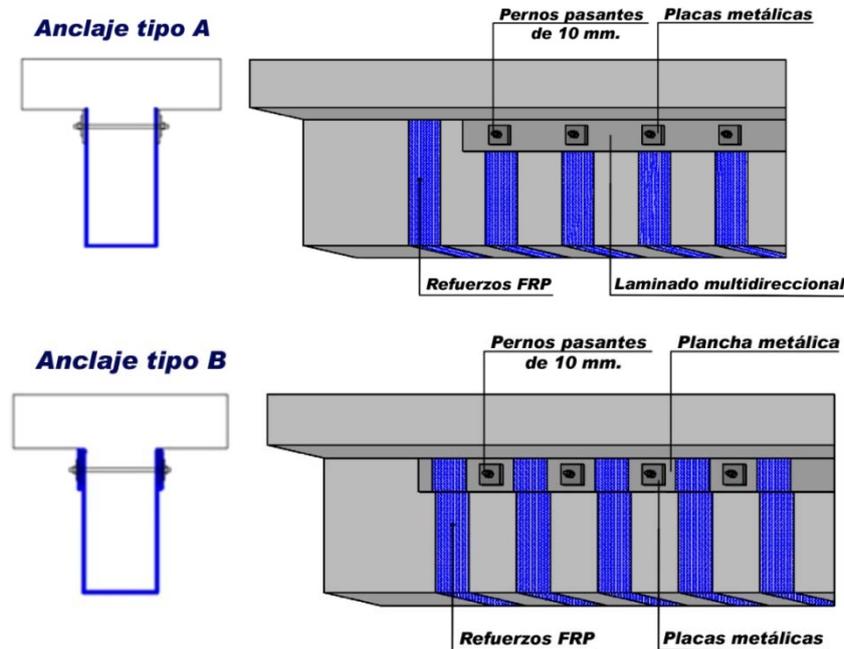


Figura 4.14. Sistemas de anclaje utilizados

4.2.5. Método de aplicación de los polímeros reforzados con fibras FRP

La aplicación del refuerzo a cortante de FRP se realizó de acuerdo con las indicaciones del fabricante (BASF) que se detallan a continuación:

- Se preparó la superficie soporte retirando la capa superficial de lechada de aproximadamente 3 mm de espesor, al mismo tiempo que se redondearon los cantos inferiores mediante una pulidora con disco abrasivo especial para hormigón. Ver Figura 4.15
- La superficie de la viga que presentaba coqueas o los bordes en los que se ha producido alguna discontinuidad al realizar el pulido, se repararon con mortero EMACO® Nanocrete R4 que se dejó curar siete días.
- Se limpia la viga del polvo mediante aspirador y brocha.
- Se mezclaron los dos componentes de la imprimación MBrace® PRIMER. Se aplicó la imprimación sobre la superficie de la viga a reforzar, con el fin sellar los poros y pequeñas cavidades y garantizar así la uniformidad de la superficie de aplicación del producto y su buena adherencia.
- Pasados 30 min y antes de 48 horas se aplicó sobre la capa de imprimación una primera capa de resina epoxi, MBrace® FIBRE SATURANT. Una vez mezclados los dos componentes que conforman el saturante se dispuso de aproximadamente 30 minutos para su aplicación antes de que éste empezase a endurecerse y que se produjese la pérdida de maleabilidad.
- Inmediatamente se colocó sobre la capa de resina la hoja de fibra de carbono, MBrace® FIBRE presionándola con un rodillo especial de teflón hasta que la resina quedó embebida eliminando además, posibles burbujas de aire que podrían impedir su adherencia al hormigón.

- g. Se aplicó una segunda capa de resina epoxi pasados 30 min y antes de 60 min de la aplicación de la hoja de fibras hasta que éstas quedaron saturadas y totalmente cubiertas.
- h. Se dejó como mínimo 48 horas de curado antes de ensayar.



Figura 4.15. Retirada lechada de cemento mediante pulido



Figura 4.16. Aplicación de la resina epoxi y el tejido de fibra de carbono.

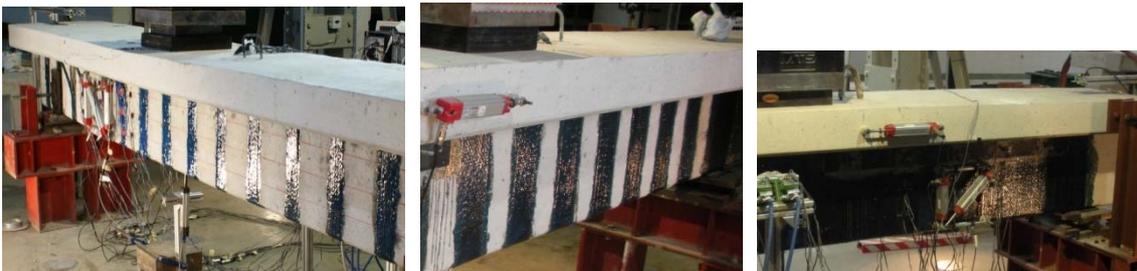


Figura 4.17. Viga reforzada con cuantía 1, 2 y 3 de FRP respectivamente

4.2.6. Configuración de los ensayos y equipos técnicos

Los ensayos de las vigas se realizaron en el pórtico de carga del Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló (LTE) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña. En la Figura 4.18 se observan los equipos de control, adquisición de datos, la instrumentación y la disposición del pistón de carga y apoyos del ensayo que quedan descritos en este apartado.



Figura 4.18. Pórtico de carga con actuador hidráulico MTS.

Las diferentes vigas se cargaron monotónicamente hasta su rotura mediante un actuador MTS dispuesto en el pórtico de carga que se ve en la Figura 4.18. Se trata de un servoactuador pseudodinámico de 1MN a compresión y 650 KN a tracción que dispone de 500 mm de recorrido de pistón. Dispone de dos rótulas situadas a ambos extremos, lo que le permite giros en múltiples direcciones, tanto para aplicar fuerza o desplazamiento como para proteger el actuador frente a esfuerzos no previstos. Las características y dimensiones se muestran en la Figura 4.19.

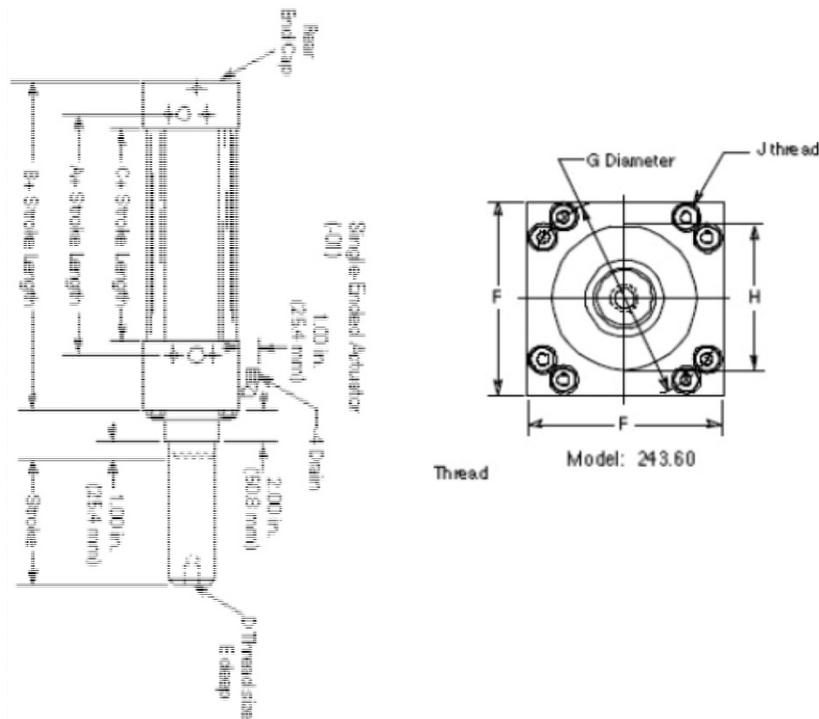


Figura 4.19. Izq. Sección longitudinal del actuador MTS Series 243.60. Der. Sección transversal de la placa de anclaje de la rótula del actuador.

Las características principales del actuador se detallan en la Tabla 4. 9

Tabla 4. 9 Características principales del actuador MTS Series 243.60

Fuerza máxima (KN)	Tracción	648
	Compresión	1013
Área efectiva del pistón (cm²)	Tracción	324,31
	Compresión	506,74

El actuador dispone internamente de un transductor de desplazamiento que mantiene un registro continuo de la posición del actuador.

El actuador se maneja mediante un controlador multiestacional que permite el control del ensayo por desplazamiento, carga o por un dispositivo de medida externa (dispone de ocho canales de control y seis actuadores controlados).

El controlador del actuador MTS Flextest 60 incluye un software mediante el cual se puede visualizar numérica y gráficamente la evolución del ensayo (carga y desplazamiento), programar el ensayo definiendo diferentes rampas de carga y/o descarga disponiendo límites a dichas rampas y definir ciclos, tal y como se ve en la Figura 4.20.

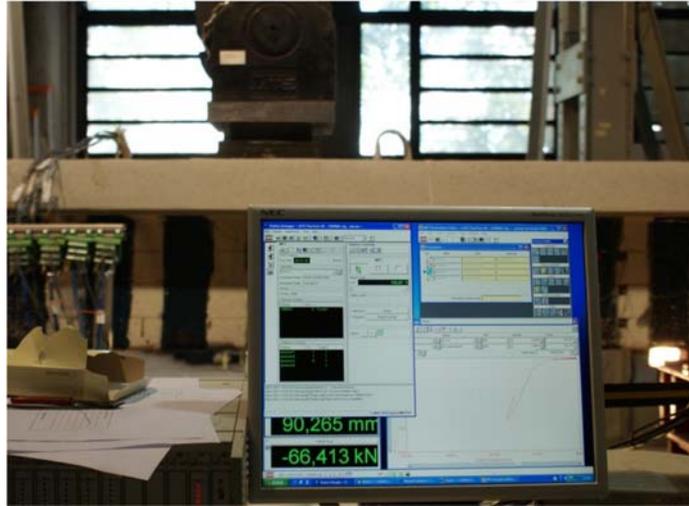


Figura 4.20. Software del controlador MTS Flextest 60

Los ensayos se han realizado con control de desplazamiento con las velocidades indicadas en el Capítulo 5 en función de cada una de las vigas ensayadas.

Las galgas extensométricas y los transductores de desplazamiento empleados en los ensayos se conectan al sistema de adquisición de datos MGC Plus, que opera con el software CATMAN, ambos de la casa comercial HBM. La adquisición transforma las lecturas de voltaje en medidas de longitud o de deformación. Las lecturas de datos para esta campaña experimental se realizaron a 0,5 Hz. Este sistema se puede ver en la Figura 4.21.



Figura 4.21. Sistema de adquisición de datos HBM MGC Plus

4.2.7. Instrumentación

La instrumentación que se ha dispuesto en los ensayos consta de transductores de desplazamiento (Temposonics, LVDT's (de las siglas Linear Variable Differential Transformator), láseres Acuity AR200-5014) y galgas extensométricas.

Los transductores de desplazamiento, que para esta campaña son del fabricante MTS, son sensores de posición lineal, es decir, miden desplazamientos en una sola dirección. Son transductores magnetostrictivos, lo que significa que se basan en el acoplamiento de fuerzas mecánicas y magnéticas, de manera que una deformación o translación produce una variación

de un campo magnético y al mismo tiempo una corriente eléctrica, tal y como se ve en el esquema de funcionamiento de la Figura 4.22

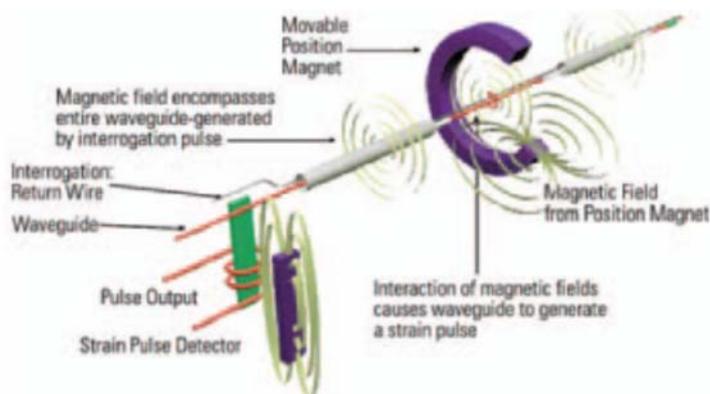


Figura 4.22. Esquema de funcionamiento de los transductores de desplazamiento (temposonics) (MTS System, <http://machinedesign.com/archive/good-positioning>)

Los temposonics miden la deformación media entre los puntos en que se colocan y la medición depende del rango de actuación o longitud, que va desde los 75 hasta los 1500 mm. En esta campaña sólo se han utilizado temposonics de 75, 100, 150 y 200 mm.

Como se observa en la Figura 4.23 se dispone un temposonic vertical entre la cara inferior de la viga y la losa de carga del laboratorio, en la vertical del punto de carga, para medir la flecha en este punto durante el ensayo. Se disponen dos temposonics horizontales, uno a cada lado de la viga, centrados en el espesor del ala, a 25 cm del punto de carga hacia el vano de cortante, donde se estima que pasará la fisura del ala.

Se dispusieron también 5 temposonics simétricamente a cada lado de la viga configurando una roseta situada entre el punto de carga y el apoyo más cercano a la rotura tal y como se ve en la Figura 4.23 Izq. de manera que se permitiera identificar la dirección de las deformaciones principales y el ángulo de las bielas de compresión y verificar así si este se ajusta al ángulo real de las fisuras de rotura de la viga.

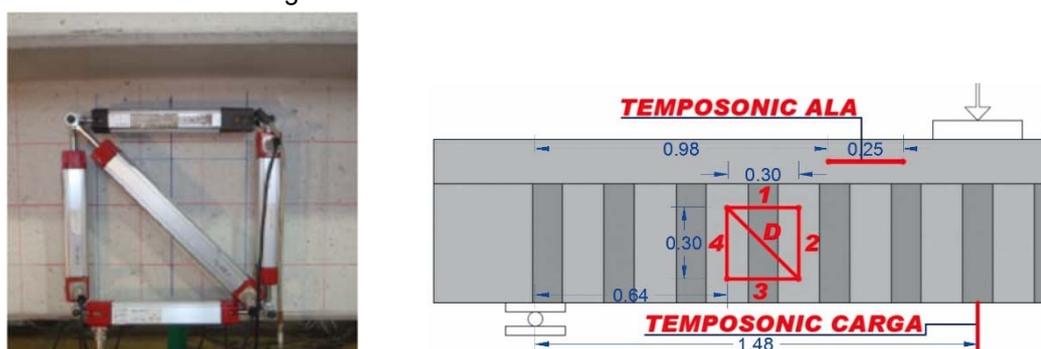


Figura 4.23. Izq. Temposonics dispuestos en roseta para un lado de la viga. Der. Descripción de los temposonics dispuestos para un lado de la viga

En esta campaña experimental se han empleado también LVDTs, que por inducción miden desplazamientos en una dirección, para medir el deslizamiento relativo entre el hormigón y las bandas de FRP. Para ello se ha dispuesto un LVDT adherido al hormigón y otro al FRP. Ambos miden el desplazamiento respecto a un único perfil de acero horizontal anclado al hormigón lo

más cercanamente posible al FRP (ver Figura 4.24). Restando un deslizamiento respecto al otro obtenemos el deslizamiento relativo. Los LVDT, se diferencian de los transductores de desplazamiento por tener un rango menor a estos que les permite tener mayor precisión. Para esta campaña experimental se ha utilizado el modelo AX/1.5/S de accionamiento por muelle.

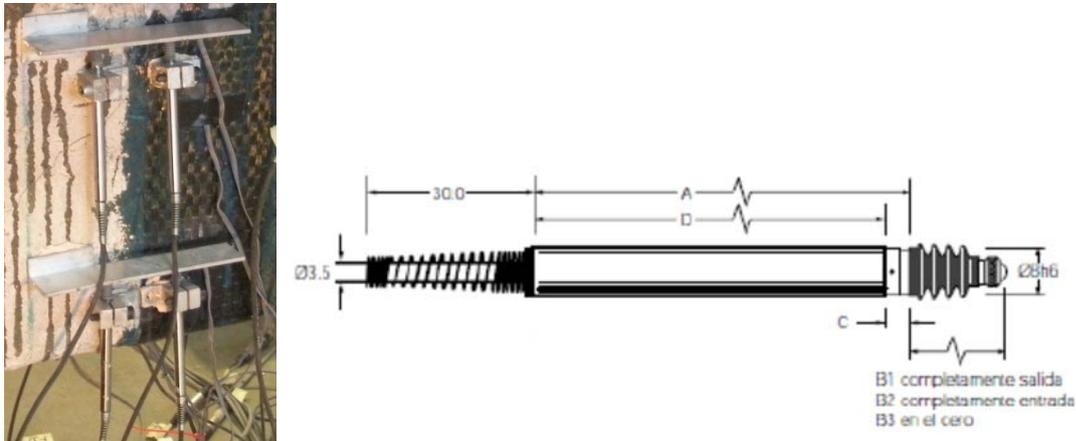


Figura 4.24. Izq. Disposición de cuatro LVDT para medir el deslizamiento relativo entre el hormigón y el FRP. Der. Sección transversal de un LVDT de accionamiento por muelle

Finalmente, se ha dispuesto un láser en cada apoyo para medir posibles descensos. Los láseres de medición basan su principio en la triangulación, emitiendo así un haz de luz visible láser incidente sobre una superficie deseada al mismo tiempo que captando mediante el propio dispositivo la luz reflejada recibida en un determinado ángulo. De esta manera se calcula la distancia entre el punto emisor de la luz y el punto reflector (ver esquema de funcionamiento en la Figura 4.25 Izq.). Estos aparatos de medición que se apoyan en unas ménsulas metálicas, de modo que estos quedan 5 cm por encima de la cara superior de la viga en los dos puntos de apoyo. Si existe descenso de apoyos se resta este valor al de la flecha medida en el punto de aplicación de la carga para obtener la flecha real. En la Figura 4.25 se ve la disposición de los láseres, que se colocan en la parte superior de la viga y es la misma en los dos apoyos.

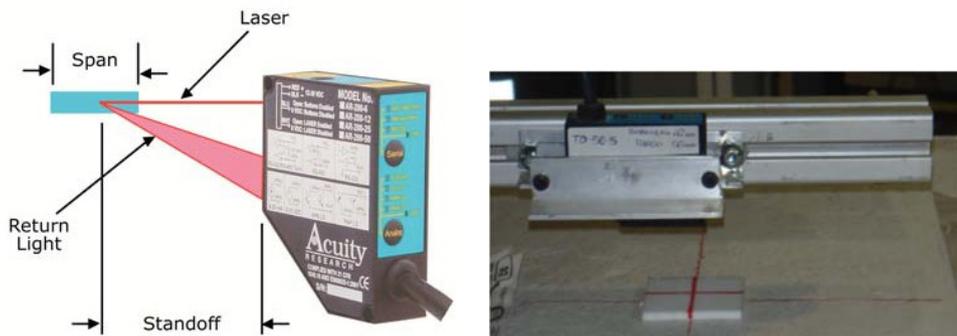


Figura 4.25. Izq. Esquema de funcionamiento de los láseres Acuity AR200-50M. Der. Disposición de un láser sobre la vertical del punto de apoyo

Se ha dispuesto una instrumentación exhaustiva mediante galgas extensométricas, para la cuantificación de las contribuciones a cortante del acero longitudinal y transversal y del FRP.

Mediante galgas extensométricas unidireccionales se ha medido la deformación longitudinal en el punto soporte de la galga a través de la variación de la resistencia óhmica.

Las galgas extensométricas son una resistencia eléctrica adherida a una base aislante. Las deformaciones que se producen en el elemento al que se adhiere la galga debido a un

determinado estado de carga se transfieren a la resistencia de la galga. La variación de resistencia es directamente proporcional a la deformación según:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (4.1)$$

donde: ε : Deformación
 R: Resistencia de la galga
 ΔR : Variación en la resistencia de la galga provocada por deformación.
 K: Factor de galga (característico del tipo de galga).

La deformación medida por la galga se traduce de una variación de la resistencia eléctrica que hace necesaria la utilización de puentes de Wheatstone para convertir la salida en un voltaje eléctrico.

La resistencia de la galga varía en función del material soporte y de su capacidad para disipar calor. La deformación máxima de la galga depende de su longitud, de manera que para deformaciones elevadas se emplean galgas más largas que para deformaciones menores.

Las galgas deben resistir los condicionantes del ensayo. Uno de los más importantes es la temperatura y su oscilación de la que depende que se elijan o no galgas autocompensables. Otros condicionantes importantes son la humedad y la exposición a medios agresivos pero estos pueden atenuarse con una buena protección e impermeabilización de la galga. Para esta campaña experimental con ensayos estáticos el factor más importante para la elección de la galga es su deformación máxima.

En la colocación de las galgas en las armaduras de las vigas, además de garantizar la adherencia mediante el pulido y limpiado del acero (ver Figura 4.26), se debe de proporcionar una especial protección para evitar el desprendimiento de las galgas durante el proceso de hormigonado y de vibrado, así como para evitar la excesiva humedad que se les conferiría por el vertido de hormigón fresco. Para ello se protegen e impermeabilizan las galgas con un tubo de plástico relleno de silicona. Previamente al encapsulamiento de la galga se coloca cinta no conductora para asegurar que no existen distorsiones en las mediciones de las deformaciones (ver Figura 4.26).

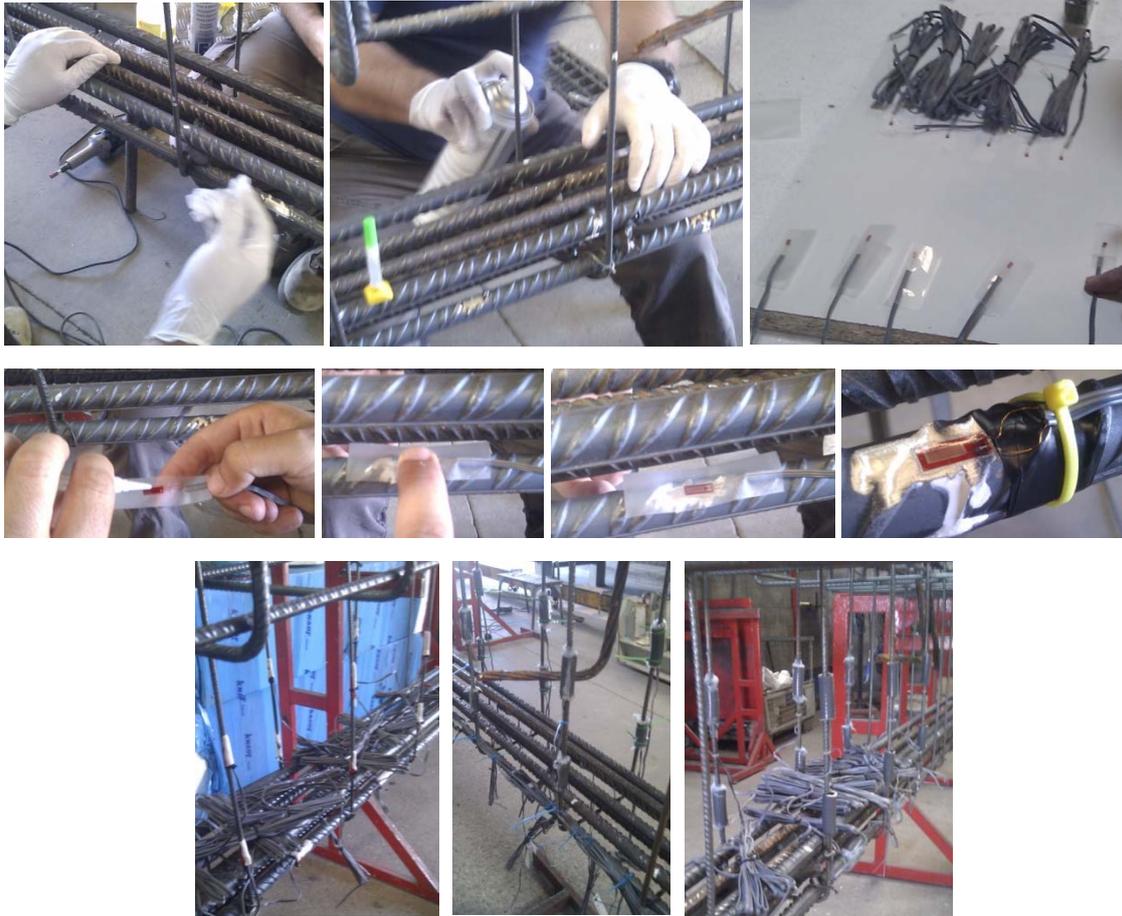


Figura 4.26. Proceso de aplicación de las galgas en el acero.

Las galgas situadas en el FRP no requieren de una especial impermeabilización, tan solo asegurar su correcta adherencia librándolas de la presencia de polvo así como de posibles irregularidades por acumulación de resina, mediante el pulido y la limpieza con alcohol de la zona de FRP donde se dispondrá la galga. Esta adherencia se garantiza usando un adhesivo de cianocrilato.



Figura 4.27. Disposición final de galgas en el FRP

Para la presente campaña se han dispuesto galgas extensométricas en dos puntos de las armaduras longitudinales que quedan entre los tres cercos instrumentados, por los que pasará la fisura de cortante, que disponen también de galgas a dos alturas distintas para cada lado de

la viga con el fin de conocer las deformaciones, y en consecuencia las tensiones, de los puntos que se muestran en la Figura 4.28.

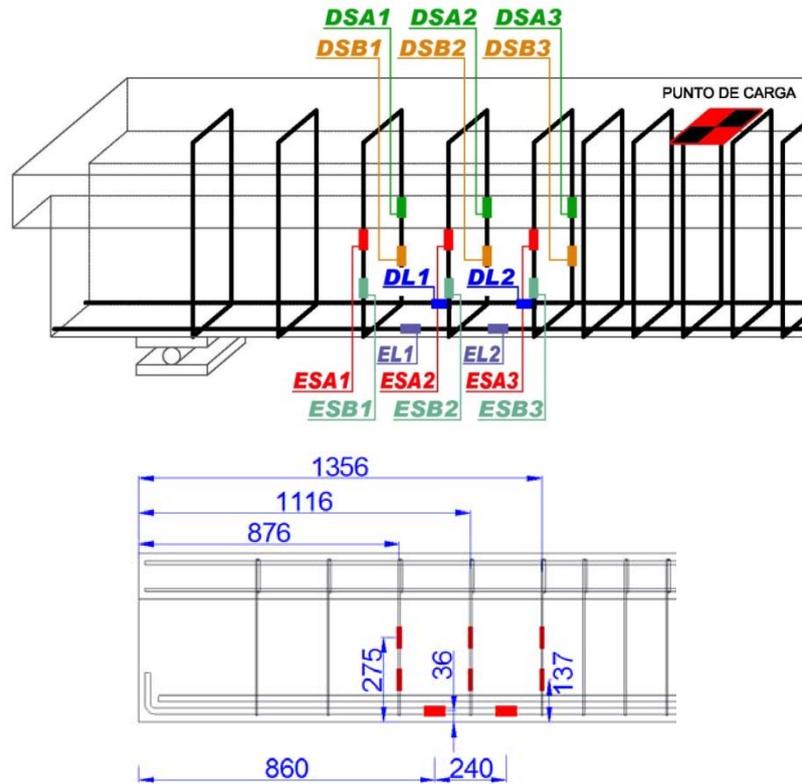


Figura 4.28. Galgas dispuestas en las armaduras longitudinales y transversales

Se han instrumentado 3 laminados de FRP a cada lado de la viga que coinciden con la posición de las tres armaduras transversales instrumentadas (ver Figura 4.29). Las galgas se han dispuesto a 3 alturas distintas para cada banda, a 96, 200 y 300 mm respecto la base de la viga, para cuantificar cual es la distribución de deformaciones y tensiones producida a lo largo del refuerzo. En el siguiente capítulo, para referirse a los laminados interceptados por la fisura crítica, se utilizará la nomenclatura que viene de las galgas, es decir laminado 123, laminado 456 y laminado 789. Se hablará también del lado frontal, F, que es el que queda más cercano al equipo de adquisición de datos, y el lado anterior, A, que se corresponde con el otro alzado de la viga.

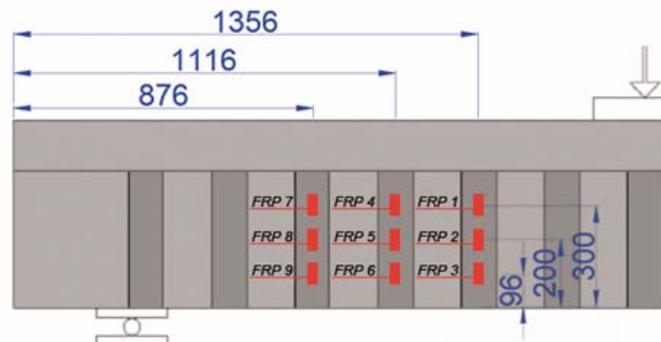


Figura 4.29. Galgas dispuestas en tres bandas de FRP. Disposición simétrica en el lado opuesto

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la campaña experimental. En el primer apartado se realiza una breve descripción del desarrollo de cada ensayo, mostrando las particularidades y/o incidencias principales, junto a una tabla resumen en la que se indica la fecha de ensayo de cada ejemplar, la resistencia media del hormigón el día de ensayo, las cuantías de armadura longitudinal, transversal y de FRP junto al tipo de anclaje empleado, el cortante último en el apoyo más cercano al punto de aplicación de la carga y el modo de rotura. En esta primera parte también se incluye el gráfico cortante en apoyo-flecha bajo el punto de aplicación de la carga para cada ensayo.

En el siguiente apartado se realiza un análisis global de la campaña experimental, estudiando los cortantes últimos, el modo de rotura, el instante en el que se produce el desprendimiento prematuro del refuerzo, así como el ángulo de inclinación de la fisura crítica de cortante, en función de la cuantía de FRP y el tipo de anclaje dispuesto y de la cuantía de armadura pasiva longitudinal.

Se analiza el comportamiento de las vigas a través de la relación cortante en apoyo-flecha en la sección de aplicación de la carga, y también a partir de las deformaciones en la armadura pasiva transversal y en los refuerzos FRP instrumentados. A partir de estos datos, se han evaluado la contribución a cortante del hormigón del alma, del hormigón del ala, del acero pasivo transversal y del FRP.

Finalmente este apartado concluye con la comparación de los resultados experimentales con los modelos teóricos y un resumen de las conclusiones del análisis de resultados.

5.1 Resumen de resultados de la campaña experimental

En la Tabla 5. 1 y en la Tabla 5. 2 se resumen los ensayos realizados según su tipo de refuerzo, si dispone o no de anclaje, los cortantes en los que se producen desprendimientos del FRP, el cortante último, el cortante de su teórico ensayo de control y el incremento de cortante respecto a este ensayo de control. La nomenclatura de los ensayos es la siguiente: la primera sigla (M o A) indica la cuantía de armadura longitudinal, media o alta; el segundo índice indica la cuantía de refuerzo FRP (0, 1, 2, y 3); la tercera sigla indica el tipo de anclaje si dispone de él (A o B) o si no dispone de anclaje (S); la última sigla a o b para las vigas sin anclaje indica si es el primer o segundo ensayo sobre el mismo tipo de viga. El cortante de su teórico ensayo de control se refiere al cortante último de la viga sin refuerzo transformado para tener en cuenta la diferente resistencia del hormigón. Es decir, a partir del cortante último de la viga de control de la serie M o A se ha calculado la componente V_s y la componente V_c , como la diferencia entre V_u y V_s . Para obtener el cortante último de la viga teórica de control se ha sumado a V_s , el valor de V_c afectado por la raíz cúbica de la relación entre la resistencia del hormigón de la viga reforzada y la resistencia del hormigón de la viga de control correspondiente.

Tabla 5. 1 Resumen de resultados para las vigas de la serie M

Viga	Tipo de refuerzo	Anclaje	Galga	$V_{peeling}$	V_u	$V_{control(*)}$	ΔV
	FRP		FRP	(KN)	(KN)	(KN)	(%)
M0Sa	sin FRP	sin anclaje	--	--	299,9	-	-
M0Sb	sin FRP	sin anclaje	--	--	309,6	-	-
M1Sa	U w=50mm/240mm	sin anclaje	--	(**)	349,4	314,03	10,1%
			A6	272,4			
			A5	272,4			
M1Sb	U w=50mm/240mm	sin anclaje	A4	272,4	324,7	313,3	3,51%
			F6	261,4			
			F4	261,4			
			A9	215,2			
			A7	222,3			
M2Sa	U w=100mm/ 240mm	sin anclaje	A5	222,3	284,9	305,2	-7,1%
			A4	222,3			
			F9	252,6			
			F4	252,6			
			A8	250,9			
			A7	250,9			
M2Sb	U w=100mm/240mm	sin anclaje	A4	154,0	259,1	305,2	-17,7%
			F8	240,0			
			F4	151,4			
M1B	U w=50mm/240mm	platabanda metálica			328,1	305,2	7,0%
M1A	U w=50mm/240mm	FRP Multidireccional			335,8	304,7	9,3%
M2B	U w=100mm/240mm	platabanda metálica			325,0	305,3	6,1%
M2A	U w=100mm/240mm	FRP Multidireccional			348,0	304,7	12,4%

(*) Cortante último de la viga de control modificado en función de la resistencia del hormigón el día del ensayo
 (**) No se registró la carga a la que apareció el desprendimiento prematuro del refuerzo de FRP

Tabla 5. 2 Resumen de resultados para las vigas de la serie A.

Viga	Tipo de refuerzo	Anclaje	Galga	$V_{peeling}$	V_u	$V_{control(*)}$	ΔV						
	FRP		FRP	(KN)	(KN)	(KN)	(%)						
A0Sa	sin FRP	sin anclaje	--	--	326,6	-	-						
A0Sb	sin FRP	sin anclaje	--	--	319,7	-	-						
A1Sa	U w=50mm/240mm	sin anclaje	F9	238,3	333,8	321,5	3,7%						
			F7	238,3									
			F6	291,2									
			F4	291,2									
A1Sb	U w=50mm/240mm	sin anclaje	A8	302,8	335,8	328,3	2,2%						
			A4	286,8									
			F8	289,0									
			F7	289,0									
			F6	286,8									
A2Sa	U w=100mm/240mm	sin anclaje		(**)	338,1	321,4	4,9%						
			A2Sb	U w=100mm/240mm				sin anclaje	A7	289,0	340,4	327,8	3,7%
			A2B	U w=100mm/240mm				platabanda metálica			401,6	328,1	18,3%
			A2A	U w=100mm/240mm				FRP Multidireccional			403,0	323,1	19,8%
A3B	continuo en U	platabanda metálica			408,6								
A3A	continuo en U	FRP Multidireccional			382,2								

(*) Cortante último de la viga de control modificado en función de la resistencia del hormigón el día del ensayo
 (**) No se registró la carga a la que apareció el desprendimiento prematuro del refuerzo de FRP

Todas las vigas ensayadas fallaron a cortante a excepción de la viga A3B que falló a flexión.

En la tabla 5.3 se detallan los cortantes teóricos de fisuración según la resistencia a tracción del hormigón el día del ensayo de cada ejemplar y el cortante de fisuración real según se aprecia un cambio de pendiente en los gráficos cortante desplazamiento que se muestran en las fichas de cada ensayo.

Tabla 5. 3 Resistencia a tracción del hormigón, momento teórico de fisuración, cortante teórico de fisuración y cortante real de fisuración de los ensayos realizados en la campaña experimental

	$f_{ct,m}$ (día ensayo)	Momento teórico fisuración (*)	$V_{teórico}$ fisuración	V_{real} fisuración
	N/mm ²	KN·m	KN	KN
M0Sa	3,70	47,51	32,10	44,05
M0Sb	3,70	47,51	32,10	43,62
A0Sa	3,84	49,31	33,31	50,57
A0Sb	3,84	49,31	33,31	97,8
M1Sa	3,59	46,10	31,15	10,92
M1Sb	3,59	46,10	31,15	21,5
A1Sa	3,59	46,10	31,15	51,54
A1Sb	4,55	58,42	39,47	43,37
M2Sa	3,32	42,63	28,80	39,63
M2Sb	3,32	42,63	28,80	38,34
A2Sa	3,59	46,10	31,15	15,6
A2Sb	4,55	58,42	39,47	48,69
M1B	3,32	42,63	28,80	32,44
M1A	3,70	47,51	32,10	45,51
M2B	3,32	42,63	28,80	34,6
M2A	3,70	47,51	32,10	44,4
A2B	4,55	58,42	39,47	42,06
A2A	3,84	49,31	33,31	52,6
A3B	4,55	58,42	39,47	39,65
A3A	3,84	49,31	33,31	59,17

(*) Momento teórico de fisuración calculado según el momento resistente de la sección, W' , de 0,01284 m³ para momentos positivos

A continuación se describe brevemente cada uno de los ensayos realizados. Para cada ensayo se indica el cortante para el que se producen los desprendimientos de los laminados FRP de acuerdo con la información registrada por las galgas, así como las plastificaciones indicadas por sus correspondientes galgas.

5.1.1. Vigas de control

Ensayo M0Sa

El primer ensayo sobre la viga de control de cuantía media de armadura longitudinal se realizó en dos ciclos, mediante control de desplazamiento. En el primer ciclo se alcanzó un cortante de 50 kN en el apoyo del vano de cortante. Se descargó y posteriormente se llevó la viga a rotura. Durante el ensayo se desarrollaron fisuras de flexión-cortante. Al formarse la fisura en el ala que une el punto de aplicación de la carga con el extremo de la fisura crítica, se produjo la rotura por cortante.

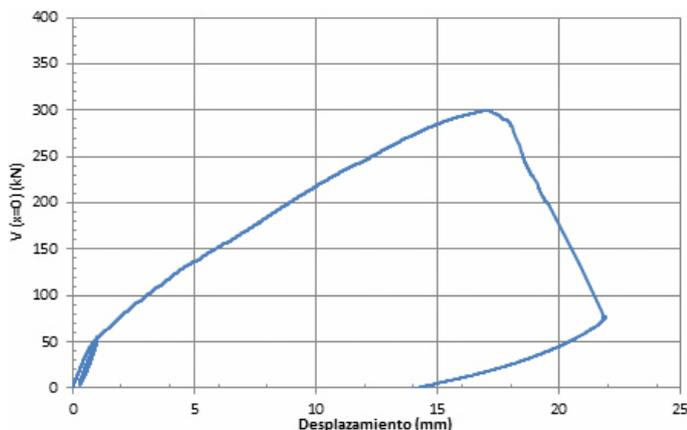


Figura 5. 1. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo M0Sa

Se observó como la inclinación media de la fisura crítica en el alma fue mayor (27,5°) que en el ala (9°).

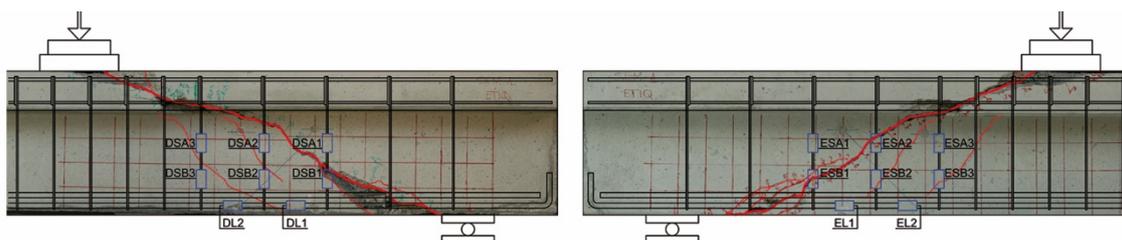


Figura 5. 2. Fisuras producidas en el ensayo M0Sa en el vano de cortante

Tabla 5. 4 Cortante de plastificación de las armaduras transversales

Galga	Plastificación	V (kN)
DSB1	Plastificación	177,5
ESB1	Plastificación	179,3
ESA2	Plastificación	188,2
DSA2	Plastificación	196,9
ESB3	Plastificación	226,1
DSA3	Plastificación	268,9
DSB2	Plastificación	270,3
DSB3	Plastificación	270,6

Ensayo M0Sb

En el segundo ensayo de la viga M0S, se observó un comportamiento similar al ensayo M0Sa. Después de completar el ciclo de carga-descarga, se llevó la viga hasta rotura ($V_u = 309,58$ kN), observándose un leve descenso de capacidad portante en torno a los 270 kN. La rotura de la viga se produjo cuando se formó la segunda rama de la fisura crítica que atraviesa el ala.

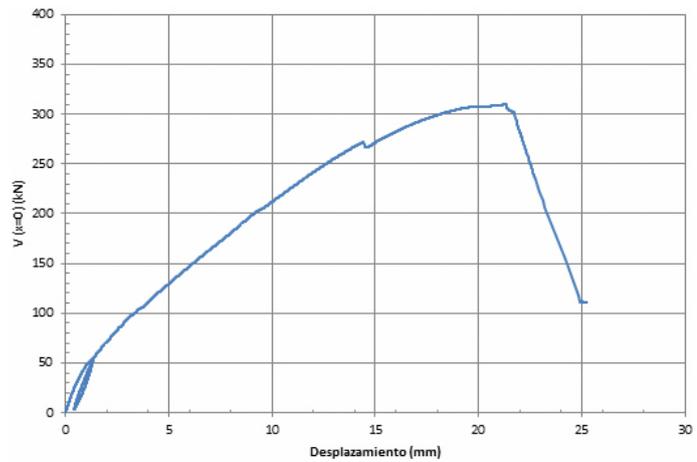


Figura 5. 3. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo M0Sb

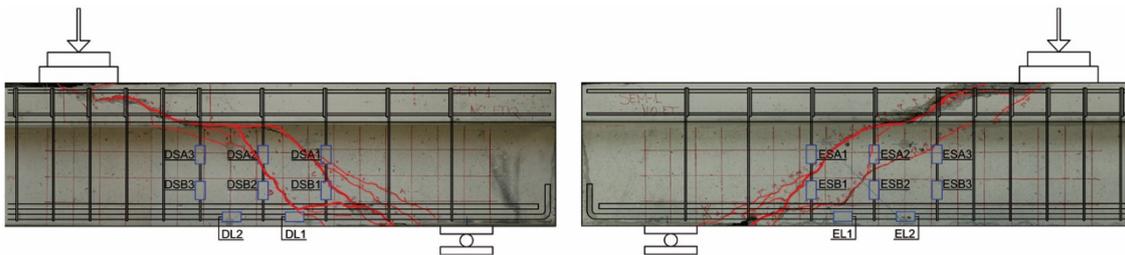


Figura 5. 4. Fisuras producidas en el ensayo M0Sb

Tabla 5. 5 Cortante de plastificación de las armaduras transversales

Galga	Plastificación	V (kN)
ESB1	Plastificación	172,1
DSA1	Plastificación	184,5
DSB1	Plastificación	224,4
DSB3	Plastificación	237,7
ESA1	Plastificación	269,4
DSA2	Plastificación	269,5
ESB3	Plastificación	270,6
DSB2	Plastificación	271,8
DSA3	Plastificación	280,5

Ensayo A0Sa

El ensayo A0Sa se corresponde con el primero de los ensayos de la viga de control con cuantía alta de armadura longitudinal. Al completar la primera rampa carga-descarga se llevó la viga a rotura ($V_u=326,6$ kN). La fisura crítica de cortante presentó una inclinación media con la horizontal de 29° . La rotura se produjo cuando se formó la fisura en el ala con una inclinación inferior a la del alma.

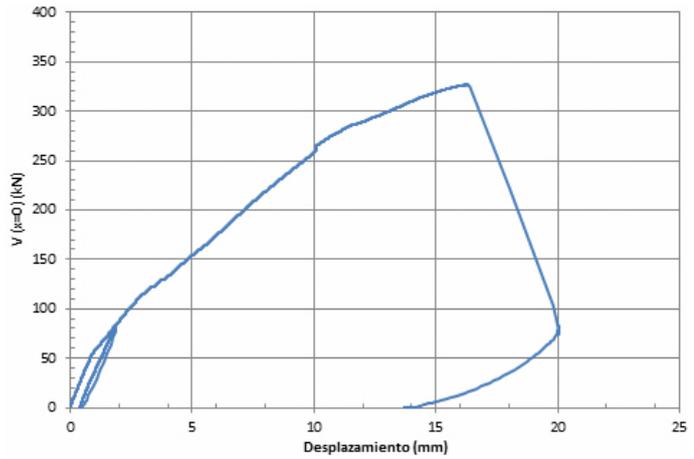


Figura 5. 5. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo A0Sa

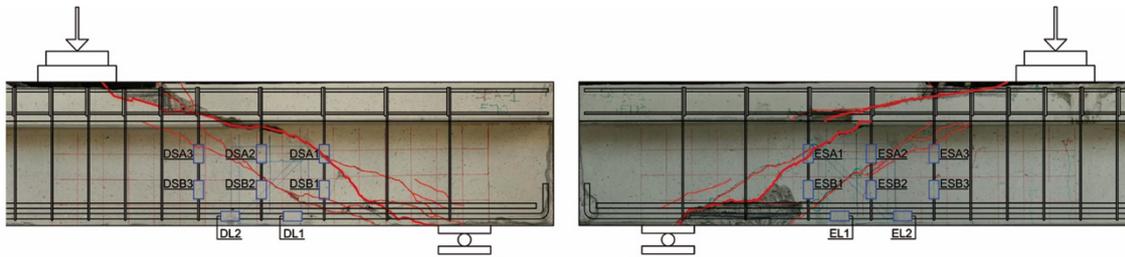


Figura 5. 6. Fisuras producidas en el ensayo A0Sa

Tabla 5. 6 Cortante de plastificación de la armadura transversal

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA1	Plastificación	162,1
ESA1	Plastificación	182,8
ESA2	Plastificación	188,5
DSA2	Plastificación	205,4
ESB2	Plastificación	223,1
ESB1	Plastificación	235,4
DSB2	Plastificación	240,4
DSB1	Plastificación	242,5
DSA3	Plastificación	269,8
ESA3	Plastificación	286,7

Ensayo A0Sb

El ensayo se inició el 23-09-2011, pero se interrumpió debido a que se produjo un desplazamiento horizontal del ejemplar durante el ensayo que indicaba que la carga no se estaba aplicando verticalmente. Se retomó el ensayo el día 27-09-2011. Después de completar un ciclo de carga-descarga hasta 100 kN, se produjo un pequeño descenso de carga en torno a los 180 kN. La rotura por cortante se produjo cuando el esfuerzo actuante era de 319,7 kN al prolongarse la fisura crítica a través del ala, como en los casos anteriores.

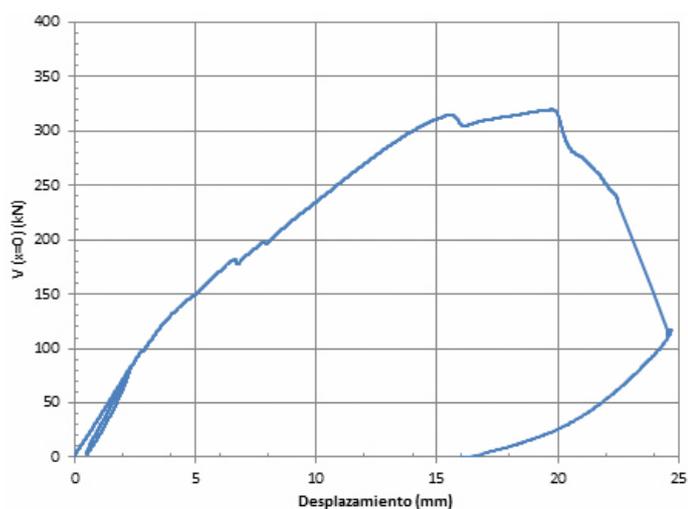


Figura 5. 7. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para el ensayo A0Sb

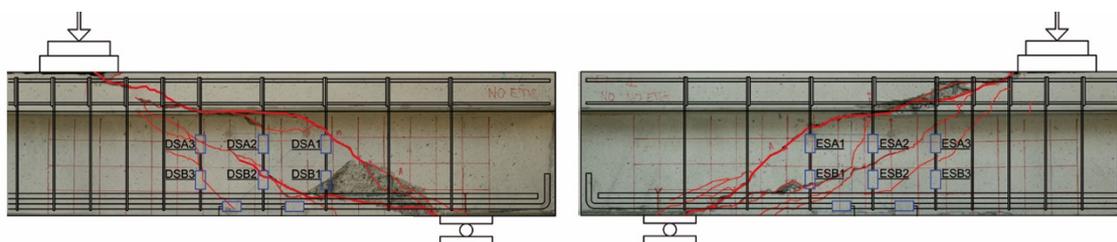


Figura 5. 8. Fisuras producidas en el ensayo A0Sb

Tabla 5. 7 Cortante de plastificación de la armadura transversal

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA1	Plastificación	209,1
ESA1	Plastificación	215
ESB2	Plastificación	234
ESA3	Plastificación	237,4
DSB3	Plastificación	243,4
DSB1	Plastificación	243,8
ESA2	Plastificación	243,9
DSA2	Plastificación	248,3
ESB1	Plastificación	271,8
ESB3	Plastificación	306,1

5.1.2. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP baja (tipo 1) y sin anclaje

Ensayo M1Sa

Después del primer ciclo de carga y a partir de unos 300 kN se observó la plastificación de la armadura longitudinal (ver Figura 5.9).

El desprendimiento de los laminados se inició primero en aquellos en los que la longitud de anclaje medida desde la fisura de cortante hasta el extremo del laminado era menor y luego se propagó hacia aquellos con mayor longitud de anclaje por encima de la fisura. Pese a que se había producido el desprendimiento de los laminados, la rotura del ejemplar no se produjo hasta la propagación de la fisura crítica de cortante del alma en las alas, para $V_u=349,4$ kN.

En la Tabla 5. 8 no se indican desprendimientos de refuerzos FRP porque estos no se pudieron identificar a partir de las galgas.

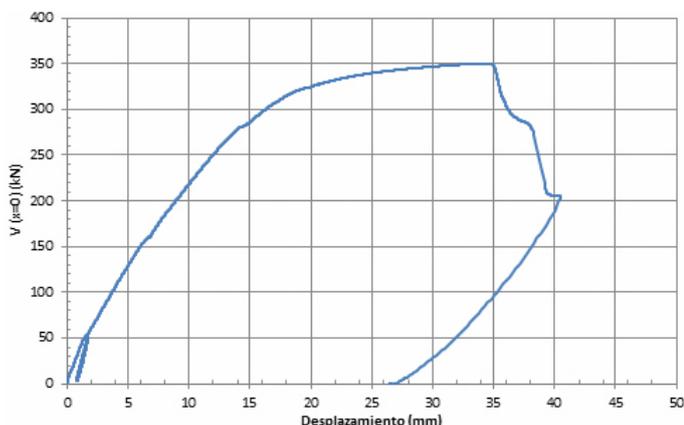


Figura 5. 9. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1Sa

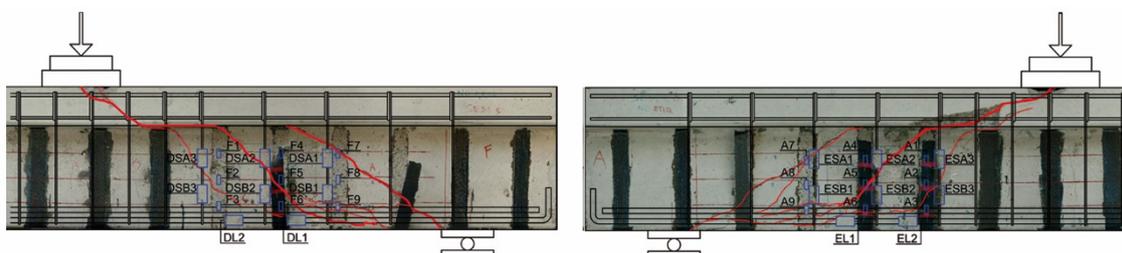


Figura 5. 10. Fisuras producidas en el ensayo M1Sa

Tabla 5. 8 Cortante de plastificación de la armadura transversal

Galga	Plastificación	V (KN)
DSB2	Plastificación	215,7
DSB3	Plastificación	258,4

Ensayo M1Sb

En la rampa de carga se observan dos pequeños saltos cuando el cortante en el apoyo está alrededor de los 180 y de los 270 kN, debidos al desprendimiento de los refuerzos de FRP 456 (en los que están localizadas en las galgas A6, A5, A4, F6 y F4). Pese a que se hayan desprendido los laminados que atraviesan la fisura crítica, la viga sigue resistiendo carga hasta que se forma la segunda rama de la fisura de cortante, es decir, cuando la fisura atraviesa el ala, y rompe para un cortante de 324,7 kN.

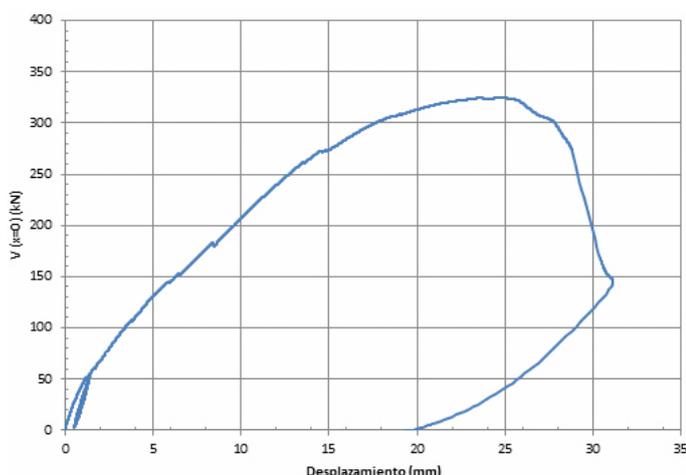


Figura 5. 11. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1Sb

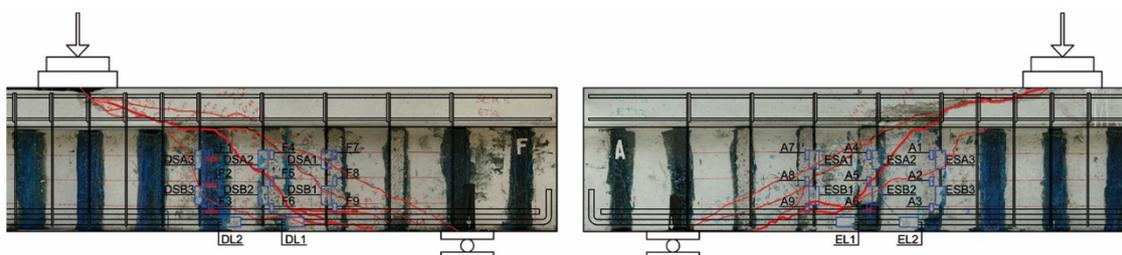


Figura 5. 12. Fisuras producidas en el ensayo M1Sb

Tabla 5. 9 Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP

Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)	Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)
DSB1	Plastificación	176,1	DSA3	Plastificación	271,5
DSA2	Plastificación	216,5	ESA1	Plastificación	271,6
ESA2	Plastificación	226,8	A6	Desprendimiento FRP	272,4
ESB1	Plastificación	238,7	A5	Desprendimiento FRP	272,4
DSA1	Plastificación	256,6	A4	Desprendimiento FRP	272,4
DSB3	Plastificación	256,9	ESB3	Plastificación	281,1
F6	Desprendimiento FRP	261,4	ESB2	Plastificación	305,9
F4	Desprendimiento FRP	261,4	ESB2	Plastificación	305,9
ESA3	Plastificación	261,6	DSB2	Plastificación	311,3

Ensayo A1Sa

Durante el ensayo, para un cortante de 239 kN se produjo el desprendimiento del refuerzo FRP del laminado 789 del lado F y a 254 kN el del lado A. A continuación, a 276 kN se desprendió parcialmente el laminado 456 del lado A, y a 291 kN se produjo el desprendimiento total del lado F. Finalmente a 294 kN se desprendió el laminado de FRP más cercano al apoyo en el lado F y a 310 kN el laminado del lado A. Después de fisurarse las alas, el laminado 456 del lado A se desprendió totalmente y en este instante, la viga falló a cortante (333,7 kN).

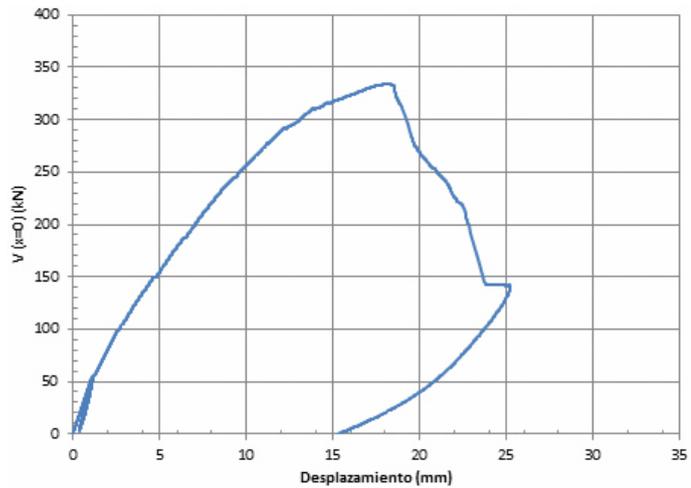


Figura 5. 13. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A1Sa

En la Tabla 5. 10 se indican solo desprendimientos de refuerzos FRP registrados por las galgas.

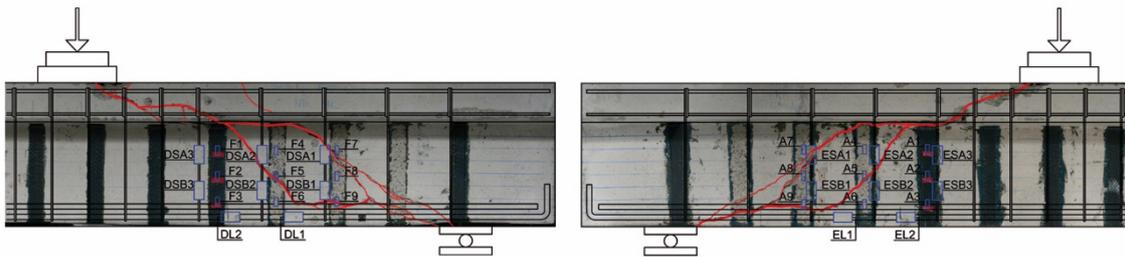


Figura 5. 14. Fisuras producidas en el ensayo A1Sa

Tabla 5. 10 Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP

Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)
DSA1	Plastificación	219,4
DSB2	Plastificación	230,7
F9	Desprendimiento FRP	238,3
F7	Desprendimiento FRP	238,3
DSA2	Plastificación	272,8
DSB1	Plastificación	277,8
F6	Desprendimiento FRP	291,2
F4	Desprendimiento FRP	291,2

Ensayo A1Sb

Durante el ensayo de la viga A1Sb, se produjo el desprendimiento de los refuerzos de FRP a 286 kN para los laminados 456 de ambos lados, a 288 KN para el laminado 789 del lado F, a 292 kN para el laminado más cercano al apoyo en el lado F y finalmente, para 302 KN en el laminado 789 del lado A. Este último desprendimiento produjo un ligero descenso de la capacidad portante de la viga, pero a posteriori se llegó a un cortante último de 335 KN. La rotura se produjo al propagarse la fisura crítica en el ala.

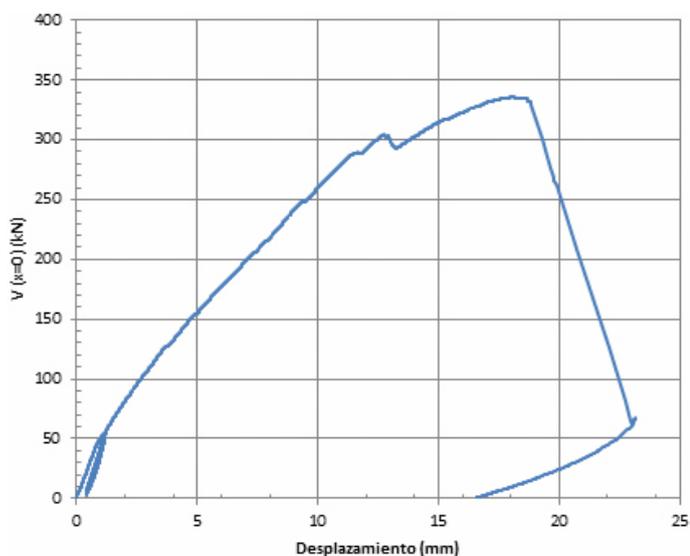


Figura 5. 15. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A1Sb

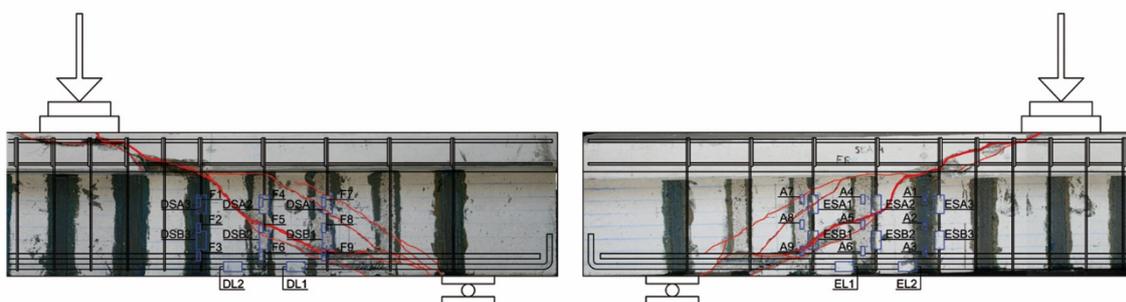


Figura 5. 16. Fisuras producidas en el ensayo A1Sb

Tabla 5. 11 Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP

Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)	Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)
ESA1	Plastificación	212,8	A4	Desprendimiento FRP	286,8
DSA1	Plastificación	213,2	F4	Desprendimiento FRP	286,8
DSB1	Plastificación	248,1	F6	Desprendimiento FRP	286,8
ESA2	Plastificación	249,2	F8	Desprendimiento FRP	289
ESB1	Plastificación	249,4	F7	Desprendimiento FRP	289
DSA2	Plastificación	249,5	A8	Desprendimiento FRP	302,8
DSB2	Plastificación	263,1			

5.1.3. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 2) y sin anclaje

Ensayo M2Sa

Las fisuras de flexión aparecieron para una carga de 184 kN. A los 190 kN apareció la primera fisura de cortante. El desprendimiento de los refuerzos de FRP se produjo para 222 kN en los laminados 456 y 789 del lado A, a 255 kN para los laminados 456 y 789 del lado F, a 279 kN para el laminado más cercano al apoyo del lado F y finalmente a 281 kN su homólogo para el lado A. Posteriormente, la viga se cargó hasta rotura para un cortante de 284 kN una vez la fisura crítica de cortante se había prolongado hacia las alas.

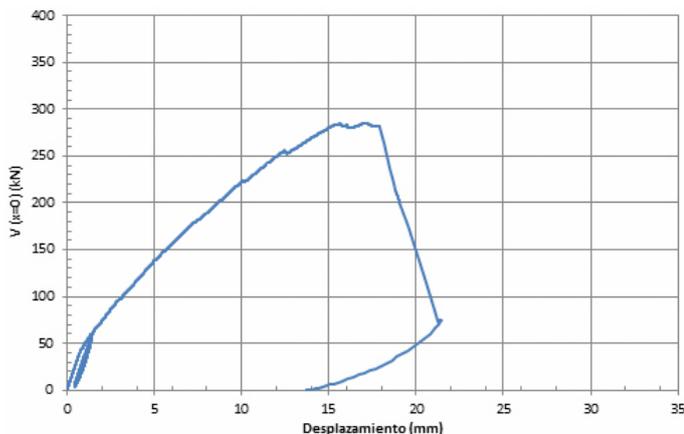
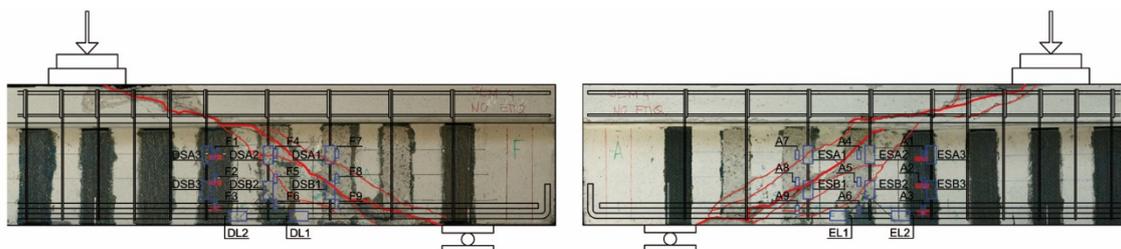


Figura 5.17. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2Sa



Ensayo M2Sb

Durante el ensayo, se produjo el desprendimiento del refuerzo 456 (ambos lados) para un cortante actuante de 163 kN. Bajo un cortante de 248 kN se desprendió el laminado 789 por ambos lados y bajo un cortante de 258 kN el laminado más cercano al apoyo del lado A. Cuando se produjo el desprendimiento de los laminados 789 de ambos lados, se observó la aparición de fisuras en el ala. La viga falló para un cortante de 259 kN después de producirse la fisura en el ala y que ésta se uniese a la fisura crítica que atraviesa el alma.

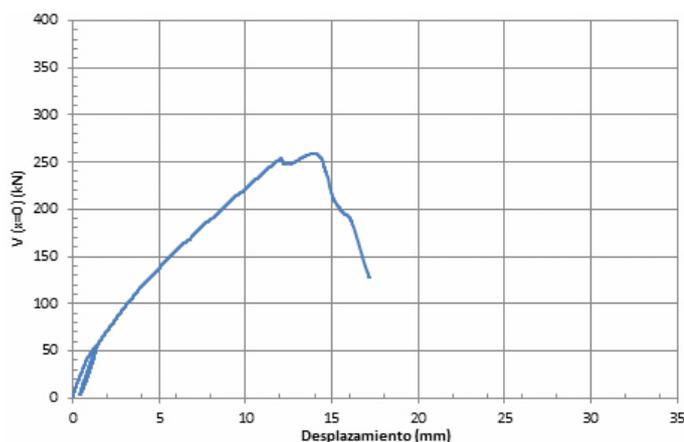


Figura 5. 19. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2Sb

Para este ensayo se observó una carga última menor que la de su ensayo de control (M0Sa 299,9 kN, M0Sb 309,58 kN), siendo la resistencia a compresión del hormigón muy similar en ambos casos.

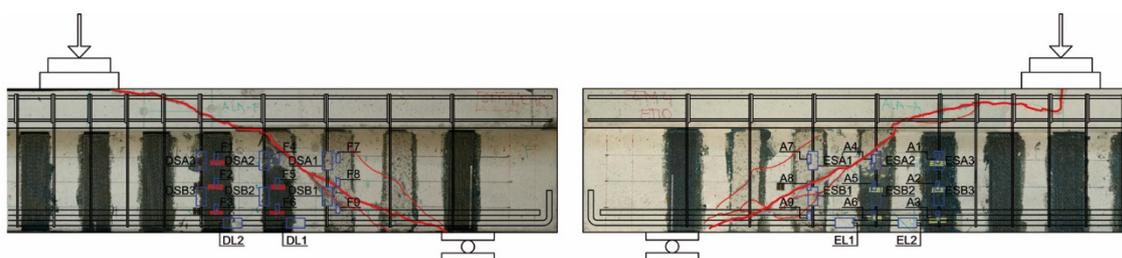


Figura 5. 20. Fisuras producidas en el ensayo M2Sb

Tabla 5. 13 Cortante de plastificación de la armadura transversal y del desprendimiento del FRP

Galga	Plastificación, desp. FRP	V (KN)	Galga	Plastificación, desp. FRP	V (KN)
F4	Desprendimiento FRP	151,4	F8	Desprendimiento FRP	240
A4	Desprendimiento FRP	154	ESA3	Plastificación	244,4
DSB1	Plastificación	211,6	DSA2	Plastificación	249,3
ESB1	Plastificación	227,7	ESA2	Plastificación	250,5
DSA3	Plastificación	229,6	A8	Desprendimiento FRP	250,9
ESA1	Plastificación	237,7	A7	Desprendimiento FRP	250,9

Ensayo A2Sa

En el ensayo de la viga A2Sa se produjo un problema de inestabilidad del sistema. Se empezó el ensayo el 22 de diciembre de 2011 y después de intentos reiterados, el 23 de Enero de 2012 se llevó a rotura, una vez empleado un sistema de seguridad frente al giro a torsión, y con un control más exhaustivo de la verticalidad del pistón. El 22 de diciembre al llegar a un cortante de 275 kN los laminados 456 y 789 se desprendieron y a los 300 kN se produjo un giro torsional de la viga sobre su eje longitudinal que produjo la interrupción del ensayo.

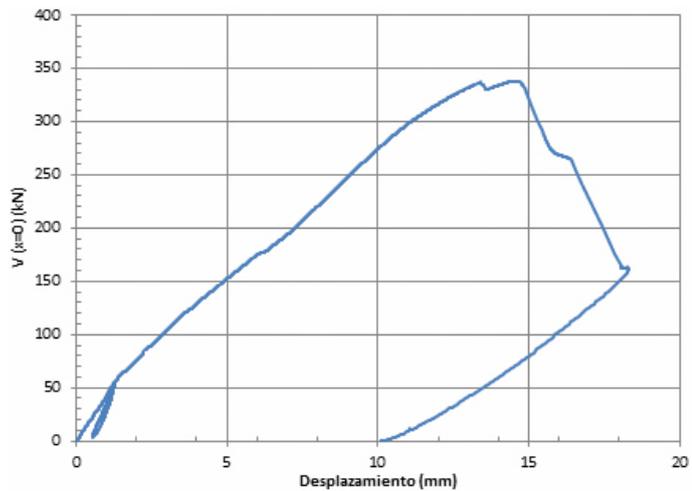


Figura 5. 21. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2Sa

Finalmente el 23 de enero, se retomó el ensayo y se alcanzó un cortante máximo de 338 kN. El fallo fue similar a los casos anteriores.

En la Tabla 5. 14 no se indican desprendimientos de refuerzos FRP porque estos no se observan en el registro de las galgas, aunque se verifica visualmente que éstos existieron.

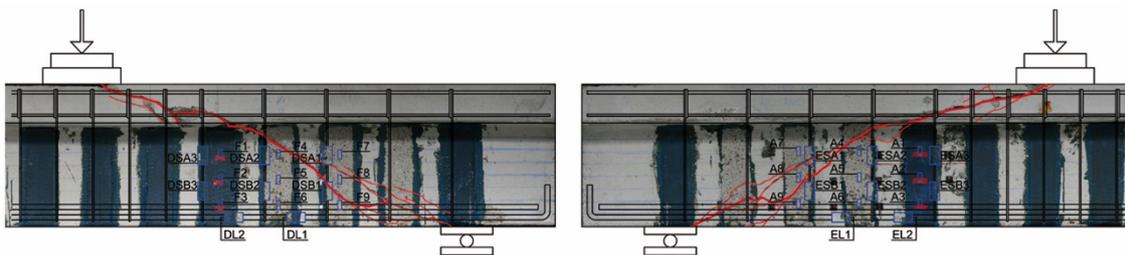


Figura 5. 22. Fisuras producidas en el ensayo A2Sa

Tabla 5. 14 Cortante de plastificación de la armadura de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA2	Plastificación	299,3

Ensayo A2Sb

En el ensayo A2Sb, aparecieron las primeras fisuras de cortante para 215 kN. El desprendimiento de los refuerzos de FRP se inició cuando el cortante en el apoyo era de 289 kN para los laminados 789. Éste se produjo a ambos lados del FRP y se reflejó por un descenso de carga en la curva cortante-desplazamiento. Para un cortante de 294 kN se desprendió el laminado 123 del lado F, y a 308 kN el laminado más cercano al apoyo del lado F. Finalmente a 325 kN el del lado A.

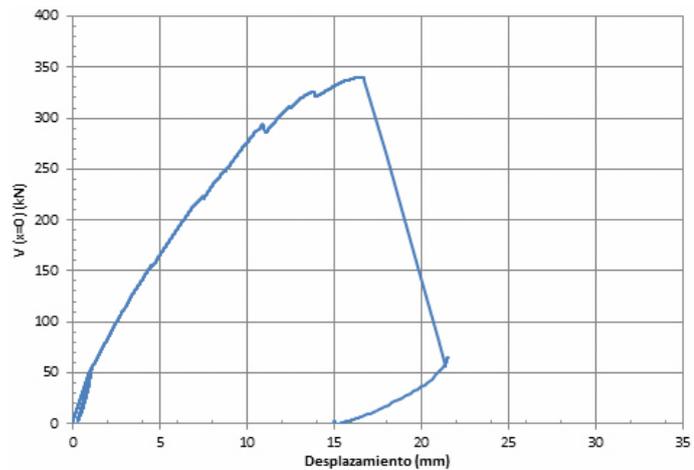


Figura 5. 23. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2Sb

La viga falló de forma brusca y frágil bajo un cortante de 340 kN una vez se formó la segunda rama de la fisura crítica a cortante que atraviesa las alas.

En la Tabla 5. 15 se indican sólo los desprendimientos de FRP detectados por las galgas.

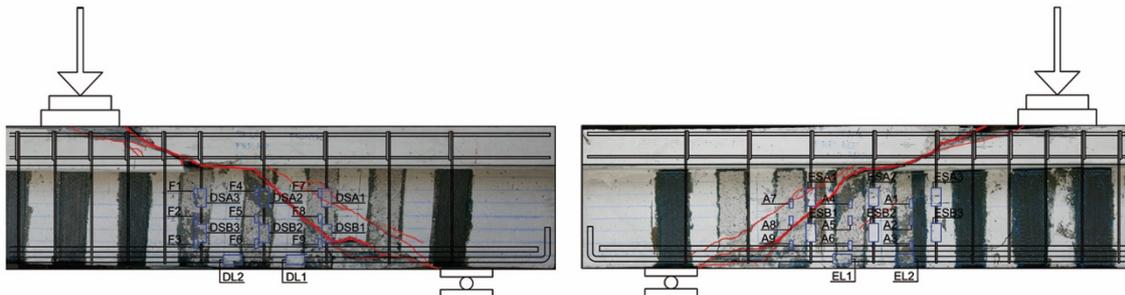


Figura 5. 24. Fisuras producidas en el ensayo A2Sb

Tabla 5. 15 Cortante de plastificación de la armadura transversal y desprendimiento FRP

Galga	Plastificación, desp. FRP	V (kN)
ESA1	Plastificación	240,8
ESB1	Plastificación	274,7
A7	Desprendimiento FRP	289
ESA3	Plastificación	292
ESB2	Plastificación	292,1
ESA2	Plastificación	301,3

5.1.4. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP baja (tipo 1) y anclaje del FRP

Ensayo M1B

Durante el ensayo, se observó como la armadura longitudinal plasticó bajo un cortante cercano a los 300 kN. Los refuerzos de FRP no se desprendieron bruscamente debido a su sujeción por el anclaje, aunque se apreció que no están totalmente adheridos al hormigón al finalizar el ensayo, puesto que se inició su desprendimiento de forma local, pero no pudo progresar por la presencia de los anclajes.

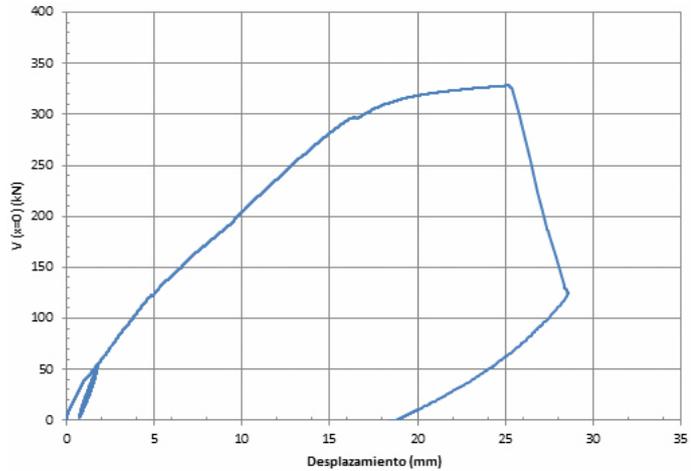


Figura 5.25. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1B



Figura 5.26. Fisuras producidas en el ensayo M1B

Tabla 5. 16 Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA1	Plastificación	219,5
DSB1	Plastificación	233,2
DSA2	Plastificación	245,1
DSB2	Plastificación	250,3
DSA3	Plastificación	280,6

Ensayo M1A

El ensayo no se desarrolló según lo previsto debido a que durante la aplicación de la carga se produjo una torsión del ejemplar, debido a que que la aplicación de la carga no fue perfectamente vertical. Por ello, el ensayo se inició el 15 de marzo de 2012 (indicado con una línea roja en la Figura 5. 27), apreciándose fisuras de cortante a partir de 165 kN. Cuando el desplazamiento en el centro de la luz alcanzó 20 mm se optó por interrumpir el ensayo por motivos de seguridad.

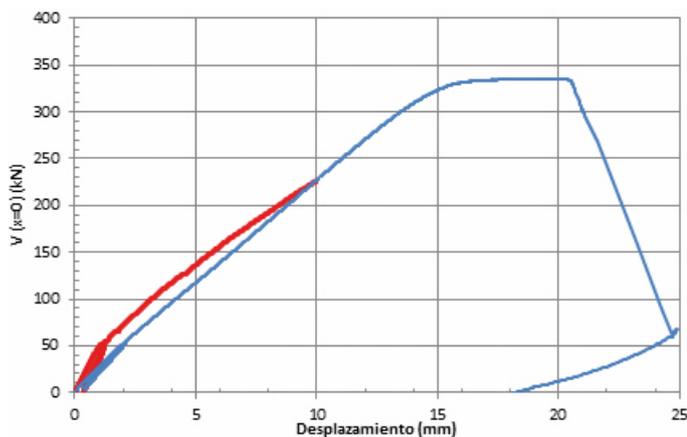


Figura 5. 27. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M1A

Para evitar el giro a torsión y para mejorar la seguridad se diseñaron unos estabilizadores para los caballetes de apoyo formados por unos perfiles metálicos en forma de “L”. Se retomaron los ensayos el 26 de abril (indicado con una línea azul en la Figura 5. 27) que discurrieron sin producirse torsión.

En el segundo ensayo hasta rotura, se apreció visualmente el desprendimiento local en su zona central del refuerzo de FRP 789 del lado F para 289 kN. Los laminados en ningún caso se desprendieron completamente puesto que estaban bien anclados al laminado multidireccional que quedó seriamente dañado y descendió.

En la Tabla 5. 17 no se indican desprendimientos de refuerzos FRP puesto que no se han podido apreciar en el registro de las galgas.



Figura 5. 28. Fisuras producidas en el ensayo M1A

Tabla 5. 17 Cortante de plastificación de la armadura transversal y desprendimiento FRP

Galga	Plastificación, desprendimiento FRP	V (KN)
NO PLASTIFICAN LAS ARMADURAS TRANSVERSALES. NO SE APRECIA EL DESPRENDIMIENTO DEL FRP EN LA MEDICIÓN DE LAS GALGAS		

5.1.5. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 2) y anclaje del FRP

Ensayo M2B

Durante el ensayo, una vez formada la fisura crítica de cortante, se inició el desprendimiento parcial de los laminados de FRP para un cortante actuante de 250 kN al mismo tiempo que se produjo un leve salto en la carga aplicada (ver Figura 5.29). Los laminados sólo se desprendieron parcialmente porque estaban bien anclados.

En la Tabla 5. 18 no se indican desprendimientos de refuerzos FRP porque se observaron en el registro de las galgas.

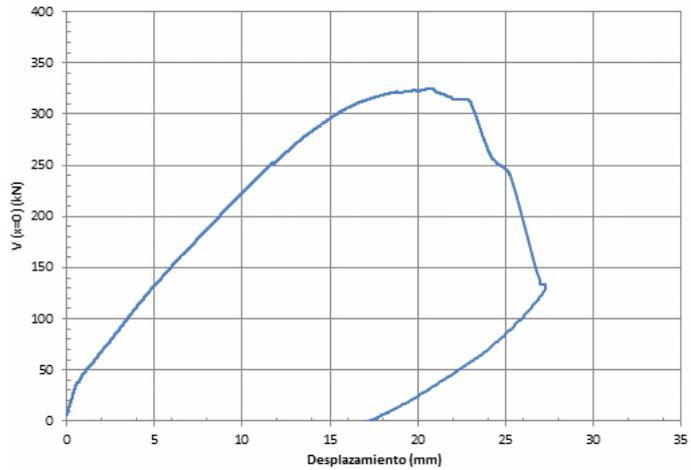


Figura 5.29. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2B

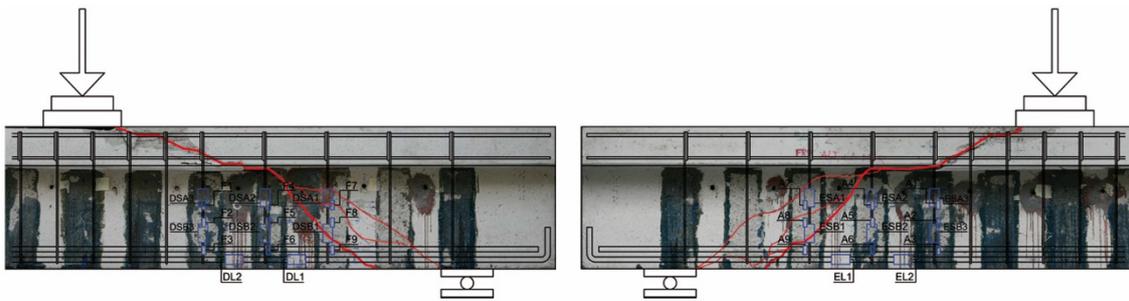


Figura 5.30. Fisuras producidas en el ensayo M2B

Tabla 5. 18 Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSB2	Plastificación	260,2
DSA1	Plastificación	260,3
DSB1	Plastificación	293,4

Ensayo M2A

Durante el ensayo, se desprendieron los refuerzos de FRP de la zona no anclada bajo un cortante de 259 kN. La viga falló a cortante a 348 kN. Bajo la carga última, los laminados de FRP anclados se desprendieron en su zona central y se desgarraron, pero siguieron anclados en la zona superior más cercana a las alas. El laminado multidireccional dispuesto horizontalmente en la zona de anclaje sufrió un claro deterioro, presentando desgarros por cizallamiento.

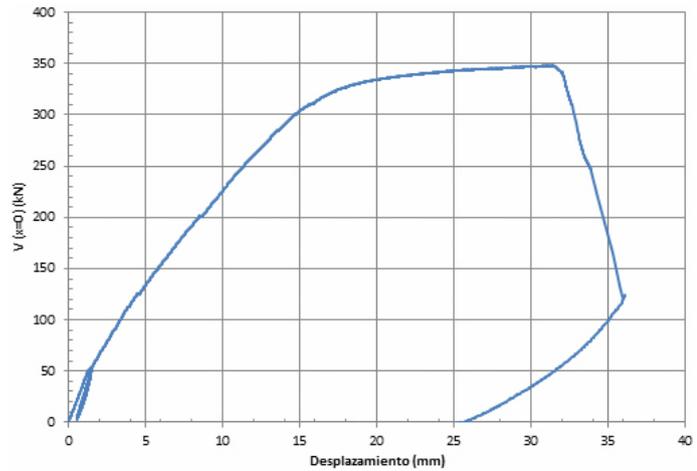


Figura 5. 31. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo M2A

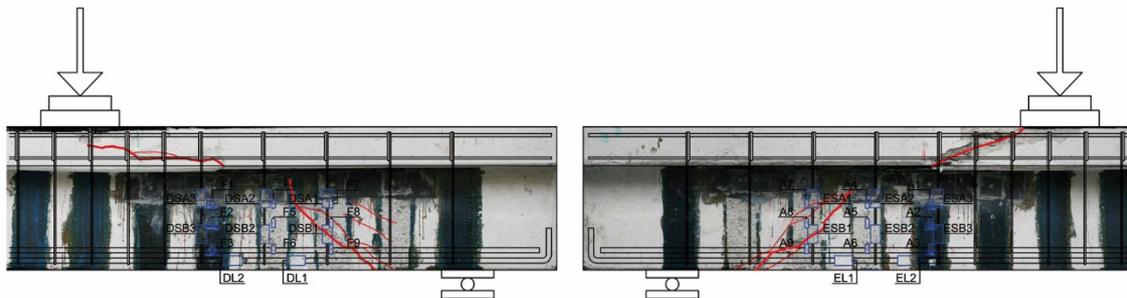


Figura 5. 32. Fisuras producidas en el ensayo M2A

Tabla 5. 19 Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSB1	Plastificación	223,9
ESB1	Plastificación	230,5
ESA1	Plastificación	242,7
DSA2	Plastificación	252,9
ESA2	Plastificación	263,7
DSA1	Plastificación	269,8
ESA3	Plastificación	339,5
DSA3	Plastificación	344,8

Ensayo A2B

La armadura longitudinal plastificó bajo un cortante de 370 kN, Durante el ensayo se desarrollaron fisuras de cortante muy verticales. Los refuerzos externos no se desprendieron debido al efecto del anclaje aunque se apreció que en estos refuerzos se produjo la rotura de fibras y desprendimientos locales. La viga alcanzó su cortante máximo de 401,64 kN y falló bruscamente cuando rompieron los cercos de las alas.

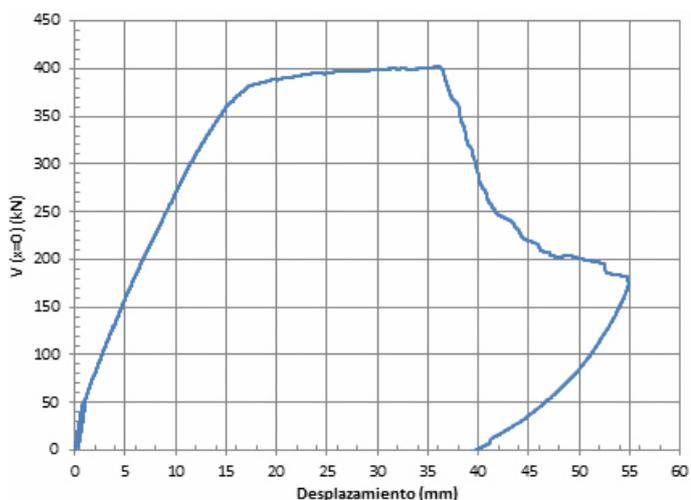


Figura 5.33. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2B



Figura 5. 34. Fisuras producidas en el ensayo A2B

Tabla 5. 20 Cortante de plastificación de la armadura de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA1	Plastificación	261,0
DSB2	Plastificación	295,1
DSA2	Plastificación	360,1

Ensayo A2A

El ensayo se desarrolló en dos etapas debido a un problema de verticalidad de aplicación de la carga que ocasionó el giro a torsión de la viga. El primer día de ensayo fue el 10 de Julio del 2012. Durante este ensayo, se produjo el desprendimiento del FRP 456 para un cortante de 370 KN. Poco después se interrumpió el ensayo por la torsión producida. Se retomó el ensayo al día siguiente. Cuando el cortante era de 385 KN plastificó la armadura pasiva. A partir de este punto la viga se siguió deformando sin absorber mucha más carga hasta que la formación de la fisura crítica en las alas que produjo el colapso brusco y frágil del ejemplar para un cortante de 403 KN

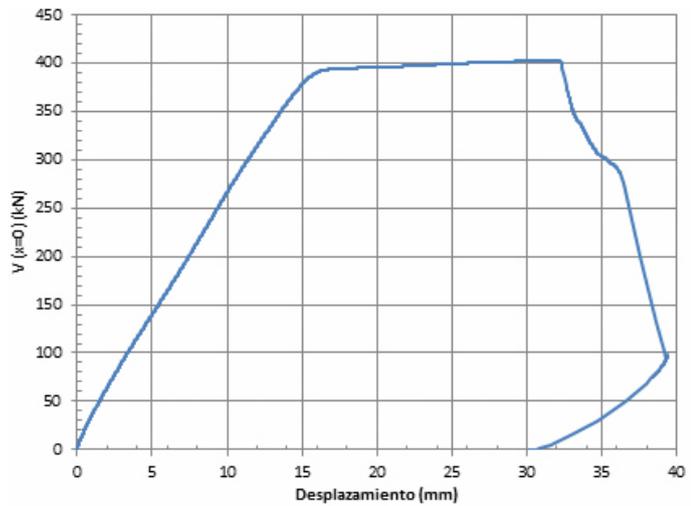


Figura 5. 35. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A2A

En la Tabla 5. 21 no se indican desprendimientos de refuerzos FRP porque estos no se aprecian en el registro de deformaciones del FRP por parte de las galgas.

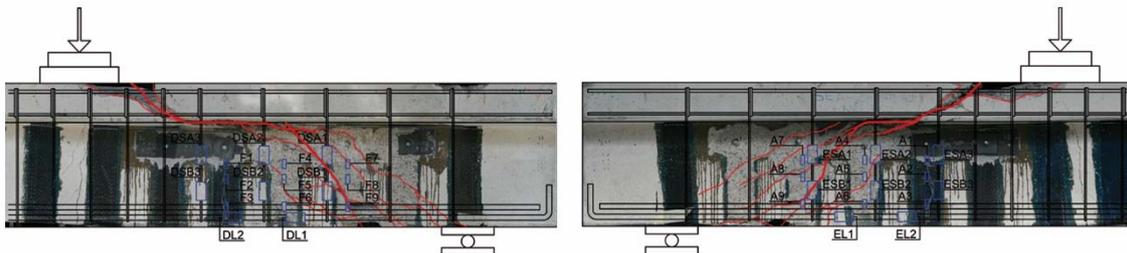


Figura 5. 36. Fisuras producidas en el ensayo A2A

Tabla 5. 21 Cortante de plastificación de la armadura de acero transversal

Galga	Plastificación	V (kN)
ESB2	Plastificación	334,0

5.1.6. Vigas con cuantía de refuerzo de FRP alta (tipo 3) y anclaje del FRP

Ensayo A3B

El ensayo se desarrolló sin incidencias aunque el ejemplar no rompió a cortante como estaba previsto sino a flexión. La rotura se produjo cuando el cortante en el apoyo alcanzó los 408 kN. Una vez retirado el FRP se observaron fisuras de flexión significativas, mientras que no se observó ninguna fisura crítica de cortante en el alma. Además se observaron durante el ensayo la aparición de pequeñas fisuras en las alas.

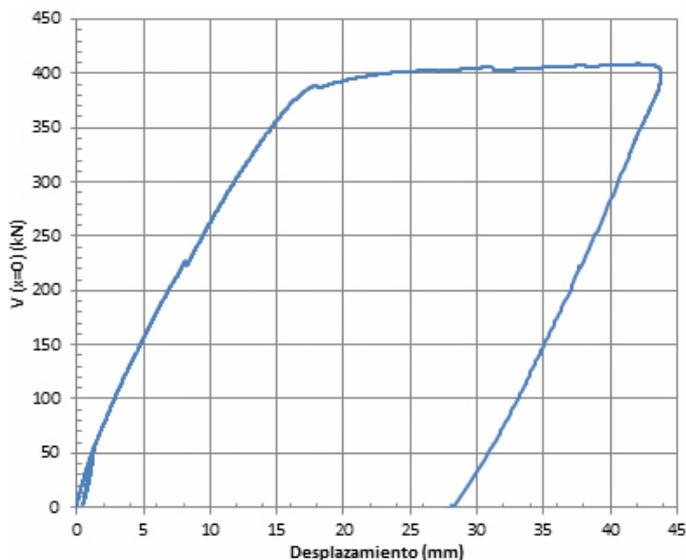


Figura 5. 37. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A3B



Figura 5. 38. Fisuras producidas en el ensayo A3B

Tabla 5. 22 Cortante de plastificación de la armadura transversal de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSA1	Plastificación	310,5
DSA2	Plastificación	405,1

Ensayo A3A

El refuerzo continuo de FRP evitó que se apreciaran fisuras o el posible desprendimiento de éste, puesto que en este caso el FRP estaba anclado. Cerca del instante de rotura, se observaron irregularidades en la superficie del refuerzo FRP asociadas a su desprendimiento local. Una vez finalizado el ensayo y al retirar el refuerzo de FRP, se apreciaron las fisuras de cortante que no han aflorado a la superficie al producirse el desprendimiento del FRP antes de la rotura de las fibras.

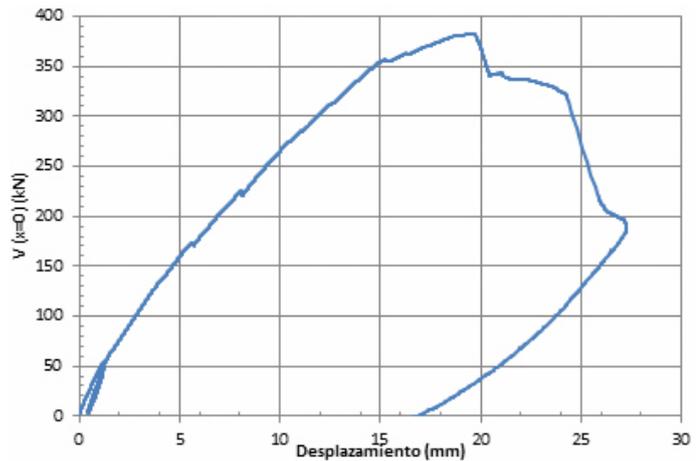


Figura 5. 39. Cortante-desplazamiento bajo el punto de aplicación de la carga del ensayo A3A

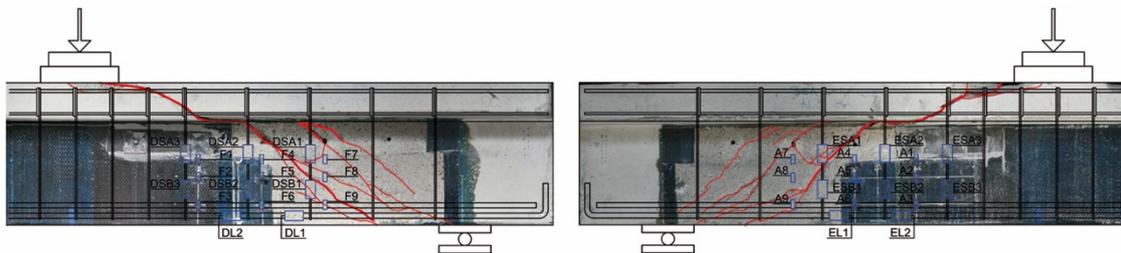


Figura 5. 40. Fisuras producidas en el ensayo A3A

Tabla 5. 23 Cortante de plastificación de la armadura de acero

Galga	Plastificación	V (kN)
DSB1	Plastificación	305,3
ESB1	Plastificación	312,1
DSA1	Plastificación	312,3
ESA2	Plastificación	347,0
DSA2	Plastificación	362,7
ESA1	Plastificación	368,3

5.2. Influencia de la cuantía de refuerzo externo, de armadura longitudinal, y del anclaje

En la Tabla 4.2 del Capítulo 4 se muestran los cortantes últimos totales que se predijeron de forma analítica para esta campaña experimental, siendo de 170 kN para la cuantía de armadura pasiva longitudinal media con cuantía de FRP 1 y de 270 kN para la cuantía de FRP 2. Para la cuantía de armadura longitudinal alta con cuantía de FRP 1 se estimaba que el cortante último se producía alrededor de los 180 kN, mientras que para la cuantía de FRP 2 éste se situaría alrededor de los 280 kN. En las Figura 5. 41 y Figura 5. 42 se aprecia que los resultados obtenidos en el laboratorio son muy superiores a los esperados. Las vigas de referencia sin refuerzo resistieron un cortante último de 299,9 kN y de 309,6 kN para el caso de menor cuantía de armadura longitudinal y de 326,6 kN y 319,7 kN para las vigas de cuantía alta. Por lo tanto, el cortante último fue bastante mayor de lo que inicialmente se preveía que resistieran las vigas reforzadas (considerando el fib Bulletin 14 (2001), el cortante último total previsto era de entre 230 y 270 kN). Este aumento de cortante último en relación a la predicción realizada con la Instrucción EHE-08, se produce por el aporte de resistencia de las alas, que no se contempla en la formulación actual, que considera que el cortante se resiste únicamente a través del alma.

En la Figura 5. 41 se muestra el cortante último en función de la cuantía transversal de FRP y del efecto del anclaje según se trate de vigas con cuantía longitudinal media o alta. Se aprecia que el refuerzo no es eficiente si no está anclado, puesto que el refuerzo de las vigas, que se realiza en el alma, sufre un desprendimiento prematuro dejando de ser efectivo antes de alcanzar su capacidad máxima. Por este motivo es importante evitar este desprendimiento prematuro del refuerzo que puede realizarse mediante dispositivos de anclaje del FRP. En la Figura 5. 41 se observa como en algunos casos con cuantía mayor de FRP sin anclaje, el cortante último fue menor que en la viga de control.

La existencia del refuerzo a cortante de FRP modifica los mecanismos resistentes. La presencia del FRP hace que éste contribuya a la resistencia a cortante, lo que se traduce en una menor participación de la armadura transversal interna. Es decir, la tensión de tracción se reparte entre los cercos transversales convencionales y el FRP externo, por lo que los cercos puede ser que no plastifiquen cuando haya refuerzo externo. Una vez se desprende el FRP de forma prematura, toda la carga resistida por éste se traslada a los estribos internos, los cuales si pueden seguir aumentando la tensión de tracción llegan a plastificar. En caso de que estén plastificados y no puedan incrementar su tensión de trabajo, se produciría el fallo a cortante de forma más o menos inmediata.

Por otro lado, al disponer de una mayor cuantía de armadura transversal (FRP+armadura transversal), el ángulo de inclinación de las bielas puede ser más vertical que el de la viga sin refuerzo, lo que hace que menos cercos transversales colaboren en la resistencia a cortante. Por lo tanto, el cortante resistido por la armadura transversal interna es menor, lo que implica un cortante último inferior que puede llegar a ser menor que el de la viga de control. Al desprenderse el laminado, siguen colaborando los mismos cercos que al inicio del ensayo cuando el FRP estaba adherido (pero en este caso colaboran menos cercos que en la viga de control), debido a que una vez formada la fisura crítica, el ángulo de inclinación de esta fisura con la horizontal ya no se modifica.

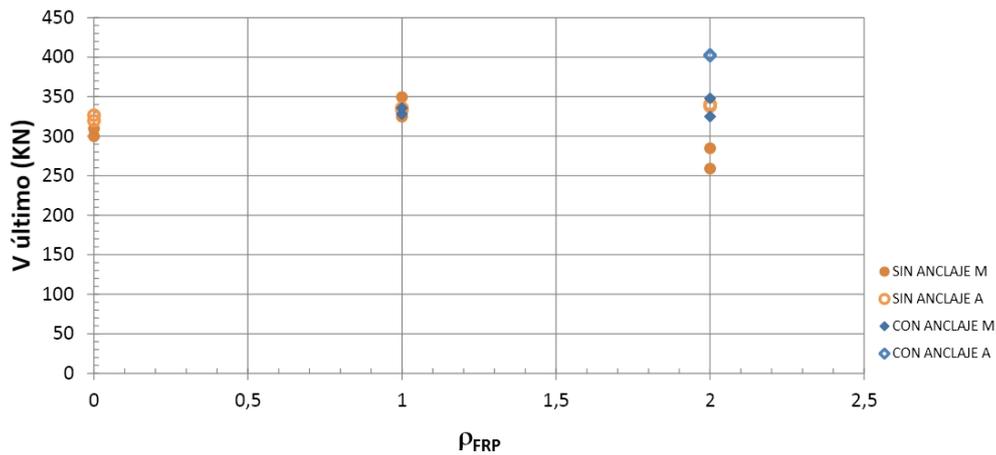


Figura 5. 41. Efecto de la cuantía transversal de FRP y del anclaje

En la Figura 5. 42 se muestra la influencia de la cuantía longitudinal de acero en la resistencia a cortante de los elementos reforzados. Se observa como a mayor cuantía de armadura longitudinal, el cortante último resistido es mayor. Además, la disposición de anclajes permite aumentar la capacidad resistente de las vigas reforzadas. El aumento de la armadura longitudinal puede aumentar el cortante último debido a cuatro motivos:

- 1) El primero es la reducción del ángulo de las bielas de compresión, que hace que la fisura intersecte más cercos e interviene más armadura transversal de acero a la resistencia a cortante. Se puede explicar también mediante la analogía de una celosía en la que el tirante inferior resiste más que el vertical y por equilibrio el ángulo de la biela debe ser más horizontal.
- 2) El segundo motivo es que disponiendo de una mayor armadura longitudinal, para la misma carga, la fisura del alma está más cerrada y, en consecuencia, existe más *aggregate interlock*.
- 3) El tercer motivo es que a mayor cuantía de armadura longitudinal, la profundidad de la fibra neutra (x) es mayor y el esfuerzo cortante que resiste la cabeza comprimida (donde el hormigón no ha fisurado aún), es también mayor debido a que se integran las tensiones tangenciales en un área mayor.
- 4) Finalmente el cuarto motivo es la capacidad de la armadura longitudinal para transmitir esfuerzos de corte perpendiculares a su eje también conocido como efecto pasador ("dowel action").

En los primeros estadios de aplicación de la carga, el efecto más dominante es el del *aggregate interlock* pero a medida que las fisuras se van abriendo cobra más importancia la resistencia de la cabeza de compresión. En cuanto a la contribución de la armadura transversal a la resistencia a cortante cobra importancia la reducción del ángulo de las bielas de compresión que conllevan un aumento de la armadura transversal de acero que interviene a la resistencia de cortante.

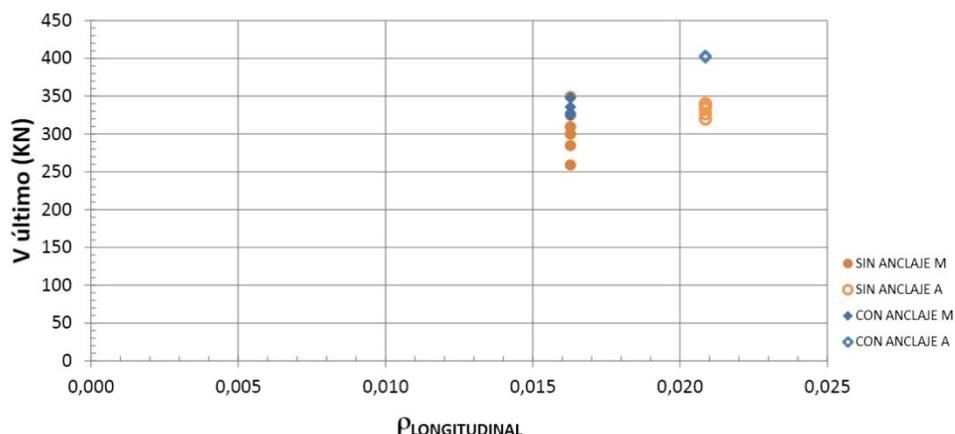


Figura 5. 42. Efecto de la cuantía longitudinal de acero y del anclaje

5.3. Ángulo de la fisura crítica de cortante

El ángulo que forma la fisura crítica de cortante con la directriz de la pieza puede ayudar a explicar las contribuciones a cortante del hormigón, acero y FRP (V_c , V_s y V_{FRP} , respectivamente) en vigas reforzadas externamente con FRP.

A continuación, se analiza la variación de la resistencia última de cortante de las vigas ensayadas según su cuantía de refuerzo de FRP que a su vez modifica los ángulos de la fisura crítica o de sus bielas de compresión.

Tabla 5. 24 Resistencia media del hormigón a compresión, ángulos de las fisuras críticas en el alma, ala y promedio de los dos ángulos anteriores y cortante último de las vigas de la serie de cuantía de armadura longitudinal media

	f_{cm} (MPa)	θ_{alma} (°)	θ_{ala} (°)	$\theta_{promedio}$ (°)	V_{ultimo} (kN)
M0S	40,2	32,5	9,8	21,0	304,8
M1S	42,8	35,8	15,5	25,5	337,1
M2S	39,8	28,5	9,0	19,0	272,0
M1anclaje	38,8	43,3	8,3	25,5	332,0
M2anclaje	38,8	41,3	7,8	24,5	336,5

Tabla 5. 25 Resistencia media del hormigón a compresión, ángulos de las fisuras críticas en el alma, ala y promedio de los dos ángulos anteriores y cortante último de las vigas de la serie de cuantía de armadura longitudinal alta

	f_{cm} (MPa)	θ_{alma} (°)	θ_{ala} (°)	$\theta_{promedio}$ (°)	Vúltimo (kN)
A0S	42,6	28,5	8,3	18,5	323,2
A1S	47,1	29,5	8,3	19,0	334,8
A2S	47,1	28,0	11,0	19,5	339,3
A2anclaje	47,2	37,3	10,0	24,0	402,3
A3anclaje	47,2	--	--	--	395,4

En la Tabla 5. 24 y en la Tabla 5. 25 se muestra la resistencia media del hormigón a compresión, los ángulos de las fisuras críticas en el alma y en el ala promediando los valores en ambas caras de las vigas. También se muestra $\theta_{promedio}$, que es el ángulo promedio del alma y del ala que se ve en las Figuras A2.1 hasta la Figura A2.20 del Anejo 2 y finalmente el valor medio del cortante último de las vigas agrupadas según el mismo criterio de ensayo.

En la Tabla 5. 24 se aprecia que el ángulo promedio de las vigas con cuantía de armadura longitudinal media y cuantía baja de FRP, vigas M1, con y sin anclaje (M1S y M1anclaje respectivamente) y el ángulo de la viga M2anclaje (refuerzo alto de FRP y anclaje) son de 24-25° y sus resistencias de cortante últimas son parecidas siendo de 337'1, 332'0 y 336'5 KN respectivamente. La resistencia a compresión del hormigón el día del ensayo es similar para todas estas vigas oscilando entre 42,8 MPa para la viga M1S, 38,8 MPa para la misma viga con anclaje (M1anclaje) y también 38,8 MPa para la viga M2 con anclaje. Se observa que por lo general, cuando la fisura crítica es más vertical, la resistencia última a cortante es mayor.

Se aprecia que al reforzar la viga con cuantía de FRP baja, M1S, se aumenta la resistencia última de cortante un promedio de un 10,6 % respecto a su viga de control M0S al mismo tiempo que el ángulo de sus bielas de compresión aumenta un 21,4 %. No sucede lo mismo cuando se refuerza con cuantía alta de FRP, viga M2S, donde la resistencia de la viga reforzada es un 10,8% inferior a la resistencia de la viga de control, M0S. Al reducirse la resistencia de cortante última también se ha obtenido un ángulo de fisura crítica inferior al de la viga de control, disminuyendo a 19° respecto a los 21° de la viga de control. Si para cada una de las vigas reforzadas, estimamos el cortante último ficticio de la viga de control a partir del cortante último real modificando la componente V_c por la resistencia de compresión del hormigón real, los porcentajes se modifican. El incremento de resistencia obtenido para la viga M1S es de 7,3 % y el decremento observado en la viga M2S es de -16,1 %.

En la Tabla 5. 25, con cuantía de armadura longitudinal alta, se aprecia que en la viga A0S o viga de control, en la viga A1S con cuantía baja de refuerzo FRP y en la viga A2S, con cuantía alta de refuerzo FRP, los ángulos promedio de las fisuras críticas son parecidos, siendo de 18'5°, 19° y 19'5° respectivamente. Al mismo tiempo, sus resistencias de cortante últimas son parecidas siendo de 323, 335 y 339 kN respectivamente. Para estos casos, la resistencia a compresión del hormigón oscila entre 42,6 MPa para la viga de control, y 47,1 MPa para las vigas A1S y A2S.

Para la cuantía de armadura longitudinal alta, al reforzar la viga con cuantía de FRP baja, A1S, se aumenta la resistencia última de cortante un 3,6 % respecto a su viga de control A0S al mismo tiempo que el ángulo de sus bielas de compresión aumenta un 2,7 %. Para la cuantía de armado longitudinal alta, a diferencia del caso de cuantía longitudinal media, al reforzar con cuantía de FRP alta, A2S, se aumenta también la resistencia de cortante un 4,98 % respecto A0S y el ángulo de las bielas de compresión un 5,4%. Si consideramos la influencia de la resistencia a compresión el día del ensayo, y calculamos un cortante ficticio de control para las vigas en función de su resistencia a compresión, el incremento de cortante último para las vigas A1S es de 4,2% y para las vigas A2S es de 19,8%.

Al no disponer de un teórico ensayo A3S que dispondría de armadura longitudinal alta y refuerzo de FRP muy alto no es posible saber si, al igual que para la cuantía de armadura longitudinal media, con este ensayo, la resistencia última a cortante y el ángulo de fisura crítica también se reduce respecto a la viga de control A0S, trasladándose la cuantía óptima de FRP a una cuantía superior que para las vigas de la serie M.

La disposición del anclaje en las vigas M1anclaje y M2anclaje imposibilita el desprendimiento del refuerzo FRP y tanto para la cuantía de FRP alta como baja, el ángulo de la fisura crítica es mayor al de la viga de control M0S, al igual que sus resistencias de cortante últimas. Se demuestra así que la presencia del refuerzo de FRP cuando no existe desprendimiento de este se traduce en un aumento del ángulo de las bielas de compresión. En este caso, la analogía de la celosía para alcanzar el equilibrio requiere un ángulo mayor de las bielas de compresión.

En los casos sin anclaje hay un desprendimiento prematuro del laminado. El ángulo de la fisura crítica en el alma para M1S es mayor que en los ensayos de control, mientras que para M2S este ángulo es menor.

Los ejemplares M2S, reforzados de forma discontinua con cuantía alta de FRP, resisten un cortante último inferior al resistido por la viga control M0S. Esto es debido a que al reforzar la viga se aumenta el ángulo de las bielas de compresión en relación a las vigas de control, por ello se intercepta una superficie de armadura transversal de acero inferior al de la viga de control. En el ejemplar reforzado aunque se interceptan menos cercos, la capacidad de la viga de resistir cortante es mayor debido a la contribución del FRP. Esto deja de ser así cuando el refuerzo de FRP deja de contribuir debido a su desprendimiento, ya que cuando esto sucede el área de acero de la armadura transversal que contribuye a resistir cortante es menor que el de su viga de control. Este fenómeno depende de cómo la cuantía de refuerzo FRP modifique el ángulo de las bielas de compresión y depende del instante en que se produzca el desprendimiento del refuerzo FRP.

El instante en que se produce el desprendimiento del refuerzo FRP va vinculado a la cuantía de refuerzo FRP dispuesta, al mismo tiempo que la disposición de una cuantía superior de FRP no se traduce en una mayor resistencia a cortante. Así pues concluimos, que en el caso en que no se disponga anclaje existe una cuantía de FRP óptima, a partir de la cual disponer más cuantía de refuerzo no supone un incremento de la resistencia última de cortante del ejemplar.

A diferencia de las vigas con armadura longitudinal media, en la Tabla 5. 25 de armadura longitudinal alta se aprecia que aumentar la cuantía de FRP se traduce en un aumento del ángulo de la fisura crítica y de la resistencia última de cortante excepto para la viga A3anclaje, con cuantía muy alta de FRP, en que su resistencia de cortante es menor a la viga A2anclaje, con cuantía alta de FRP. Esta excepción se puede justificar debido a que en este caso se trata

de la serie con armadura longitudinal alta y que esto haya trasladado la cuantía de refuerzo de FRP óptima a una cuantía superior que en el caso de la serie con cuantía longitudinal media. En este caso la cuantía de FRP óptima se encontraría entre la cuantía de FRP alta y la cuantía de FRP muy alta.

5.4. Cortante-desplazamiento en el punto de aplicación de la carga

En este apartado se analiza el cortante-desplazamiento de las vigas de la campaña experimental. A continuación, se analiza la deformación-cortante de la armadura longitudinal, los estribos y los refuerzos FRP para ambas series de vigas con y sin anclaje.

En la

Figura 5.43 se muestra la relación cortante-desplazamiento de las vigas de la serie de cuantía de armadura longitudinal media, M. Se aprecia que todos los ejemplares de esta serie reforzados con FRP superan la resistencia de cortante último de la viga de control, excepto los ejemplares con cuantía alta de FRP sin anclar, M2S. Todas las vigas presentan una rigidez de cortante similar hasta alcanzar los 200 KN, donde hay un cambio de pendiente significativo y las vigas M1A y M2A, que son las que disponen de anclaje, presentan más rigidez, especialmente M1A que por el contrario ve reducida su ductilidad de manera considerable respecto a M2A.

En este caso las resistencias a compresión del hormigón el día del ensayo varían de un ejemplar a otro en un rango entre 38,5 MPa y 42,8 MPa (ver Tabla 4.3), por lo que la resistencia del hormigón es bastante parecida en todos los ensayos. La disposición del refuerzo FRP aumenta la ductilidad de todos los ejemplares excepto los de cuantía alta de FRP sin anclaje, M2S, como en el caso de la resistencia última de cortante. Los ejemplares M2A y en especial M1S son los que presentan mayor ductilidad. Tal y como se observa, en la viga M2A, los laminados de FRP se desprenden antes de que se produzca la plastificación de la armadura longitudinal. El tipo de anclaje A proporciona una ductilidad mayor que el anclaje B para las vigas con mayor cuantía de FRP.

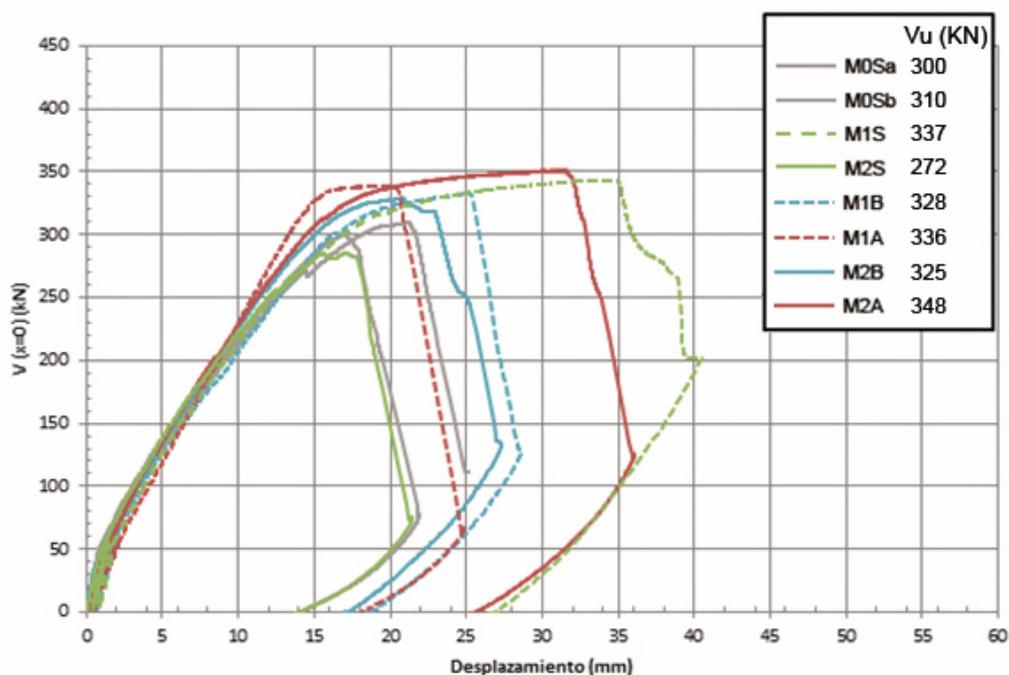


Figura 5.43. Cortante-Desplazamiento de las vigas de la serie M

En la Figura 5.44 se muestran las gráficas cortante-desplazamiento de las vigas de la serie de cuantía de armado longitudinal alta, A. La resistencia a cortante de las vigas de la serie A reforzadas con FRP también es superior a la de las vigas de control, excepto para los ejemplares A1S, con cuantía baja de FRP y sin anclaje, que dibujan sus curvas cortante-desplazamiento situadas entre las descritas por las vigas de control, A0Sa y A0Sb.

Las rigideces iniciales de los distintos ejemplares para la cuantía de acero longitudinal alta son parecidas.

En la serie A, las resistencias a compresión del hormigón el día del ensayo tienen una variabilidad mayor que en la serie M, oscilando entre 42,6 MPa para la viga de control y 49,8 MPa para algunos de los ejemplares reforzados (ver Tabla 4.3).

Las vigas con mayor ductilidad son las que están ancladas. Se trata de las vigas con cuantía de FRP alta con los dos tipos de anclaje, A2A y A2B y los ejemplares con FRP continuo y anclaje, A3B. Estos ejemplares presentan plastificación de su armadura longitudinal.

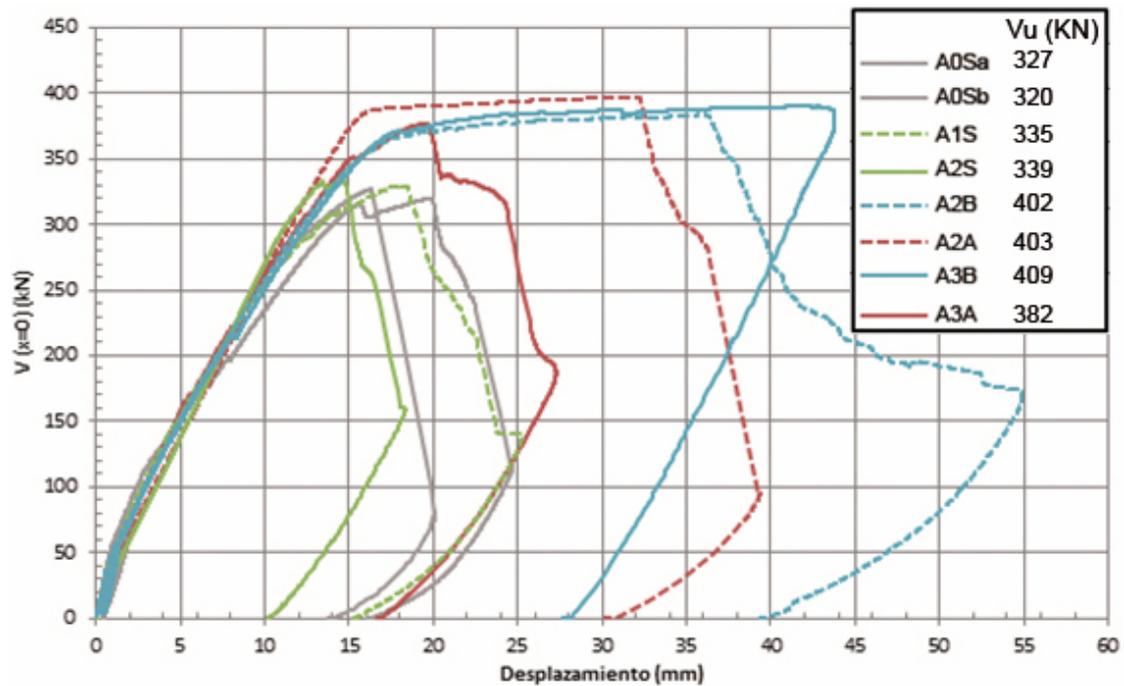


Figura 5.44. Cortante-Desplazamiento de las vigas de la serie A

En las Figura 5.45, Figura 5.46 y Figura 5.47 se muestran las gráficas cortante-desplazamiento de los ejemplares anclados, en que todos ellos presentan una resistencia a cortante mayor que la de la viga de control, debido a que aunque haya un desprendimiento local del refuerzo, éste continua actuando mecánicamente debido a su anclaje, aunque no necesariamente solidario al hormigón. Se aprecia que la disposición del anclaje confiere más ductilidad al conjunto.

En la Figura 5.45 se muestra por separado la viga de control y las vigas con anclaje para cada tipo de cuantía longitudinal de armadura.

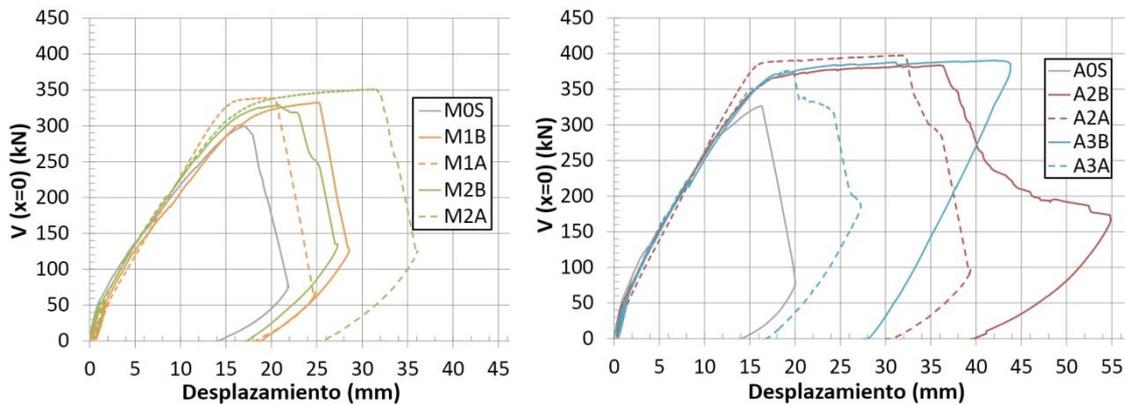


Figura 5.45. Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Vigas M; Dcha: Vigas A

En la Figura 5.46, se muestran las relaciones cortante-desplazamiento para cada tipo de anclaje en particular.

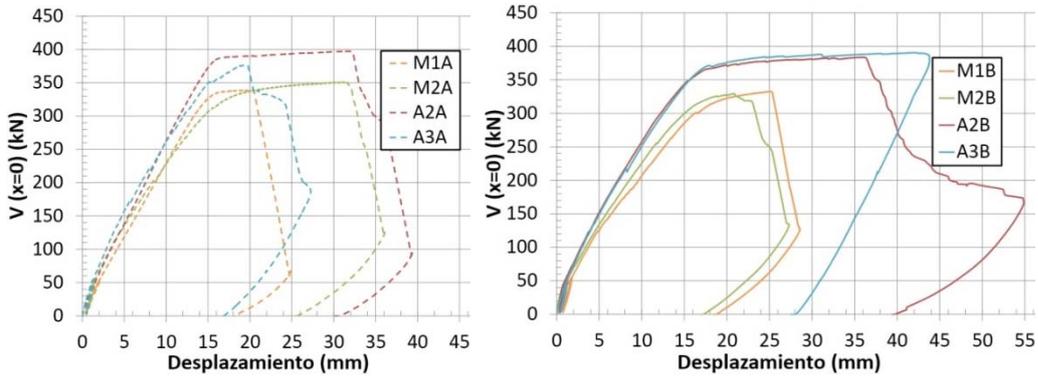


Figura 5.46. Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Anclaje tipo A; Dcha: Anclaje tipo B

En la Figura 5.47 se muestran las relaciones cortante-desplazamiento para cada tipo de cuantía de FRP con anclaje por separado. Se puede observar, que para la cuantía de FRP 1 o menor, el comportamiento es relativamente similar para ambos casos. Sin embargo, para la cuantía 2 y cuantía 3 de FRP, y en particular para el caso de mayor armadura longitudinal, parece que el anclaje tipo B se comportó mejor. Sin embargo, para la menor cuantía de armadura longitudinal, la tendencia parece ser la contraria, obteniendo un mejor comportamiento el anclaje tipo A.

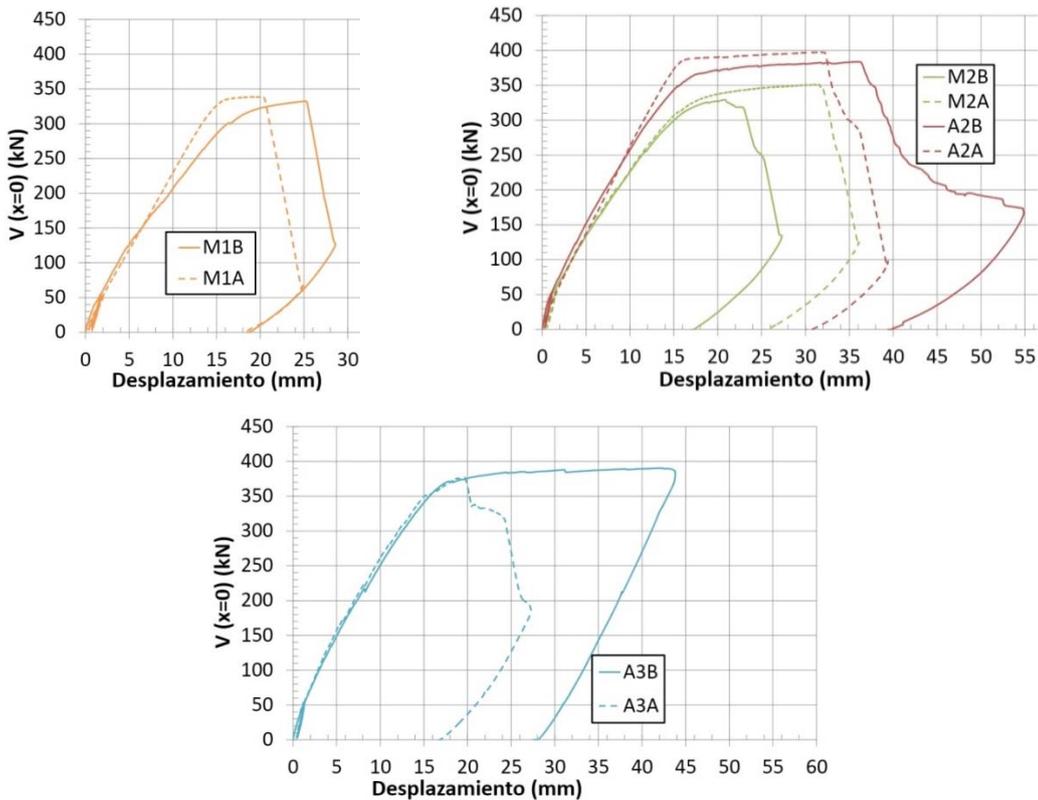


Figura 5.47. Cortante-Desplazamiento para los ejemplares anclados. Izda: Cuantía de FRP1; Dcha: Cuantía de FRP2; Abajo: Cuantía de FRP3

5.5. Cortante - deformaciones en la armadura longitudinal, armadura transversal y refuerzo FRP

A continuación, se analiza la evolución de la deformación de la armadura transversal de acero y del refuerzo externo FRP. Este análisis comparativo permite conocer en qué momento la cuantía de acero o de FRP entra en funcionamiento y empieza a absorber tracciones. En la Figura 5.48 y en la Figura 5.49 se muestra la posición de las galgas.

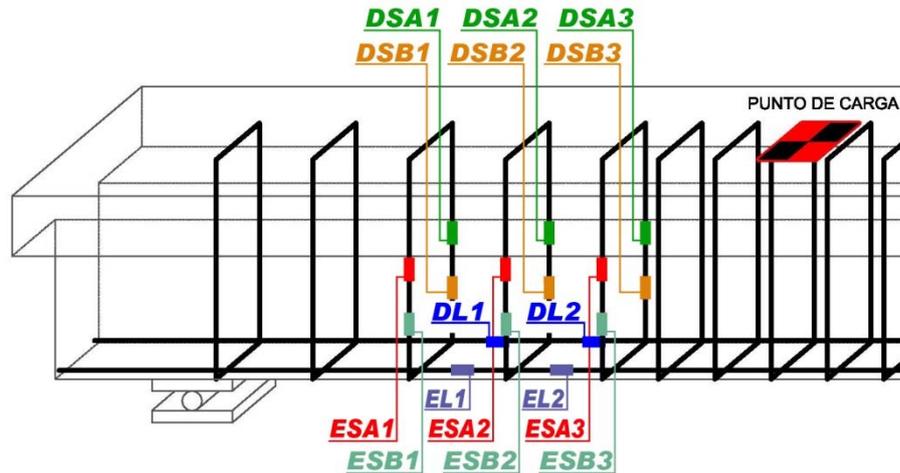


Figura 5.48. Posición de las galgas en la armadura de acero

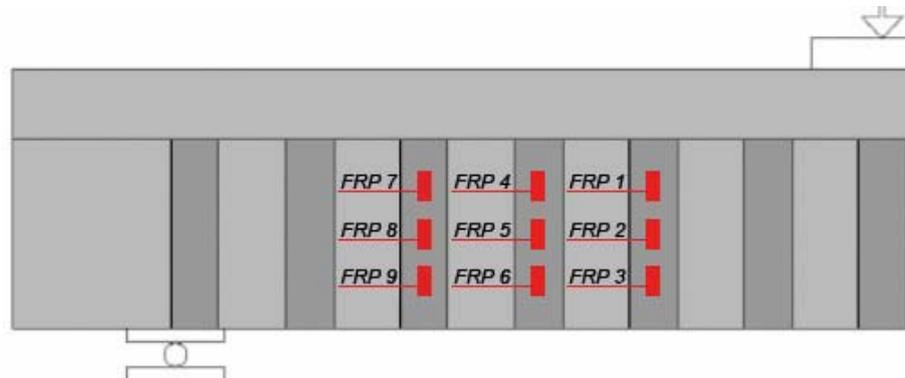


Figura 5.49. Posición de las galgas en el refuerzo de FRP

En la Figura 5.50, para las vigas de cuantía de acero longitudinal media y en la Figura 5.51, para las de cuantía alta, se ha comparado la deformación media del FRP de las galgas FRP F2 y FRP A2 con la deformación media de la armadura transversal de acero de las galgas ESB3, DSB3 para la misma zona afectada.

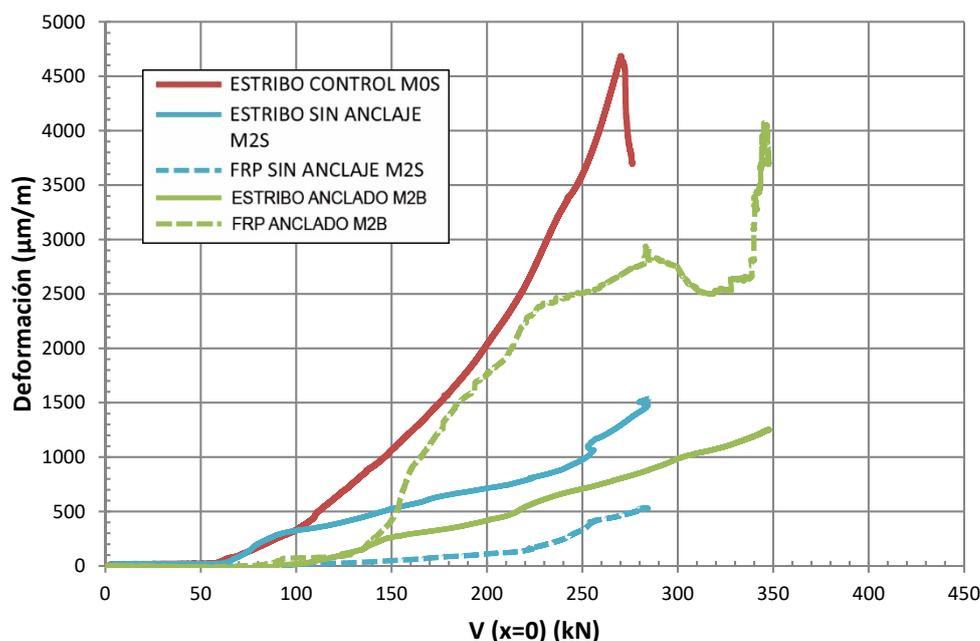


Figura 5.50. Deformación-Cortante para los ensayos M0S, M2S y M2B

Tal y como se observa en la Figura 5.50, la contribución del hormigón a la resistencia de cortante, V_c , es prácticamente la misma para la viga de control que para la viga reforzada sin anclaje (aproximadamente de unos 60 kN), debido a que sus respectivas armaduras transversales de acero se activan para el mismo nivel de carga. Así pues se puede afirmar que, para este caso, el refuerzo de la viga no implica la modificación de la contribución del hormigón a cortante. Cuando los refuerzos están anclados, la armadura de acero se activa para un cortante aplicado superior (aproximadamente de unos 120 kN). El anclar los refuerzos de FRP, parece que incrementa la contribución del hormigón a cortante, al menos para este caso. Los refuerzos de FRP, con y sin anclaje, se activan para niveles de carga similares. Sin embargo, la deformación alcanzada por el FRP anclado es muy superior al FRP sin anclaje porque no se produce desprendimiento.

Las mayores deformaciones para el cerco transversal analizado se dan en la viga de control. La disposición del refuerzo FRP supone una reducción de las deformaciones en las armaduras transversales de acero, al repartirse con el FRP. Este hecho se acentúa en el caso en que el FRP se encuentra anclado.

Las deformaciones en el FRP sin anclaje son inferiores a las de la armadura transversal de acero, mientras que al anclar el FRP este absorbe mucha más deformación que su correspondiente estribo.

Cabe mencionar que la Figura 5.50 corresponde a las deformaciones en el laminado 123 y en el cerco con la misma coordenada longitudinal. Este laminado es el que permanece adherido con mayor longitud de anclaje por debajo de la fisura crítica de cortante. Cuando se produce el desprendimiento del mismo por encima de la fisura crítica, el resto del FRP permanece adherido.

En la Figura 5.51 se muestran las deformaciones de la armadura transversal de acero y de FRP para las vigas de control A0S, con cuantía alta de FRP sin anclaje A2S y con anclaje tipo A, A2A. En este caso las deformaciones máximas también se dan para la armadura transversal

de acero de la viga de control, así como las deformaciones mínimas se dan para el estribo de la viga con FRP anclado. En la cuantía de acero longitudinal alta el estribo de la viga de control se activa para un cortante mayor que el estribo de la viga de control de la cuantía de acero longitudinal media. Esto se traduce en una mayor contribución del hormigón a cortante cuando se dispone de mayor cuantía longitudinal.

Para la cuantía longitudinal alta, las deformaciones del FRP sin anclaje para este caso son similares a las de su correspondiente estribo, aunque son muy similares, mientras que las deformaciones del FRP anclado son considerablemente superiores a las del estribo, pese a que la rigidez axial del estribo es bastante superior (prácticamente el doble) de la del FRP.

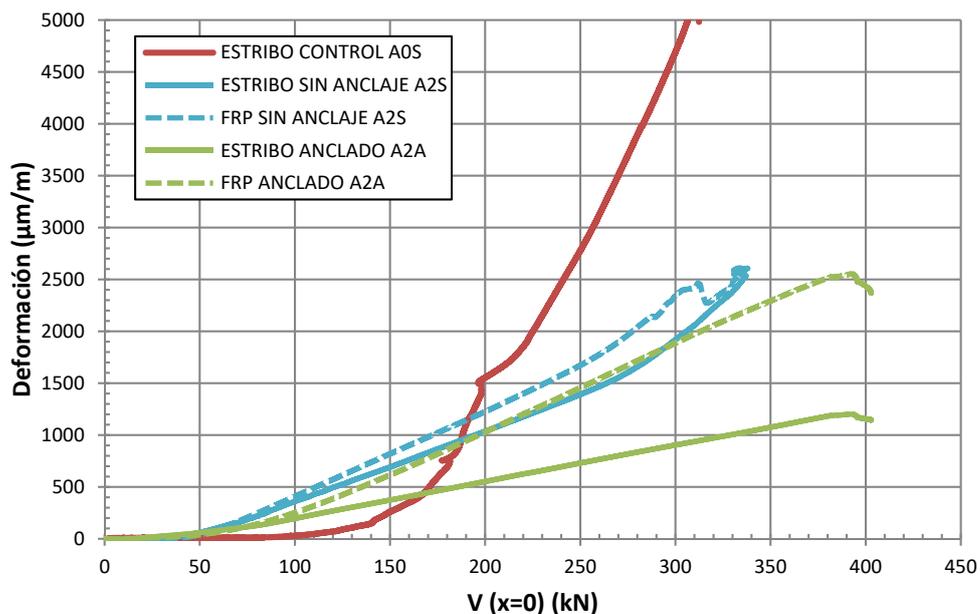


Figura 5.51. Deformación-Cortante para los ensayos A0S, A2S y A2A

Pese a que para la viga de control, los estribos se activan para un cortante de 110 kN, el FRP y la armadura transversal de acero de las vigas reforzadas se activan para un mismo valor de cortante, siendo entonces la contribución del hormigón a la resistencia a cortante alrededor de 50 kN, mientras que para la cuantía longitudinal media esta era de alrededor de 90 kN. Esto implica que para la cuantía alta de acero longitudinal, la contribución del hormigón a cortante es inferior que para la cuantía media.

En la Figura 5. 52, se analiza cómo influye la cuantía de FRP en los ensayos con refuerzo anclados, ya que así se descarta el efecto provocado por el desprendimiento prematuro del refuerzo polimérico. En el análisis se comparan las deformaciones de la armadura transversal de acero y de FRP del ejemplar con cuantía 2 (A2A), es decir, laminados anclados de 100 mm. de ancho separados 240 mm., con la del ejemplar con laminado continuo anclado, A3A.

Tal y como se observa en la Figura 5. 52, el aumento de cuantía de FRP apenas modifica la deformación de la armadura transversal de acero, adquiriendo pendientes prácticamente similares para el ejemplar A2A que para el A3A.

El refuerzo FRP de cuantía 2 se activa para un cortante similar al de los estribos de los dos ejemplares, alrededor de 40 kN, mientras que para la cuantía 3, éstos se activa para un cortante muy superior, de 130 kN. Así pues para la cuantía 3 de FRP la contribución del FRP se retarda considerablemente en relación a la del acero transversal.

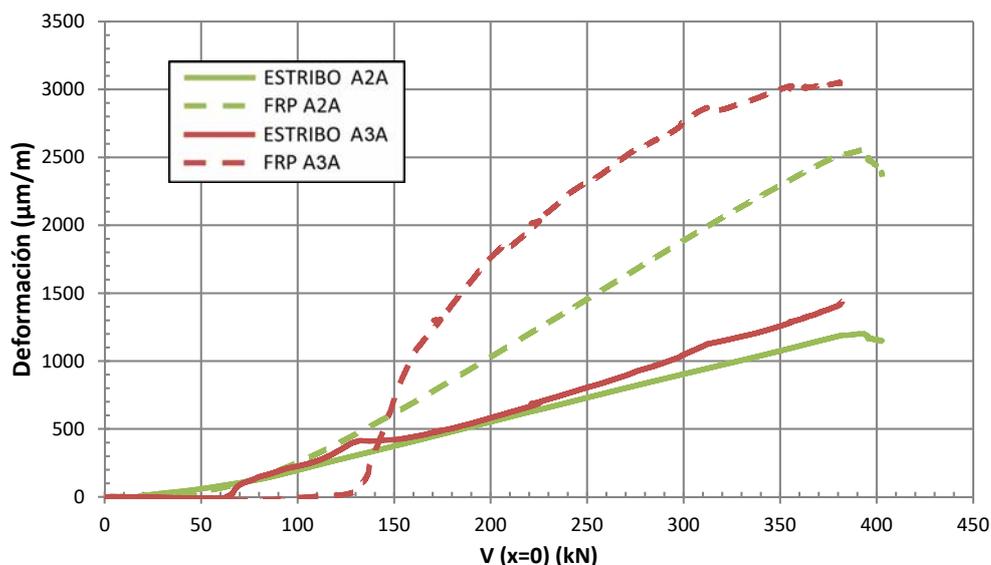


Figura 5.52. Deformación-Cortante para los ensayos anclados A2A y A3A

Las Figura 5.53, Figura 5.54 y Figura 5.55 muestran el patrón de fisuración, la ubicación de las galgas en las armaduras transversales de acero y en los refuerzos de FRP, y la deformación-cortante de las mismas.

Para las vigas en las que el FRP no está anclado de la serie M, el desprendimiento se produce antes en las vigas con cuantía alta de FRP que en los ejemplares con menor cuantía de FRP.

La contribución del acero transversal a la resistencia de cortante de la serie M con FRP sin anclajes es mayor en la viga con menor cuantía de FRP, M1Sa, que en la viga con cuantía alta de FRP, M2Sa. Los refuerzos de FRP empiezan a colaborar alrededor del mismo valor de cortante en ambas vigas, 100 kN, pero este refuerzo soporta cortantes superiores para la viga con cuantía baja de refuerzo FRP, M1Sa, que para la viga con cuantía alta, M2Sa. Por este motivo el FRP en la viga M1Sa absorbe deformaciones más elevadas que en la viga M2Sa.

En la parte superior de la Figura 5.53, se observa la fisuración y distribución de FRP transversal para los ensayos M2Sa y M1Sa. En esta figura se puede observar los estribos interceptados así como los FRP atravesados por las fisuras de cortante. Se puede observar como en el caso de la viga con menor cuantía de FRP se da una mayor activación de un mayor número de armaduras transversales que colaboran a la resistencia de cortante.

En la Figura 5.54, se observa que las vigas con anclaje presentan un comportamiento distinto de las que no disponen de anclaje. Así pues en el ejemplar anclado con refuerzo tipo 2 (laminados de ancho 100 mm), M2B, se observa que las deformaciones en la armadura transversal de acero son menores que en las del ejemplar con refuerzo tipo 1 (laminados de ancho 50 mm), M1B, mientras que la viga sin anclaje, M2Sa, presenta deformaciones en la armadura transversal de acero más elevadas que M1Sa. El ejemplar de la serie A sin anclar con refuerzo tipo 1 presenta deformaciones en los estribos similares a las de la viga con refuerzo tipo 2. Las tensiones en los estribos de las vigas sin anclar son más elevadas en vigas con mayor cuantía de FRP, debido a que una vez se produce el desprendimiento prematuro del refuerzo, los incrementos de tracción que se llevaría el FRP los asume la armadura transversal si no ha plastificado, que por ello aumenta su contribución. Las deformaciones en los estribos de los ejemplares A1Sa y A2Sb son muy parecidas.

En la parte superior de la Figura 5.54 se observa que los ángulos de las fisuras críticas de cortante de las vigas con FRP anclado de la serie M son un poco más verticales a los observados en las mismas vigas sin anclaje del FRP (ver Figura 5.53). Además, en las vigas con FRP anclado se presenta una fisura crítica más definida que tiene menor ramificación. Las tensiones en los estribos de acero de los ejemplares anclados son menores que en las vigas sin anclar puesto que en este caso el FRP colabora con los estribos hasta rotura.

En la serie A sin anclar con cuantía baja de FRP, A1Sa, la contribución del acero transversal a la resistencia de cortante es similar a la de la viga con cuantía alta de FRP, A2Sb, ya que el área de armadura transversal que contribuye a cortante es similar para ambos casos. En la parte superior de la Figura 5.55 se observa que el número de estribos y de FRP interceptados por las fisuras de cortante es similar.

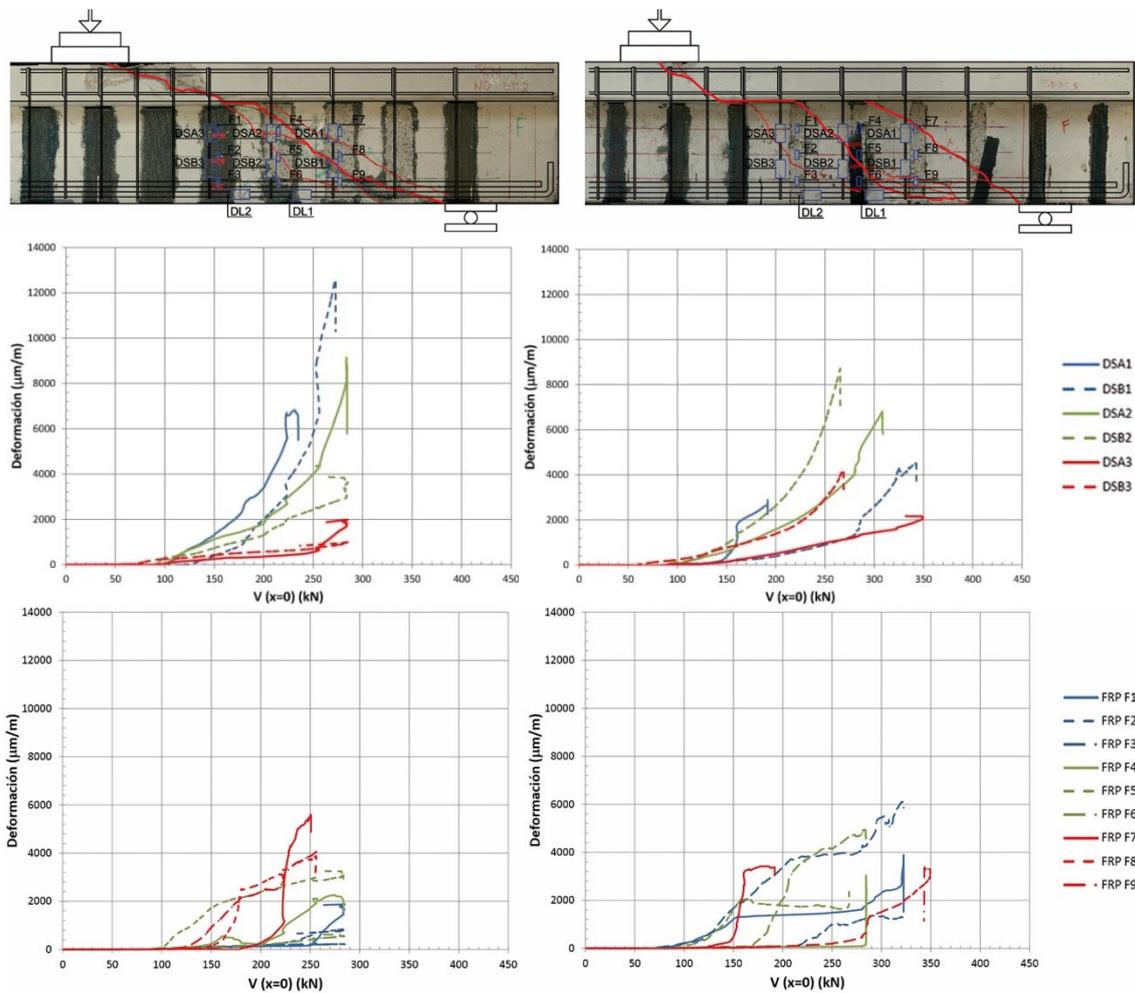


Figura 5.53. Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: M2Sa. Der: M1Sa. Medio: Cortante - Deformación en armaduras transversales de acero. Izq: M2Sa. Der: M1Sa. Abajo: Cortante - Deformación en refuerzos FRP. Izq: M2Sa. Der: M1Sa.

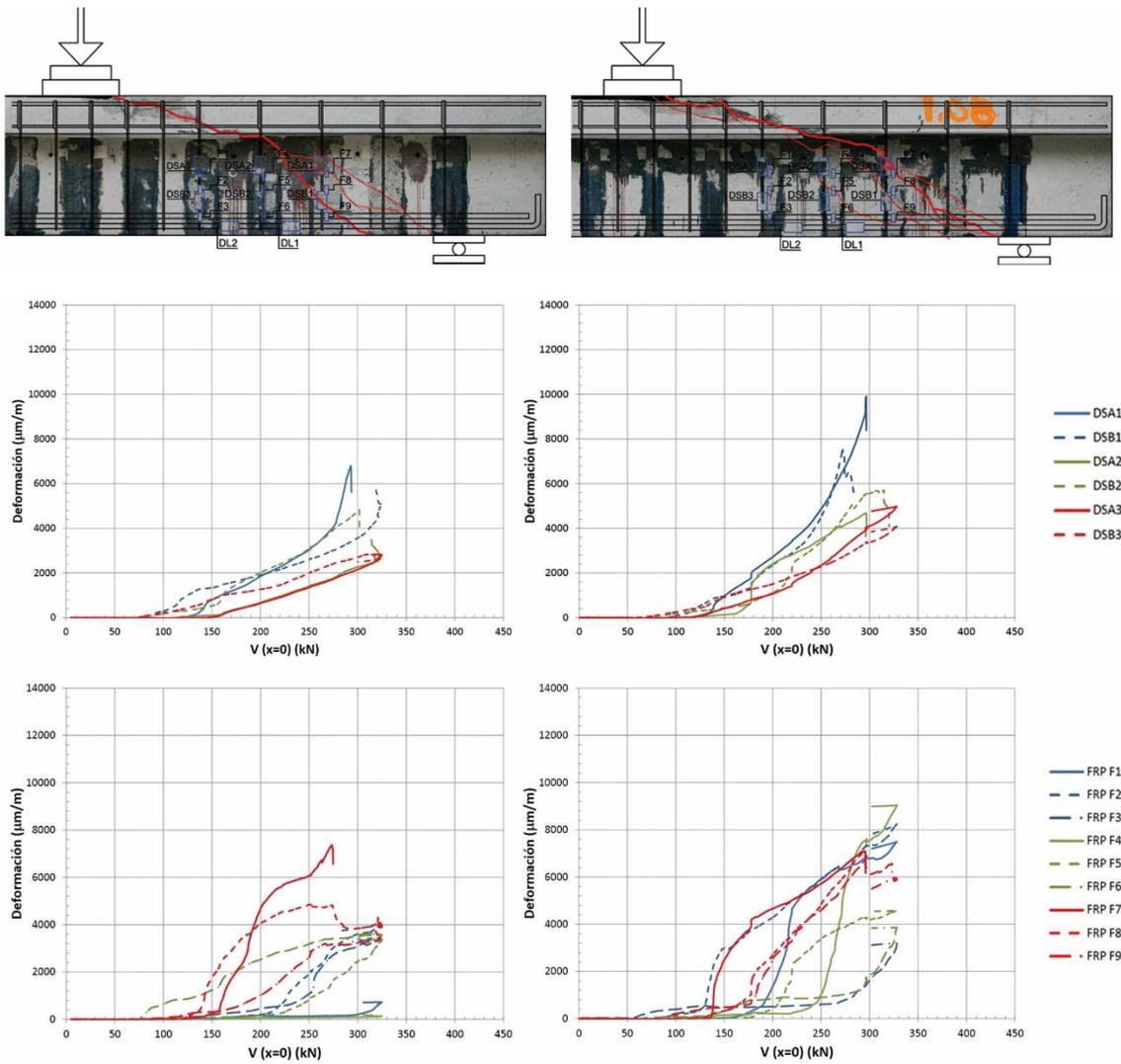


Figura 5.54. Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: M2B. Der: M1B. Medio: Deformación-Cortante en armaduras transversales de acero. Izq: M2B. Der: M1B. Abajo: Deformación-Cortante en refuerzos FRP. Izq: M2B. Der: M1B.

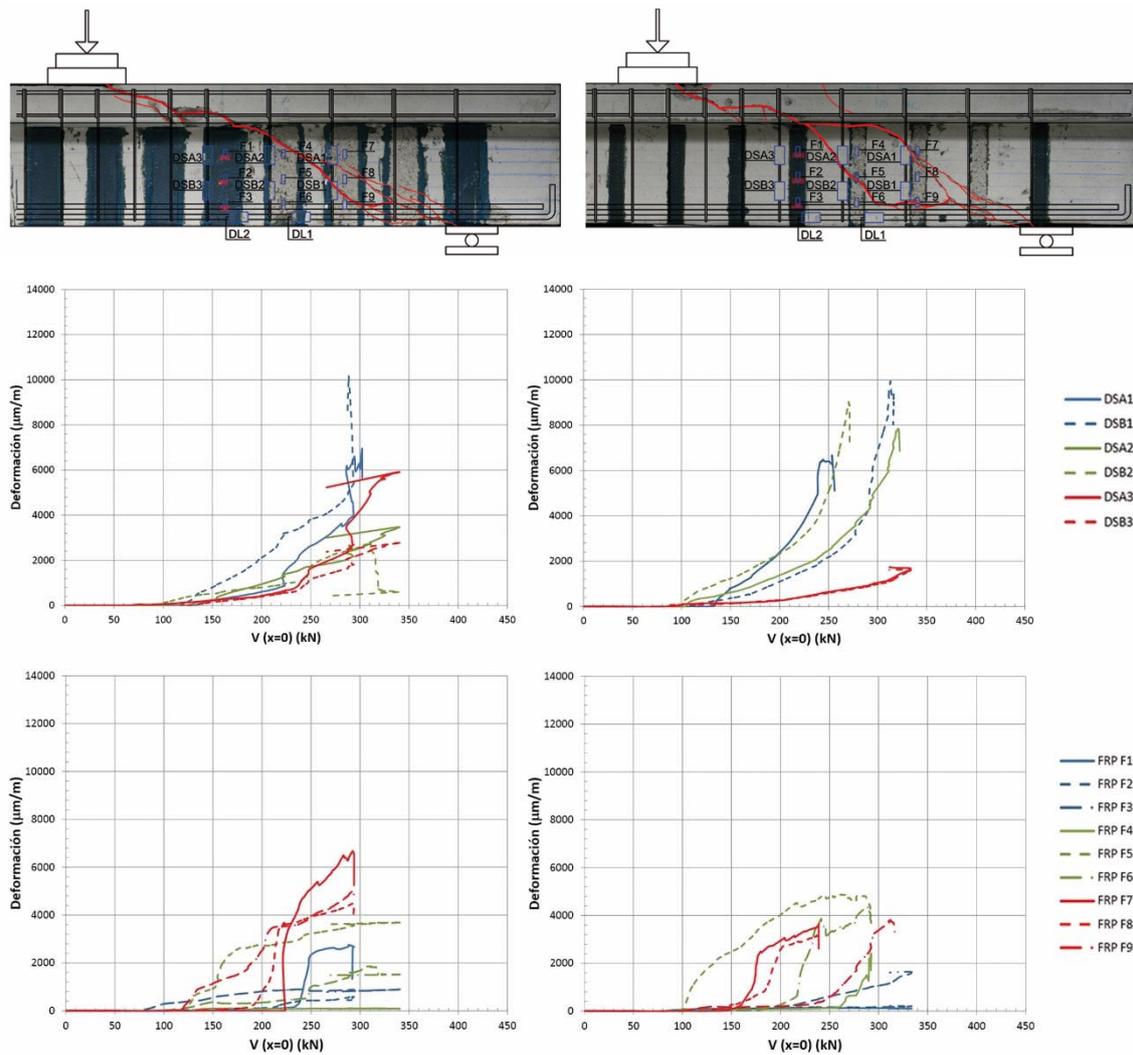


Figura 5.55. Arriba: Fisuras producidas en cada ensayo. Izq: A2Sb. Der: A1Sa. Medio: Deformación-Cortante en armaduras transversales de acero. Izq: A2Sb. Der: A1Sa. Abajo: Deformación-Cortante en refuerzos FRP. Izq: A2Sb. Der: A1Sa.

En la Figura 5.56 se pretende ver cuál es la influencia de la cuantía de armadura longitudinal (series M y A), así como de las diferentes cuantías de refuerzo de FRP en las deformaciones de las armaduras longitudinales. Se analizan los ensayos de control (M0Sa y A0Sa), los ensayos con cuantía baja de FRP sin anclaje, (M1Sa y A1Sa), los ensayos con cuantía alta de FRP sin anclaje, (M2Sa y A2Sa) y con cuantía alta y muy alta de FRP pero con anclajes (M2A, A2A, A3A, M2B, A2B y A3B).

Aumentando la cuantía de armadura longitudinal, el cortante último alcanzado es mayor, tanto para la viga de control como para las vigas reforzadas con la misma cuantía de FRP. Sin embargo, esta tendencia no se observó para las vigas reforzadas con cuantía baja de FRP, donde la viga con cuantía media de armadura longitudinal, M1Sa, resistió un cortante mayor que el de la viga con armadura longitudinal alta, A1Sa.

Se observa como para un mismo esfuerzo de cortante, las deformaciones en la armadura longitudinal son siempre más elevadas para la serie M.

La rigidez inicial es similar en todos los casos hasta que se produce la fisuración de la pieza. A partir de allí la rigidez es mayor para las vigas con mayor cuantía longitudinal.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el cortante último aumenta para las vigas con anclaje del FRP. La disposición del anclaje confiere más ductilidad al sistema una vez han plastificado sus armaduras.

La rigidez de las vigas ancladas con refuerzo muy alto de FRP, A3A y A3B, no es superior a la de sus homólogas reforzadas con cuantía alta de FRP, A2A y A2B, como era de esperar, de la misma manera que el cortante último que resisten las vigas A3A y A3B no siempre es superior al de sus homólogas A2A y A2B.

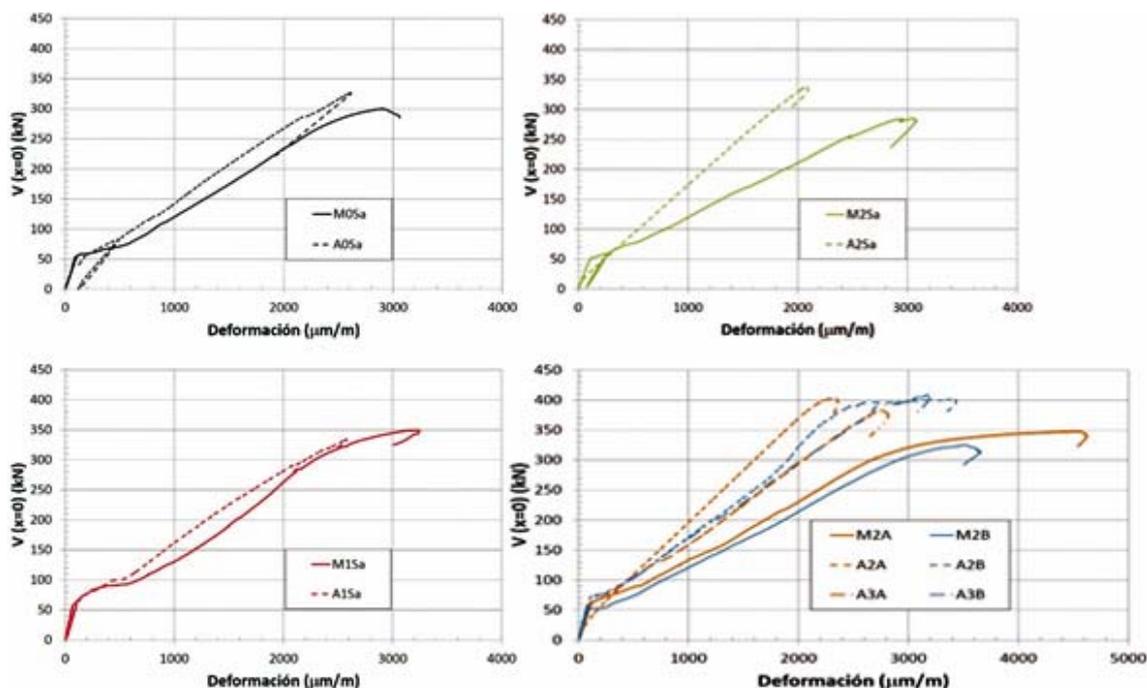


Figura 5.56. Cortante-deformación de las armaduras longitudinales. Primero: ejemplares M0Sa y A0Sa. Segundo: ejemplares M1Sa y A1Sa. Tercero: ejemplares M2Sa y A2Sa. Cuarto: ejemplares M2A, A2A, A3A, M2B, A2B y A3B.

5.6. Contribución a la resistencia de cortante del hormigón, de la armadura transversal, del refuerzo externo de FRP y del ala de la sección en T

En las Tabla 5. 28 y en la Tabla 5. 29 se muestran las contribuciones máximas del acero, V_s , y del FRP, V_{FRP} , así como el promedio de la contribución del hormigón, V_c . Todas estas contribuciones se han obtenido a partir del registro de las galgas. En particular, la contribución del hormigón a la resistencia a cortante se ha obtenido como el valor del cortante promedio de las distintas galgas dispuestas en el acero y en el FRP en el momento en que estas se activan, es decir una vez el hormigón fisura.

La contribución del acero, V_s , se ha obtenido según la ecuación:

$$V_{su} = z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \Sigma A \alpha \cdot \sigma_{s \alpha d} \quad (5.1)$$

Como el ángulo de la armadura transversal con la horizontal es de $\alpha = 90^\circ$, la ecuación queda:

$$V_{su} = z \cdot (\cot \theta) \cdot \Sigma A_{90} \cdot \sigma_{s \alpha d} \quad (5.2)$$

donde:

θ : Ángulo de las bielas de compresión (θ) promedio del ala y alma que se ha obtenido visualmente en el momento de la rotura.

z : Brazo mecánico obtenido del equilibrio seccional como M/T . La tracción en la armadura longitudinal (T) se determina como:

$$T = A_s \cdot \sigma \quad (5.3)$$

donde:

A_s : Área armadura longitudinal. Para las vigas de la serie M, $A_{s M 8\phi 16} = 1608,5 \text{ mm}^2$ y para las vigas de la serie A, $A_{s A 4\phi 16} + A_{s A 4\phi 20} = 804,25 + 1256,64 = 2060,89 \text{ mm}^2$.

σ : Tensión de la armadura longitudinal. La tensión de la armadura longitudinal se calcula a partir de la deformación medida en cada una de las tres secciones de estudio (1, 2 y 3) correspondientes a los estribos transversales donde se han situado las galgas extensométricas, (ver Figura 5. 57).



Figura 5. 57. Secciones de estudio definidas

La deformación medida en la armadura longitudinal de la *sección de estudio 1* hace referencia a la galga *DL2* que no está exactamente alineada con dicha sección pero es la más próxima. De forma similar, para la *sección de estudio 3*, se considera la deformación longitudinal de la galga en *DL1*, ya que es la más próxima a esta sección. En el caso de la sección de estudio 2, se ha tomado el promedio de las galgas *DL1* y *DL2* para obtener la deformación asociada a la armadura longitudinal en esa sección.

Con las deformaciones medidas en la armadura longitudinal se calcula su tensión considerando la plastificación de la barra de acuerdo con el ensayo a tracción realizado sobre la misma.

Para las vigas de la serie M.:

- Si $\varepsilon \leq \varepsilon_{y\phi 16}$ la tensión es: $\sigma = \varepsilon \cdot E_{\text{lím elástico}}$
- Si $\varepsilon > \varepsilon_{y\phi 16}$ la tensión es: $\sigma = \varepsilon \cdot E_{\text{tramo plástico}} + \sigma_{\text{remanente}}$

Para las vigas de la serie A:

- a) Si $\varepsilon \leq \varepsilon_{y\phi 16}$ la tensión es:

$$\sigma = \varepsilon \cdot (E_{\text{lím elástico}\phi 16} + E_{\text{lím elástico}\phi 20})$$

- b) Si $\varepsilon > \varepsilon_{y\phi 16}$ y $\varepsilon \leq \varepsilon_{y\phi 20}$ la tensión es:

$$\sigma = E_{\text{plástico}\phi 16} \cdot \varepsilon + \sigma_{\text{remanente}\phi 16} + E_{\text{lím elástico}\phi 20} \cdot \varepsilon$$

- c) Si $\varepsilon > \varepsilon_{y\phi 20}$ la tensión es:

$$\sigma = E_{\text{plástico}\phi 16} \cdot \varepsilon + \sigma_{\text{remanente}\phi 16} + E_{\text{plástico}\phi 20} \cdot \varepsilon + \sigma_{\text{remanente}\phi 20}$$

Las propiedades mecánicas de la armadura longitudinal y transversal se facilitan en la Tabla 5.26.

Tabla 5. 26 Propiedades mecánicas del armado longitudinal y transversal

Diámetro ϕ	f_y medio (N/mm ²)	ε_u	ε_y	$E_{\text{elástico}}$ (N/mm ²)	$E_{\text{plástico}}$ (N/mm ²)	Tensión remanente (b) (N/mm ²)
6	645,73	0,1444	0,00339984	189.956	280,28	644,77
16	572,24	0,1357	0,002917	196.121	766,35	570
20	603,65	0,12625	0,0034478	175.084	193,5	602,98

En la Figura 5.58 se muestran las secciones analizadas, con su correspondiente esquema de fuerzas, diagrama de cortantes y de momentos flectores.

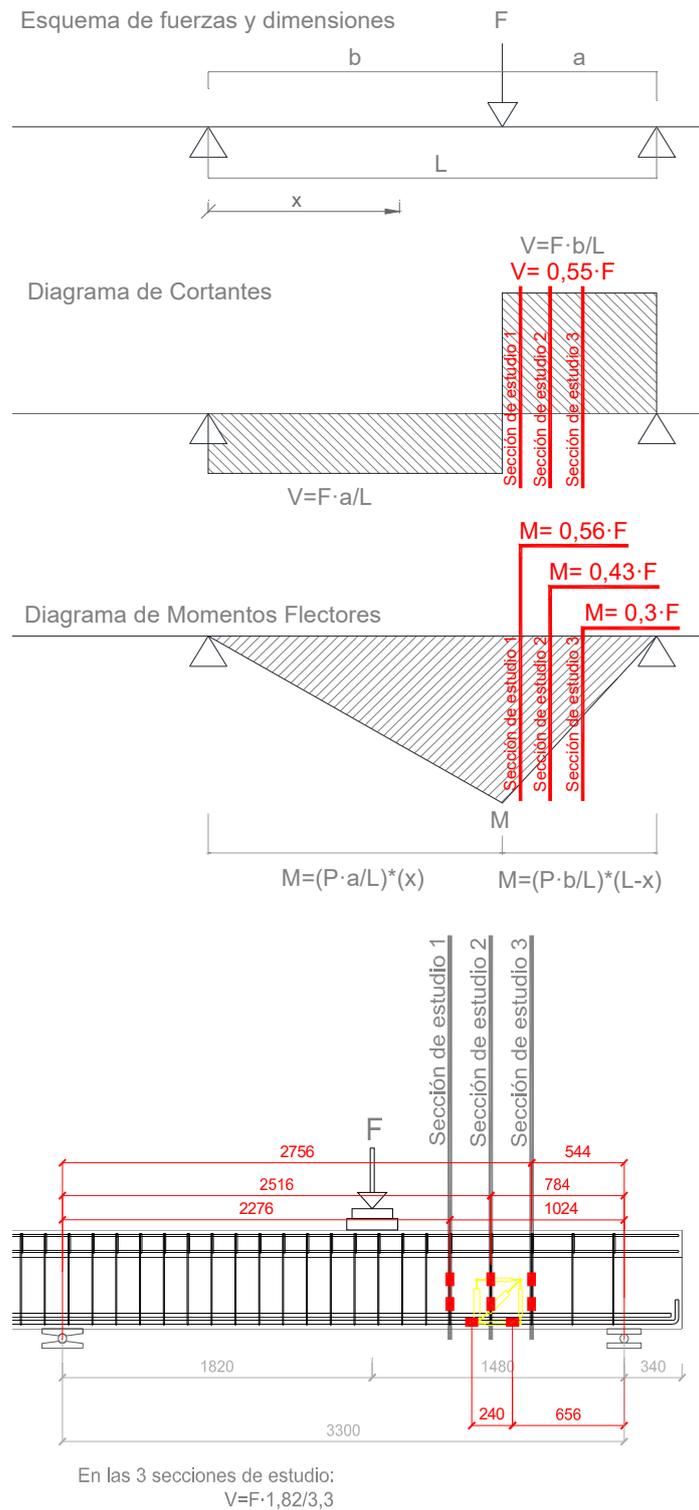


Figura 5.58. Secciones analizadas con su correspondiente esquema de fuerzas, diagrama de cortantes y de momentos flectores

El área de la armadura de cortante que ha contribuido a resistir el cortante último, (A_{90} , área de la sección por unidad de longitud (mm^2/mm)), se ha calculado considerando el número de estribos interceptados por la fisura de cortante dividido por la proyección horizontal de la fisura:

$$n^{\circ} \text{ estribos} = \frac{n^{\circ} \text{ estribos que interseca la fisura}}{\text{Longitud fisura}}$$

En la Figura 5.59 se muestra el criterio empleado para determinar el número de estribos que interseca la fisura de cortante así como la medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura, que incluye las dos ramas; ala y alma.

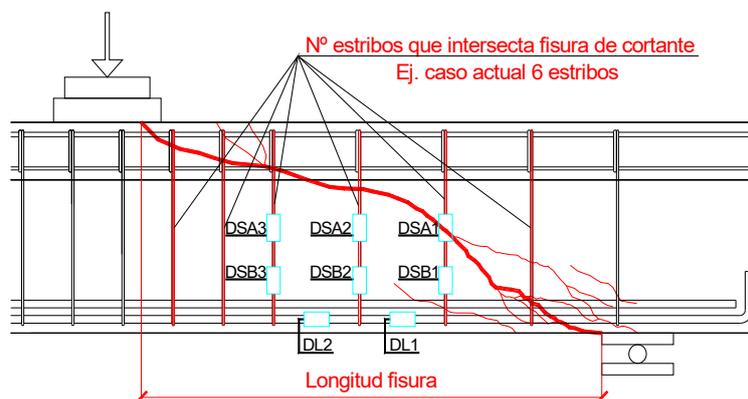


Figura 5.59. Criterio para determinar los estribos que intersecan la fisura de cortante y medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura.

La tensión en la armadura transversal, σ_s , se determina a partir de las deformaciones en las galgas de cada una de las tres secciones de estudio. A partir de esta tensión se obtiene la tracción en cada cerco y la suma de todas ellas da la contribución del acero transversal a la resistencia a cortante.

La contribución de los laminados FRP, V_{FRP} , se ha obtenido siguiendo un procedimiento similar al anterior según la ecuación:

$$V_{FRP} = z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sum A \cdot f_{y\alpha,d} \quad (5.4)$$

Dado que en este caso los laminados de FRP también se han dispuesto a 90° . Se simplifica la ecuación a:

$$V_{FRP} = z \cdot (\cot \theta) \cdot \sum A_{FRP} \cdot f_{y\alpha,d} \quad (5.5)$$

donde:

z: Brazo mecánico.

$\cot \theta$: cotangente del ángulo de las bielas de compresión (θ) del alma que se ha obtenido visualmente en el momento de la rotura. En el caso de los FRP el ángulo solo es del alma ya que los laminados solo se disponen en esta zona de la viga.

A_{FRP} : (n° ramas FRP) · (Área 1 banda FRP) · (láminas FRP/unidad de longitud)

donde:

Los valores de “Área 1 banda FRP” y “láminas FRP/unidad de longitud” se calculan según la cuantía de FRP dispuesta. Existen cuatro tipos de cuantías:

Cuantía de FRP=0.

Cuantía de FRP=1. Se disponen bandas de 50 mm de ancho distribuidas cada 240 mm tal y como se ve en la Figura 5. 60

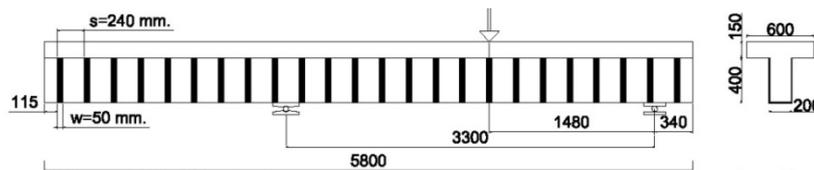


Figura 5. 60. Distribución de las bandas para la cuantía de FRP 1

Cuantía de FRP=2. Se disponen bandas de 100 mm de ancho distribuidas cada 240 mm tal y como se ve en la Figura 5. 61

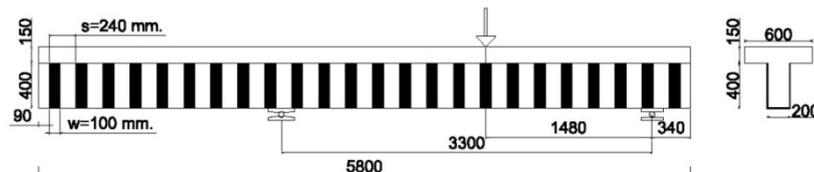


Figura 5. 61. Distribución de las bandas para la cuantía de FRP 2

Cuantía de FRP=3. Disposición del refuerzo FRP continuo. Toda la viga está envuelta con el refuerzo FRP.

En la Figura 5. 62 se muestra el criterio empleado para determinar el número de bandas FRP que intersecta la fisura de cortante, así como la medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura. Véase que en la proyección horizontal interviene para el caso de las láminas FRP únicamente la longitud de fisura del alma, ya que el refuerzo solo se dispone en el alma de la viga y que así mismo el número de bandas FRP computadas son las que están únicamente en la fisura de cortante del alma.

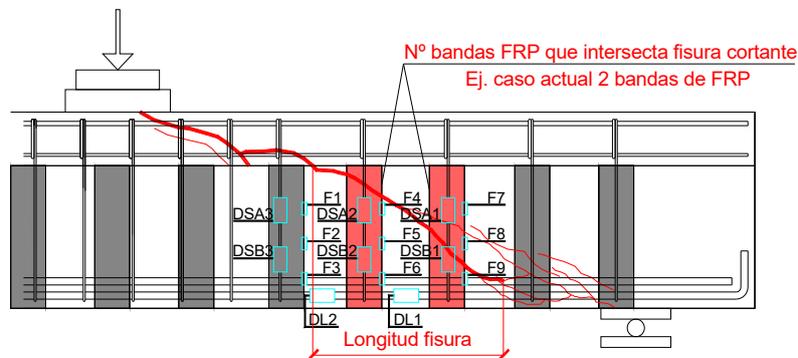


Figura 5. 62. Criterio para determinar las bandas de FRP que intersectan la fisura de cortante y medición de la proyección horizontal de la longitud de fisura.

La tensión en el FRP se calcula mediante las deformaciones medidas a partir por las galgas extensométricas. Solo se contempla la rama elástica ya que no existe rama plástica o es prácticamente imperceptible. Así pues cuando el compuesto alcanza su límite elástico inmediatamente rompe. De esta manera existe una única ecuación:

$$\sigma = \epsilon_{FRP} \cdot E_{lim \text{ elástico } FRP} \quad (5.6)$$

Tabla 5. 27 Propiedades mecánicas de los laminados de FRP

f_u FRP (N/mm ²)	ϵ_u FRP	$E_{elástico}$ FRP (N/mm ²)
2.739	0,01042	262.964

En la Tabla 5. 27, mostrada anteriormente, se detallan las propiedades mecánicas de los laminados FRP utilizados en esta campaña experimental que permiten completar la ecuación anterior junto con las deformaciones medidas en el refuerzo.

En la Tabla 5. 28 y en la Tabla 5. 29, se han obtenido las contribuciones a cortante promedio del acero, V_s , y del FRP, V_{FRP} .

Tabla 5. 28 Contribución a cortante promedio del hormigón, del acero y del FRP de las vigas con cuantía longitudinal media

Viga	V_c (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	$V_c+V_s+V_{FRP}$ (KN)
M0Sa	97,6	55,1	0,0	152,7	152,7
M0Sb	85,0	42,5	0,0	127,5	127,5
M1Sa	98,0	47,3	10,6	145,3	155,9
M1Sb	108,7	47,1	8,6	155,8	164,4
M2Sa	94,2	47,2	15,1	141,4	156,5
M2Sb	120,1	37,8	16,4	157,9	174,3
M1B	95,2	39,2	14,6	134,4	149
M1A	15,6	13,6	5,2	29,2	34,4
M2B	92,5	45,1	14,0	137,6	151,6
M2A	98,4	59,1	24,0	157,5	181,5

Tabla 5. 29 Contribución a cortante promedio del hormigón, del acero y del FRP de las vigas con cuantía longitudinal alta

Viga	V_c (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s+V_{FRP} (KN)
A0Sa	97,5	26,2	0,0	123,7	123,7
A0Sb	115,0	74,6	0,0	189,6	189,6
A1Sa	111,0	41,3	6,4	152,3	158,7
A1Sb	104,3	41,4	10,2	145,7	155,9
A2Sa	21,3	35,3	8,5	56,6	65,1
A2Sb	102,5	43,6	17,7	146,1	163,8
A2B	98,3	53,6	20,8	151,9	172,7
A2A	7,6	22,3	15,3	29,9	45,2
A3B	112,5	*	*	*	*
A3A	111,4	29,2	35,2	140,6	175,8

* No apareció fisura visible de cortante por lo que no se pudo medir la contribución del acero y del FRP según esta metodología.

La contribución a cortante del refuerzo FRP, V_{FRP} , y de la armadura transversal de acero, V_s , corresponde al máximo cortante producido por la suma del cortante del laminado FRP más el cortante de la armadura transversal de acero. Las tres secciones de estudio atravesadas por la fisura crítica de cortante, son aquellas donde se encuentran los tres estribos instrumentados y que coinciden con los tres refuerzos de FRP instrumentados (ver Figura 5. 63). La máxima contribución a cortante del refuerzo FRP y del acero se ha obtenido a partir del promedio de valores entre las dos caras.

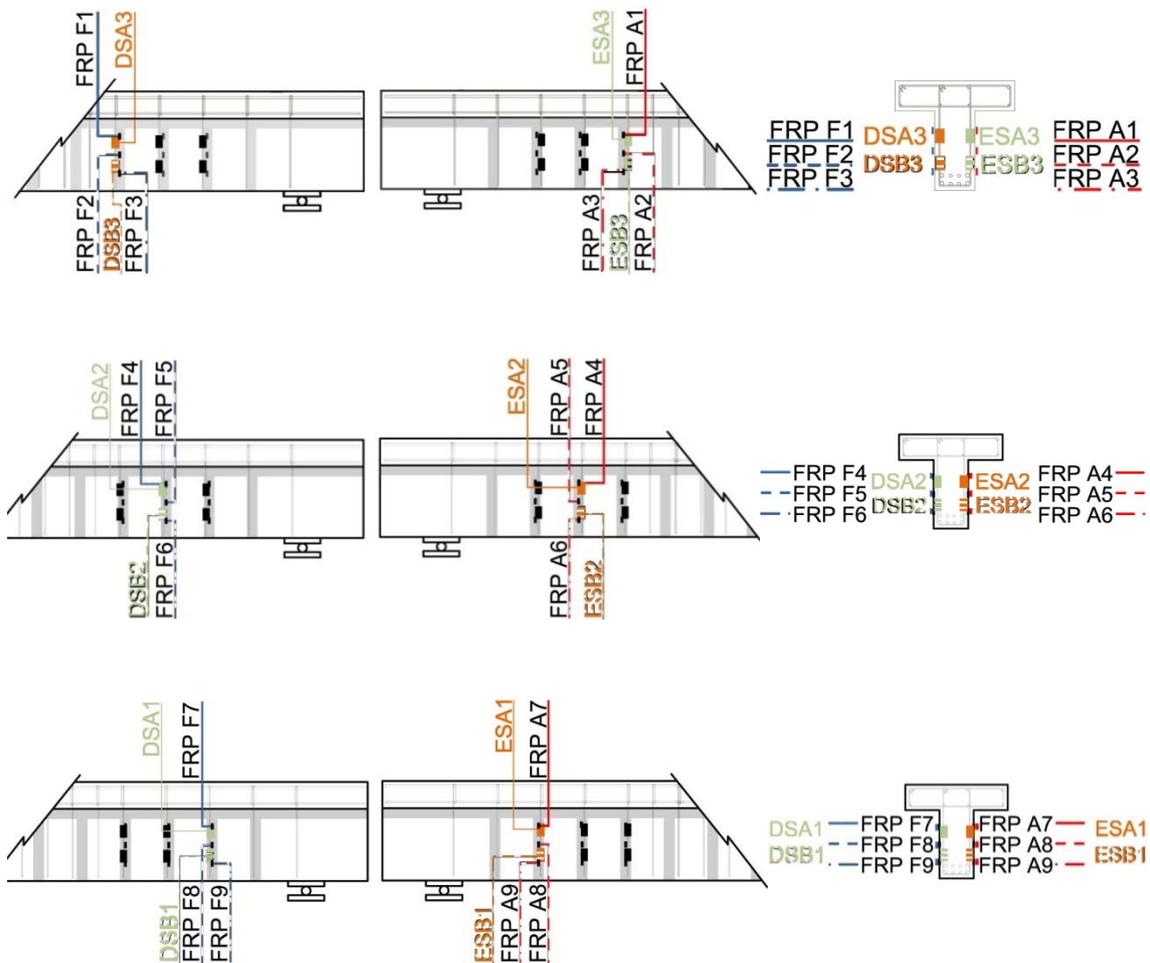


Figura 5. 63. Agrupación de galgas de la armadura transversal de acero y del FRP para las tres secciones de estudio. Cada sección corresponde a una fila de la imagen.

En la Tabla 5. 30 se definen las combinaciones realizadas para determinar cuál de ellas da el cortante máximo. Cada combinación coincide con una de los dos caras de las tres secciones instrumentadas para así determinar la contribución de cada sección según las combinaciones máximas.

Para cada sección de estudio se han definido tres combinaciones de cortante resistido por armadura transversal y refuerzo externo. Se identifica para cada sección de estudio cuál de estas combinaciones es máxima para cada estado de carga y finalmente el máximo total de todos los estados de carga. La identificación de la combinación máxima permite obtener la ubicación del cortante más elevado y por donde posiblemente se dibuje la fisura crítica. La media del cortante de la armadura transversal de acero y del laminado FRP de todas las secciones es la contribución de acero, V_s , y la contribución de FRP, V_{FRP} , total que tiene cada ejemplar.

Tabla 5. 30 Combinación de los cortantes máximos para cada sección de estudio

Sección de estudio 1	Sección de estudio 1	Sección de estudio 2	Sección de estudio 2	Sección de estudio 3	Sección de estudio 3
LADO A	LADO F	LADO A	LADO F	LADO A	LADO F
$V_{ESA3}+V_{FRP A1}$	$V_{DSA3}+V_{FRP F1}$	$V_{ESA2}+V_{FRP A4}$	$V_{DSA2}+V_{FRP F4}$	$V_{ESA1}+V_{FRP A7}$	$V_{DSA1}+V_{FRP F7}$
$V_{ESB3}+V_{FRP A2}$	$V_{DSB3}+V_{FRP F2}$	$V_{ESB2}+V_{FRP A5}$	$V_{DSB2}+V_{FRP F5}$	$V_{ESB1}+V_{FRP A8}$	$V_{DSB1}+V_{FRP F8}$
$V_{ESB3}+V_{FRP A3}$	$V_{DSB3}+V_{FRP F3}$	$V_{ESB2}+V_{FRP A6}$	$V_{DSB2}+V_{FRP F6}$	$V_{ESB1}+V_{FRP A9}$	$V_{DSB1}+V_{FRP F9}$

Según este procedimiento se obtiene la contribución total del acero y del FRP para cada ejemplar tal y como se ve en las tablas A2.1 hasta la tabla A2.20 del Anejo 2. En estas mismas tablas se ve la contribución del hormigón, V_c , obtenida como el valor de cortante que corresponde a la activación de las galgas para la combinación que da cortante máximo para cada sección de estudio dispuestas en el acero y en el FRP.

En la Tabla 5. 31 se puede ver la contribución máxima del hormigón, del acero y del FRP a cortante. Tal y como se observa, existe una diferencia entre el cortante último experimental y la suma de la contribución del hormigón, del acero transversal y del FRP externo a la resistencia a cortante. Esta diferencia se puede suponer que corresponde a la contribución del ala a la resistencia de cortante, es decir la resistencia del hormigón del ala y de la armadura transversal dispuesta en el interior de la misma.

En la Tabla 5. 32 se listan las contribuciones de cada material a la resistencia a cortante en porcentaje relativo a la resistencia última. Se aprecia como el hormigón colabora un promedio de un 29% a la resistencia a cortante con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 40%.

Según los datos proporcionados por las galgas, existen tres casos donde la contribución del hormigón a cortante es muy baja: A2A, A2Sa y M1A aunque no presentan ninguna particularidad en común que los diferencie de los demás. En estos tres casos se ha activado rápidamente la contribución del acero y del FRP a cortante. En el caso de la viga A2Sa la contribución del acero y del FRP ha sido muy superior a la de su homóloga A2Sb, hecho que se contrapone con la baja contribución del hormigón. La contribución del hormigón a cortante para el resto de ejemplares oscila entre los 78 y los 126 KN y tiene un valor medio de 94 KN.

La contribución del acero a la resistencia a cortante es menor cuando los ejemplares reforzados con FRP están anclados, excepto para el caso de M2A. Su promedio es de 48 KN con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 38%. Su contribución mínima es de 20 KN y su máxima de 90 KN presentando una gran dispersión.

La contribución del FRP a cortante no es eficiente si éste no está anclado debido a que se produce su desprendimiento prematuro. Al anclarlo la resistencia a cortante del refuerzo aumenta considerablemente y es entonces cuando la contribución de la cuantía de FRP resulta más relevante, observándose que la cuantía más alta de refuerzo FRP (A3B) contribuye a la resistencia de cortante con un valor máximo de 50 KN, la cuantía alta de FRP contribuye entre 25 y 20 KN para la cuantía longitudinal de acero alta y 18 y 31 KN para la media. Finalmente, en la cuantía de FRP más baja apenas contribuía a la resistencia a cortante con valores de 17 y 6 KN correspondientes a las vigas de cuantía longitudinal media de acero. No se ensayaron vigas con cuantía baja de FRP anclado y cuantía alta de armadura longitudinal

La contribución del ala a la resistencia a cortante (hormigón y armadura transversal en la misma) ha sido superior a la esperada. El promedio de la contribución del ala a la resistencia a cortante es de 176 KN, lo que supone un 52% de la resistencia total de cortante con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 26,6%. Con estos datos se corrobora que la aportación del ala a la resistencia a cortante es importante y nada despreciable.

Tabla 5. 31 Contribución del hormigón, del acero, del FRP y del ala a la resistencia de cortante en kN de acuerdo con los datos proporcionados por las galgas extensométricas.

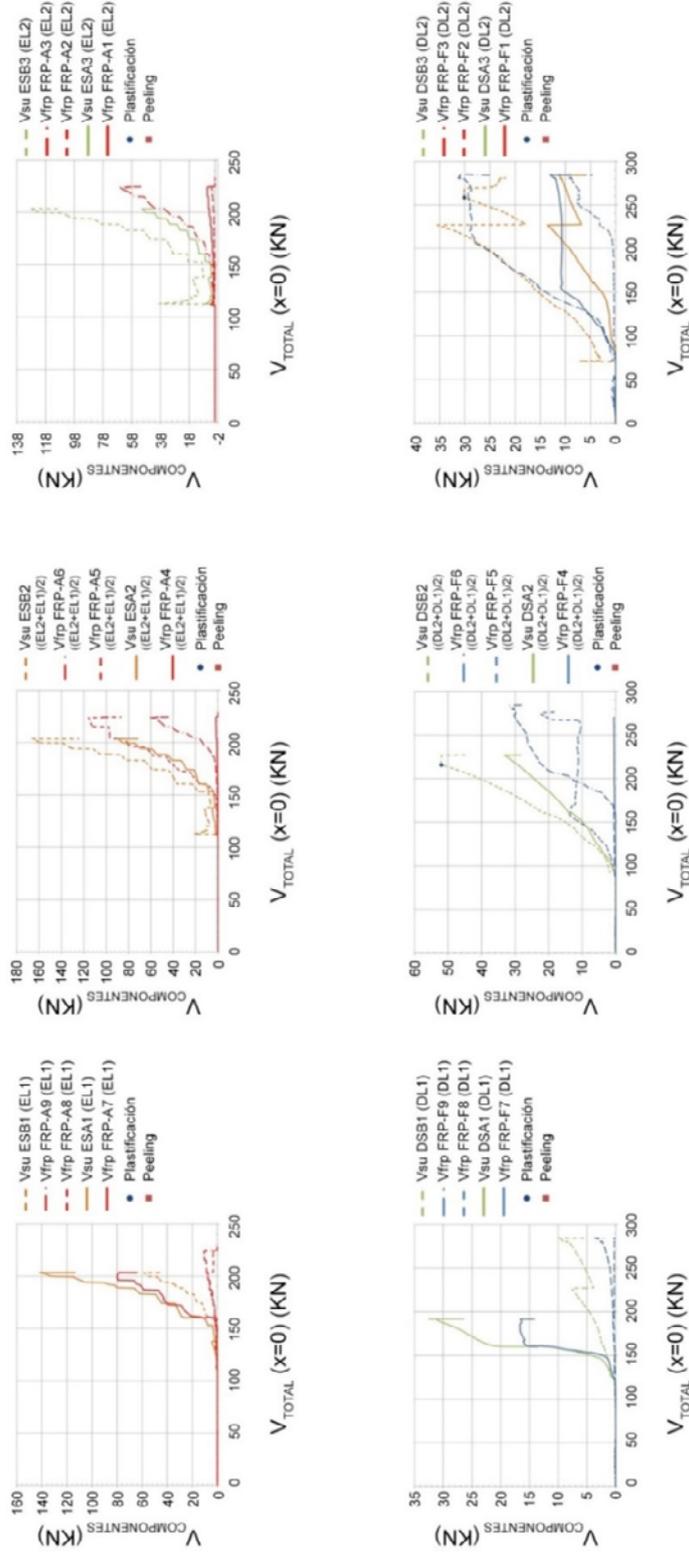
	V_c (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	$V_c+V_s+V_{FRP}$ (KN)	$\Delta V=V_{ala}$ (KN)	$V_{u,exp}$ (KN)
M0Sa	95,3	126,0		221,3	78,6	299,9
M0Sb	77,5	90,7		168,2	141,4	309,6
A0Sa	97,0	102,7		199,7	126,9	326,6
A0Sb	100,0	179,2		279,2	40,5	319,7
M1Sa	91,3	102,8	24,5	218,7	130,7	349,4
M1Sb	105,9	99,8	18,2	223,9	100,8	324,7
A1Sa	126,1	84,1	16,7	226,9	106,9	333,8
A1Sb	118,5	82,6	24,0	225,2	110,6	335,8
M2Sa	114,7	100,2	37,5	252,4	32,5	284,9
M2Sb	112,0	99,8	33,1	244,9	14,2	259,1
A2Sa	55,0	99,2	24,5	178,7	159,4	338,1
A2Sb	124,2	83,4	57,3	264,8	75,6	340,4
M1B	114,8	78,1	34,9	227,8	100,3	328,1
M1A	25,8	39,9	13,1	78,8	257,0	335,8
M2B	80,0	93,2	35,9	209,2	115,8	325,0
M2A	121,3	141,0	62,5	324,8	23,2	348,0
A2B	96,3	116,1	50,1	262,5	139,1	401,6
A2A	23,0	66,6	38,1	127,7	275,3	403,0
A3B	--	--	--	--	--	408,6
A3A	113,7	52,9	99,7	266,3	115,9	382,2

Tabla 5. 32 Porcentaje de la máxima contribución del hormigón, del acero, del FRP y del ala a la resistencia de cortante

	V_c	V_s	V_{FRP}	$V_c+V_s+V_{FRP}$	V_{ala}
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
M0Sa	31,8	42,0	0,0	73,8	26,2
M0Sb	25,0	29,3	0,0	54,3	45,7
A0Sa	29,7	31,4	0,0	61,1	38,9
A0Sb	31,3	56,0	0,0	87,3	12,7
M1Sa	26,1	29,4	7,0	62,6	37,4
M1Sb	32,6	30,7	5,6	69,0	31,0
A1Sa	37,8	25,2	5,0	68,0	32,0
A1Sb	35,3	24,6	7,2	67,1	32,9
M2Sa	40,3	35,2	13,2	88,6	11,4
M2Sb	43,2	38,5	12,8	94,5	5,5
A2Sa	16,3	29,3	7,3	52,9	47,1
A2Sb	36,5	24,5	16,8	77,8	22,2
M1B	35,0	23,8	10,6	69,4	30,6
M1A*	7,7	11,9	3,9	23,5	76,5
M2B	24,6	28,7	11,1	64,4	35,6
M2A	34,9	40,5	17,9	93,3	6,7
A2B	24,0	28,9	12,5	65,4	34,6
A2A	5,7	16,5	9,5	31,7	68,3
A3B	--	--	--	--	--
A3A	29,7	13,8	26,1	69,7	30,3

* Los valores recogidos por las galgas extensométricas no parecen correctos

La Figura 5. 64 muestra las diferentes componentes del cortante último para una de las vigas ensayadas para las tres secciones de estudio. Las figuras de los ejemplares restantes, figuras A3.1 a A3.20, en las que también se detalla la relación $V_{componentes}/V_{TOTAL}$ se muestran en el Anejo 3. $V_{componentes}$ indica la contribución del acero o del FRP a la resistencia de cortante. En estas gráficas se puede observar si plastifica la armadura transversal de acero y si se produce el desprendimiento del refuerzo FRP.



Sección 3

Sección 2

Sección 1

Figura 5. 64 Contribución a cortante del acero y del FRP según las galgas dispuestas en estos materiales respecto al cortante total del ejemplar M1Sa

En la tabla A4.1 del Anejo 4 se resume la contribución a cortante del hormigón, del acero transversal y del refuerzo FRP para tres instantes: rotura, inicio de plastificación de estribos y desprendimiento del refuerzo FRP.

En la Figura 5. 65 se puede observar para la viga A2A, el valor de la contribución del FRP, la suma entre FRP y armadura transversal y el cortante total. El resto de ejemplares con las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero, FRP y ala) se detallan en las figuras A5.2 a la figura A5.11 del Anejo 5.

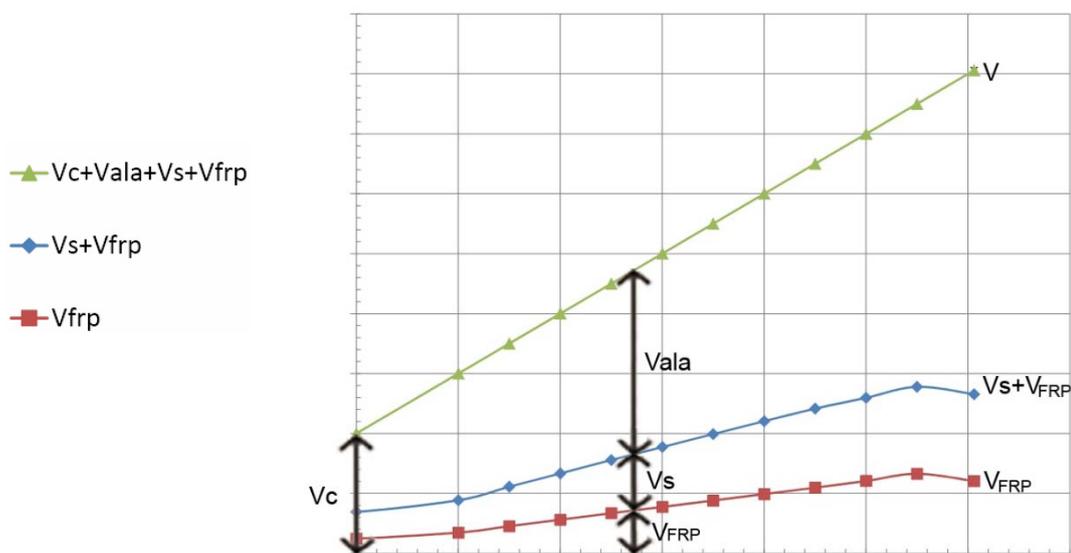


Figura 5. 65. Componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero, FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A2A

5.7. Comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos de las guías de diseño

En este apartado se comparan los cortantes últimos experimentales de cada ejemplar con las predicciones teóricas según la formulación de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (2008) y de acuerdo con la formulación de Zararis et al. (2006) que tiene en cuenta la contribución de las alas para obtener la resistencia a cortante del hormigón. La contribución del FRP se ha obtenido según las recomendaciones o guías de diseño existentes: fib Bulletin 14 (2001), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012), CNR-DT200/2004 (2004) y DAfStb (2013). Estos resultados se muestran en la Tabla 5. 33. Para estos cálculos se ha utilizado como ángulo de inclinación de las bielas comprimidas, el ángulo observado de la fisura crítica y no una estimación teórica como en el apartado 4.2.2.

En la Tabla 5. 34 se comparan los cortantes experimentales de los distintos ejemplares con los valores teóricos obtenidos de la contribución del hormigón a la resistencia a cortante de Zararis et al. (2006) más la contribución del acero transversal y la del refuerzo FRP según el fib Bulletin 14 (2001), ACI440.2R-08 (2008), TR55 (2012), CNR-DT-200/2004 (2004) y DAfStb (2013).

Tabla 5. 33 Comparación del cortante último experimental con las predicciones teóricas

	$V_{u\ EXP}$	V_C+V_S EHE'08 (2008)	V_C+V_S Zararis et al. (2006)	V_{FRP} fib Bull. 14 (2001)	V_{FRP} ACI440.2R- 08 (2008)	V_{FRP} TR55 (2012)	V_{FRP} CNR-DT- 200/2004 (2004)	V_{FRP} DAfStb (2013)
	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)
M0S	304,7	150,1	306,8	-	-	-	-	-
A0S	323,1	160,6	315,7	-	-	-	-	-
M1S	337,1	152,2	299,9	62,4	22,9	8,8	27,7	22,7
A1S	334,8	164,3	330,2	64,6	24,4	8,8	40,4	25,9
M1A	335,8	149,1	306,8	60,2	21,5	8,8	27,3	12,2
M1B	328,1	148,7	282,8	59,9	21,3	8,7	26,2	12,2
M2S	272,0	149,8	282,8	82,4	43,7	17,5	71,3	48,0
A2S	339,3	164,3	330,2	87,7	48,8	17,7	65,7	48,5
M2A	348,0	149,1	306,8	81,7	43,1	17,6	53,8	24,4
M2B	325,0	148,7	282,8	81,3	42,7	17,5	51,7	24,4
A2A	403,0	162,3	315,7	86,0	47,2	17,6	54,8	24,1
A2B	401,6	166,2	360,6	89,4	50,6	17,7	57,1	24,1
A3A	382,2	162,3	315,7	126,4	113,2	42,3	126,1	57,9
A3B	408,6	166,2	360,6	131,4	121,4	42,6	131,4	57,9

La formulación de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (2008) no considera la contribución de las alas a la resistencia a cortante, por lo que la Tabla 5. 33 muestra que cuando se obtiene la contribución del hormigón y del acero según esta instrucción los valores del cortante obtenido son muy inferiores al cortante experimental. Esto conlleva a una evaluación de la resistencia a cortante del lado de la seguridad que puede servir de cara al diseño pero no de cara a la evaluación de la resistencia de las vigas.

La formulación de Zararis et al. (2006) tiene en cuenta la contribución de las alas para obtener la resistencia a cortante del hormigón y se ajusta satisfactoriamente a los resultados experimentales.

Tabla 5. 34 Cortante último experimental y teórico para las diferentes guías de diseño de FRP calculando V_c+V_s de acuerdo con Zararis et al. (2006)

	$V_{u,exp}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$ FIB14	$V_c+V_s+V_{FRP}$ ACI440	$V_c+V_s+V_{FRP}$ TR55	$V_c+V_s+V_{FRP}$ CNR-DT- 200	$V_c+V_s+V_{FRP}$ DAfStb
	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)
M0S	304,7	306,8	306,8	306,8	306,8	306,8
A0S	323,1	315,7	315,7	315,7	315,7	315,7
M1S	337,1	362,3	322,8	308,7	327,6	322,6
A1S	334,8	394,8	354,6	339,0	370,6	356,1
M1A	335,8	367,0	328,3	315,6	334,1	319,0
M1B	328,1	342,7	304,1	291,5	309,0	295,0
M2S	272,0	365,2	326,5	300,3	354,1	330,8
A2S	339,3	417,9	379	347,9	395,9	378,7
M2A	348,0	388,5	349,9	324,4	360,6	331,2
M2B	325,0	364,1	325,5	300,3	334,5	307,2
A2A	403,0	401,7	362,9	333,3	370,5	339,8
A2B	401,6	450,0	411,2	378,3	417,7	384,7
A3A	382,2	442,1	428,9	358,0	441,8	373,6
A3B	408,6	492,0	482,0	403,2	492,0	418,5

En la Tabla 5. 35 se comparan los cocientes entre el valor experimental y el teórico del cortante último. La formulación es conservadora si el cociente es superior a la unidad. Por el contrario, los cocientes menores a la unidad indican una formulación por el lado de la inseguridad.

Tabla 5. 35 Relación entre el cortante último experimental y el cortante último teórico según Zararis más las diferentes formulaciones estudiadas

	$V_{u,exp}/V_{teor}$ fib Bulletin 14 (2001)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ ACI440.2R-08 (2008)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ TR55 (2012)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ CNR-DT- 200/2004 (2004)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ DAfStb (2013)
M1S	0,93	1,04	1,09	1,03	1,04
A1S	0,85	0,94	0,99	0,90	0,94
M1A	0,91	1,02	1,06	1,01	1,05
M1B	0,96	1,08	1,13	1,06	1,11
M2S	0,74	0,83	0,91	0,77	0,82
A2S	0,81	0,90	0,98	0,86	0,90
M2A	0,90	0,99	1,07	0,97	1,05
M2B	0,89	1,00	1,08	0,97	1,06
A2A	1,00	1,11	1,21	1,09	1,19
A2B	0,89	0,98	1,06	0,96	1,04
A3A	0,86	0,89	1,07	0,87	1,02
A3B	0,83	0,85	1,01	0,83	0,98

En la Tabla 5. 36 se indica el promedio y el coeficiente de variación del cociente entre el cortante último experimental y el cortante teórico de la Tabla 5. 35.

Tabla 5. 36 Promedio y coeficiente de variación para las combinaciones Zararis más FIB14, ACI440, TR55, CNR-DT-200/2004 o DAfStb.

	$V_{u,exp}/V_{teor}$ fib Bulletin 14 (2001)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ ACI440.2R-08 (2008)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ TR55 (2012)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ CNR-DT- 200/2004 (2004)	$V_{u,exp}/V_{teor}$ DAfStb (2013)
Promedio	0,88	0,97	1,06	0,94	1,02
Coeficiente de Variación (%)	7,89	9,16	7,28	10,40	9,54

Tal y como se observa, la formulación que proporciona cocientes más cercanos a la unidad es el ACI-440.2R-08 y el DAfStb (2013) combinados con la formulación de Zararis et al. (2006). El

resto de formulaciones también presentan resultados muy cercanos a la unidad. Por último, los coeficientes de variación son bajos y oscilan entre 7 y 10%.

En la Figura 5. 66 se ilustran los valores de la Tabla 5. 34.

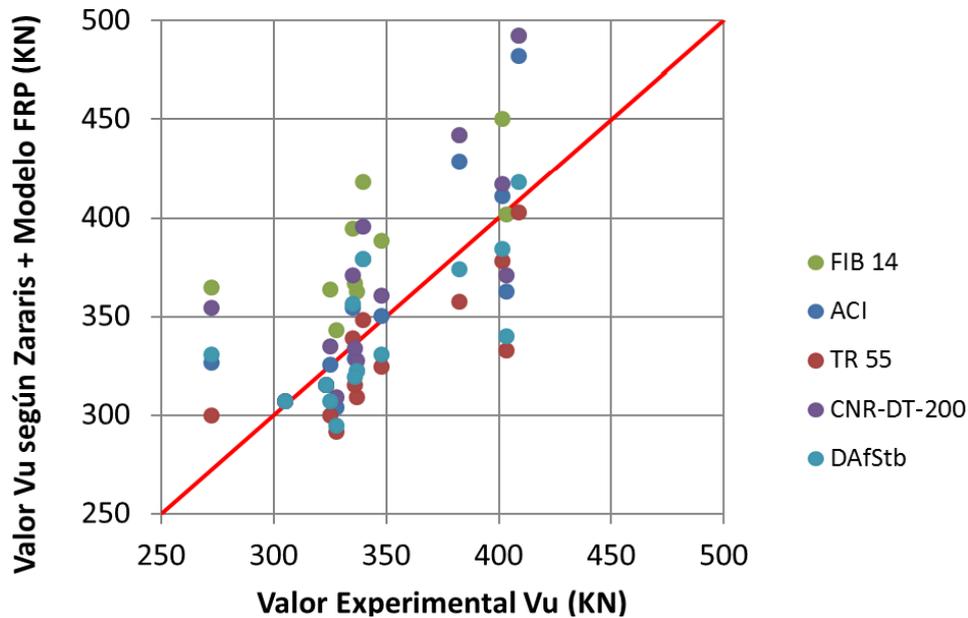


Figura 5. 66. Cortante último experimental respecto al cortante último teórico según Zararis más las diferentes guías de diseño de FRP

5.8. Conclusiones del análisis de resultados

El objetivo principal de esta campaña experimental ha sido cuantificar la contribución del FRP a la resistencia de cortante. Además se ha pretendido ver la influencia de éste y de la cuantía de armadura longitudinal sobre el resto de mecanismos resistentes.

El valor medio del cortante último de las vigas de control con cuantía de armadura longitudinal alta fue de 323,1 kN, y el de las vigas de cuantía longitudinal media fue de 304,7 kN. El aumento de la cuantía de armadura longitudinal aumenta el cortante último debido a tres motivos. El primero es la reducción del ángulo de las bielas de compresión con la horizontal, que implica que la fisura crítica de cortante interseca más cercos e interviene más armadura transversal en la resistencia de cortante. El segundo motivo es que disponiendo de una mayor cuantía de armadura longitudinal, y para el mismo valor de carga aplicada, la fisura del alma está más cerrada y, en consecuencia, existe más *aggregate interlock*. Finalmente el tercer motivo es que a mayor cuantía de armadura longitudinal, la profundidad de la fibra neutra (x) es mayor y la fuerza cortante que resiste la cabeza (donde el hormigón no ha fisurado aún), es también mayor debido a que se integra un área mayor.

Los resultados de los ensayos muestran que el refuerzo a cortante mediante laminados FRP modifica los mecanismos resistentes a cortante en relación a la viga sin refuerzo. Así lo demuestra que la suma de la contribución del hormigón y del acero de la pieza reforzada no coincide con la resistencia a cortante de la pieza sin reforzar. Además se ha visto que en vigas con mayor cuantía de FRP, el cortante último alcanzado era igual e incluso inferior al de la viga de control, no siendo así para vigas con cuantía menor de FRP.

Cuando el FRP está anclado y no se desprende de forma prematura al abrirse la fisura crítica de cortante, la aplicación del refuerzo FRP aumenta el ángulo de las bielas de compresión, por lo que al interceptar menos cercos de cortante se reduce la contribución de la armadura transversal de acero. Sin embargo, esta reducción viene compensada por la aplicación del refuerzo FRP que aumenta la cuantía transversal total.

En los casos en los que los refuerzos externos de FRP no se anclaron, éstos se fueron desprendiendo prematuramente de forma secuencial, empezando por aquellos con una menor longitud de anclaje por encima de la fisura crítica de cortante. Una vez desprendidos los laminados, la tracción que resistía el refuerzo se ha ido transfiriendo a la armadura transversal de acero que si todavía no ha plastificado sigue incrementando su nivel de tensión hasta la plastificación. Si los cercos ya han plastificado se alcanza antes la rotura, puesto que éstos no pueden seguir absorbiendo tracciones. Dado que el número de cercos transversales atravesados por la fisura crítica es menor que en el caso de la viga de control, la carga resistida final acaba siendo menor.

En cuanto al ángulo de inclinación de la fisura crítica, para los casos sin anclaje, el ángulo es similar al de la viga de control, sin embargo éste aumenta en el caso de los refuerzos anclados.

En cualquier caso, si no se produjese el desprendimiento prematuro del FRP, el cortante último hubiese sido mayor. Por este motivo, si el refuerzo a cortante de FRP no está bien anclado resulta poco eficiente para incrementar la resistencia a cortante. Es importante pues evitar este desprendimiento mediante el diseño, la ejecución y la disposición adecuada de anclajes.

En los ensayos reforzados con FRP de la serie M, el cortante último siempre fue mayor que el de las vigas de control excepto para los ejemplares M2Sa y M2Sb, reforzados con cuantía alta de FRP, que resisten un cortante último inferior al de la viga de control M0S.

El instante en que se produce el desprendimiento del refuerzo FRP va vinculado a la cuantía de refuerzo y a su disposición puesto que depende básicamente de la longitud de anclaje de los refuerzos FRP en relación a la fisura crítica. Por ello, una cuantía superior de FRP no necesariamente se traduce en una mayor resistencia a cortante. Así pues, se concluye que existe una cuantía de FRP límite, a partir de la cual disponer más cuantía de refuerzo puede llegar a disminuir la resistencia última de cortante del ejemplar.

En la serie M (cuantía media de armadura longitudinal) se aprecia claramente como el anclaje confiere una mayor rigidez a las vigas, así como el FRP aumenta la ductilidad de todos los ensayos excepto los de cuantía alta de FRP sin anclar, M2S. En las vigas de esta serie con anclaje, la armadura de acero se activa para una carga superior que cuando no hay de anclaje, por lo que anclar el FRP también modifica la contribución del hormigón, V_c , aumentándola.

De acuerdo con la información de las galgas, el FRP de las vigas de la serie M se activa más tarde que el acero, mientras que en la serie A se activa al mismo tiempo. Las vigas de la serie A reforzadas con FRP superan el cortante último de las vigas de control excepto en la viga con cuantía baja de FRP, A1S.

Las vigas con cuantía de acero longitudinal media reforzadas y sin anclar presentan una gran disparidad de resultados, como lo corrobora la diferencia existente entre el ejemplar M1S que incrementa su resistencia última a cortante en un +10,6% respecto al cortante de control y el ejemplar M2S que presenta una reducción del -10,7%. La dispersión se reduce en las vigas de

cuantía de acero longitudinal alta reforzadas sin anclar. Las variaciones en este caso respecto al cortante de control solo oscilan entre el +3,6% y el +5%.

Las vigas reforzadas con anclaje han aumentado la resistencia última a cortante respecto la viga de control entre el +8,9 % para las vigas M1anc y el +24,5 % para las vigas A2anc. Las vigas reforzadas con anclaje y cuantía de acero longitudinal alta (A2anc) presentan mayor resistencia a cortante que las que tienen cuantía de acero longitudinal media para el caso particular de la cuantía 2 de FRP (M2anc). Las primeras incrementan su resistencia en un +24,5%, mientras que las segundas solo en un +10,42%.

Los anclajes tipo A presentan un mayor incremento de la resistencia última de cortante que los anclajes tipo B, excepto para el caso de las vigas con refuerzo continuo.

Para las vigas con anclajes, el aumento de la cuantía de FRP se traduce en un aumento de la resistencia del hormigón a cortante, V_c , puesto que los estribos y los refuerzos FRP se activan para un cortante mayor. Es decir que cuando se aumenta la cuantía de FRP pasando de M1ANC a M2ANC, la contribución del hormigón a cortante, V_c , aumenta de un 21,35 % a un 29,75%, respectivamente. La contribución del hormigón a cortante también aumenta al pasar de A2ANC, con un 14,85%, a A3ANC con un 29,7%.

La contribución promedio del hormigón a cortante, V_c , es de 94 kN, que porcentualmente supone un 29 % del cortante total. La contribución del acero a la resistencia de cortante es menor cuando los ejemplares reforzados con FRP están anclados. Así pues se observa que esta contribución se reduce del 30,05 % en M1S al 17,85 % para los ejemplares anclados M1ANC. La contribución del acero a cortante también se reduce al pasar de M2S con un 36,85 % a los ejemplares anclados M2ANC con un 34,6 %. Esto mismo sucede al pasar de una contribución del acero a cortante del 26,9 % en A2S a un 22,7 % en los ejemplares anclados A2ANC. El promedio de la contribución del acero a la resistencia de cortante es de 48 kN con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 38%. V_{FRP} no es eficiente si no está anclado debido a su desprendimiento prematuro. El promedio de la resistencia a cortante del refuerzo FRP es de 19 kN, lo que supone un 5,5% de la resistencia total con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 53% lo que supone que es la componente de cortante que presenta mayor dispersión. El promedio de la contribución del ala a la resistencia de cortante es de 176 kN, lo que supone un 52% de la resistencia total de cortante con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 26,6%. Con estos datos se corrobora que la aportación del ala a la resistencia de cortante es muy importante y nada despreciable puesto que supone la mitad de la resistencia total.

Las deformaciones de la armadura transversal de acero se reducen al reforzar las vigas mediante laminados de FRP, puesto que las tensiones se reparten entre ambos armados. Este descenso es más acusado si los refuerzos están anclados. No obstante, no se identifica una mayor reducción de las deformaciones de la armadura transversal de acero para mayor cuantía de FRP. Paralelamente, cuando el FRP está anclado absorbe más deformación que su correspondiente estribo y lo descarga.

Para un mismo cortante, las deformaciones del FRP no anclado de la serie A son ligeramente superiores a las de la armadura transversal, mientras que en la serie M son los estribos quienes presentan deformaciones ligeramente superiores.

Las vigas con una cuantía de armadura longitudinal alta presentan deformaciones menores en la armadura longitudinal que las vigas con menor cuantía de armadura.

La predicción del cortante último de las vigas de control según la Instrucción EHE-08 es conservadora, dando valores del orden del 50% del cortante último experimental, puesto que

no considera la contribución de las alas. La formulación de Zararis et al. (2006) para evaluar la resistencia última de cortante de vigas en T sin reforzar se ajusta satisfactoriamente a los ensayos experimentales puesto que tiene en cuenta la contribución de las alas. Si a esta predicción se le añade la contribución del FRP, la relaciones entre el cortante último experimental y el teórico obtenido a partir de las diferentes guías de diseño son próximos a 1,0 y con coeficientes de variación de entre el 7 y el 10%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1. Conclusiones del análisis de los modelos existentes para obtener la contribución del FRP

Las recomendaciones o guías de diseño sobre refuerzos externos con laminados de FRP (fib Bulletin 14 (2001), CNR-DT200/2004 (2004), ACI 440.2R-08 (2008), TR 55 (2012) y DAfStb (2013)) obtienen la capacidad resistente a cortante de los elementos reforzados externamente con FRP sumando las contribuciones del hormigón V_c (si se considera), del acero transversal, V_s , y de las fibras FRP, V_{FRP} .

Se ha analizado el comportamiento de los distintos modelos existentes para evaluar la contribución del FRP a la resistencia a cortante mediante la predicción teórica de los resultados experimentales de una base de datos de ensayos recopilada en esta tesis. Se ha obtenido que los resultados teóricos no se ajustan bien a los resultados experimentales, observándose una gran dispersión.

En este análisis comparativo, el valor experimental de la contribución del FRP a cortante se ha obtenido como la diferencia entre el cortante último experimental de la viga reforzada respecto a la viga de control. Por lo tanto, no se ha considerado que el refuerzo a cortante pueda modificar el ángulo de inclinación de las bielas de compresión, modificando por lo tanto las otras componentes que resisten el cortante último (contribución del hormigón y del acero transversal). La interacción de las diferentes componentes puede resultar una posible causa de la elevada dispersión que presentan los resultados estadísticos cuando se analiza el ratio entre la contribución experimental y teórica del FRP a cortante.

Aplicando a la base de datos la Clasificación de Puntos de Demérito de Collins (2001), se obtiene que el modelo del fib Bulletin 14 (2001) es el que muestra un mejor comportamiento, con una menor puntuación total, pese que es la guía de diseño que proporciona resultados más conservadores.

6.1.2. Conclusiones de la campaña experimental

Con el objetivo de identificar las componentes que intervienen en la resistencia a cortante de elementos reforzados externamente a cortante con laminados FRP, se ha llevado a cabo una campaña experimental de vigas de sección en T, con dos cuantías de armadura pasiva longitudinal, y con varias cuantías de refuerzo externo a cortante (continuo y discontinuo), con laminados FRP como refuerzo externo, anclados y sin anclar.

El cortante último de las vigas de control con cuantía de armadura longitudinal alta es superior al de las de cuantía longitudinal media. Este hecho es debido a que al aumentar la cuantía de armadura longitudinal se produce una reducción del ángulo de inclinación de las bielas de compresión, más armadura transversal colabore a la resistencia de cortante. Disponiendo de una mayor armadura longitudinal, para la misma carga, la fisura del alma está menos abierta y, en consecuencia, existe más *aggregate interlock*. Por último, si aumenta la cuantía de armadura longitudinal, también lo hace la profundidad de la fibra neutra (x) y el cortante resistido por la cabeza comprimida.

Los resultados de los ensayos muestran que el refuerzo a cortante mediante laminados FRP modifica los mecanismos resistentes a cortante en relación a la viga sin refuerzo. Así lo demuestra que la suma de la contribución del hormigón y del acero de la pieza reforzada no coincide con la resistencia a cortante de la pieza sin reforzar. Además se ha visto que en vigas con mayor cuantía de FRP, el cortante último alcanzado era igual e incluso inferior al de la viga de control, no siendo así para vigas con cuantía menor de FRP.

Cuando el FRP está anclado, la aplicación del refuerzo FRP aumenta el ángulo de las bielas de compresión, por lo que inicialmente se reduce la contribución a cortante de la armadura transversal de acero. Sin embargo, esta reducción viene compensada por la aplicación del refuerzo FRP que aumenta la cuantía transversal total.

Si el laminado no está anclado, se produce el desprendimiento prematuro del mismo de forma progresiva en función de las longitudes de anclaje de los refuerzos dispuestos. Por ello, el FRP no llega a alcanzar su resistencia a tracción. En el instante en que se produce el desprendimiento, la tracción resistida por la banda de FRP se redistribuye y se transfiere inmediatamente a la armadura transversal de acero. Al aumentar la tensión de tracción en dicha armadura puede llegar a plastificar. Se ha observado, que en algunos ensayos la carga resistida final es menor que la de la viga de control, probablemente porque al desprenderse el FRP las diferentes componentes restantes no son capaces de verificar equilibrio. Si no se hubiese producido el desprendimiento prematuro del FRP, probablemente la carga última hubiese sido mayor. Por este motivo si el refuerzo FRP no está anclado al alma de las vigas resulta ineficiente para incrementar la resistencia de cortante.

Las vigas reforzadas con anclaje han aumentado, para todos los casos, la resistencia última a cortante respecto al cortante de las vigas de control. Los anclajes tipo A presentan un mayor incremento de la resistencia última de cortante que los anclajes tipo B, excepto para el caso de las vigas con refuerzo continuo.

Las vigas con cuantía de acero longitudinal media reforzadas con FRP sin anclajes presentan una mayor dispersión de resultados que las vigas de cuantía de acero longitudinal alta reforzadas sin anclajes.

Los resultados no muestran que una mayor cuantía de refuerzo FRP se traduzca en el aumento de la resistencia última de cortante para ensayos con la misma cuantía de acero longitudinal con refuerzos de FRP sin anclaje.

En las vigas con FRP anclado, el aumento de la cuantía de FRP se traduce en un aumento de la resistencia del hormigón a cortante, V_c , puesto que los estribos y los refuerzos FRP se activan para un cortante mayor. La contribución del hormigón a cortante, V_c , es inferior para la cuantía longitudinal alta de acero que para la cuantía media.

El FRP de las vigas de la serie M se activa más tarde que el acero, mientras que en la serie A se activa al mismo tiempo. En ambas series el anclaje confiere mayor ductilidad al sistema.

La contribución del hormigón a la resistencia de cortante, V_c , supone un 29 % del cortante total. La contribución del acero a la resistencia de cortante es menor cuando el FRP está anclado. Su promedio es de un 13,5% del cortante total con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 38%. El promedio de la contribución del FRP a la resistencia de cortante es de un 5,5% de la resistencia total con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 53% lo que supone que es la componente de cortante que presenta mayor dispersión, debido al desprendimiento prematuro del laminado. El promedio de la contribución del ala a la resistencia de cortante es un 52% de la resistencia total de cortante con un coeficiente de variación (C.O.V.) del 26,6%.

Las deformaciones de la armadura transversal de acero se reducen al reforzar las vigas mediante laminados de FRP y aun se reducen más si los refuerzos están anclados. No obstante no se identifica una mayor reducción de las deformaciones de la armadura transversal de acero para mayor cuantía de FRP. En las vigas de la serie M se aprecia que las deformaciones de los laminados de FRP anclados son muy superiores respecto a los que no están anclados, mientras que en la serie A no se observa el mismo comportamiento.

Para las vigas de control, la predicción del cortante último según la Instrucción EHE'08 es muy conservadora puesto que no considera la contribución de las alas a la resistencia a cortante. La formulación de Zararis et al. (2006) para evaluar la resistencia última de cortante de vigas en T sin reforzar se ajusta satisfactoriamente a los ensayos experimentales.

Cuando se evalúa la resistencia última de las vigas, si se tiene en cuenta la contribución del ala a la resistencia a cortante mediante la aplicación de la formulación de Zararis et al. (2006) y si se combina con las predicciones de la contribución del FRP a la resistencia a cortante dadas por las recomendaciones o por las guías de diseño existentes (fib Bulletin 14, 2001, ACI 440.2R-08 (2008), TR55 (2012), CNR-DT-200/2004 (2004) y DAfStb (2013)), los resultados a nivel de cortante último son similares. El promedio de los ratios cortante último experimental/cortante último teórico son próximos a 1.0 con un coeficiente de variación entre 7 y 10%. Aplicando la Clasificación de puntos de demérito de Collins, los mejores resultados se obtienen combinando la formulación de Zararis et al. (2006) con la de DAfStb (2013).

6.2 Líneas futuras de investigación

Como consecuencia del trabajo realizado se abren futuras líneas de investigación:

- 1) Desarrollar una formulación para la contribución de la resistencia real de cortante del refuerzo externo de FRP en vigas de hormigón armado que se ajuste correctamente a los resultados de los ensayos experimentales
- 2) Desarrollar una formulación para la evaluación de la resistencia última a cortante de elementos de hormigón armado reforzados con FRP que tenga en cuenta la interacción entre las diferentes componentes: contribución del hormigón, V_c , acero transversal, V_s y refuerzo externo a cortante con FRP, V_{FRP} .
- 3) Estudio de la contribución de las alas a la resistencia a cortante en secciones en T.
- 4) Desarrollar una campaña experimental análoga sin armadura transversal pero con las mismas cuantías de armadura longitudinal para ver la influencia de la misma.
- 5) Analizar otro tipo de configuraciones de refuerzos externos a cortante con FRP que impliquen una mejora de la adherencia, aplicándolos en ranuras realizadas en el hormigón, los llamados (NSM) Near Surface Mounted Reinforcement.
- 6) Estudiar otros tipos de materiales como refuerzo externo a cortante como las aleaciones con memoria de forma, o bien los TRM (Textile Reinforced Mortar)

REFERENCIAS

Referencias

- ACI Committee 440.** *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2008.
- Adhikary, B. B., Mutsuyoshi, H., and Ashraf, M.** "Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage". *ACI Structural Journal*, 2004, 101(5) (pgs: 660–668)
- ASTM D3039 / D3039M-08,** *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008
- Brosens, K., Van Gemert, D.** "Anchoring stresses between concrete and carbon fibre reinforced laminates", *Proceedings 3rd International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, edited by Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, 1997, pp. 271-278
- Carolin, A.** "Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements". Phd thesis. *Luleå University of Technology*, 2003.
- Carolin A, Täljsten B.** "Theoretical study of strengthening for increased shear bearing capacity". *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(6), 497–506.
- Chaallal, O., Nollet, M. J., and Perraton, D.** "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fiber-reinforced-plastic plates: Design guidelines for shear and flexure". *Canadian Journal Civil Engineering*, 1998, 25(4), 692–704.
- Chen, J.; Teng, J.** "Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding". *Construcion Building Materials*. 2003, 17(1), 27-41.
- Chen JF, Teng JG.** "Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding". *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, 2003, p. 27–41.
- CNR-DT200/2004.** *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. Roma: CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, 2004.
- Collins, M. P.** *Evaluation of shear design procedures for concrete structures*. Canadá: CSA Technical Committee on Reinforced Concrete Design, 2001.
- DAfStb.** *Erläuterungen und Beispiele zur DAfStb-Richtlinie "Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung"*. 1. Aufl. ed. Berlin: Beuth, 2013.
- Deniaud C, Cheng R.** "Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets". *ACI Struct J*, 2001, 98, 386–94.
- Deniaud C, Cheng R.** "Reinforced concrete T-beams strengthened in shear with fiber reinforced polymer sheets". *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(4), 302–310.
- Deniaud C, Cheng R.** "Simplified shear design method for concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer sheets". *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(5); 425–433.

- EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural.** Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, 2008, 2008. 978-84-498-0825-8
- Feldman, D.** "Polymeric building materials". UK: *Elsevier Science Publishers Ltd.*, 1989.
- FIB Bulletin 14.** *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Working party of the Task Group 9.3 F.* Suiza: International Federation for Structural Concrete (fib), Julio 2001.
- Hollaway, L.C., and Leeming, M.B.** "Strengthening of Reinforced Concrete Structures using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering". England: *Ed. Cambridge*, 1999.
- Khalifa A, Gold WJ, Nanni A, M.I. AA.** "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members". *J Compos Constr* 1998, 2, 195–202.
- Khalifa A, Nanni A.** "Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites". *Cem Concr Compos*, 200022:165–74. doi:10.1016/S0958-9465(99)00051-7.
- Kim, D. H.** "Composite structures for civil and architectural engineering". London: *E & FN Spon*, 1995.
- Leung, C.K.Y, Zhongfan Chen, Stephen Lee, Mandy Ng, Ming Xu, i Jianmao Tang** "Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips". *Journal of Composites for construction*. Julio-Agosto 2009, 339-341.
- Malek, A. M., Saadatmantesh, H.** "Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber-Reinforced Plastic", *ACI Structural Journal*, 1998, 95 (4), 391-399.
- Malek, A. M., Saadatmantesh, H., Ehsani M. R.** "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End", *ACI Structural Journal*, 1998, 95 (1), 142-152.
- Mofidi A, Chaallal O.** "Shear strengthening of RC beams with EB FRP: Influencing factors and conceptual debonding model". *Journal of composites for construction*, 2011, 15(1), 62-74.
- Mofidi A. Chaallal O.** "End-anchorage systems to prevent EB FRP sheets debonding in shear strengthened RC Beams", *Proceedings of the FRPRCS-11*, eds. Barros and Sena-Cruz, Guimaraes, Portugal, 2013.
- Monti G, Liotta M.** "Tests and design equations for FRP-strengthening in shear". *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4), 799–809.
- Pellegrino C, Modena C.** "Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement". *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2), 104–111.
- Pellegrino C, Modena C.** "Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: Experimental study and analytical modeling". *ACI Structural Journal*, 2006, 103(5), 720–728.
- Täljsten, B.** "Plate bonding, Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics". Doctoral Thesis, *Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering*. 1994

- TR-55.** Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. London, Great Britain. 2012
- Triantafillou T.** "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites". *ACI Structural Journal*, 1998, 95(2), 107–115.
- Triantafillou T, Antonopoulos C.** "Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP". *Journal of composites for construction*, 2000, 4(4), 198–205.
- UNE 83-306-85.** "Ensayos de hormigón: rotura por tracción indirecta: ensayo brasileño. IRANOR, Instituto Español de Normalización, España, 1985.
- UNE-EN 12390-6:2010.** *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.* AEN/CTN 83 - Hormigón, España, 2010. ISBN:91.100.30-10
- UNE-EN ISO 6892-1:2010.** *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.(ISO 6892-1:2009).* AEN/CTN 7-Ensayos de materiales, España, 2010, ISBN 77.040.10.
- Ye, L.P., Lu, X.Z., Chen JF.** "Design proposals for debonding strengths of FRP strengthened RC beams in the Chinese Design Code". Proc., Int. Symp. Bond Behav. FRP Struct. Int. Inst. FRP Constr. (IIFC), Hong Kong, China., 2005.
- Zararis, I.P; Karaveziroglou M.K y Zararis, P.D.** "Shear strength of reinforced concrete T-beams". *ACI Structural Journal*, 2006, 103(5); 693-700.
- Zhang, Z., Hsu, C.-T., and Moren, J.** "Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates". *Journal of composites for construction*, 2004, 8(5), 403–414.

ANEJOS

ANEJO 1

**BASE DE DATOS DE ENSAYOS DE VIGAS
REFORZADAS EXTERNAMENTE A CORTANTE CON
LAMINADOS FRP**

AUTHOR	YEAR	SPECIMEN	SEC	GEOMETRY				CONCRETE				STEEL				MATERIALS				FRP				EXPERIMENTAL RESULTS														
				B _{total} (mm)	B _{web} (mm)	H _{total} (mm)	H _{web} (mm)	H _{flange} (mm)	H _{mid} (mm)	E _c (MPa)	f _{ck} (MPa)	f _{yk} (MPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (MPa)	f _{yk} (MPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (MPa)	A _s (mm ²)	U	C	YES	NO	App	Cont	Anch	t _{FRP} (mm)	w _{FRP} (mm)	s _{FRP} (mm)	E _{FRP} (GPa)	E _{FRP} (MPa)	f _u (MPa)	t _u (ms)	β ₁	V ₀ (mm/s)	V ₀ (mm/s)	Failure mode	FRP failure	shear crack angle
Khalifa & Nanni	2000	BT6	T	380	150	405	100	305	2.0	3.00	43.30	35.30	7.21	7.21	28000	26000	470	730	200000	1124	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	90.00	221.0		Flexural			131.0
Denauid & Cheng	2001	T6NS-C45	T	400	140	600	150	450	2.0	2.74	44.10	36.10	3.28	3.28	34340	34340	470	730	200000	2132	CFRP	U	C	NO	0.11	50.00	100.00	230.00	3400.00	16.62	45	110.10	213.6		Shear	Debonding		103.5
Denauid & Cheng	2001	T6S4-C90	T	400	140	600	150	450	2.0	2.77	44.10	36.10	3.28	3.28	34340	34340	470	730	200000	2124	CFRP	U	C	NO	0.11	50.00	100.00	230.00	3400.00	16.62	45	110.10	213.6		Shear	Debonding		105.9
Denauid & Cheng	2001	T6S4-G90	T	400	140	600	150	450	2.0	2.77	44.10	36.10	3.28	3.28	34340	34340	470	730	200000	2124	CFRP	U	C	NO	0.10	1.00	1.00	177.00	2060.00	16.62	90	187.55	297.5		Shear	Debonding		85.3
Denauid & Cheng	2001	T6S4-Tri	T	400	140	600	150	450	2.0	2.77	44.10	36.10	3.28	3.28	34340	34340	470	730	200000	2124	CFRP	U	C	NO	0.10	1.00	1.00	177.00	2060.00	16.62	90	187.55	297.5		Shear	Debonding		105.9
Denauid & Cheng	2001	T6S2-G90	T	400	140	600	150	450	2.0	2.77	44.10	36.10	3.28	3.28	34340	34340	470	730	200000	2124	CFRP	U	C	NO	0.11	50.00	100.00	230.00	3400.00	16.62	45	110.10	213.6		Shear	Debonding		129.2
Annaiah et al.	2001	J52A	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		131.4
Annaiah et al.	2001	J52B	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		25.2
Annaiah et al.	2001	J52C	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		22.3
Annaiah et al.	2001	J52D	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J53B	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J54A	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J55A	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J55B	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J56A	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Annaiah et al.	2001	J56B	T	660.4	152	381	76.2	305	1.0	2.57	20.68	12.68	1.63	1.63	27358	27358	344	441	200000	253	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	228.00	3790.00	16.62	90	211.90	237.1		Shear	Debonding		23.4
Park et al.	2001	2	R	0	130	250	0	250	1.0	2.75	25.40	17.40	2.01	2.01	29099	29099	488	488	200000	423	CFRP	U	C	NO	0.16	1.00	1.00	240.00	3400.00	14.17	90	25.90	64.5		Shear	Debonding		36.6
Park et al.	2001	3	R	0	130	250	0	250	1.0	2.75	25.40	17.40	2.01	2.01	29099	29099	488	488	200000	423	CFRP	U	C	NO	0.16	1.00	1.00	240.00	3400.00	14.17	90	25.90	64.5		Shear	Debonding		36.6
Park et al.	2001	4	R	0	130	250	0	250	1.0	2.75	25.40	17.40	2.01	2.01	29099	29099	488	488	200000	423	CFRP	U	C	NO	0.16	1.00	1.00	240.00	3400.00	14.17	90	25.90	64.5		Shear	Debonding		36.6
Park et al.	2001	5	R	0	130	250	0	250	1.0	2.75	25.40	17.40	2.01	2.01	29099	29099	488	488	200000	423	CFRP	U	C	NO	0.16	1.00	1.00	240.00	3400.00	14.17	90	25.90	64.5		Shear	Debonding		36.6
Park et al.	2001	6	R	0	130	250	0	250	1.0	2.75	25.40	17.40	2.01	2.01	29099	29099	488	488	200000	423	CFRP	U	C	NO	0.16	1.00	1.00	240.00	3400.00	14.17	90	25.90	64.5		Shear	Debonding		36.6
Li et al.	2002	880_1	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		12.0
Li et al.	2002	880_2	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_3	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_4	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_5	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_6	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_7	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Li et al.	2002	880_8	R	0	130	300	0	300	1.0	3.01	38.00	30.00	2.90	2.90	35000	35000	550	550	210000	402	CFRP	S	C	NO	1.50	1.00	1.00	42.40	470.00	11.08	45	20.50	32.5		Shear	Debonding		25.1
Chahal et al.	2002	G5.5_1L	T	584.2	135	444.5	88.9	356	1.0	1.71	37.90	29.90	2.89	2.89	32810	32810	441	441	203000	1134	CFRP	U	C	NO	0.29	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	289.13	320.3		Rupture			30.5
Chahal et al.	2002	G5.5_2L	T	584.2	135	444.5	88.9	356	1.0	1.71	37.90	29.90	2.89	2.89	32810	32810	441	441	203000	1134	CFRP	U	C	NO	0.29	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	289.13	320.3		Rupture			30.5
Chahal et al.	2002	G8.0_1L	T	584.2	135	444.5	88.9	356	1.0	1.71	37.90	29.90	2.89	2.89	32810	32810	441	441	203000	1134																		

AUTHOR	YEAR	SPECIMEN	GEOMETRY			CONCRETE			STEEL			FRP			EXPERIMENTAL RESULTS																					
			B _{total} (mm)	B _{web} (mm)	H _{total} (mm)	H _{web} (mm)	n _{longitud}	n _{transv}	f _c (MPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (GPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (GPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (GPa)	V ₀	Failure mode	FRP failure angle	V _{FRP-90}																	
Wong & Vecchio	2003	RW0A-1	R	0	305	560	0	1.0	3.87	30.60	22.60	2.40	2.40	26000	26000	441	690	210000	2400	CFRP	S	D	NO	0.84	200.00	300.00	99.09	1090.00	11.00	90	165.50	246.5	81.0	Shear	Shear	9
Wong & Vecchio	2003	RW0A-2	R	0	305	560	0	1.0	4.78	33.90	25.90	2.63	2.63	28000	28000	438	658	205000	3099	CFRP	S	D	NO	0.84	200.00	300.00	99.09	1090.00	11.00	90	160.00	229.5	69.5	Debonding	Shear	
Wong & Vecchio	2003	RW0A-3	R	0	305	560	0	1.0	6.65	51.50	43.50	3.71	3.71	36000	36000	441	690	210000	3885	CFRP	S	D	NO	0.84	200.00	300.00	99.09	1090.00	11.00	90	192.50	218.0	25.5	Debonding	Shear	
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB3-90	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	690	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	90	198.50	231.5	33.0	Rupture	Shear	
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB4-90	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	90	198.50	217.5	19.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB5-90	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	90	198.50	234.5	36.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB6-90	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.36	1.00	1.00	278.00	4900.00	21.49	90	198.50	218.0	19.5	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB7-90-0	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.36	1.00	1.00	278.00	4900.00	21.49	90	198.50	241.0	42.5	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB8-90-0	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.36	1.00	1.00	278.00	4900.00	21.49	90	198.50	227.0	28.5	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB9-45	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	264.5	66.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB10-45	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	273.5	75.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB11-45	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	254.5	56.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB12-45	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.18	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	265.5	67.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB13-45-0	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.36	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	256.5	58.0	Rupture	Shear		
Alagunadaramoorthy et al	2003	SB14-45-0	R	0	230	380	0	1.0	2.78	39.00	31.00	2.96	2.96	33090	33090	414	200000	982	CFRP	W	C	NO	0.36	1.00	1.00	228.00	4900.00	21.49	45	198.50	271.0	72.5	Rupture	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B6	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37173	37173	490	200000	603	CFRP	S	D	NO	0.27	20.00	50.00	230.00	3500.00	15.22	90	45.00	55.5	10.5	Debonding	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B9	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37173	37173	490	200000	603	CFRP	S	D	NO	0.27	20.00	60.00	230.00	3500.00	15.22	45	45.00	58.0	13.0	Debonding	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B10	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37173	37173	490	200000	603	CFRP	S	D	NO	0.27	20.00	60.00	230.00	3500.00	15.22	73	45.00	65.0	20.0	Debonding	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B12	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37173	37173	490	200000	603	CFRP	S	D	NO	0.27	1.00	1.00	230.00	3500.00	15.22	90	45.00	97.5	52.0	Rupture	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B13	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37173	37173	490	200000	603	CFRP	S	C	NO	0.27	1.00	1.00	230.00	3500.00	15.22	45	45.00	94.0	59.5	Rupture	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B15	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37175	37175	490	200000	603	CFRP	S	C	NO	0.27	1.00	1.00	230.00	3500.00	15.22	90	45.00	86.9	41.9	Rupture	Shear		
Abdel-Jaber et al	2003	B16	R	0	150	200	0	2.0	2.34	57.44	49.44	4.04	4.04	37175	37175	490	200000	603	CFRP	U	C	NO	0.54	1.00	1.00	230.00	3500.00	15.22	90	45.00	80.0	35.0	Rupture	Shear		
Zhang	2003	Z11-590	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	90	17.37	87.7	37.4	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z11-545	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	45	47.37	97.0	49.6	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z22-590	R	0	102	228.6	0	2.0	1.29	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	90	72.95	104.5	31.6	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z22-545	R	0	102	228.6	0	2.0	1.29	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	45	72.95	121.4	48.5	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z31-F90	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	C	NO	0.33	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	43.15	77.2	34.0	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z31-FU	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	C	NO	0.66	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	43.15	87.9	44.7	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z31-FU	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	U	C	NO	0.33	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	43.15	96.1	52.9	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z32-F90	R	0	102	228.6	0	2.0	1.29	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	C	NO	0.33	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	87.63	128.8	41.1	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z32-FU	R	0	102	228.6	0	2.0	1.29	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	C	NO	0.66	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	87.63	133.4	45.8	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z34-R45	R	0	102	228.6	0	2.0	1.29	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	C	NO	0.33	1.00	1.00	73.10	960.00	13.13	90	87.63	127.7	40.0	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z31-SCR45	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	45	46.04	59.8	13.8	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z23-SCR45	R	0	102	228.6	0	2.0	1.31	50.47	42.47	3.65	3.65	35760	35760	400	200000	507	CFRP	S	D	NO	1.20	40.00	101.60	165.00	2800.00	16.97	45	47.37	82.7	35.4	Debonding	Shear		
Zhang	2003	Z31-FCRU	R	0	102	228.6	0	1.0	1.94	50.47	42.47	3.65	3.65																							

AUTHOR	YEAR	SPECIMEN	SEC	GEOMETRY				CONCRETE				STEEL				MATERIALS				FRP				EXPERIMENTAL RESULTS					
				B _{1/4} (mm)	H _{total} (mm)	H _{steel} (mm)	H _{steel} (mm)	H _{steel} (mm)	f _c (MPa)	f _{cs,exp} (MPa)	E _c (MPa)	E _{c,exp} (MPa)	f _y (MPa)	f _{s,exp} (MPa)	E _s (MPa)	E _{s,exp} (MPa)	f _{yk} (MPa)	f _{yk,exp} (MPa)	ε _{yk}	ε _{yk,exp}	β ₁	β ₂	ε _{yk}	ε _{yk,exp}	Failure mode	FRP failure angle	shear crack angle	V _{FRP,exp}	
Kachalev & Barnes	2003	CI	R	0	152	152	0	0.00	27.50	19.50	2.17	1.17	30821	0	CFRP	S	C	NO	0.44	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	25	19.1		
Kachalev & Barnes	2003	CI'	R	0	152	152	0	0.00	27.50	19.50	2.17	1.17	30821	0	CFRP	S	C	NO	1.00	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	25	18.2		
Kage-Abu, Lee, Tomosawa	2003	CI	R	0	200	200	0	0.00	39.20	31.20	2.97	2.97	34687	0	CFRP	S	C	NO	1.00	1.00	1.00	230.00	3500.00	15.22	90	25	34.1		
Kage-Abu, Lee, Tomosawa	2003	SR1210	R	0	200	200	0	0.00	39.20	31.20	2.97	2.97	34687	0	CFRP	S	C	NO	0.10	1.00	1.00	284.00	3430.00	12.08	90	45	31.1		
Kage-Abu, Lee, Tomosawa	2003	SR1214	R	0	200	200	0	0.00	39.20	31.20	2.97	2.97	34687	0	CFRP	S	C	NO	0.10	1.00	1.00	284.00	3430.00	12.08	90	45	22.4		
Kage-Abu, Lee, Tomosawa	2003	SR1218	R	0	200	200	0	0.00	39.20	31.20	2.97	2.97	34687	0	CFRP	S	C	NO	0.10	1.00	1.00	284.00	3430.00	12.08	90	45	24.7		
Maiek, Saaditmanesh	2003	SCD3-23	R	0	127	203	0	0.00	36.50	28.50	2.80	2.80	33872	0	CFRP	S	C	NO	1.98	1.00	1.00	200.00	105.00	0.53	45	35	23.7		
Adhikary et al.	2004	CI	R	0	300	300	0	2.0	3.94	45.92	37.92	3.39	3.39	34760	207000	3217	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	112.00	165.0
Adhikary et al.	2004	C2	R	0	300	300	0	2.0	3.94	50.10	42.10	3.63	3.63	35680	207000	3217	CFRP	U	C	YES	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	112.00	228.5
Adhikary et al.	2004	C3	R	0	300	300	0	2.0	3.94	50.21	42.21	3.64	3.64	35700	207000	3217	CFRP	U	C	YES	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	112.00	237.5
Adhikary et al.	2004	C4	R	0	300	300	0	2.0	3.94	51.64	43.64	3.72	3.72	36000	207000	3217	CFRP	W	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	112.00	250.0
Adhikary et al.	2004	A-1	R	0	300	300	0	2.0	3.94	48.56	40.56	3.54	3.54	35340	207000	3217	AFRP	U	C	NO	0.29	1.00	1.00	120.00	2000.00	16.67	90	112.00	155.0
Adhikary et al.	2004	A-2	R	0	300	300	0	2.0	3.94	50.98	42.98	3.68	3.68	35860	207000	3217	AFRP	U	C	YES	0.29	1.00	1.00	120.00	2000.00	16.67	90	112.00	200.0
Adhikary et al.	2004	A-3	R	0	300	300	0	2.0	3.94	52.29	45.29	3.81	3.81	36340	207000	3217	AFRP	U	C	YES	0.29	1.00	1.00	120.00	2000.00	16.67	90	112.00	245.0
Adhikary et al.	2004	A-4	R	0	300	300	0	2.0	3.94	52.85	44.85	3.79	3.79	36250	207000	3217	AFRP	W	C	NO	0.17	1.00	1.00	120.00	2000.00	16.67	90	112.00	244.0
Adhikary, Mutsuyoshi	2004	B-4	R	0	150	200	0	1.0	3.00	31.50	23.50	2.46	2.46	36253	683	CFRP	S	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	21.1		
Adhikary, Mutsuyoshi	2004	B-5	R	0	150	200	0	1.0	3.00	31.00	23.00	2.43	2.43	36254	683	CFRP	S	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	21.1		
Adhikary, Mutsuyoshi	2004	B-6	R	0	150	200	0	1.0	3.00	34.00	26.00	2.63	2.63	36255	683	CFRP	S	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	21.1		
Adhikary, Mutsuyoshi	2004	B-7	R	0	150	200	0	1.0	3.00	34.40	26.40	2.66	2.66	36256	683	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3400.00	14.78	90	21.1		
Adhikary, Mutsuyoshi	2004	B-8	R	0	150	200	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_3	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	243.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_4	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	253.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_5	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	246.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_6	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	230.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_7	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_8	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	230.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_9	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.44	40.00	120.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_10	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.44	40.00	120.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	243.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_11	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_12	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_13	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_14	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_15	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_16	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_17	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_18	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_19	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_20	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_21	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_22	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	90	176.75	240.0
Feng, Xue Song et al.	2004	SBI_23	R	0	150	360	0	2.0	2.88	40.80	32.80	3.07	3.07	33000	205000	2011	CFRP	U	C	NO	0.22	1.00	1.00	235.00	4200.00	17.87	9		

AUTHOR	YEAR	SPECIMEN	GEOMETRY				MATERIALS										EXPERIMENTAL RESULTS																		
			B_{total} (mm)	B_{web} (mm)	H_{total} (mm)	H_{web} (mm)	H_{web}^* (mm)	n^*	α	$f_{c,exp}$ (MPa)	$f_{c,cal}$ (MPa)	$E_{c,exp}$ (MPa)	$E_{c,cal}$ (MPa)	E_s (MPa)	$f_{t,exp}$ (MPa)	$f_{t,cal}$ (MPa)	A_s (mm ²)	Typo	Appli	Cont	Anch.	t_{exp} (mm)	t_{cal} (mm)	W_{exp} (mm)	W_{cal} (mm)	f_{FRP} (MPa)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (mm)	β_1	β_2	V_u (KN)	Failure mode	FRP failure angle	shear crack angle	V_u (KN)
Boussethem,Chaailal	2006	DBS12L	T	270	95	220	55	1.0	1.48	33.50	25.50	2.60	2.60	31620	31620	420	1750000	604	CFRP	U	C	NO	0.13	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	149.72	166.7	Shear	Shear	39	17.0
Boussethem,Chaailal	2006	SBS01L	T	270	95	220	55	1.0	2.89	33.50	25.50	2.60	2.60	31620	31620	420	1750000	604	CFRP	U	C	NO	0.07	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	36.13	59.4	Shear	Shear	39	23.2
Boussethem,Chaailal	2006	SBS02L	T	270	95	220	55	1.0	2.89	33.50	25.50	2.60	2.60	31620	31620	420	1750000	604	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	36.13	68.5	Shear	Shear	38	34.4
Boussethem,Chaailal	2006	SBS11L	T	270	95	220	55	1.0	2.96	33.50	25.50	2.60	2.60	31620	31620	420	1750000	604	CFRP	U	C	NO	0.07	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	92.96	95.8	Shear	Shear	38	2.8
Boussethem,Chaailal	2006	SBS12L	T	270	95	220	55	1.0	2.96	33.50	25.50	2.60	2.60	31620	31620	420	1750000	604	CFRP	U	C	NO	0.13	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	92.96	105.1	Shear	Shear	38	12.2
Boussethem,Chaailal	2006	DB_05_05L	T	208	152	406	102	1.0	1.53	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.06	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	178.20	268.2	Shear	Shear	38	90.0
Boussethem,Chaailal	2006	DB_50_1L	T	508	152	406	102	1.0	1.53	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	178.20	285.5	Shear	Shear	38	107.3
Boussethem,Chaailal	2006	DB_50_2L	T	508	152	406	102	1.0	1.53	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	178.20	289.0	Shear	Shear	38	110.8
Boussethem,Chaailal	2006	DB_51_1L	T	508	152	406	102	1.0	1.56	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	323.50	355.5	Shear	Shear	38	32.0
Boussethem,Chaailal	2006	DB_51_2L	T	508	152	406	102	1.0	1.56	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	323.50	357.7	Shear	Shear	38	34.2
Boussethem,Chaailal	2006	DB_52_1L	T	508	152	406	102	1.0	1.56	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	331.70	389.7	Shear	Shear	38	58.0
Boussethem,Chaailal	2006	DB_52_2L	T	508	152	406	102	1.0	1.56	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	331.70	404.8	Shear	Shear	38	73.1
Boussethem,Chaailal	2006	SB_50_05L	T	508	152	406	102	1.0	3.05	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.06	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	81.20	102.4	Shear	Shear	22	21.2
Boussethem,Chaailal	2006	SB_50_1L	T	508	152	406	102	1.0	3.05	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	81.20	120.0	Shear	Shear	22	38.8
Boussethem,Chaailal	2006	SB_50_2L	T	508	152	406	102	1.0	3.05	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	81.20	121.7	Shear	Shear	22	40.5
Boussethem,Chaailal	2006	SB_51_05L	T	508	152	406	102	1.0	3.12	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.06	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	262.80	282.0	Shear	Shear	38	19.2
Boussethem,Chaailal	2006	SB_51_1L	T	508	152	406	102	1.0	3.12	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	131.40	255.0	Shear	Shear	38	123.6
Boussethem,Chaailal	2006	SB_51_2L	T	508	152	406	102	1.0	3.12	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	262.80	267.2	Shear	Shear	38	4.4
Boussethem,Chaailal	2006	SB_52_1L	T	508	152	406	102	1.0	3.12	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.11	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	295.10	309.4	Flexural	Flexural	38	14.3
Boussethem,Chaailal	2006	SB_52_2L	T	508	152	406	102	1.0	3.12	25.00	17.00	1.98	1.98	28960	28960	470	2000000	1995	CFRP	U	C	NO	0.21	1.00	1.00	231.00	3650.00	15.80	90	295.10	297.2	Flexural	Flexural	38	2.1
Jayaprakash et al	2006	TT1-1	T	400	120	340	100	2.0	2.51	38.00	30.00	2.90	2.90	32840	32840	470	2000000	628	CFRP	U	D	NO	0.09	80.00	150.00	230.00	3800.00	16.52	90	87.33	120.6	Flexural	Flexural	33	33.3
Jayaprakash et al	2006	TT1-1	T	400	120	340	100	2.0	2.51	38.00	30.00	2.90	2.90	32840	32840	470	2000000	628	CFRP	U	D	NO	0.09	80.00	150.00	230.00	3800.00	16.52	90	87.33	140.5	Flexural	Flexural	33	53.2
Jayaprakash et al	2006	TT1-2	T	400	120	340	100	2.0	2.52	38.00	30.00	2.90	2.90	32840	32840	470	2000000	628	CFRP	U	D	NO	0.09	80.00	150.00	230.00	3800.00	16.52	90	87.33	133.9	Flexural	Flexural	33	46.6
Jayaprakash et al	2006	TS1-1	T	400	120	340	100	2.0	2.52	38.00	30.00	2.90	2.90	32840	32840	470	2000000	628	CFRP	U	D	NO	0.09	80.00	150.00	230.00	3800.00	16.52	90	67.37	94.0	Flexural	Flexural	30	26.6
Jayaprakash et al	2006	TS1-2	T	400	120	340	100	2.0	2.52	38.00	30.00	2.90	2.90	32840	32840	470	2000000	628	CFRP	U	D	NO	0.09	80.00	150.00	230.00	3800.00	16.52	90	67.37	80.7	Flexural	Flexural	30	13.3
De Lorenzis, Rizzo	2006	UW90	R	0	700	210	0	2.0	3.00	9.30	71.30	7.31	3.07373	30773	545	2100000	1571	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	730.00	3430.00	14.91	90	172.15	141.5	Debonding	Debonding	45	55.8	
Dias and Barros	2006	A10_M	R	0	150	300	0	2.0	2.14	49.20	41.20	3.58	3.58	35480	35480	464	2100000	314	CFRP	U	D	NO	0.33	25.00	190.00	390.00	3000.00	7.69	90	50.20	61.0	Debonding	Debonding	45	10.8
Dias and Barros	2006	A12_M	R	0	150	300	0	2.0	2.15	49.20	41.20	3.58	3.58	35480	35480	464	2100000	452	CFRP	U	D	NO	0.33	25.00	95.00	390.00	3000.00	7.69	90	58.25	89.8	Debonding	Debonding	45	31.5
Dias and Barros	2006	B10_M	R	0	150	150	0	2.0	2.31	56.20	48.20	3.97	3.97	36930	36930	464	2100000	314	CFRP	U	D	NO	0.33	25.00	80.00	390.00	3000.00	7.69	90	37.01	55.6	Debonding	Debonding	45	18.6
Dias and Barros	2006	B12_M	R	0	150	150	0	2.0	2.33	56.20	48.20	3.97	3.97	36930	36930	464	2100000	452	CFRP	U	D	NO	0.33	25.00	40.00	390.00	3000.00	7.69	90	37.85	71.5	Debonding	Debonding	45	33.7
Pellegrino & Modena	2006	A-U1-C-17	R	0	150	300	0	2.0	3.00	41.40	33.40	3.11	3.11	33690	33690	534	2000000	2827	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3450.00	15.00	90	185.20	238.1	Debonding	Debonding	45	52.9
Pellegrino & Modena	2006	A-U1-C-20	R	0	150	300	0	2.0	3.00	41.40	33.40	3.11	3.11	33690	33690	534	2000000	2827	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3450.00	15.00	90	185.20	225.0	Debonding	Debonding	45	55.8
Pellegrino & Modena	2006	A-U1-S-17	R	0	150	300	0	1.0	3.00	41.40	33.40	3.11	3.11	33690	33690	534	2000000	2827	CFRP	U	C	NO	0.17	1.00	1.00	230.00	3450.00	15.00	90	198.10	247.3	Debonding	Debonding	45	49.2
Pellegrino & Modena	2006	A-U																																	

AUTHOR	YEAR	SPECIMEN	SEC	GEOMETRY				CONCRETE				STEEL				FRP				EXPERIMENTAL RESULTS													
				B _{top} (mm)	H _{top} (mm)	H _{mid} (mm)	H _{bot} (mm)	E _c (MPa)	f _{ck} (MPa)	f _{yk} (MPa)	E _s (MPa)	Failure mode	FRP failure angle	V _{FRP} (kN)																			
Pujol et al.	2011	SEM3b	T	600	200	550	150	400	1.0	297	39.00	25.00	3.70	31632	31632	572	200000	1608	CFRP	U	D	NO	0.20	100.00	240.00	230.00	3450.00	15.00	90	318.45	348.0	29.5	
Pujol et al.	2011	SEM5a	T	600	200	550	150	400	1.0	297	42.82	25.00	3.59	33609	33609	572	200000	1608	CFRP	U	D	NO	0.20	50.00	240.00	230.00	3450.00	15.00	90	326.37	349.4	23.1	
Pujol et al.	2011	SEA2a	T	600	200	550	150	400	1.0	300	44.68	25.00	3.84	33060	33060	572	200000	2061	CFRP	U	U	NO	0.20	100.00	240.00	230.00	3450.00	15.00	90	336.27	403.0	66.7	
Pujol et al.	2011	SEA2b	T	600	200	550	150	400	1.0	300	44.68	25.00	3.84	33060	33060	572	200000	2061	CFRP	U	C	NO	0.20	1.00	1.00	230.00	3450.00	15.00	90	336.27	382.2	45.9	
Pujol et al.	2011	SEA4b	T	600	200	550	150	400	1.0	300	41.24	25.00	4.55	455	27004	27004	572	200000	2061	CFRP	U	D	NO	0.20	100.00	240.00	230.00	3450.00	15.00	90	329.19	340.4	11.2
Pujol et al.	2011	SEF5a	T	600	200	550	150	400	1.0	3.00	49.64	25.00	4.55	455	36913	36913	572	200000	2061	CFRP	U	D	NO	0.20	100.00	240.00	230.00	3450.00	15.00	90	345.86	401.6	55.8
Pujol et al.	2011	SEF5b	T	600	200	550	150	400	1.0	3.00	49.64	25.00	4.55	455	36913	36913	572	200000	2061	CFRP	U	C	NO	0.20	1.00	1.00	230.00	3450.00	15.00	90	345.86	408.6	62.8
Alizate et al.	2011	U9055-a(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	36.95	28.95	2.83	2.83	32562	32562	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.29	300.00	500.00	240.00	4000.00	16.67	90	148.99	246.7	45
Alizate et al.	2011	U9055-b(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	28.01	20.01	2.21	2.21	29965	29965	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.29	300.00	500.00	240.00	4000.00	16.67	90	135.85	235.9	45
Alizate et al.	2011	U9055-c(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	24.47	16.47	1.94	1.94	28775	28775	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.29	300.00	500.00	240.00	4000.00	16.67	90	129.86	217.0	45
Alizate et al.	2011	U9053-b(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	22.64	14.64	1.80	1.80	28112	28112	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.29	1.00	1.00	240.00	4000.00	16.67	90	126.54	243.3	45
Alizate et al.	2011	U9053-c(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.29	300.00	500.00	240.00	4000.00	16.67	90	140.02	206.2	45
Alizate et al.	2011	U9053-d(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.29	300.00	500.00	240.00	4000.00	16.67	90	140.02	207.4	45
Alizate et al.	2011	U9053-e(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	22.58	14.58	1.79	1.79	28089	28089	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	136.43	203.6	45
Alizate et al.	2011	U9053-f(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	28.01	20.01	2.21	2.21	29965	29965	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-g(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	28.01	20.01	2.21	2.21	29965	29965	500	200000	1885	CFRP	U	D	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-h(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-i(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-j(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-k(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-l(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-m(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-n(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-o(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-p(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-q(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-r(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-s(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-t(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-u(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-v(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-w(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-x(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-y(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-z(L)	R	0	250	420	0	0	1.0	3.58	20.50	12.50	1.62	1.62	27287	27287	500	200000	1885	CFRP	U	C	NO	0.18	300.00	500.00	240.00	3800.00	15.83	90	135.85	231.8	45
Alizate et al.	2011	U9053-aa(L)	R	0																													

AUTHOR	YEAR, SPECIMEN	GEOMETRY										MATERIALS										FRP										EXPERIMENTAL RESULTS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8	SE9	SE10	SE11	SE12	SE13	SE14	SE15	SE16	SE17	SE18	SE19	SE20	SE21	SE22	SE23	SE24	SE25	SE26	SE27	SE28	SE29	SE30	SE31	SE32	SE33	SE34	SE35	SE36	SE37	SE38	SE39	SE40	SE41	SE42	SE43	SE44	SE45	SE46	SE47	SE48	SE49	SE50	SE51	SE52	SE53	SE54	SE55	SE56	SE57	SE58	SE59	SE60	SE61	SE62	SE63	SE64	SE65	SE66	SE67	SE68	SE69	SE70	SE71	SE72	SE73	SE74	SE75	SE76	SE77	SE78	SE79	SE80	SE81	SE82	SE83	SE84	SE85	SE86	SE87	SE88	SE89	SE90	SE91	SE92	SE93	SE94	SE95	SE96	SE97	SE98	SE99	SE100	SE101	SE102	SE103	SE104	SE105	SE106	SE107	SE108	SE109	SE110	SE111	SE112	SE113	SE114	SE115	SE116	SE117	SE118	SE119	SE120	SE121	SE122	SE123	SE124	SE125	SE126	SE127	SE128	SE129	SE130	SE131	SE132	SE133	SE134	SE135	SE136	SE137	SE138	SE139	SE140	SE141	SE142	SE143	SE144	SE145	SE146	SE147	SE148	SE149	SE150	SE151	SE152	SE153	SE154	SE155	SE156	SE157	SE158	SE159	SE160	SE161	SE162	SE163	SE164	SE165	SE166	SE167	SE168	SE169	SE170	SE171	SE172	SE173	SE174	SE175	SE176	SE177	SE178	SE179	SE180	SE181	SE182	SE183	SE184	SE185	SE186	SE187	SE188	SE189	SE190	SE191	SE192	SE193	SE194	SE195	SE196	SE197	SE198	SE199	SE200	SE201	SE202	SE203	SE204	SE205	SE206	SE207	SE208	SE209	SE210	SE211	SE212	SE213	SE214	SE215	SE216	SE217	SE218	SE219	SE220	SE221	SE222	SE223	SE224	SE225	SE226	SE227	SE228	SE229	SE230	SE231	SE232	SE233	SE234	SE235	SE236	SE237	SE238	SE239	SE240	SE241	SE242	SE243	SE244	SE245	SE246	SE247	SE248	SE249	SE250	SE251	SE252	SE253	SE254	SE255	SE256	SE257	SE258	SE259	SE260	SE261	SE262	SE263	SE264	SE265	SE266	SE267	SE268	SE269	SE270	SE271	SE272	SE273	SE274	SE275	SE276	SE277	SE278	SE279	SE280	SE281	SE282	SE283	SE284	SE285	SE286	SE287	SE288	SE289	SE290	SE291	SE292	SE293	SE294	SE295	SE296	SE297	SE298	SE299	SE300	SE301	SE302	SE303	SE304	SE305	SE306	SE307	SE308	SE309	SE310	SE311	SE312	SE313	SE314	SE315	SE316	SE317	SE318	SE319	SE320	SE321	SE322	SE323	SE324	SE325	SE326	SE327	SE328	SE329	SE330	SE331	SE332	SE333	SE334	SE335	SE336	SE337	SE338	SE339	SE340	SE341	SE342	SE343	SE344	SE345	SE346	SE347	SE348	SE349	SE350	SE351	SE352	SE353	SE354	SE355	SE356	SE357	SE358	SE359	SE360	SE361	SE362	SE363	SE364	SE365	SE366	SE367	SE368	SE369	SE370	SE371	SE372	SE373	SE374	SE375	SE376	SE377	SE378	SE379	SE380	SE381	SE382	SE383	SE384	SE385	SE386	SE387	SE388	SE389	SE390	SE391	SE392	SE393	SE394	SE395	SE396	SE397	SE398	SE399	SE400	SE401	SE402	SE403	SE404	SE405	SE406	SE407	SE408	SE409	SE410	SE411	SE412	SE413	SE414	SE415	SE416	SE417	SE418	SE419	SE420	SE421	SE422	SE423	SE424	SE425	SE426	SE427	SE428	SE429	SE430	SE431	SE432	SE433	SE434	SE435	SE436	SE437	SE438	SE439	SE440	SE441	SE442	SE443	SE444	SE445	SE446	SE447	SE448	SE449	SE450	SE451	SE452	SE453	SE454	SE455	SE456	SE457	SE458	SE459	SE460	SE461	SE462	SE463	SE464	SE465	SE466	SE467	SE468	SE469	SE470	SE471	SE472	SE473	SE474	SE475	SE476	SE477	SE478	SE479	SE480	SE481	SE482	SE483	SE484	SE485	SE486	SE487	SE488	SE489	SE490	SE491	SE492	SE493	SE494	SE495	SE496	SE497	SE498	SE499	SE500	SE501	SE502	SE503	SE504	SE505	SE506	SE507	SE508	SE509	SE510	SE511	SE512	SE513	SE514	SE515	SE516	SE517	SE518	SE519	SE520	SE521	SE522	SE523	SE524	SE525	SE526	SE527	SE528	SE529	SE530	SE531	SE532	SE533	SE534	SE535	SE536	SE537	SE538	SE539	SE540	SE541	SE542	SE543	SE544	SE545	SE546	SE547	SE548	SE549	SE550	SE551	SE552	SE553	SE554	SE555	SE556	SE557	SE558	SE559	SE560	SE561	SE562	SE563	SE564	SE565	SE566	SE567	SE568	SE569	SE570	SE571	SE572	SE573	SE574	SE575	SE576	SE577	SE578	SE579	SE580	SE581	SE582	SE583	SE584	SE585	SE586	SE587	SE588	SE589	SE590	SE591	SE592	SE593	SE594	SE595	SE596	SE597	SE598	SE599	SE600	SE601	SE602	SE603	SE604	SE605	SE606	SE607	SE608	SE609	SE610	SE611	SE612	SE613	SE614	SE615	SE616	SE617	SE618	SE619	SE620	SE621	SE622	SE623	SE624	SE625	SE626	SE627	SE628	SE629	SE630	SE631	SE632	SE633	SE634	SE635	SE636	SE637	SE638	SE639	SE640	SE641	SE642	SE643	SE644	SE645	SE646	SE647	SE648	SE649	SE650	SE651	SE652	SE653	SE654	SE655	SE656	SE657	SE658	SE659	SE660	SE661	SE662	SE663	SE664	SE665	SE666	SE667	SE668	SE669	SE670	SE671	SE672	SE673	SE674	SE675	SE676	SE677	SE678	SE679	SE680	SE681	SE682	SE683	SE684	SE685	SE686	SE687	SE688	SE689	SE690	SE691	SE692	SE693	SE694	SE695	SE696	SE697	SE698	SE699	SE700	SE701	SE702	SE703	SE704	SE705	SE706	SE707	SE708	SE709	SE710	SE711	SE712	SE713	SE714	SE715	SE716	SE717	SE718	SE719	SE720	SE721	SE722	SE723	SE724	SE725	SE726	SE727	SE728	SE729	SE730	SE731	SE732	SE733	SE734	SE735	SE736	SE737	SE738	SE739	SE740	SE741	SE742	SE743	SE744	SE745	SE746	SE747	SE748	SE749	SE750	SE751	SE752	SE753	SE754	SE755	SE756	SE757	SE758	SE759	SE760	SE761	SE762	SE763	SE764	SE765	SE766	SE767	SE768	SE769	SE770	SE771	SE772	SE773	SE774	SE775	SE776	SE777	SE778	SE779	SE780	SE781	SE782	SE783	SE784	SE785	SE786	SE787	SE788	SE789	SE790	SE791	SE792	SE793	SE794	SE795	SE796	SE797	SE798	SE799	SE800	SE801	SE802	SE803	SE804	SE805	SE806	SE807	SE808	SE809	SE810	SE811	SE812	SE813	SE814	SE815	SE816	SE817	SE818	SE819	SE820	SE821	SE822	SE823	SE824	SE825	SE826	SE827	SE828	SE829	SE830	SE831	SE832	SE833	SE834	SE835	SE836	SE837	SE838	SE839	SE840	SE841	SE842	SE843	SE844	SE845	SE846	SE847	SE848	SE849	SE850	SE851	SE852	SE853	SE854	SE855	SE856	SE857	SE858	SE859	SE860	SE861	SE862	SE863	SE864	SE865	SE866	SE867	SE868	SE869	SE870	SE871	SE872	SE873	SE874	SE875	SE876	SE877	SE878	SE879	SE880	SE881	SE882	SE883	SE884	SE885	SE886	SE887	SE888	SE889	SE890	SE891	SE892	SE893	SE894	SE895	SE896	SE897	SE898	SE899	SE900	SE901	SE902	SE903	SE904	SE905	SE906	SE907	SE908	SE909	SE910	SE911	SE912	SE913	SE914	SE915	SE916	SE917	SE918	SE919	SE920	SE921	SE922	SE923	SE924	SE925	SE926	SE927	SE928	SE929	SE930	SE931	SE932	SE933	SE934	SE935	SE936	SE937	SE938	SE939	SE940	SE941	SE942	SE943	SE944	SE945	SE946	SE947	SE948	SE949	SE950	SE951	SE952	SE953	SE954	SE955	SE956	SE957	SE958	SE959	SE960	SE961	SE962	SE963	SE964	SE965	SE966	SE967	SE968	SE969	SE970	SE971	SE972	SE973	SE974	SE975	SE976	SE977	SE978	SE979	SE980	SE981	SE982	SE983	SE984	SE985	SE986	SE987	SE988	SE989	SE990	SE991	SE992	SE993	SE994	SE995	SE996	SE997	SE998

Tabla A1.1 Características geométricas y mecánicas de los ensayos de la base de datos recopilada.

ANEJO 2

CONTRIBUCIÓN DEL HORMIGÓN, ACERO Y FRP A LA RESISTENCIA DE CORTANTE

En las tablas A2.1 hasta la A2.20 se muestra: a) en la primera columna la combinación de la galga en la armadura transversal de acero junto a su homóloga en el FRP que sumadas dan el máximo cortante para cada sección de estudio; b) en la segunda columna se detalla de la combinación de galgas de la primera columna que da una mayor contribución del hormigón V_c , tomándose este valor como la contribución a cortante del hormigón en la sección estudiada; c) en la tercera columna, se detalla cada una de las galgas que forman la combinación máxima de cortantes para cada sección de estudio con sus respectivos datos que se adjuntan en las columnas posteriores.

M0Sa						
Galgas cortantes máximos	V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	V_c+V_s
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1	118	95,3	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	46,4	221,3
ESA2	109			ESA2	59,5	
ESB3	82			ESB3	71,6	
DSB1	64			DSB1	49,9	
DSA2	109			DSA2	67,4	
DSA3	90			DSA3	83,2	

Tabla A2.1 Contribución total del hormigón y del acero en la viga M0Sa

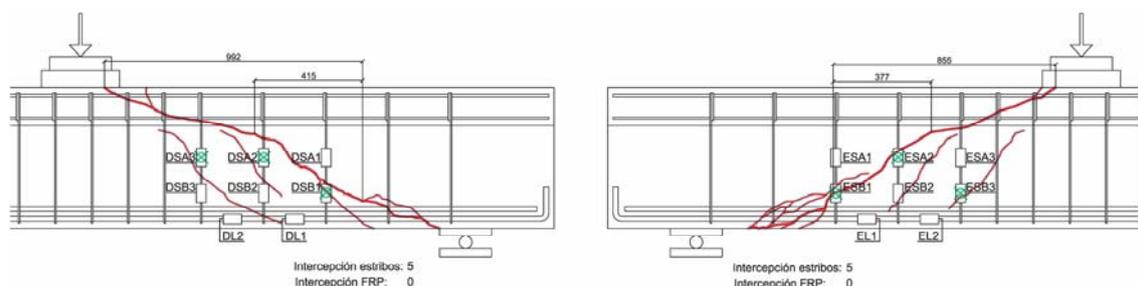


Figura A2.1 Fisuras críticas de corte de la viga M0Sa

M0Sb						
Galgas cortantes máximos	V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	V_c+V_s
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1	100	77,5	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	29,8	168,2
ESA2	90			ESA2	31,6	
ESB3	80			ESB3	44,0	
DSB1	45			DSB1	56,9	
DSB2	70			DSB2	48,0	
DSB3	80			DSB3	61,8	

Tabla A2.2 Contribución total del hormigón y del acero en la viga M0Sb

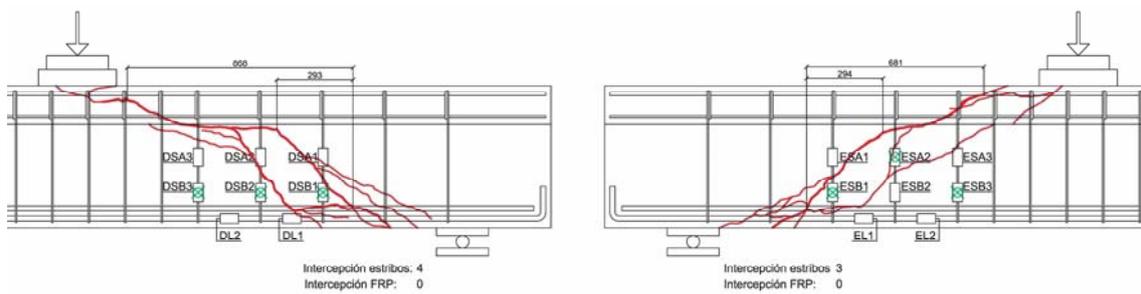


Figura A2.2 Fisuras críticas de cortante de la viga M0Sb

A0Sa						
Galgas cortantes máximos	V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	V_c+V_s
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESA1	123	97,0	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	35,28	199,7
*ESA2	60			ESA2	50,90	
ESA3	99			ESA3	62,78	
DSA1	120			DSA1	38,46	
*DSA2	115			DSA2	53,94	
DSA3	65			DSA3	66,68	

Tabla A2.3 Contribución total del hormigón y del acero en la viga A0Sa

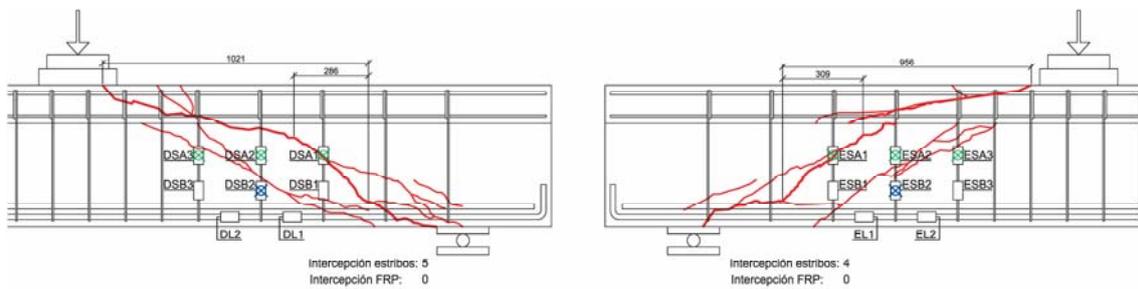


Figura A2.3 Fisuras críticas de corte de la viga A0Sa

A0Sb						
Galgas cortantes máximos	V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	V_c+V_s
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
*ESB1	100	100,0	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	55,0	279,2
*ESB2	150			ESB2	72,5	
ESA3	50			ESA3	87,6	
DSB1	110			DSB1	82,3	
DSA2	110			DSA2	143,8	
DSB3	80			DSB3	96,3	

Tabla A2.4 Contribución total del hormigón y del acero en la viga A0Sb

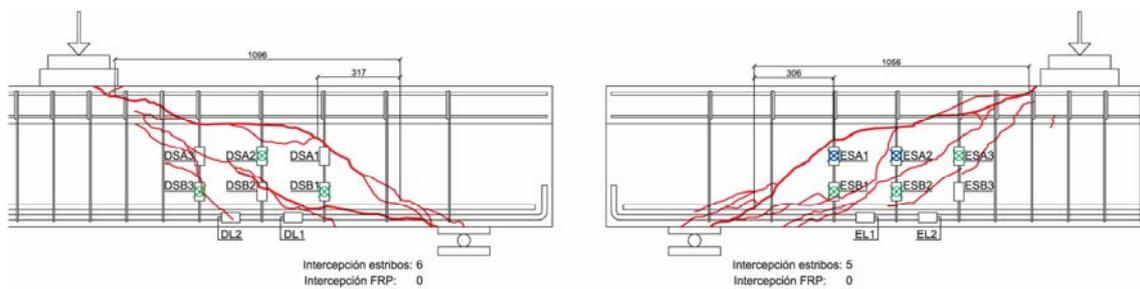


Figura A2.4 Fisuras críticas de cortante de la viga A0Sb

M1Sa						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
*ESB1+FRP A9	110	91,3	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	44,3	218,7
ESB2+FRP A5	110			ESB2	53,5	
ESB3+FRP A3	65			ESB3	60,9	
*DSB1+FRP F9	108			DSB1	39,6	
DSB2+FRP F6	90			DSB2	51,1	
DSB3+FRP F3	65			DSB3	59,1	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A9	7,16	24,5
				FRP A5	17,15	
				FRP A3	14,45	
				FRP F9	4,57	
				FRP F6	15,09	
				FRP F3	15,12	

Tabla A2.5 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M1Sa

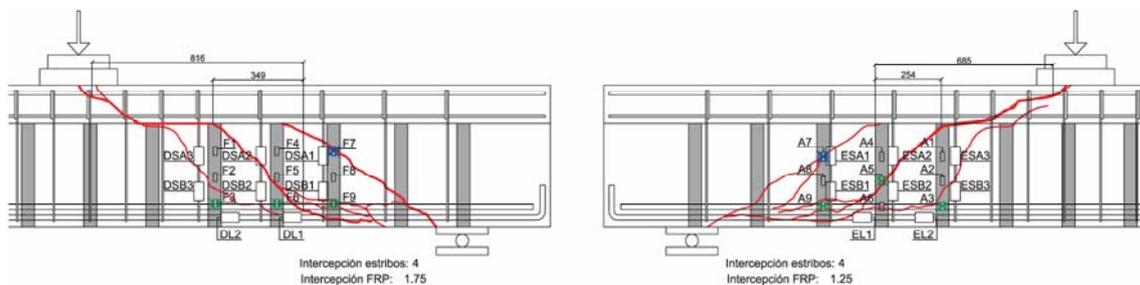


Figura A2.5 Fisuras críticas de cortante de la viga M1Sa

M1Sb						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A8	129	105,9	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	29,05	99,8
ESB2+FRP A5	98			ESB2	70,96	
ESB3+FRP A2	76			ESB3	44,27	
DSB1+FRP F9	142			DSB1	37,34	
*DSB2+FRP F6	117			DSB2	50,27	
DSB3+FRP F2	73,5			DSB3	67,48	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	223,9
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A8	9,47	
				FRP A5	0,00	
				FRP A2	16,79	
				FRP F9	6,76	
				FRP F6	5,01	
				FRP F2	16,70	

Tabla A2.6 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M1Sb

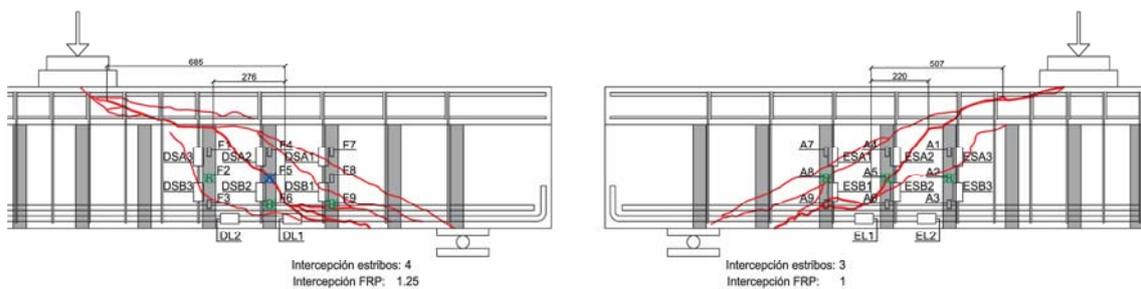


Figura A2.6 Fisuras críticas de cortante de la viga M1Sb

A1Sa						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A9	120	126,1	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	37,7	84,1
ESB2+FRP A5	103			ESB2	50,2	
ESB3+FRP A3	190			ESB3	27,2	
DSB1+FRP F9	103,9			DSB1	48,3	
DSB2+FRP F5	99,4			DSB2	58,3	
DSB3+FRP F3	140			DSB3	30,6	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	226,9
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A9	9,83	
				FRP A5	9,45	
				FRP A3	5,44	
				FRP F9	8,07	
				FRP F5	12,70	
				FRP F3	4,71	

Tabla A2.7 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A1Sa

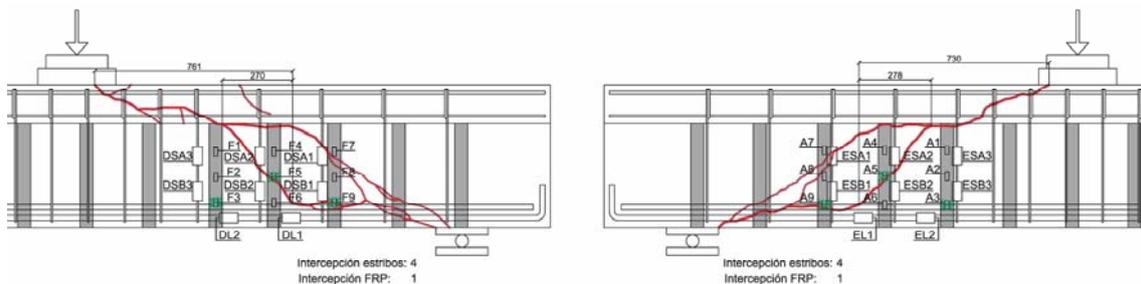


Figura A2.7 Fisuras críticas de cortante de la viga A1Sa

A1Sb						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
				(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A9	125	118,5	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	24,3	225,2
*ESA2+FRP A4	128			ESA2	47,7	
*ESA3+FRP A1	109			ESA3	37,4	
DSA1+FRP F7	154,2			DSA1	41,4	
DSA2+FRP F4	124			DSA2	52,3	
DSB3+FRP F3	71			DSB3	44,8	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	
				(KN)	(KN)	
				FRP A9	21,92	
				FRP A4	7,41	
				FRP A1	0,34	24,0
				FRP F7	9,76	
				FRP F4	19,78	
				FRP F3	12,85	

Tabla A2.8 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A1Sb

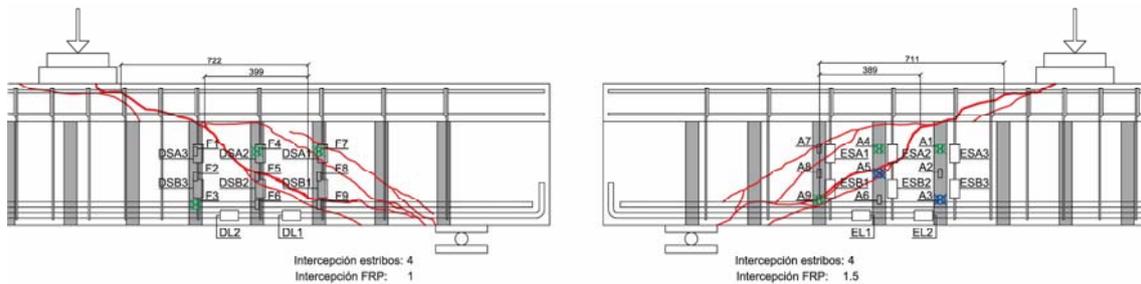


Figura A2.8 Fisuras críticas de cortante de la viga A1Sb

M2Sa						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESA1+FRP A7	140	114,7	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	44,8	100,2
ESB2+FRP A5	83			ESB2	55,3	
ESA3+FRP A1	89			ESA3	67,4	
DSA1+FRP F7	170			DSA1	40,0	
*DSA2+FRP F4	110			DSA2	55,5	
DSA3+FRP F1	96			DSA3	37,7	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	252,4
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A7	21,99	
				FRP A5	14,90	
				FRP A1	13,18	
				FRP F7	27,14	
				FRP F4	17,34	
				FRP F1	17,99	

Tabla A2.9 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M2Sa

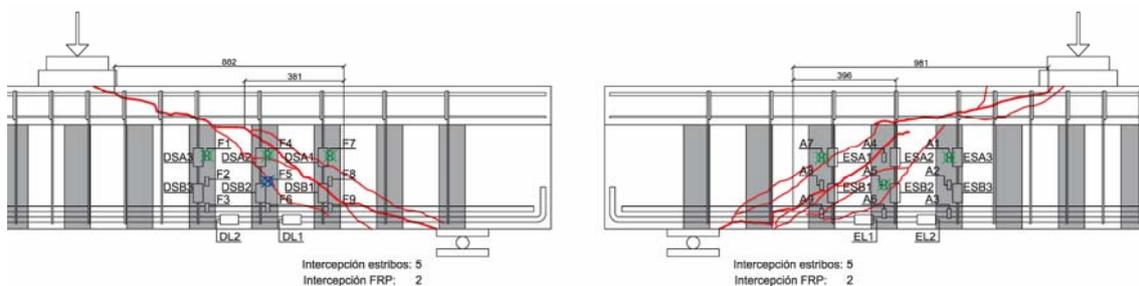


Figura A2.9 Fisuras críticas de cortante de la viga M2Sa

M2Sb						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A8	136	112,0	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	37,57	244,9
ESA2+FRP A4	120			ESA2	50,92	
ESA3+FRP A1	110			ESA3	64,23	
*DSB1+FRP F8	128			DSB1	42,47	
DSA2+FRP F4	104			DSA2	49,74	
DSA3+FRP F1	74			DSA3	54,56	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	
			FRP	FRP A8	27,90	33,1
				FRP A4	0,00	
				FRP A1	22,16	
				FRP F8	20,22	
				FRP F4	0,00	
				FRP F1	28,97	

Tabla A2.10 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M2Sb

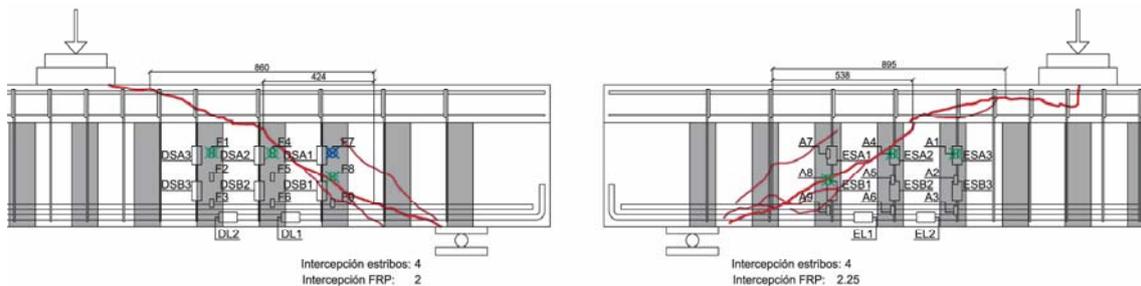


Figura A2.10 Fisuras críticas de cortante de la viga M2Sb

A2Sa						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESA1+FRP A7	50	55,0	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	11,9	178,7
ESA2+FRP A4	0			ESA2	77,4	
ESB3+FRP A2	25			ESB3	90,1	
DSA1+FRP F7	210			DSA1	1,0	
*DSA2+FRP F4	0			DSA2	69,3	
DSB3+FRP F2	45			DSB3	47,8	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	
			FRP	FRP A7	1,41	
				FRP A4	2,20	
				FRP A2	31,56	24,5
				FRP F7	0,22	
				FRP F4	0,33	
				FRP F2	37,21	

Tabla A2.11 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A2Sa

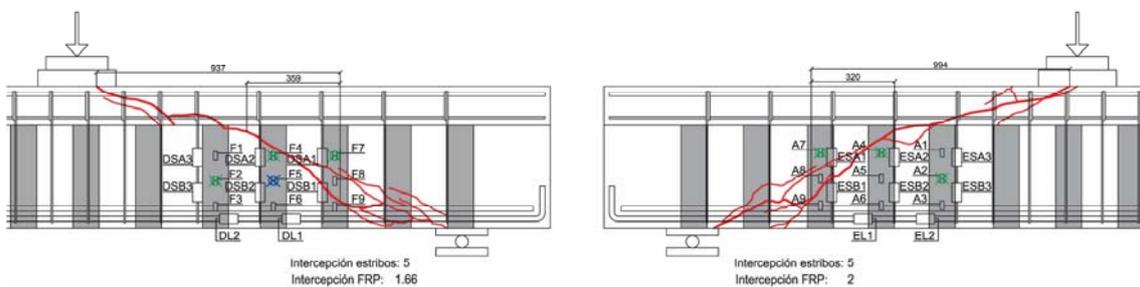


Figura A2.11 Fisuras críticas de cortante de la viga A2Sa

A2Sb						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A8	130	124,2	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	40,0	83,4
ESB2+FRP A6	90			ESB2	46,5	
ESA3+FRP A1	100			ESA3	42,8	
DSA1+FRP F7	220			DSA1	35,7	
DSB2+FRP F5	105			DSB2	38,0	
DSA3+FRP F1	100			DSA3	47,1	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	264,8
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A8	23,91	
				FRP A6	27,77	
				FRP A1	30,97	
				FRP F7	37,74	
				FRP F5	26,91	
				FRP F1	24,60	

Tabla A2.12 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A2Sb

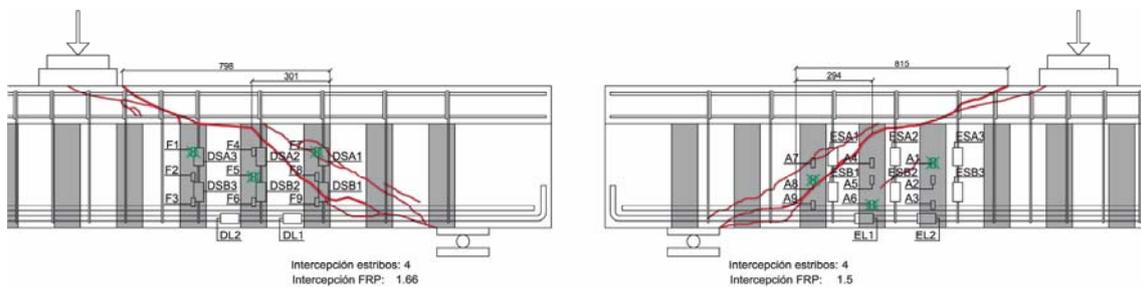


Figura A2.12 Fisuras críticas de cortante de la viga A2Sb

M1B						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{S,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESA1+FRP A7	138	114,8	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	22,2	78,1
ESA2+FRP A4	175			ESA2	33,7	
ESB3+FRP A3	66			ESB3	44,2	
DSA1+FRP F7	130			DSA1	34,8	
DSA2+FRP F4	100			DSA2	45,1	
DSB3+FRP F2	80			DSB3	54,3	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	227,8
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A7	10,94	
				FRP A4	14,90	
				FRP A3	21,90	
				FRP F7	13,51	
				FRP F4	18,74	
				FRP F2	24,57	

Tabla A2.13 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M1B

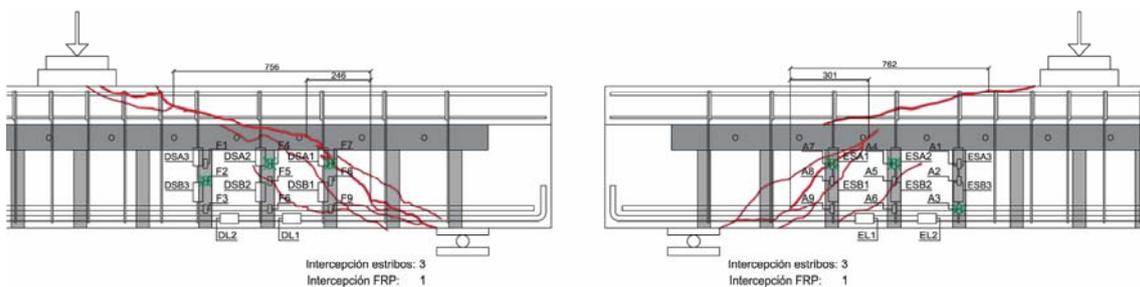


Figura A2.13 Fisuras críticas de cortante de la viga M1B

M2B						
Combinación Galga con galgas mayor V_c cortantes máx	μV_c (KN)	μV_c (KN)	Galgas cortantes máximos	V_s (KN)	$V_{s,tot}$ (KN)	$V_c+V_s+V_{FRP}$ (KN)
ESB1+FRP A8	85	80,0	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	36,7	209,2
ESB2+FRP A5	76			ESB2	50,8	
ESB3+FRP A2	58			ESB3	60,5	
DSA1+FRP F7	115			DSA1	34,4	
DSB2+FRP F6	71			DSB2	47,2	
DSB3+FRP F2	75			DSB3	50,1	
				V_{FRP} (KN)	$V_{FRP,tot}$ (KN)	
			FRP	FRP A8	18,1	35,9
				FRP A5	17,1	
				FRP A2	15,3	
				FRP F7	22,6	
				FRP F6	14,3	
				FRP F2	20,4	

Tabla A2.15 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M2B

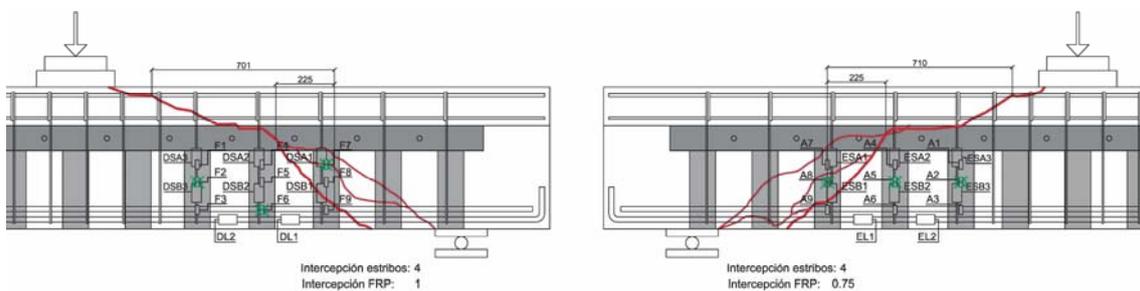


Figura A2.15 Fisuras críticas de cortante de la viga M2B

M2A						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESA1+FRP A7	150	121,3	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	46,8	141,0
ESA2+FRP A4	130			ESA2	62,3	
*ESA3+FRP A1	110			ESA3	81,6	
DSB1+FRP F9	118			DSB1	62,8	
DSA2+FRP F4	130			DSA2	83,5	
DSA3+FRP F1	90			DSA3	86,1	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	324,8
			FRP	FRP A7	19,29	62,5
				FRP A4	17,88	
				FRP A1	7,01	
				FRP F9	27,90	
				FRP F4	38,76	
				FRP F1	76,56	

Tabla A2.16 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga M2A

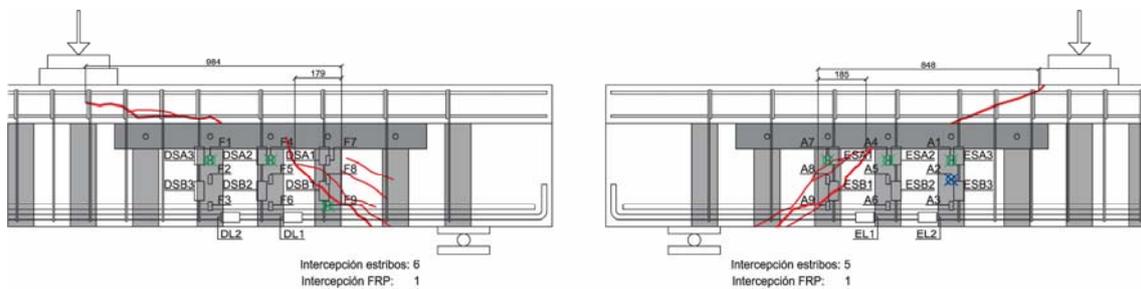


Figura A2.16 Fisuras críticas de cortante de la viga M2A

A2B							
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c		Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{S,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)			(KN)	(KN)	(KN)
ESA1+FRP A7	120	96,3	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	46,8	116,1	
ESB2+FRP A5	85			ESB2	61,9		
ESB3+FRP A3	90			ESB3	73,3		
DSA1+FRP F7	133			DSA1	47,9		
DSB2+FRP F6	75			DSB2	64,0		
DSB3+FRP F2	75			DSB3	54,4		
					V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	262,5
			FRP	FRP A7	21,16	50,1	
				FRP A5	29,42		
				FRP A3	19,04		
				FRP F7	29,70		
				FRP F6	31,91		
				FRP F2	19,05		

Tabla A2.17 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A2B

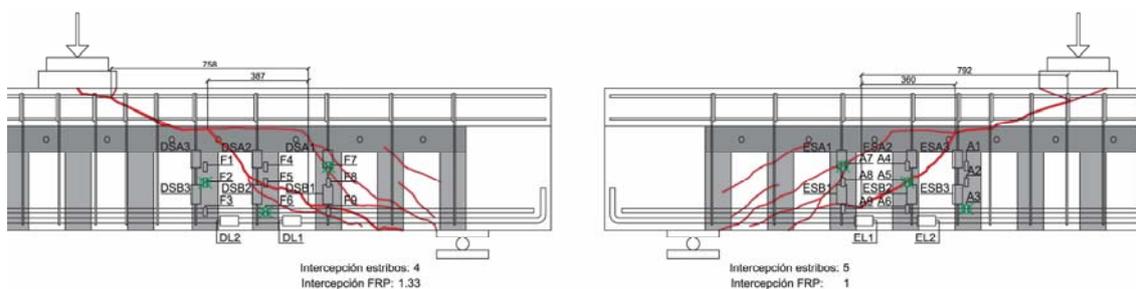


Figura A2.17 Fisuras críticas de cortante de la viga A2B

A2A						
Combinación galgas cortantes máx	Galga con mayor V_c	μV_c	Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	(KN)
ESB1+FRP A8	0	23,0	ARM. TRANSVERSAL	ESB1	1,8	66,6
*ESB2+FRP A5	23			ESB2	50,1	
*ESB3+FRP A2	29,8			ESB3	31,1	
DSB1+FRP F9	3,5			DSB1	6,4	
DSB2+FRP F6	75,5			DSB2	53,7	
DSA3+FRP F1	6,1			DSA3	56,7	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	127,7
				(KN)	(KN)	
			FRP	FRP A8	21,76	
				FRP A5	16,77	
				FRP A2	21,07	
				FRP F9	19,82	
				FRP F6	20,62	
				FRP F1	14,33	

Tabla A2.18 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A2A

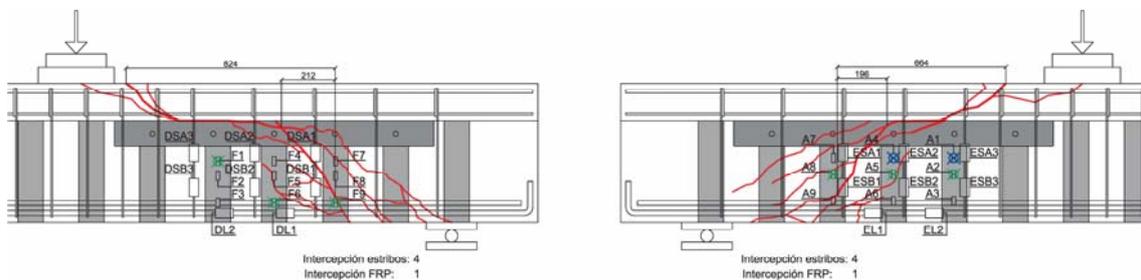


Figura A2.18 Fisuras críticas de cortante de la viga A2A

A3B										
Combinación Galga con galgas mayor V_c cortantes máx	μV_c	V_s	$V_{S,tot}$	V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$				
(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)				
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold;">ARM. TRANSVERSAL</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px;">V_{FRP}</td> <td style="padding: 5px;">$V_{FRP,tot}$</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px;">(KN)</td> <td style="padding: 5px;">(KN)</td> </tr> </table> </div> </div>							V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	(KN)	(KN)
V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$									
(KN)	(KN)									
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold;">FRP</div> </div>										

Tabla A2.19 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A3B

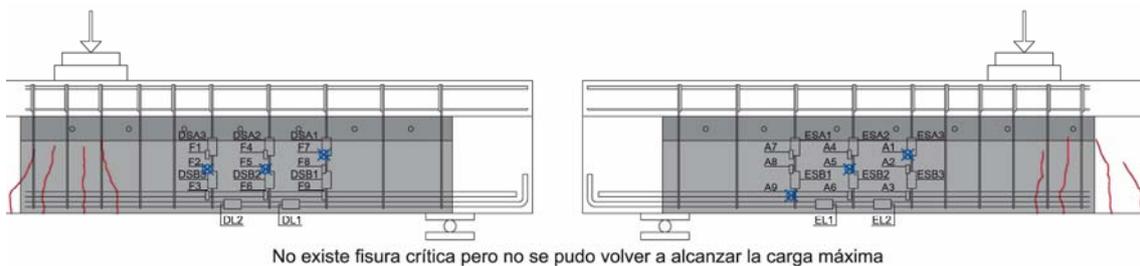


Figura A2.19 Fisuras críticas de la viga A3B

A3A						
Combinación Galga con galgas mayor V_c cortantes máx	μV_c		Galgas cortantes máximos	V_s	$V_{s,tot}$	$V_c+V_s+V_{FRP}$
	(KN)	(KN)		(KN)	(KN)	
ESA1+FRP A7	168	113,7	ARM. TRANSVERSAL	ESA1	27,3	52,9
ESA2+FRP A4	140			ESA2	38,0	
ESB3+FRP A2	100			ESB3	21,6	
DSB1+FRP F8	89			DSB1	30,8	
DSB2+FRP F5	95			DSB2	20,8	
DSB3+FRP F2	90			DSB3	20,2	
				V_{FRP}	$V_{FRP,tot}$	266,3
				(KN)	(KN)	
				FRP A7	55,79	
				FRP A4	26,91	
				FRP A2	35,16	
				FRP F8	72,33	
				FRP F5	33,47	
				FRP F2	75,37	

Tabla A2.20 Contribución total del hormigón, del acero y del FRP en la viga A3A

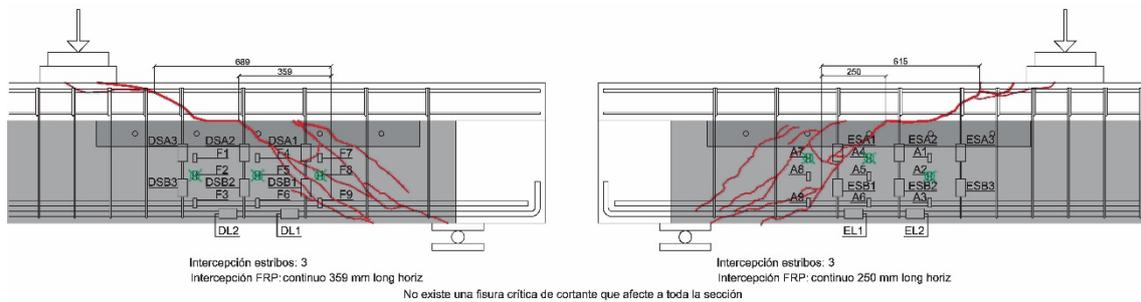


Figura A2.20 Fisuras críticas de cortante de la viga A3A

ANEJO 3

CONTRIBUCIÓN DEL ACERO Y DEL FRP A LA RESISTENCIA A CORTANTE

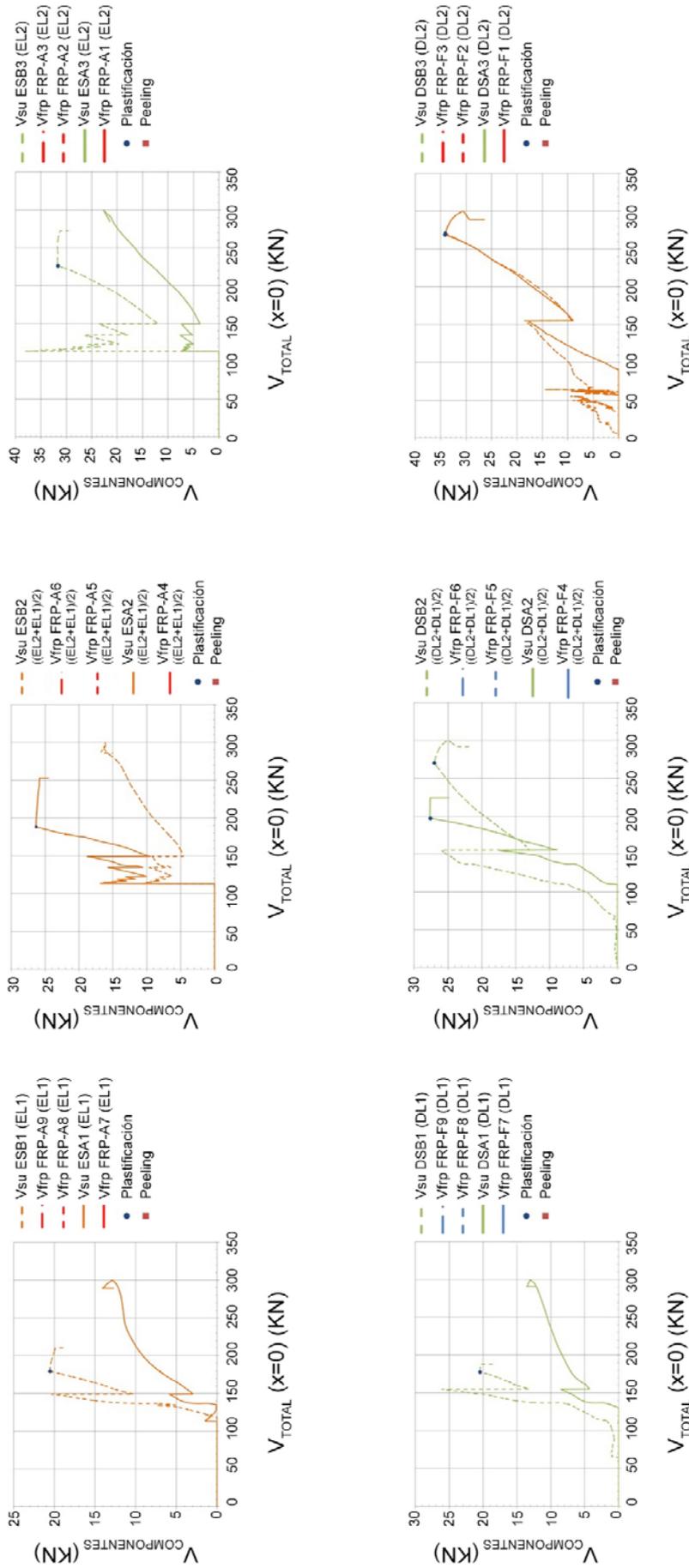


Figura A3.1 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M05a

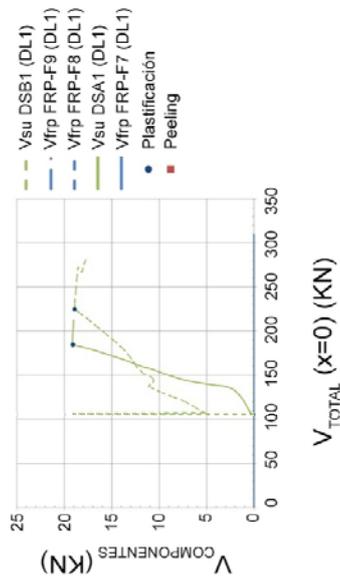
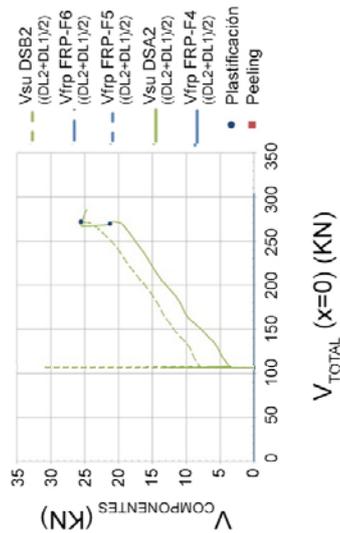
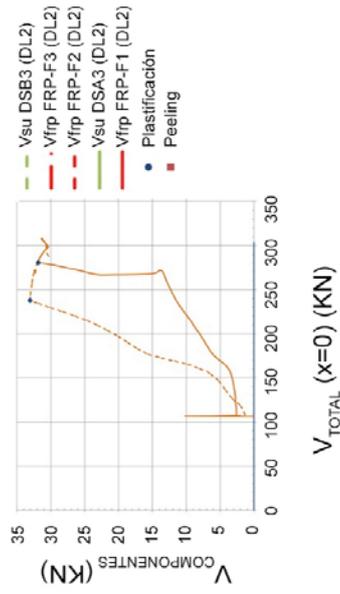
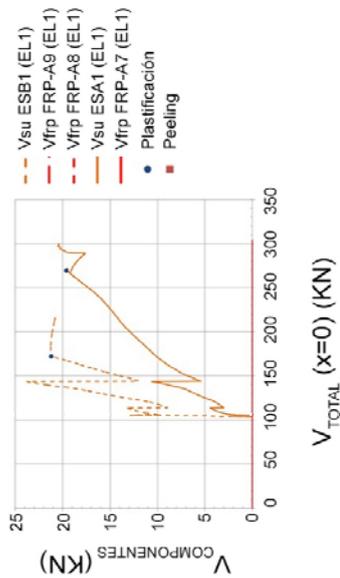
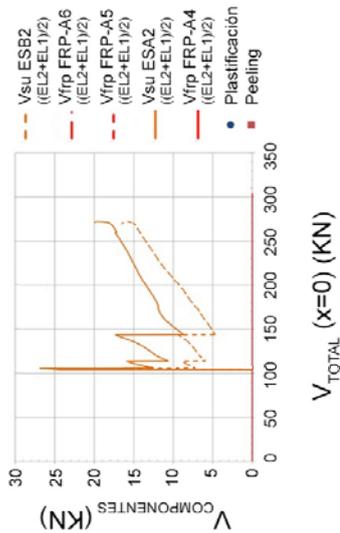
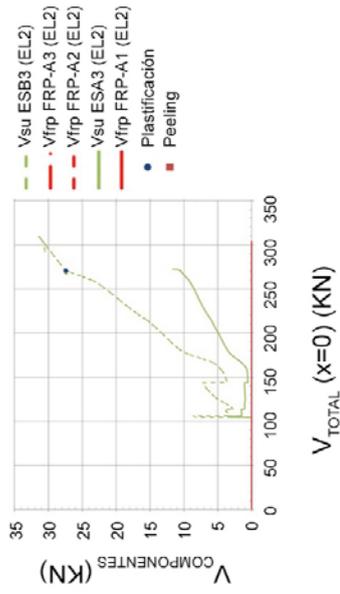


Figura A3.2 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M05b

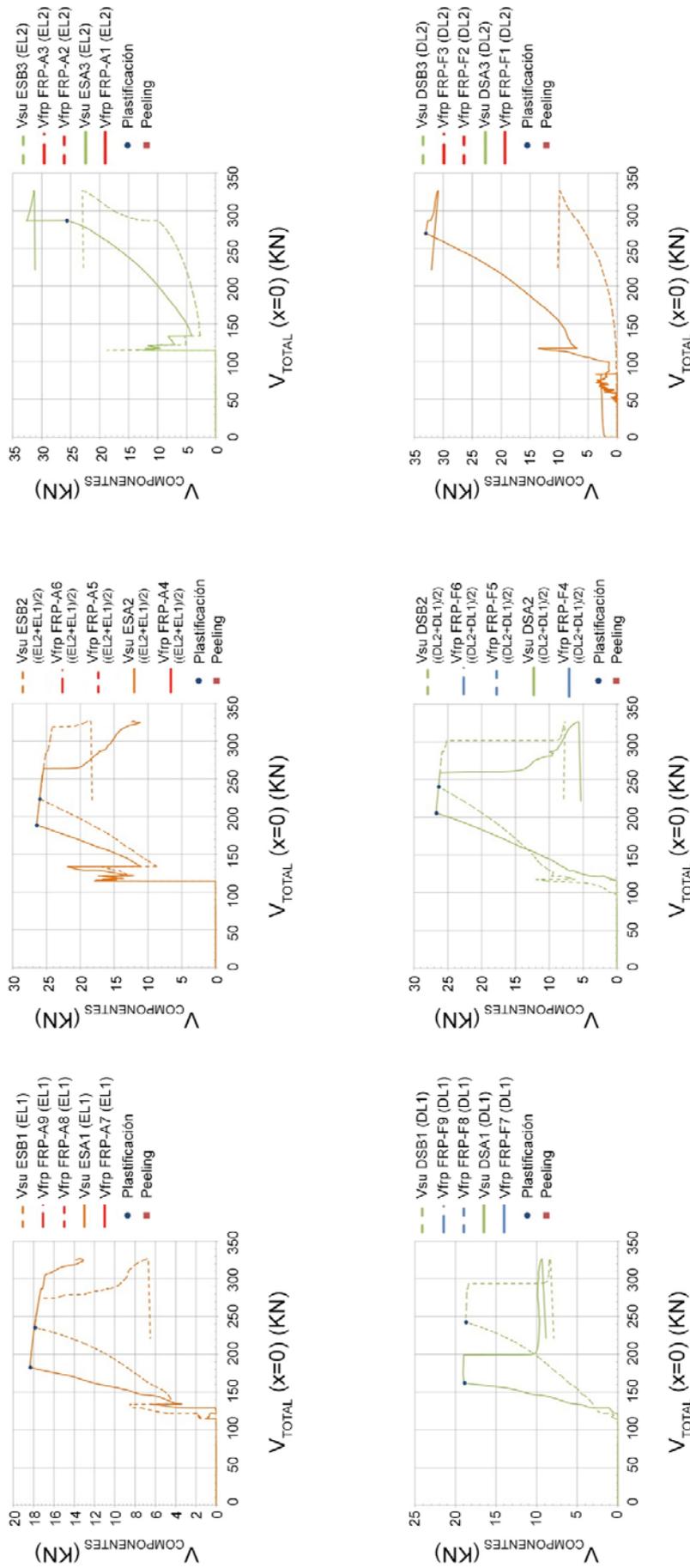


Figura A3.3 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A0Sa

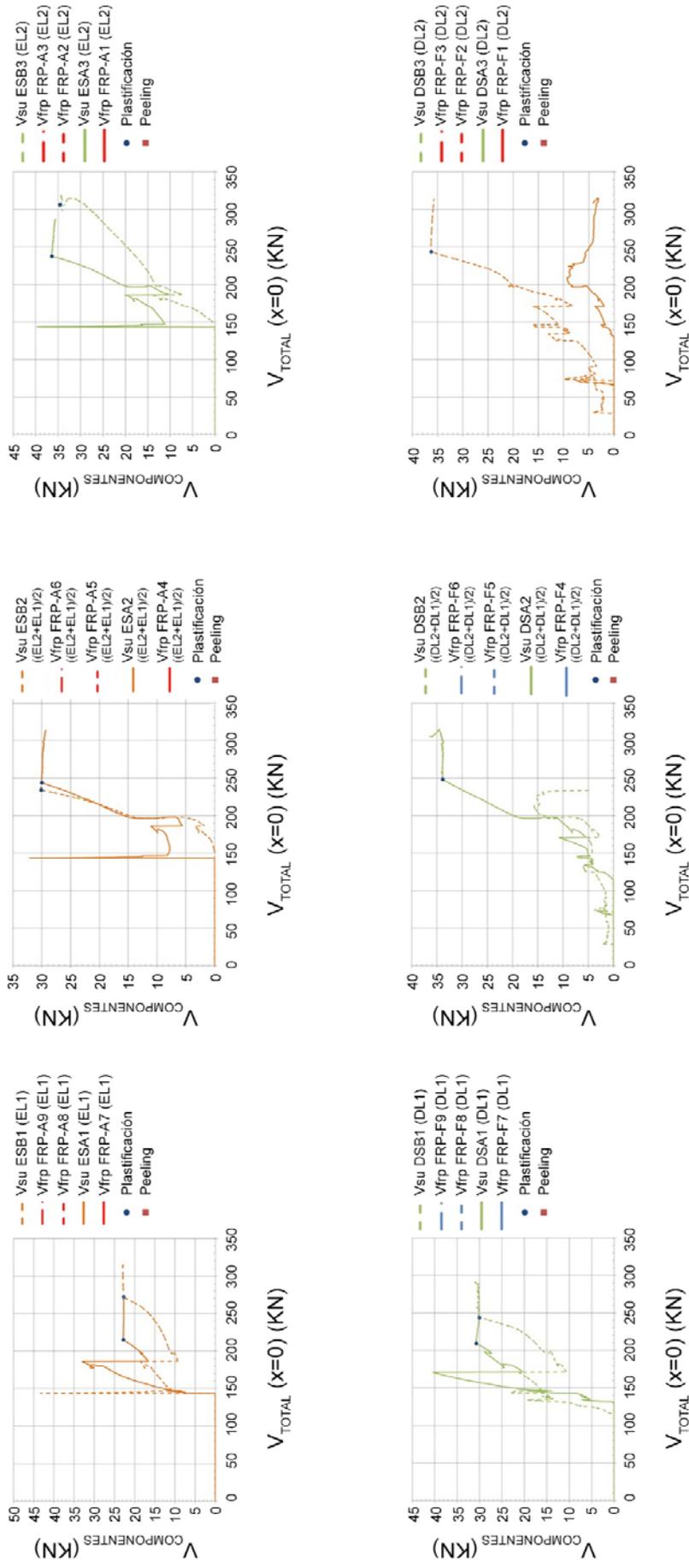


Figura A3.4 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A0Sb

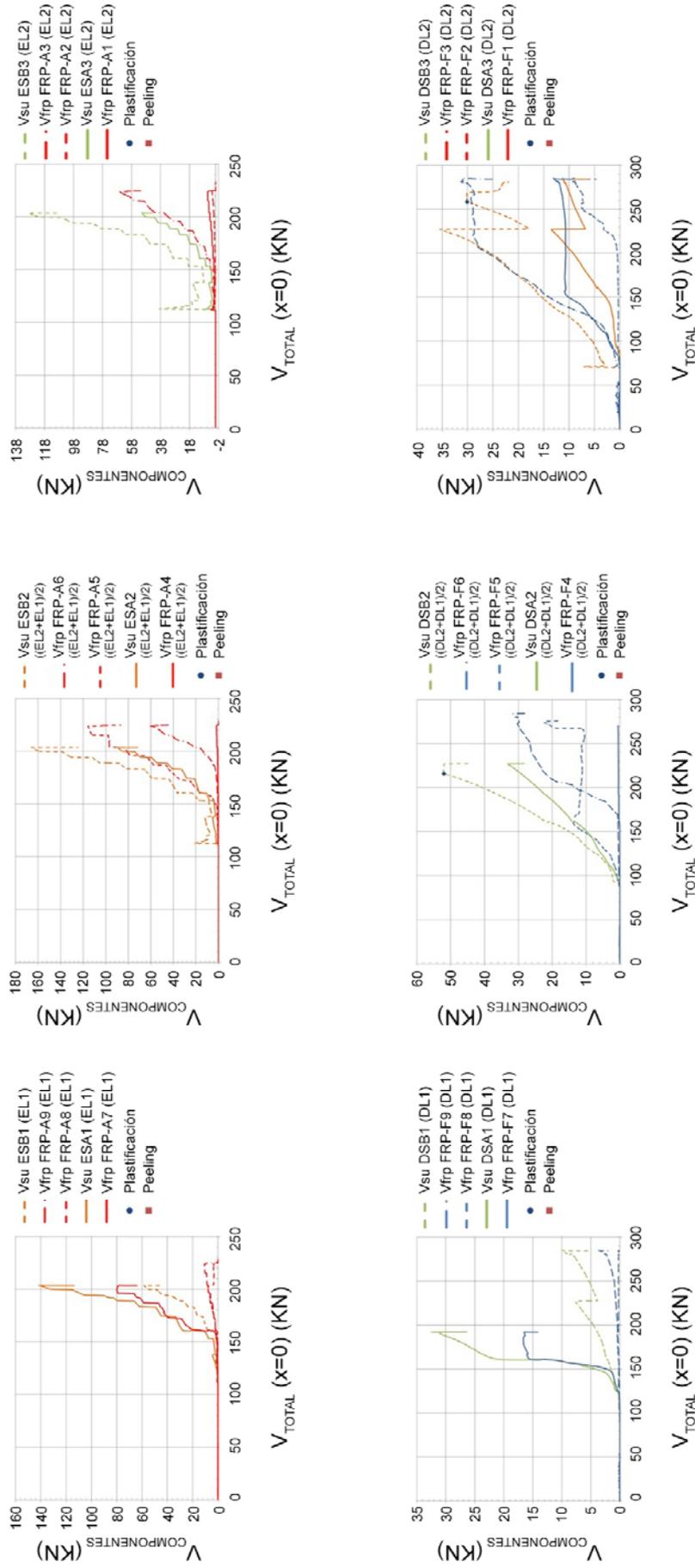


Figura A3.5 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M1Sa

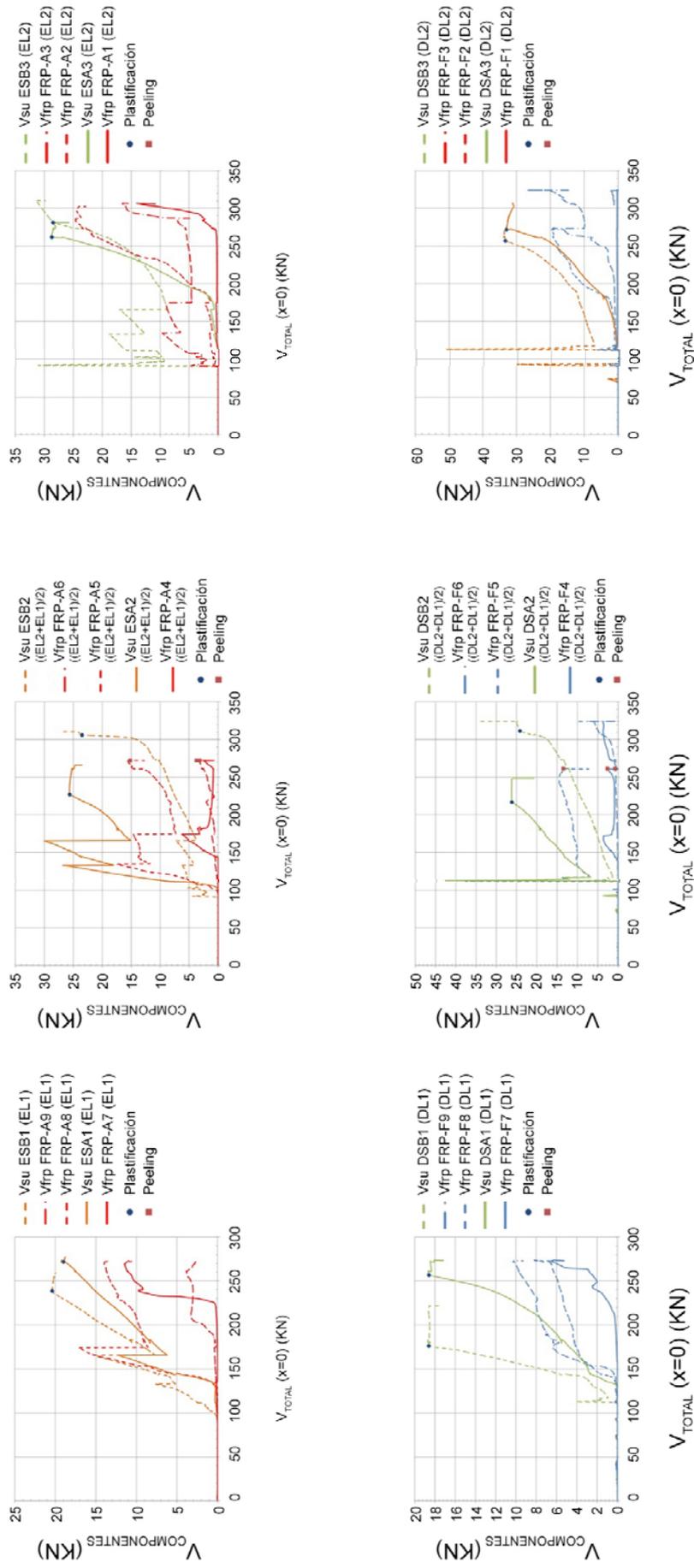


Figura A3.6 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M15b

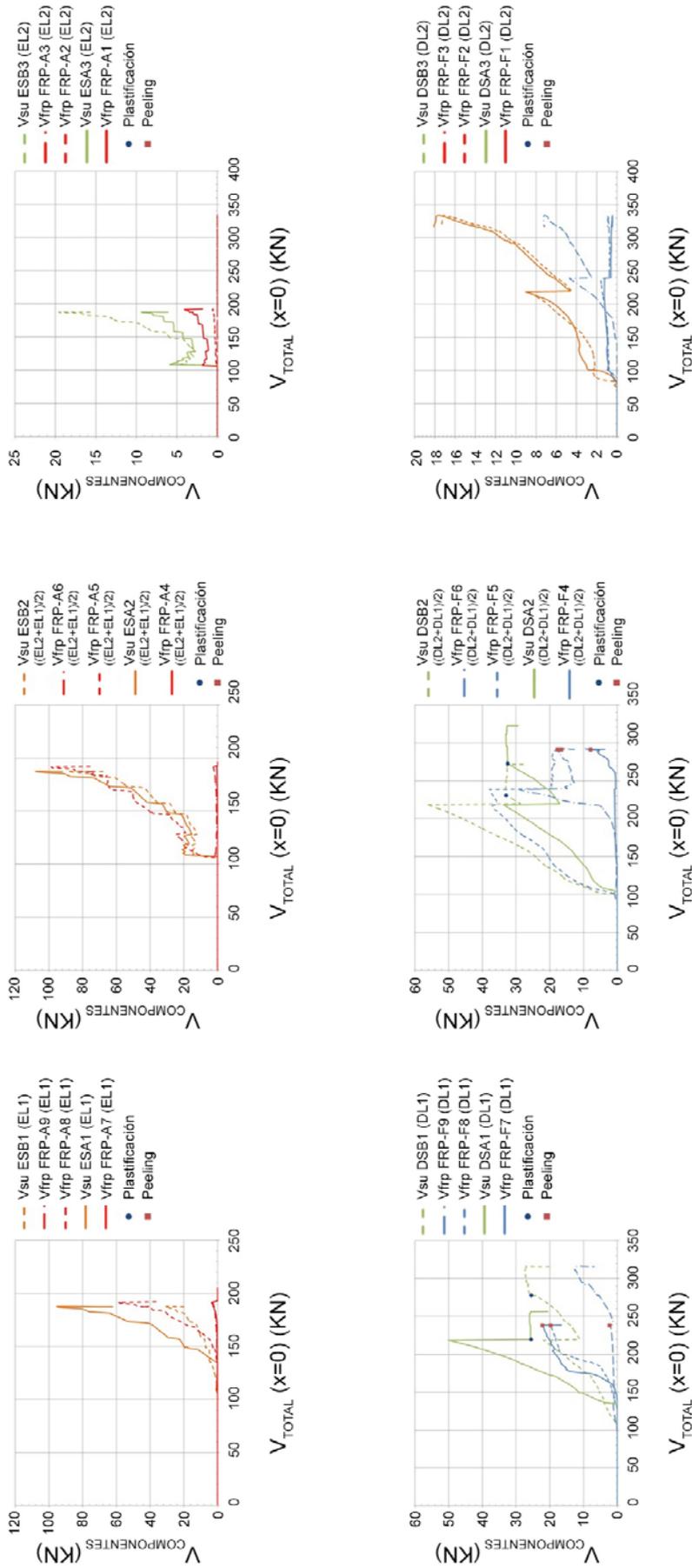


Figura A3.7 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A1Sa

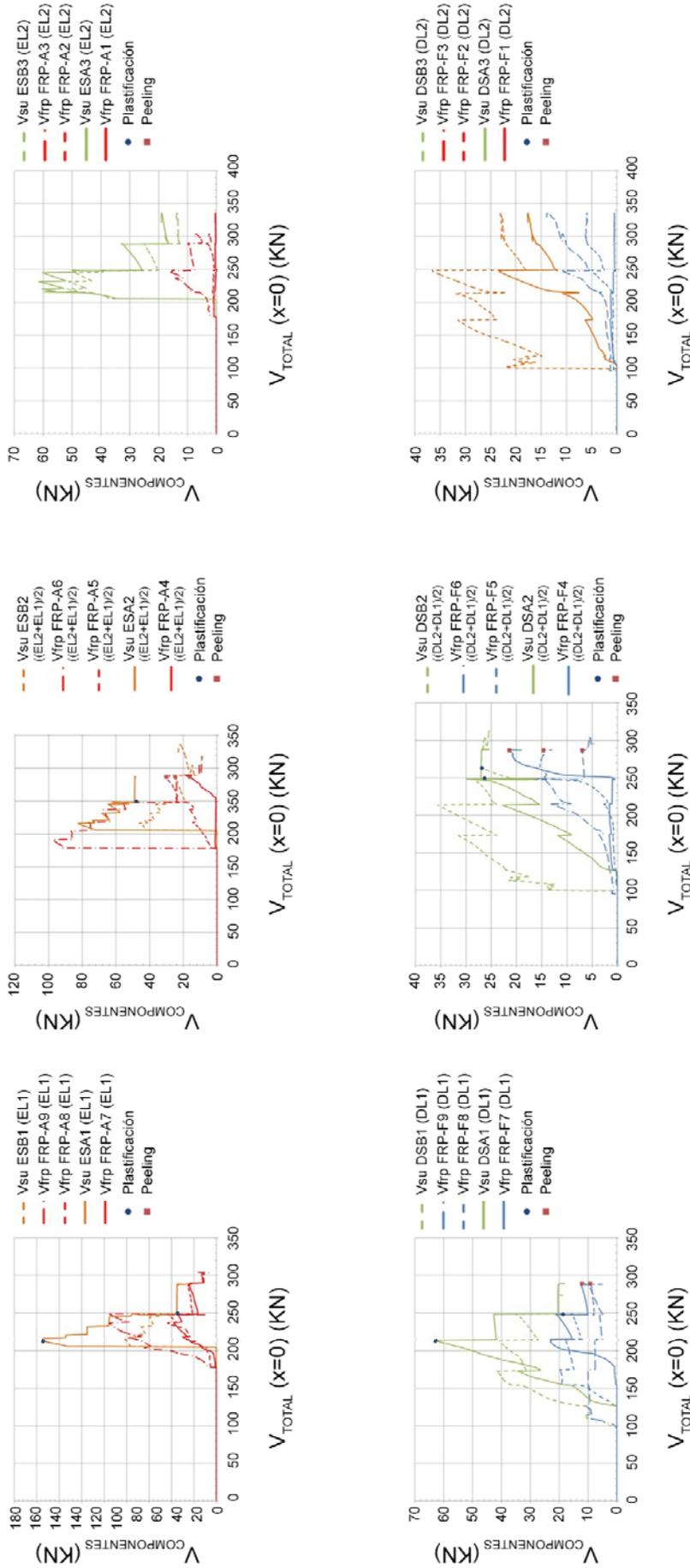


Figura A3.8 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A1Sb

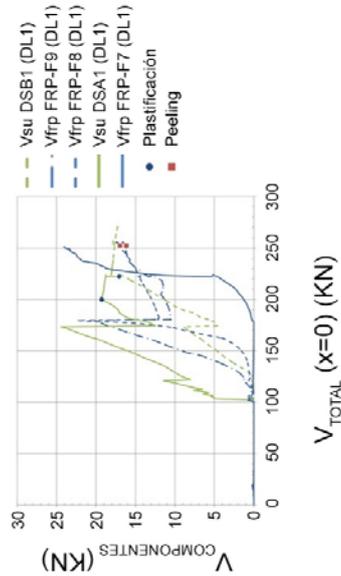
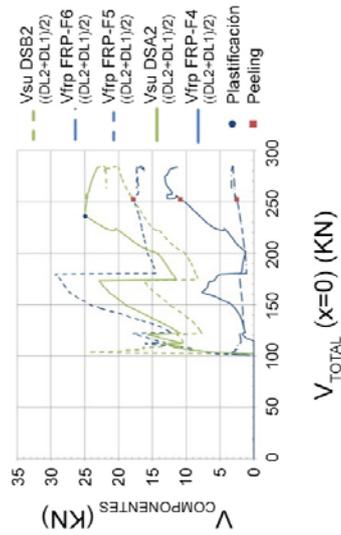
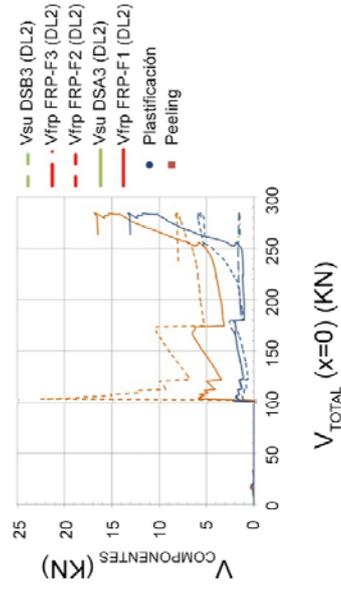
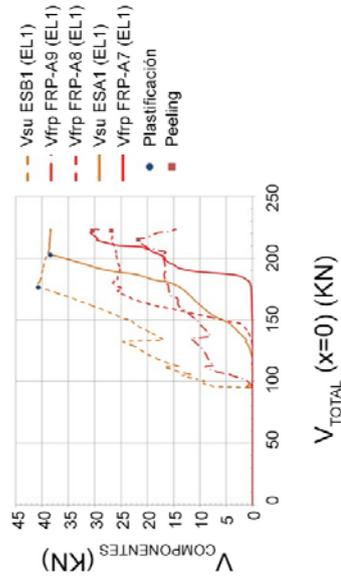
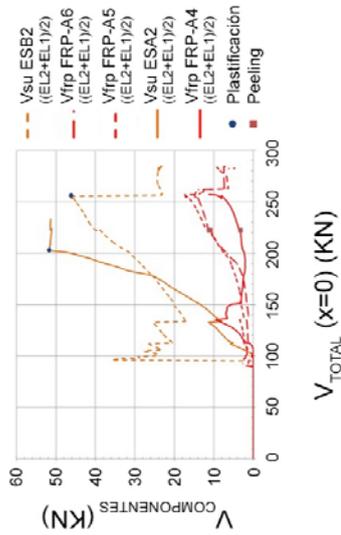
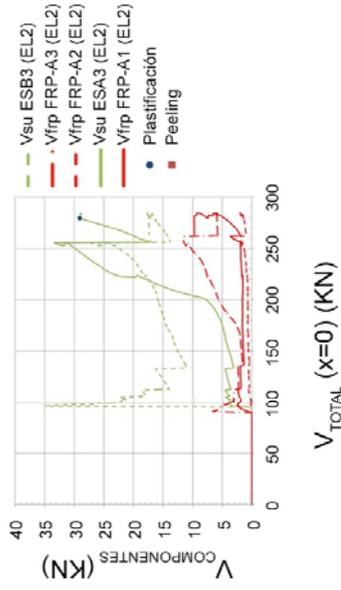


Figura A3.9 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M2Sa

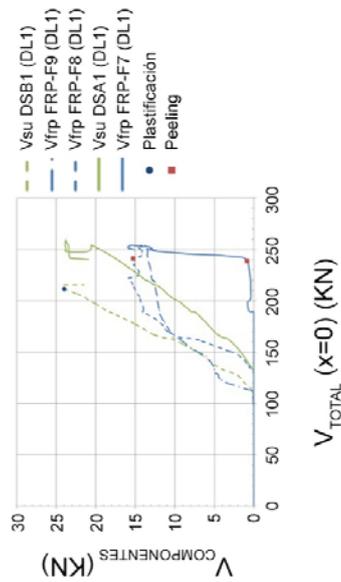
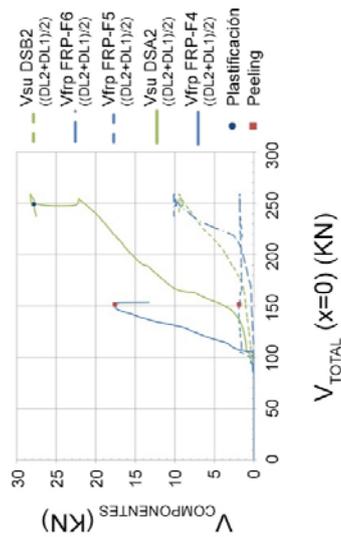
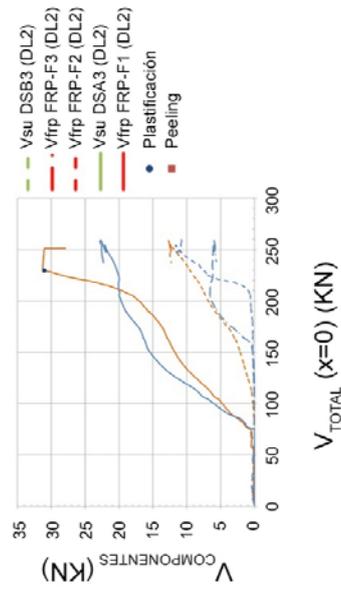
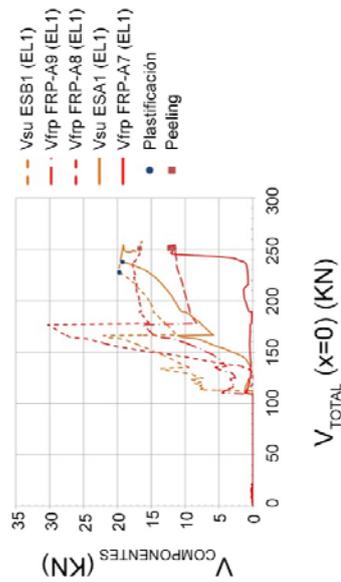
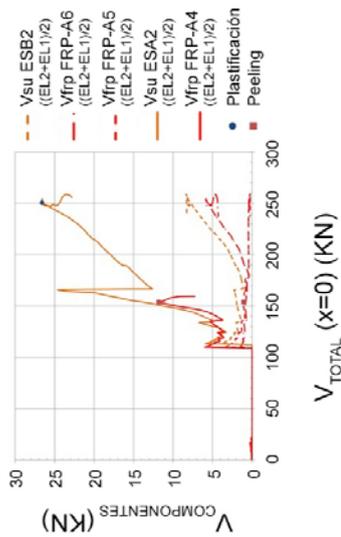
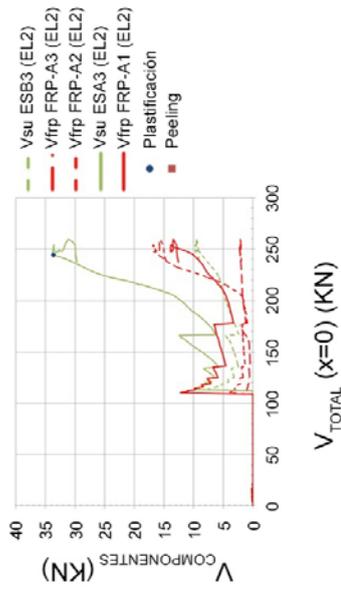


Figura A3.10 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M2Sb

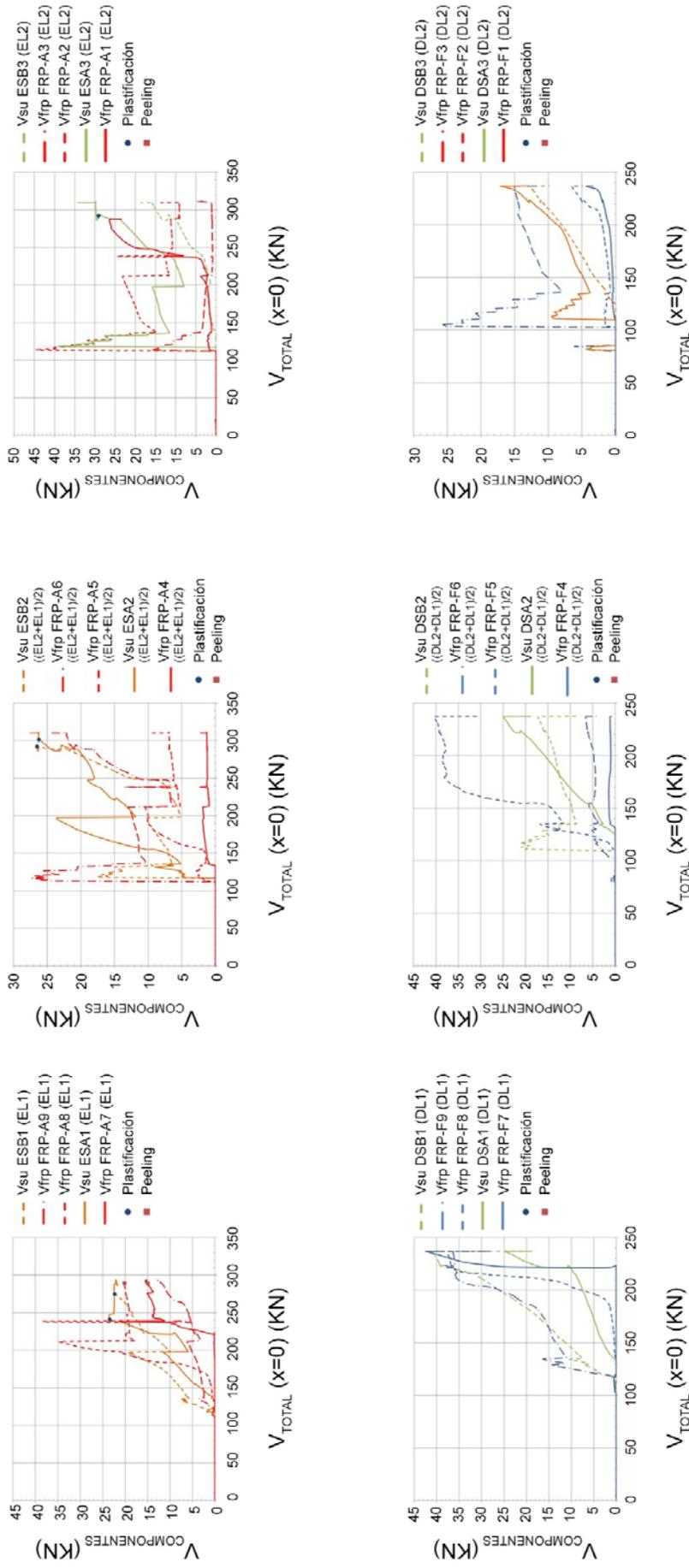


Figura A3.12 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A2Sb

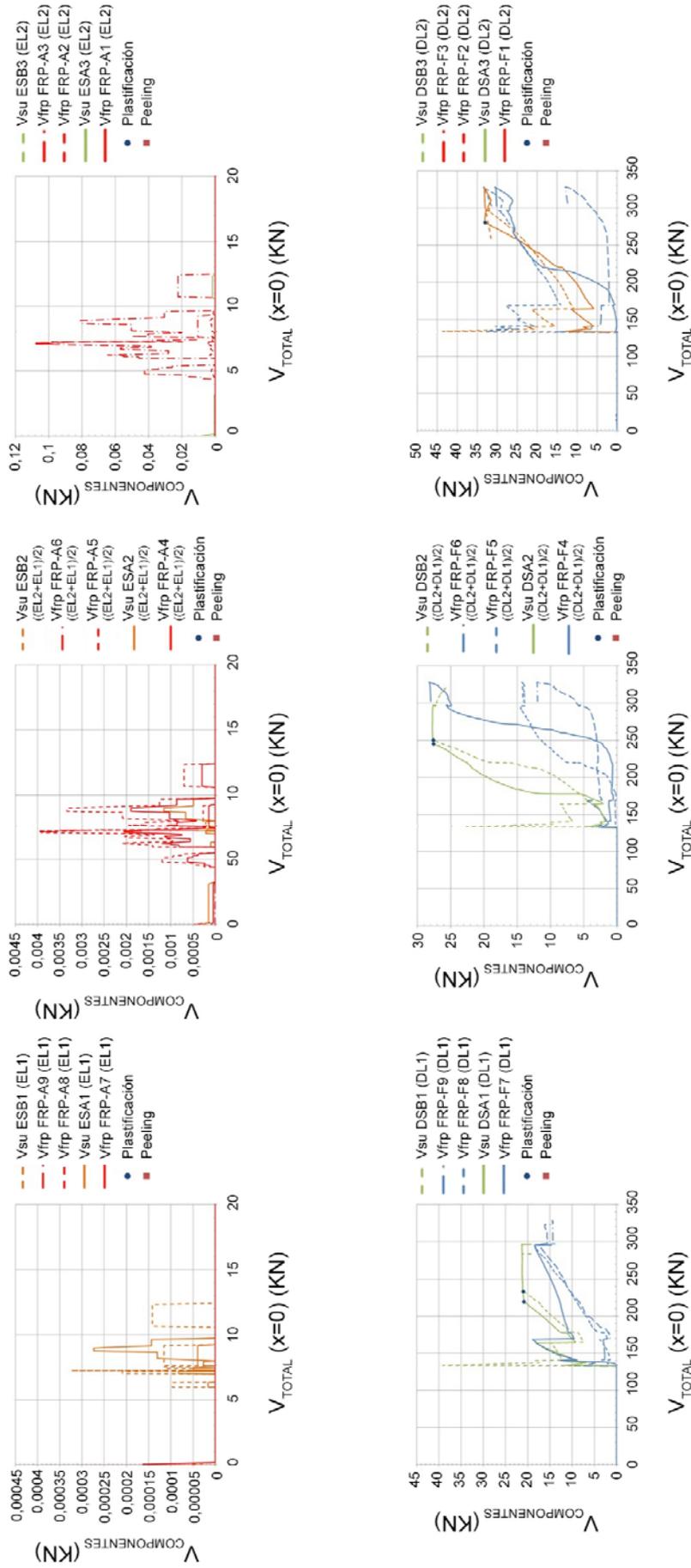


Figura A3.13 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M1B

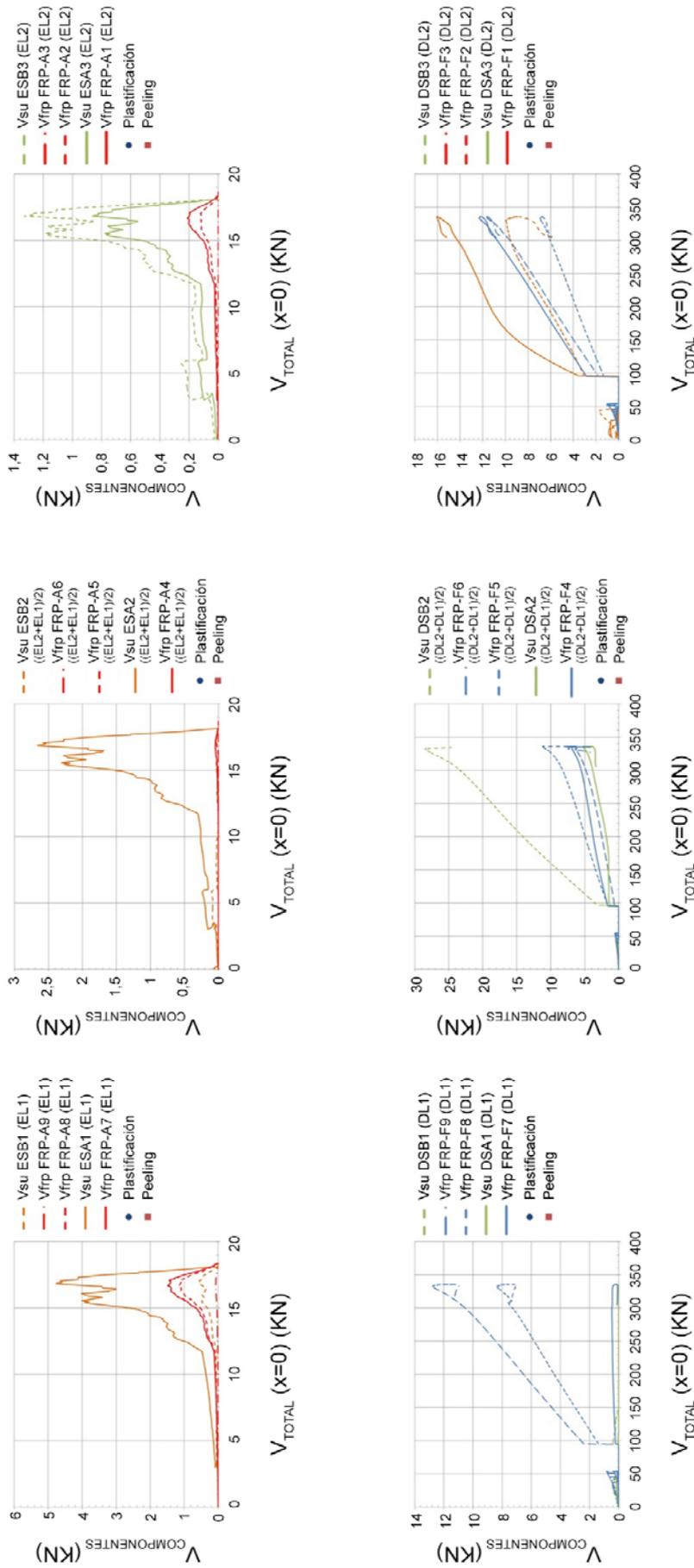


Figura A3.14 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M1A

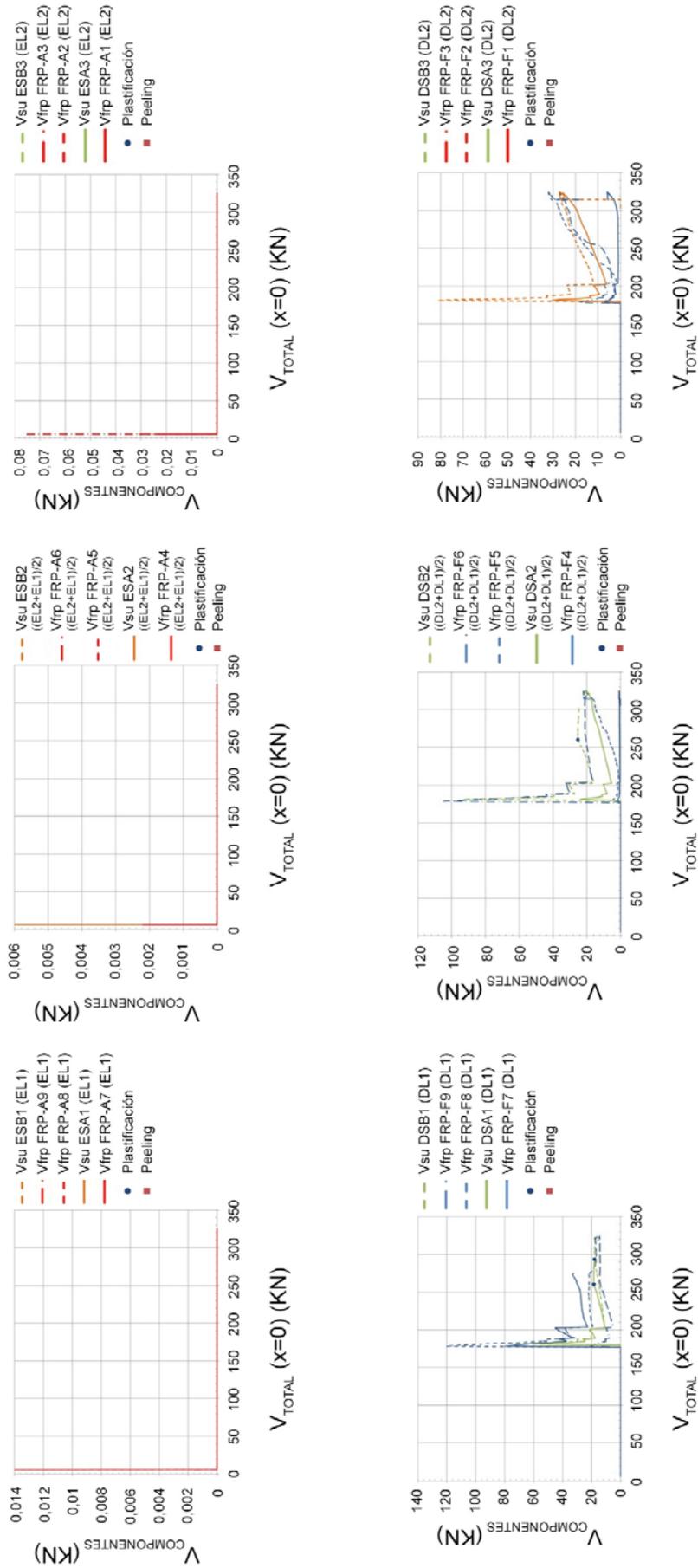


Figura A3.15 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra M2B

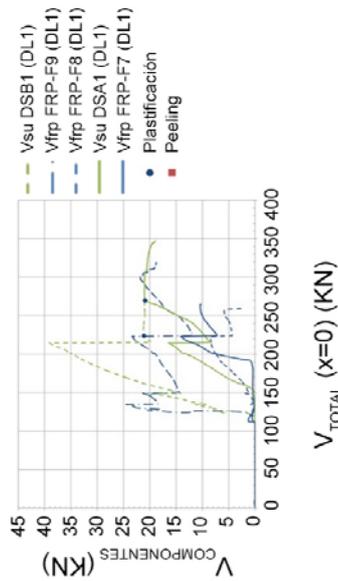
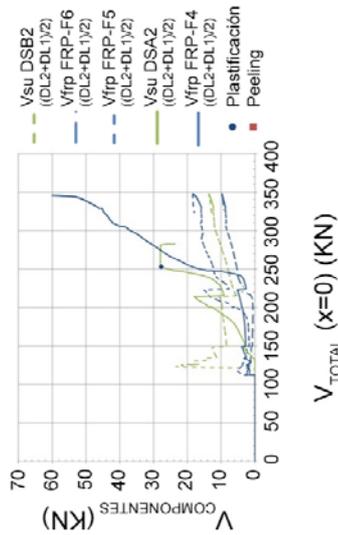
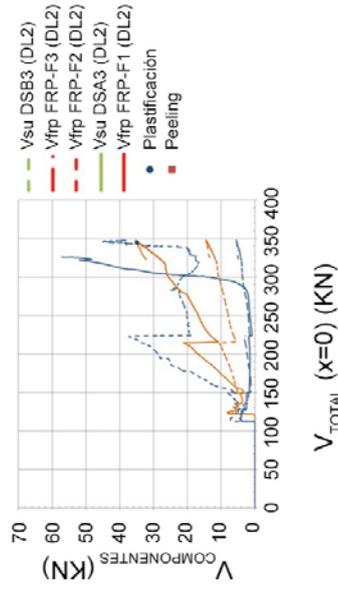
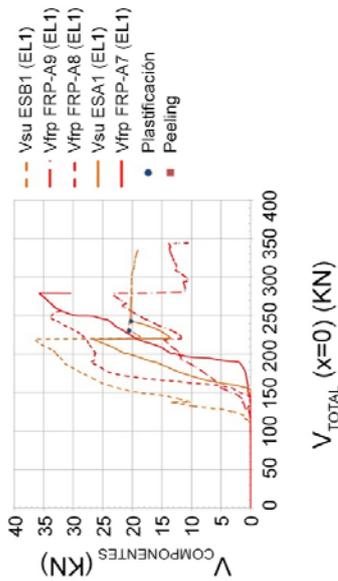
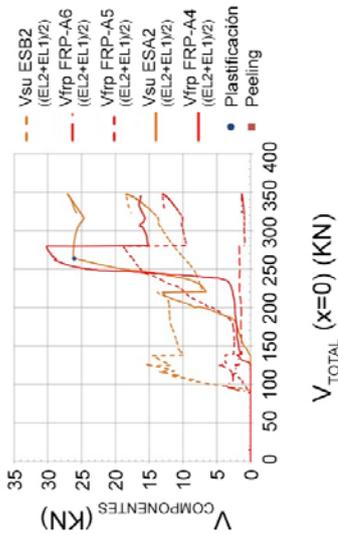
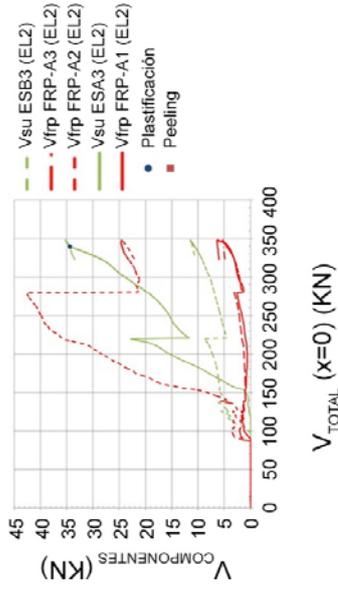


Figura A3.16 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra MZA

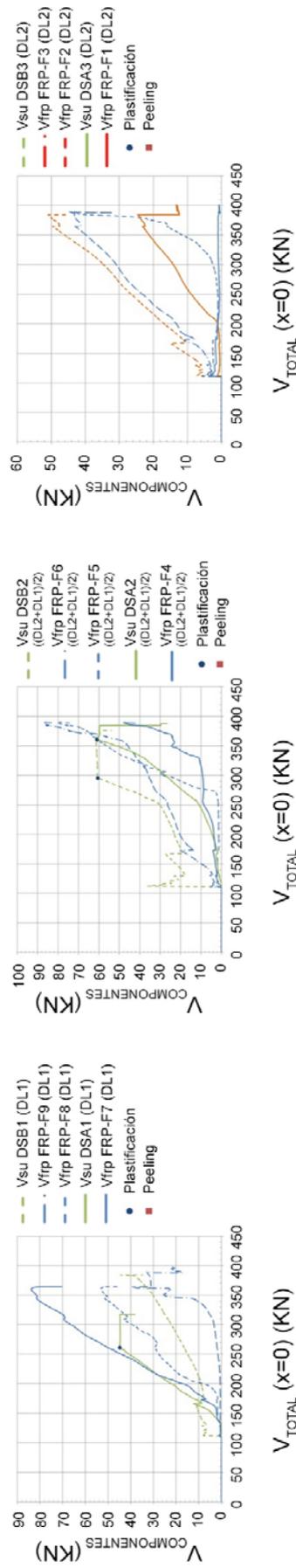
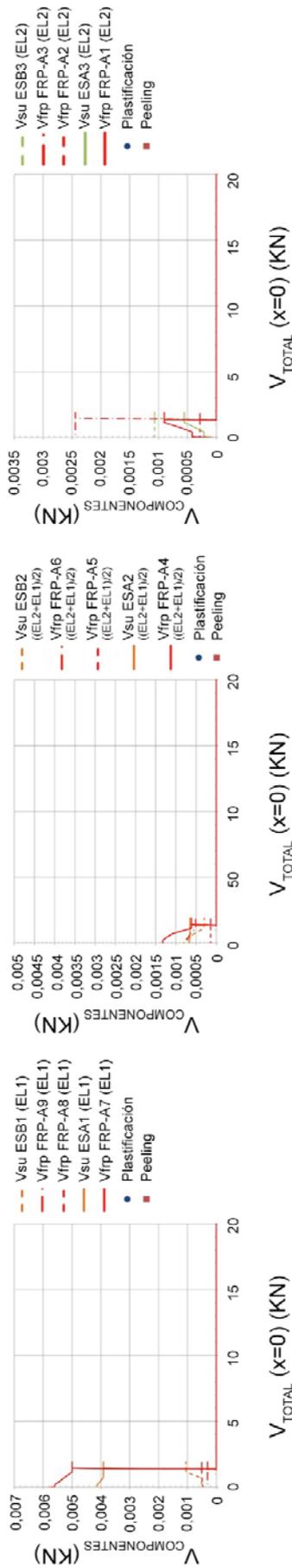


Figura A3.17 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A2B

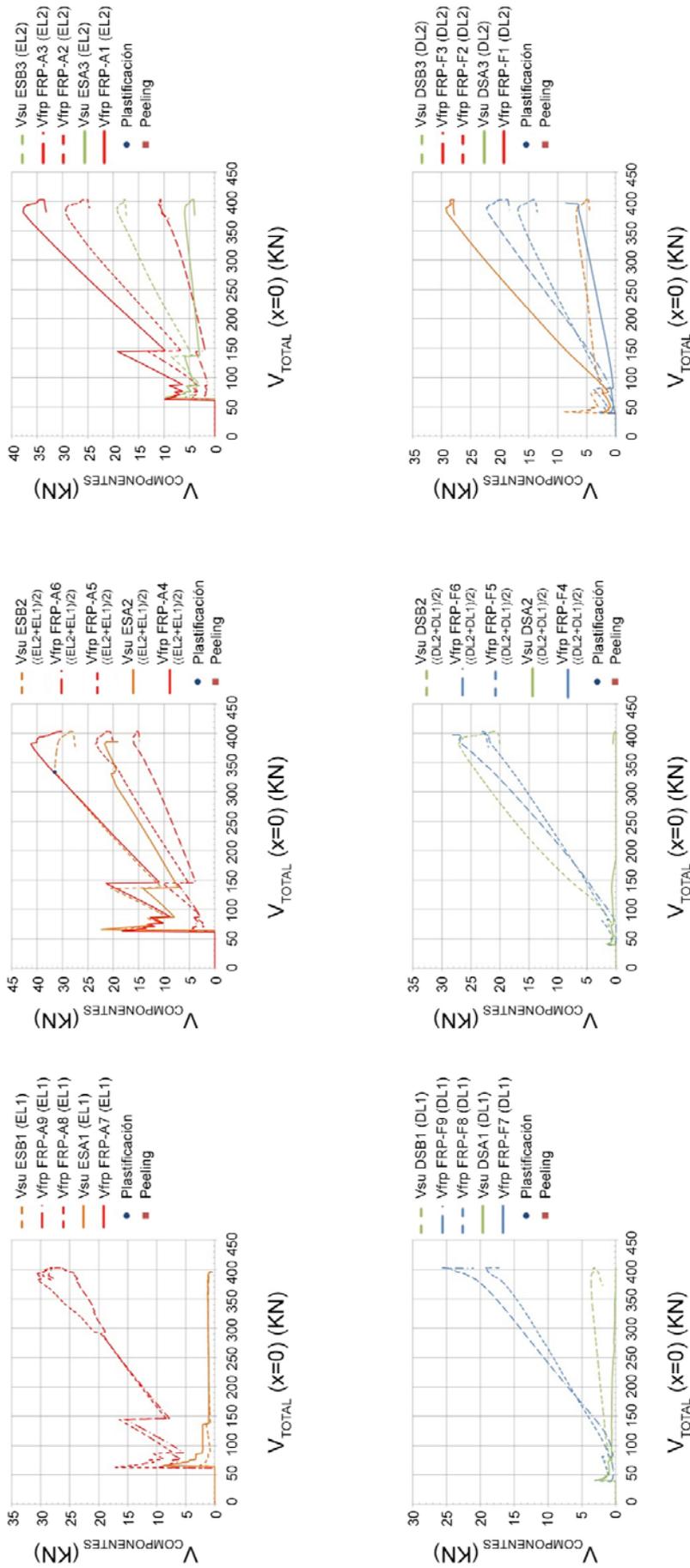


Figura A3.18 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A2A

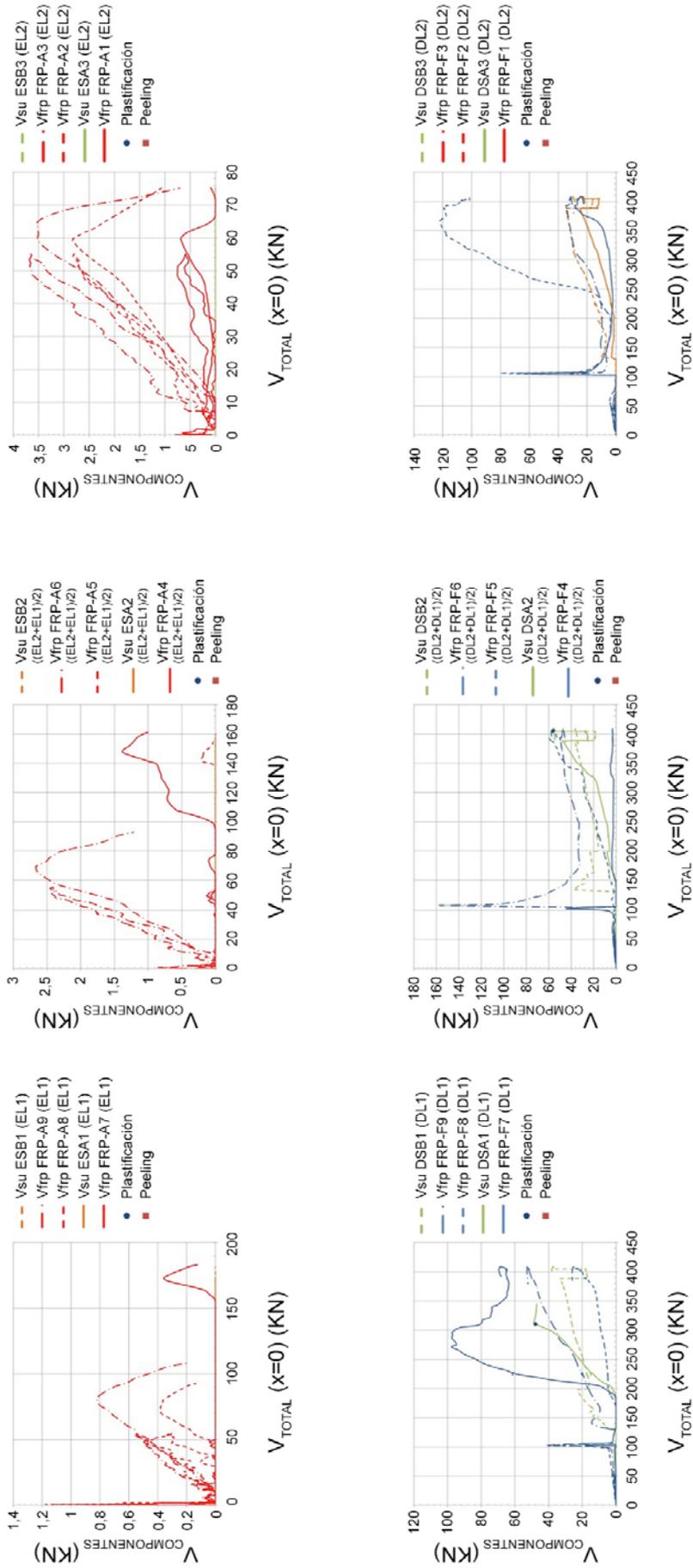


Figura A3.19 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A3B

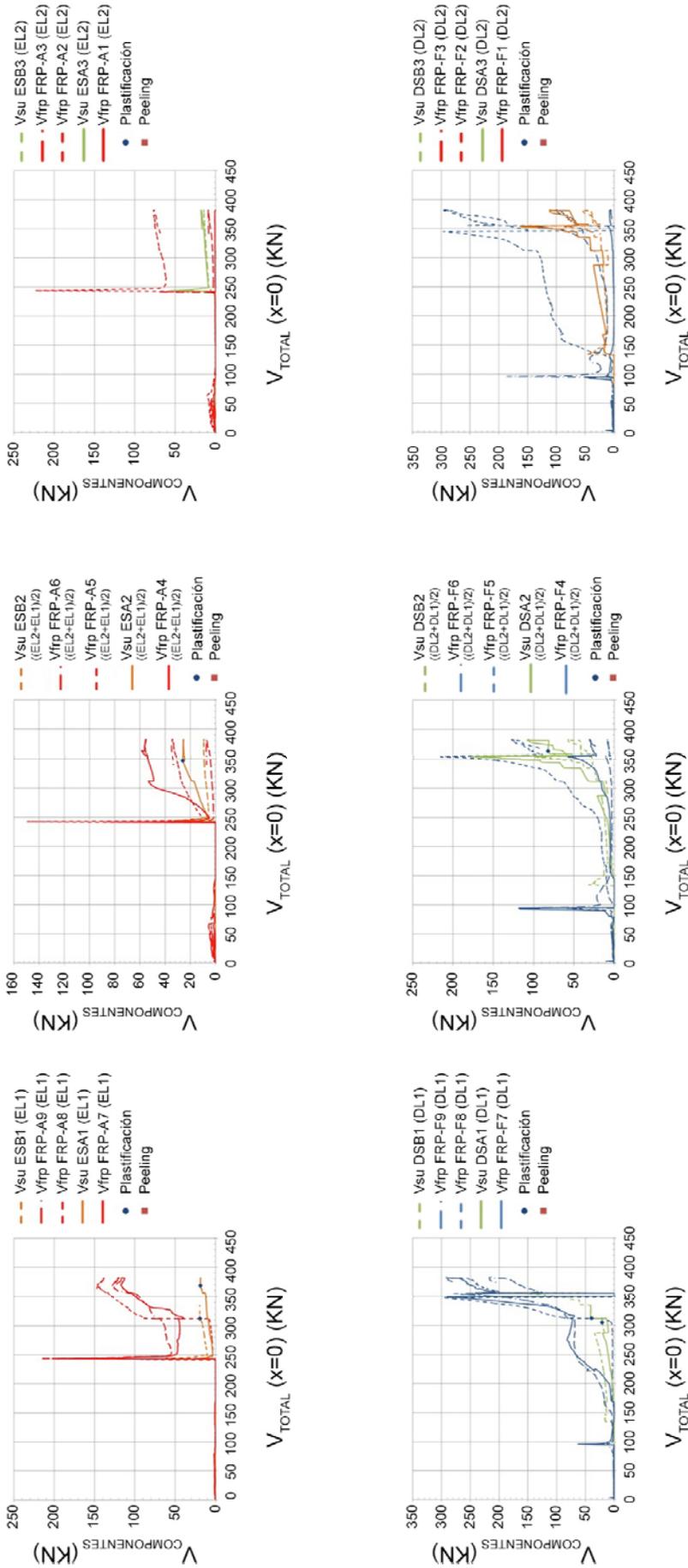


Figura A3.20 Gráfico de la contribución a cortante de las galgas dispuestas en el acero y en el FRP respecto al cortante total de la muestra A3A

ANEJO 4

**RESISTENCIA DE CORTANTE DEL HORMIGÓN,
ACERO, FRP Y ALA RESPECTO AL CORTANTE
ÚLTIMO PARA LA ROTURA DE LA VIGA,
PLASTIFICACIÓN DEL ACERO Y
DESPRENDIMIENTO DEL FRP**

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M0Sa	ESB1	Rotura	118,0	20,6	0,0	138,6	138,6	161,3	299,9
		Plastificación	118,0	20,5	0,0	138,5	138,5	40,8	179,3
	ESA2	Rotura	109,0	26,4	0,0	135,4	135,4	164,5	299,9
		Plastificación	109,0	26,3	0,0	135,3	135,3	52,9	188,2
	ESB3	Rotura	82,0	38,0	0,0	120,0	120,0	179,9	299,9
		Plastificación	82,0	31,6	0,0	113,6	113,6	112,4	226,1
	DSB1	Rotura	64,0	26,1	0,0	90,1	90,1	209,8	299,9
		Plastificación	64,0	20,4	0,0	84,4	84,4	93,1	177,5
	DSB2	Rotura	62,0	25,0	0,0	87,0	87,0	212,9	299,9
		Plastificación	62,0	27,0	0,0	89,0	89,0	181,3	270,3
	DSA2	Rotura	109,0	27,7	0,0	136,7	136,7	163,2	299,9
		Plastificación	109,0	27,6	0,0	136,6	136,6	60,3	196,9
	DSB3	Rotura	57,0	30,6	0,0	87,6	87,6	212,3	299,9
		Plastificación	57,0	34,1	0,0	91,1	91,1	179,5	270,6
	DSA3	Rotura	90,0	30,6	0,0	120,6	120,6	179,3	299,9
		Plastificación	90,0	34,1	0,0	124,1	124,1	144,8	268,9

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M0Sb	ESB1	Rotura	100,0	23,8	0,0	123,8	123,8	185,8	309,6
		Plastificación	100,0	21,2	0,0	121,2	121,2	50,9	172,1
ESA1	ESA1	Rotura	100,0	20,5	0,0	120,5	120,5	189,1	309,6
		Plastificación	100,0	19,6	0,0	119,6	119,6	149,8	269,4
ESB3	ESB3	Rotura	80,0	31,4	0,0	111,4	111,4	198,2	309,6
		Plastificación	80,0	27,4	0,0	107,4	107,4	163,1	270,6
DSB1	DSB1	Rotura	45,0	19,1	0,0	64,1	64,1	245,5	309,6
		Plastificación	45,0	18,9	0,0	63,9	63,9	160,5	224,4
DSA1	DSA1	Rotura	100,0	19,1	0,0	119,1	119,1	190,5	309,6
		Plastificación	100,0	19,1	0,0	119,1	119,1	65,4	184,5
DSB2	DSB2	Rotura	70,0	31,2	0,0	101,2	101,2	208,4	309,6
		Plastificación	70,0	25,5	0,0	95,5	95,5	176,3	271,8
DSA2	DSA2	Rotura	90,0	25,4	0,0	115,4	115,4	194,2	309,6
		Plastificación	90,0	21,0	0,0	111,0	111,0	158,5	269,5
DSB3	DSB3	Rotura	80,0	31,5	0,0	111,5	111,5	198,1	309,6
		Plastificación	80,0	33,0	0,0	113,0	113,0	124,6	237,7
DSA3	DSA3	Rotura	40,0	31,9	0,0	71,9	71,9	237,7	309,6
		Plastificación	40,0	31,8	0,0	71,8	71,8	208,7	280,5

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A0Sa	ESB1	Rotura	109,0	6,8	0,0	115,8	115,8	210,8	326,6
		Plastificación	109,0	17,8	0,0	126,8	126,8	108,6	235,4
	ESA1	Rotura	123,0	13,4	0,0	136,4	136,4	190,2	326,6
		Plastificación	123,0	18,3	0,0	141,3	141,3	41,5	182,8
	ESB2	Rotura	100,0	18,6	0,0	118,6	118,6	208,0	326,6
		Plastificación	100,0	26,0	0,0	126,0	126,0	97,1	223,1
	ESA2	Rotura	60,0	12,1	0,0	72,1	72,1	254,5	326,6
		Plastificación	60,0	26,4	0,0	86,4	86,4	102,1	188,5
	ESA3	Rotura	99,0	31,3	0,0	130,3	130,3	196,3	326,6
		Plastificación	99,0	25,6	0,0	124,6	124,6	162,1	286,7
	DSB1	Rotura	110,0	8,3	0,0	118,3	118,3	208,3	326,6
		Plastificación	110,0	18,7	0,0	128,7	128,7	113,8	242,5
	DSA1	Rotura	120,0	9,3	0,0	129,3	129,3	197,3	326,6
		Plastificación	120,0	18,9	0,0	138,9	138,9	23,2	162,1
	DSB2	Rotura	96,0	7,7	0,0	103,7	103,7	222,9	326,6
		Plastificación	96,0	26,3	0,0	122,3	122,3	118,1	240,4
	DSA2	Rotura	115,0	5,7	0,0	120,7	120,7	205,9	326,6
		Plastificación	115,0	26,7	0,0	141,7	141,7	63,7	205,4

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A0Sa	DSA3	Rotura	65,0	30,9	0,0	95,9	95,9	230,7	326,6
		Plastificación	65,0	33,0	0,0	98,0	98,0	171,8	269,8
A0Sb	ESB1	Rotura	100,0	43,3	0,0	143,3	143,3	176,4	319,7
		Plastificación	100,0	22,7	0,0	122,7	122,7	149,1	271,8
	ESA1	Rotura	130,0	33,0	0,0	163,0	163,0	156,7	319,7
		Plastificación	130,0	22,7	0,0	152,7	152,7	62,2	215,0
	ESB2	Rotura	150,0	30,2	0,0	180,2	180,2	139,5	319,7
		Plastificación	150,0	30,1	0,0	180,1	180,1	54,0	234,0
	ESA2	Rotura	50,0	32,1	0,0	82,1	82,1	237,6	319,7
		Plastificación	50,0	30,0	0,0	80,0	80,0	163,9	243,9
	ESB3	Rotura	140,0	34,4	0,0	174,4	174,4	145,3	319,7
		Plastificación	140,0	34,5	0,0	174,5	174,5	131,6	306,1
	ESA3	Rotura	50,0	39,7	0,0	89,7	89,7	230,0	319,7
		Plastificación	50,0	36,4	0,0	86,4	86,4	151,0	237,4
	DSB1	Rotura	110,0	31,0	0,0	141,0	141,0	178,7	319,7
		Plastificación	110,0	30,0	0,0	140,0	140,0	103,8	243,8
	DSA1	Rotura	130,0	40,4	0,0	170,4	170,4	149,3	319,7
		Plastificación	130,0	30,7	0,0	160,7	160,7	48,3	209,1

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A0Sb	DSA2	Rotura	110,0	54,2	0,0	164,2	164,2	155,5	319,7
		Plastificación	110,0	33,8	0,0	143,8	143,8	104,5	248,3
	DSB3	Rotura	80,0	36,3	0,0	116,3	116,3	203,4	319,7
		Plastificación	80,0	36,2	0,0	116,2	116,2	127,2	243,4
M1Sa	DSB2-F6	Rotura	87,0	52,1	0,0	139,1	139,1	210,3	349,4
		Plastificación	87,0	52,0	22,0	139,0	161,0	54,8	215,7
	DSB3-F2	Rotura	62,5	35,5	0,0	98,0	98,0	251,4	349,4
		Plastificación	62,5	30,1	7,2	92,6	99,7	158,7	258,4
M1Sb	ESB1-A8	Rotura	111,5	20,4	0,0	131,9	131,9	192,8	324,7
		Plastificación	111,5	20,4	12,5	131,9	144,3	94,4	238,7
	ESA1-A7	Rotura	151,8	19,3	0,0	171,0	171,0	153,7	324,7
		Plastificación	151,8	19,0	10,0	170,7	180,7	90,9	271,6
	ESB2-A6	Rotura	96,0	49,1	0,0	145,1	145,1	179,6	324,7
		Plastificación	96,0	23,4	0,0	119,4	119,4	186,5	305,9
		Desprendimiento FRP	96,0	10,2	3,2	106,2	109,4	163,1	272,4
	ESB2-A5	Rotura	90,0	49,1	0,0	139,1	139,1	185,6	324,7
		Plastificación	90,0	23,4	0,0	113,4	113,4	192,5	305,9
		Desprendimiento FRP	90,0	10,2	15,2	100,2	115,3	157,1	272,4

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M1Sb		Rotura	123,0	30,0	0,0	153,0	153,0	171,7	324,7
	ESA2-A4	Plastificación	123,0	25,6	1,0	148,6	149,6	77,2	226,8
		Desprendimiento FRP	123,0	30,0	3,7	153,0	156,7	115,7	272,4
	ESB3-A3	Rotura	68,5	31,4	0,0	99,9	99,9	224,8	324,7
		Plastificación	68,5	28,5	6,8	97,0	103,8	177,3	281,1
	ESA3-A1	Rotura	193,5	28,9	0,0	222,4	222,4	102,3	324,7
		Plastificación	193,5	28,7	0,2	222,2	222,4	39,2	261,6
	DSB1-F9	Rotura	124,0	18,7	0,0	142,7	142,7	182,0	324,7
		Plastificación	124,0	18,6	6,3	142,6	148,9	27,2	176,1
	DSA1-F7	Rotura	144,0	18,6	0,0	162,6	162,6	162,1	324,7
		Plastificación	144,0	18,6	2,4	162,6	165,0	91,6	256,6
	DSB2-F6	Rotura	106,5	198,0	0,0	304,5	304,5	20,2	324,7
		Plastificación	106,5	24,2	4,8	130,7	135,5	175,8	311,3
		Desprendimiento FRP	106,5	12,2	0,7	118,7	119,4	142,0	261,4
	DSA2-F4	Rotura	116,5	42,9	0,0	159,4	159,4	165,3	324,7
		Plastificación	116,5	26,2	0,9	142,7	143,5	73,0	216,5
		Desprendimiento FRP	116,5	42,9	2,6	159,4	162,0	99,4	261,4
	DSB3-F3	Rotura	68,5	51,1	0,0	119,6	119,6	205,1	324,7
		Plastificación	68,5	33,3	7,8	101,8	109,6	147,3	256,9

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M1Sb	DSA3-F1	Rotura	105,0	33,3	0,0	138,3	138,3	186,4	324,7
		Plastificación	105,0	33,0	0,3	138,0	138,2	133,3	271,5
A1Sa	DSB1-F9	Rotura	98,0	27,3	0,0	125,3	125,3	208,5	333,8
		Plastificación	98,0	25,5	5,8	123,5	129,3	148,5	277,8
		Desprendimiento FRP	98,0	13,8	2,3	111,7	114,0	124,3	238,3
DSA1-F7		Rotura	132,0	50,2	0,0	182,2	182,2	151,6	333,8
		Plastificación	132,0	29,3	20,2	161,3	181,4	37,9	219,4
		Desprendimiento FRP	132,0	25,7	22,2	157,7	179,9	58,4	238,3
DSB2-F6		Rotura	124,7	56,6	0,0	181,3	181,3	152,5	333,8
		Plastificación	124,7	32,9	21,0	157,6	178,6	52,1	230,7
		Desprendimiento FRP	124,7	56,6	16,6	181,3	197,8	93,4	291,2
DSA2-F4		Rotura	119,0	33,8	0,0	152,8	152,8	181,0	333,8
		Plastificación	119,0	32,4	2,5	151,4	154,0	118,8	272,8
		Desprendimiento FRP	119,0	32,6	7,9	151,6	159,5	131,7	291,2
A1Sb	ESB1-A8	Rotura	117,0	81,8	0,0	198,8	198,8	137,0	335,8
		Plastificación	117,0	34,6	21,4	151,6	173,0	76,4	249,4
		Desprendimiento FRP	117,0	81,8	11,8	198,8	210,6	92,2	302,8
ESA1-A7		Rotura	141,5	155,8	0,0	297,3	297,3	38,5	335,8
		Plastificación	141,5	154,5	23,4	296,0	319,4	-106,7	212,8

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A1Sb		Rotura	127,5	82,5	0,0	210,0	210,0	125,8	335,8
	ESA2-A4	Plastificación	127,5	47,9	0,5	175,4	175,9	73,3	249,2
		Desprendimiento FRP	127,5	48,8	16,0	176,3	192,3	94,5	286,8
		Rotura	96,0	41,6	0,0	137,6	137,6	198,2	335,8
	DSB1-F9	Plastificación	96,0	18,6	5,9	114,6	120,5	127,5	248,1
		Rotura	110,5	41,6	0,0	152,1	152,1	183,7	335,8
	DSB1-F8	Plastificación	110,5	18,6	14,7	129,1	143,9	104,2	248,1
		Desprendimiento FRP	110,5	41,6	9,2	152,1	161,3	127,7	289,0
		Rotura	139,6	63,3	0,0	202,9	202,9	132,9	335,8
	DSA1-F7	Plastificación	139,6	63,0	23,3	202,6	225,8	-12,6	213,2
		Desprendimiento FRP	139,6	15,0	12,1	154,6	166,8	122,2	289,0
		Rotura	81,9	35,6	0,0	117,5	117,5	218,3	335,8
	DSB2-F6	Plastificación	81,9	26,8	6,7	108,7	115,4	147,7	263,1
		Desprendimiento FRP	81,9	26,9	7,0	108,8	115,8	171,0	286,8
		Rotura	116,5	29,9	0,0	146,4	146,4	189,4	335,8
	DSA2-F4	Plastificación	116,5	26,3	0,7	142,8	143,5	105,9	249,5
		Desprendimiento FRP	116,5	26,9	21,4	143,4	164,8	122,0	286,8

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M2Sa		Rotura	85,0	41,1	0,0	126,1	126,1	158,8	284,9
	ESB1-A9	Plastificación	85,0	40,7	16,0	125,7	141,7	34,8	176,5
		Desprendimiento FRP	85,0	38,5	21,7	123,5	145,2	70,0	215,2
		Rotura	120,0	38,8	0,0	158,8	158,8	126,1	284,9
	ESA1-A7	Plastificación	120,0	38,4	17,4	158,4	175,8	26,9	202,7
		Desprendimiento FRP	120,0	38,4	30,4	158,4	188,8	33,5	222,3
		Rotura	74,0	23,3	0,0	97,3	97,3	187,6	284,9
	ESB2-A5	Plastificación	74,0	46,1	17,1	120,1	137,2	118,9	256,1
		Desprendimiento FRP	74,0	38,8	10,8	112,8	123,6	98,7	222,3
		Rotura	97,5	51,7	0,0	149,2	149,2	135,7	284,9
	ESA2-A4	Plastificación	97,5	51,7	2,6	149,2	151,9	51,1	202,9
		Desprendimiento FRP	97,5	51,1	3,2	148,6	151,8	70,5	222,3
		Rotura	87,0	28,9	9,1	115,9	125,0	159,9	284,9
	ESA3-A1	Plastificación	87,0	29,1	4,6	116,1	120,7	158,9	279,5
		Rotura	115,0	18,1	0,0	133,1	133,1	151,8	284,9
	DSB1-F9	Plastificación	115,0	17,1	13,1	132,1	145,1	77,2	222,3
		Desprendimiento FRP	115,0	17,6	16,9	132,6	149,6	103,0	252,6
		Rotura	130,0	24,4	0,0	154,4	154,4	130,5	284,9
	DSA1-F7	Plastificación	130,0	19,3	1,3	149,3	150,6	49,4	199,9

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M2Sa		Rotura	105,0	25,0	0,0	130,0	130,0	154,9	284,9
	DSA2-F4	Plastificación	105,0	24,9	8,0	129,9	137,9	98,0	235,9
		Desprendimiento FRP	105,0	24,7	10,9	129,7	140,5	112,1	252,6
M2Sb		Rotura	118,0	22,1	0,0	140,1	140,1	119,0	259,1
	ESB1-A8	Plastificación	118,0	19,7	17,5	137,7	155,2	72,5	227,7
		Desprendimiento FRP	118,0	19,2	16,7	137,2	153,9	97,0	250,9
		Rotura	187,5	19,6	0,0	207,1	207,1	52,0	259,1
	ESA1-A7	Plastificación	187,5	19,2	1,3	206,7	208,0	29,7	237,7
		Desprendimiento FRP	187,5	19,2	12,3	206,7	219,0	31,9	250,9
		Rotura	100,0	23,5	0,0	123,5	123,5	135,6	259,1
	ESA2-A4	Plastificación	100,0	26,6	0,0	126,6	126,6	124,0	250,5
		Desprendimiento FRP	100,0	13,9	11,8	113,9	125,7	28,3	154,0
		Rotura	94,0	31,1	13,4	125,1	138,5	120,6	259,1
	ESA3-A1	Plastificación	94,0	33,6	10,0	127,6	137,7	106,8	244,4
		Rotura	116,0	24,1	0,0	140,1	140,1	119,0	259,1
	DSB1-F8	Plastificación	116,0	24,0	15,0	140,0	155,0	56,5	211,6
		Desprendimiento FRP	116,0	24,1	15,2	140,1	155,3	84,7	240,0
		Rotura	101,5	28,2	0,0	129,7	129,7	129,4	259,1
	DSA2-F4	Plastificación	101,5	27,8	0,0	129,3	129,3	120,0	249,3
		Desprendimiento FRP	101,5	4,0	17,6	105,5	123,1	28,3	151,4

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M2Sb	DSA3-F1	Rotura	74,0	31,3	22,7	105,3	128,0	131,1	259,1
		Plastificación	74,0	31,0	20,3	105,0	125,3	104,3	229,6
A2Sa	DSA2-F4	Rotura	0,0	31,0	0,3	31,0	31,3	306,8	338,1
		Plastificación	0,0	32,0	0,2	32,0	32,2	267,1	299,3
A2Sb	ESB1-A9	Rotura	112,5	22,4	0,0	134,9	134,9	205,5	340,4
		Plastificación	112,5	22,3	10,4	134,8	145,2	129,6	274,7
ESA1-A7		Rotura	135,0	23,6	0,0	158,6	158,6	181,8	340,4
		Plastificación	135,0	23,4	11,8	158,4	170,2	70,6	240,8
		Desprendimiento FRP	135,0	22,1	15,0	157,1	172,1	117,0	289,0
ESB2-A6		Rotura	87,5	104,5	0,0	192,0	192,0	148,4	340,4
		Plastificación	87,5	26,5	20,4	114,0	134,4	157,7	292,1
ESA2-A4		Rotura	100,0	104,4	0,0	204,4	204,4	136,0	340,4
		Plastificación	100,0	26,2	1,3	126,2	127,5	173,8	301,3
ESA3-A1		Rotura	80,0	119,2	0,0	199,2	199,2	141,2	340,4
		Plastificación	80,0	29,1	0,0	109,1	109,1	182,9	292,0
M1B	DSB1-F9	Rotura	90,0	39,2	14,4	129,2	143,6	184,5	328,1
		Plastificación	90,0	21,0	10,4	111,0	121,3	111,8	233,2

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)	
M1B	DSA1-F7	Rotura	124,0	21,4	0,0	145,4	145,4	182,7	328,1	
		Plastificación	124,0	20,9	12,8	144,9	157,6	61,9	219,5	
	DSB2-F5	Rotura	88,5	27,7	14,3	116,2	130,5	197,6	328,1	
		Plastificación	88,5	27,6	11,4	116,1	127,5	122,8	250,3	
	DSA2-F4	Rotura	96,0	27,7	28,2	123,7	151,9	176,2	328,1	
		Plastificación	96,0	27,5	2,2	123,5	125,8	119,3	245,1	
	DSA3-F1	Rotura	92,5	33,3	30,6	125,8	156,3	171,8	328,1	
		Plastificación	92,5	33,0	26,2	125,5	151,6	129,0	280,6	
	M1A	NO PLASTIFICA NI TIENE DESPRENDIMIENTO DEL FRP								
	M2B	DSB1-F8	Rotura	94,5	17,5	16,9	112,0	128,9	196,1	325,0
			Plastificación	94,5	18,0	16,9	112,5	129,5	163,9	293,4
		DSA1-F7	Rotura	112,5	59,2	0,0	171,7	171,7	153,3	325,0
Plastificación			112,5	18,5	29,8	131,0	160,7	99,6	260,3	
DSB2-F6		Rotura	70,5	93,3	21,9	163,8	185,8	139,2	325,0	
		Plastificación	70,5	25,2	20,5	95,7	116,3	144,0	260,2	

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
M2A	ESB1-A9	Rotura	107,5	36,6	0,0	144,1	144,1	203,9	348,0
		Plastificación	107,5	20,5	13,3	128,0	141,4	89,1	230,5
	ESA1-A7	Rotura	145,0	26,6	0,0	171,6	171,6	176,4	348,0
		Plastificación	145,0	20,2	23,8	165,2	189,0	53,7	242,7
	ESA2-A4	Rotura	125,0	27,1	0,0	152,1	152,1	195,9	348,0
		Plastificación	125,0	26,1	28,8	151,1	179,9	83,8	263,7
	ESA3-A1	Rotura	100,0	35,2	6,3	135,2	141,4	206,6	348,0
		Plastificación	100,0	34,4	4,2	134,4	138,6	200,9	339,5
	DSB1-F9	Rotura	109,0	39,1	0,0	148,1	148,1	199,9	348,0
		Plastificación	109,0	21,1	13,5	130,1	143,6	80,3	223,9
	DSA1-F7	Rotura	120,0	21,0	0,0	141,0	141,0	207,0	348,0
		Plastificación	120,0	20,9	0,0	140,9	140,9	128,9	269,8
	DSA2-F4	Rotura	112,5	28,0	0,0	140,5	140,5	207,5	348,0
		Plastificación	112,5	27,7	18,5	140,2	158,7	94,2	252,9
	DSA3-F1	Rotura	90,0	35,2	0,0	125,2	125,2	222,8	348,0
		Plastificación	90,0	34,9	0,0	124,9	124,9	219,9	344,8

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A2B	DSA1-F7	Rotura	132,0	44,9	0,0	176,9	176,9	224,7	401,6
		Plastificación	132,0	44,8	50,0	176,8	226,7	34,3	261,0
	DSB2-F5	Rotura	92,5	61,4	0,0	153,9	153,9	247,7	401,6
		Plastificación	92,5	60,5	22,8	153,0	175,8	119,3	295,1
	DSA2-F4	Rotura	115,0	61,3	0,0	176,3	176,3	225,3	401,6
		Plastificación	115,0	60,9	23,6	175,9	199,5	160,6	360,1
A2A	ESB2-A5	Rotura	11,5	28,4	21,1	39,9	61,0	342,0	403,0
		Plastificación	11,5	31,5	18,8	43,0	61,8	272,3	334,0
A3B	DSA1-F7	Rotura	177,5	48,7	68,5	226,2	294,7	113,9	408,6
		Plastificación	177,5	47,8	80,5	225,3	305,7	4,7	310,5
	DSA2-F4	Rotura	142,5	55,9	3,1	198,4	201,5	207,1	408,6
		Plastificación	142,5	56,3	3,2	198,8	201,9	203,1	405,1
A3A	ESB1-A8	Rotura	115,0	61,4	138,9	176,4	315,4	66,8	382,2
		Plastificación	115,0	19,1	8,3	134,1	142,4	169,7	312,1
	ESA1-A7	Rotura	159,0	18,4	115,0	177,4	292,4	89,8	382,2
		Plastificación	159,0	18,7	116,8	177,7	294,5	73,8	368,3
	ESA2-A4	Rotura	132,5	25,3	55,2	157,8	213,0	169,2	382,2
		Plastificación	132,5	25,9	53,2	158,4	211,6	135,4	347,0

Viga	Galgas	Rotura, plastificación, desprendimiento FRP	μV_c galgas afectadas (KN)	V_s (KN)	V_{FRP} (KN)	V_c+V_s (KN)	V_c+V_s $+V_{FRP}$ (KN)	V_{ALA} (KN)	V_u (KN)
A3A	DSB1-F9	Rotura	88,0	148,9	213,9	236,9	450,8	-68,6	382,2
		Plastificación	88,0	21,2	68,5	109,2	177,7	127,5	305,3
	DSA1-F7	Rotura	117,5	41,3	291,0	158,8	449,8	-67,6	382,2
		Plastificación	117,5	39,2	74,1	156,7	230,8	81,5	312,3
	DSA2-F4	Rotura	140,0	106,6	30,2	246,6	276,8	105,4	382,2
		Plastificación	140,0	82,1	26,2	222,1	248,3	114,4	362,7

Tabla A4.1 Resumen de los resultados gráficos de la contribución obtenida por las galgas dispuestas a la resistencia de cortante del hormigón, del acero y del FRP indicando su valor para la rotura, y su valor si plastifican o presentan un desprendimiento prematuro del FRP.

ANEJO 5

CONTRIBUCIÓN A CORTANTE DEL ACERO, DEL FRP, DEL ALA Y DEL HORMIGÓN RESPECTO AL CORTANTE TOTAL

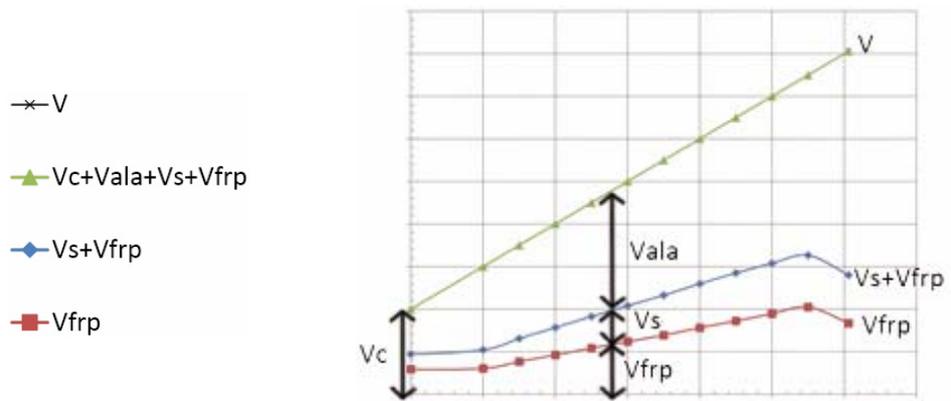


Figura A5.1 Leyenda para los gráficos de la Figura A5.2 a la Figura A5.11

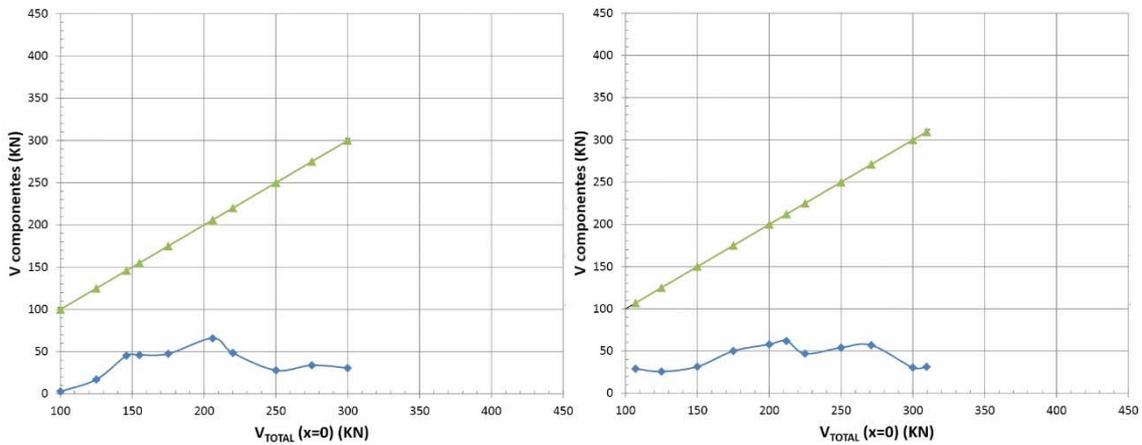


Figura A5.2 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares M0Sa y M0Sb

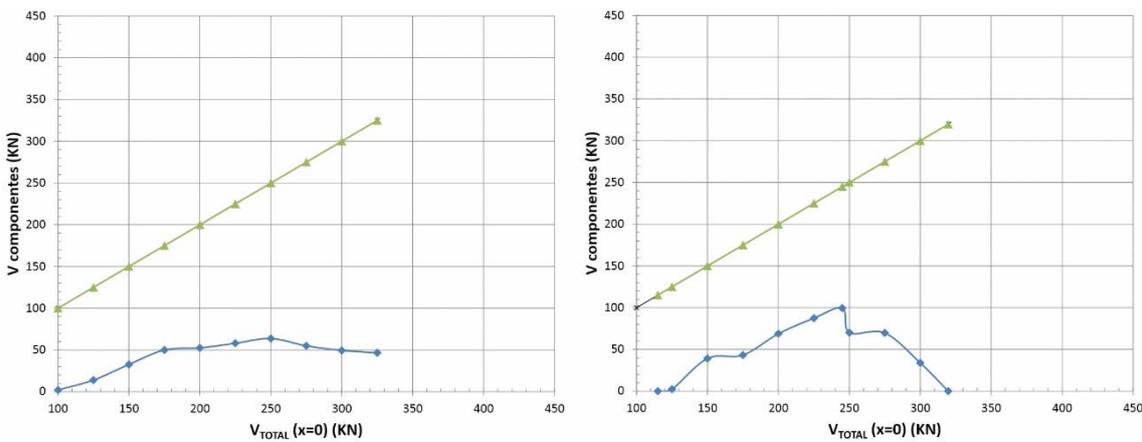


Figura A5.3 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A0Sa y A0Sb

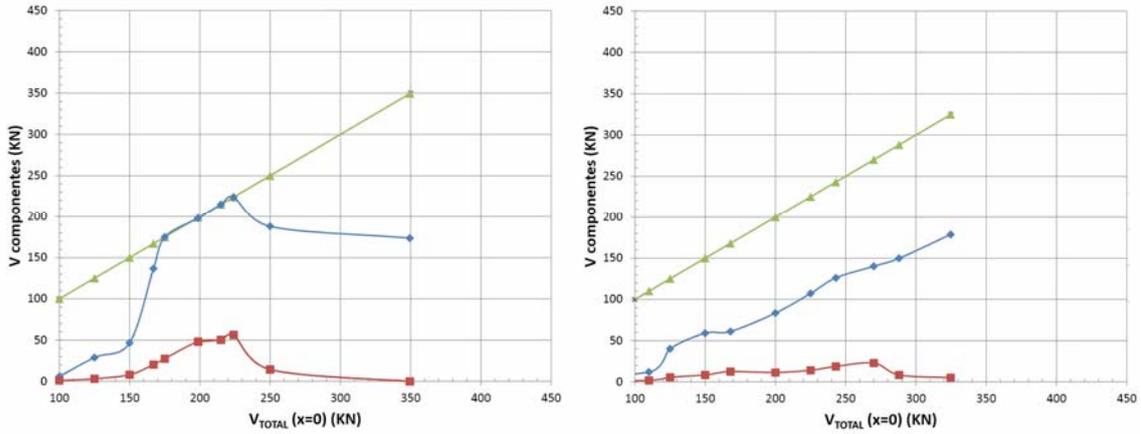


Figura A5.4 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares M1Sa y M1Sb

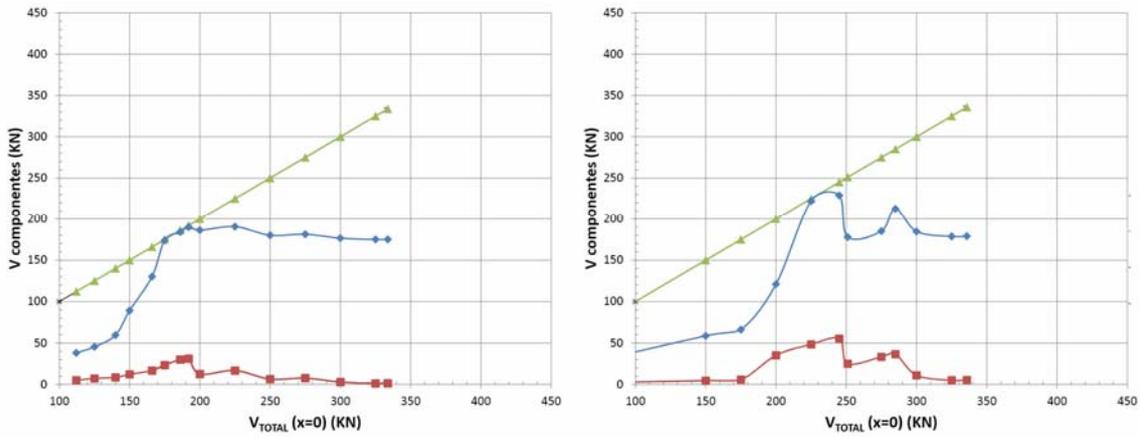


Figura A5.5 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A1Sa y A1Sb

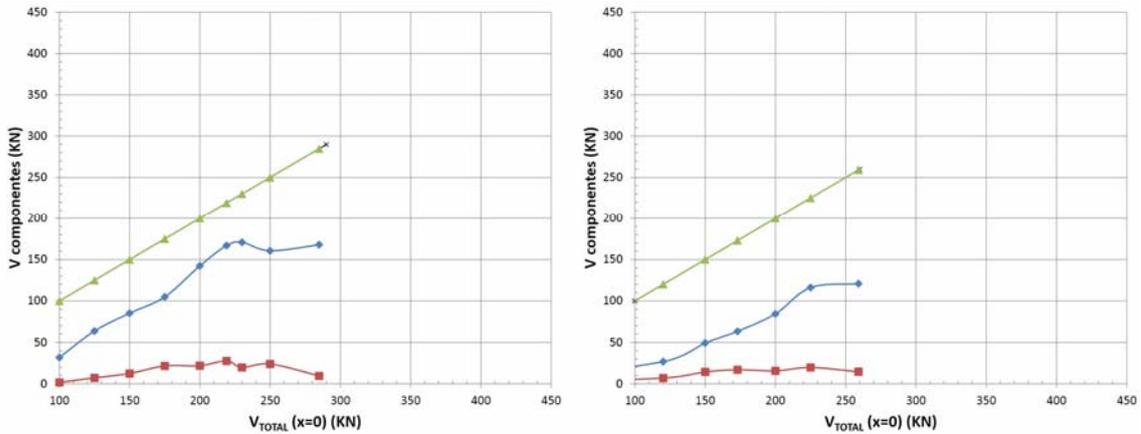


Figura A5.6 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares M2Sa y M2Sb

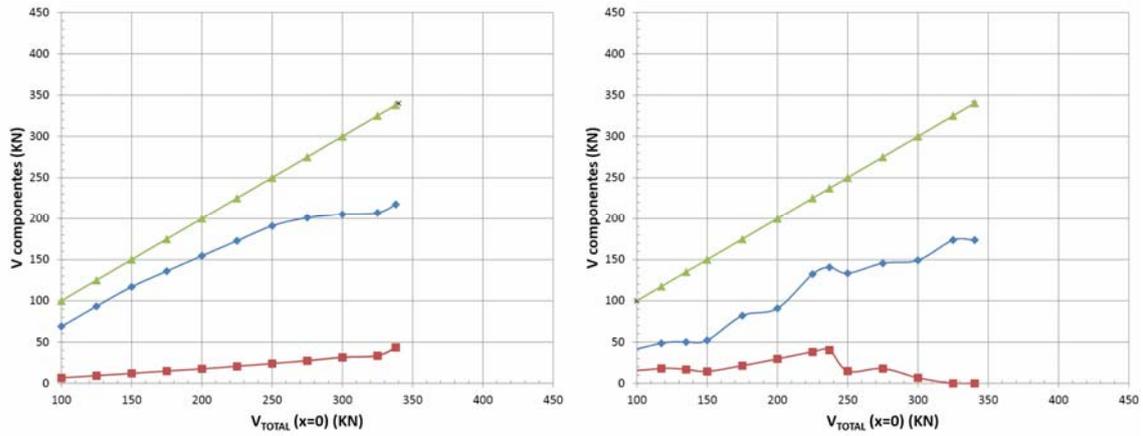


Figura A5.7 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A2Sa y A2Sb

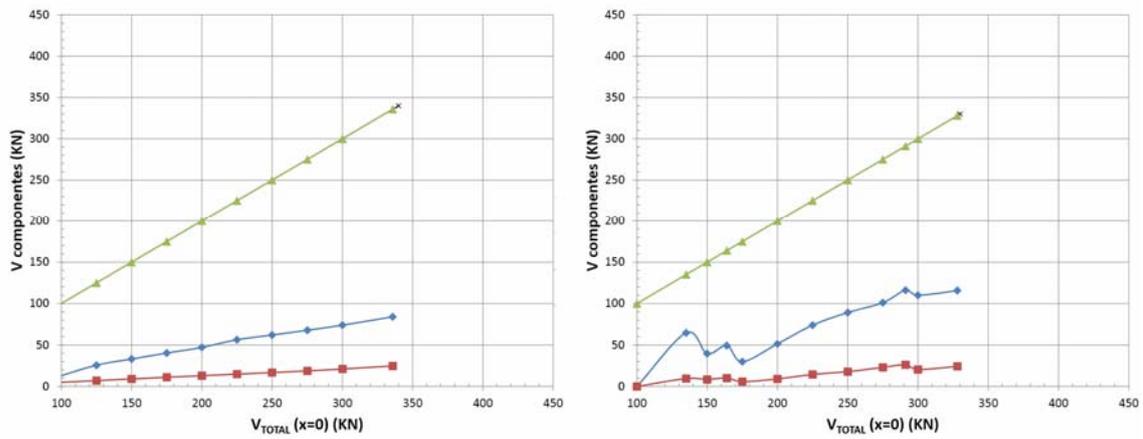


Figura A5.8 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares M1A y M1B

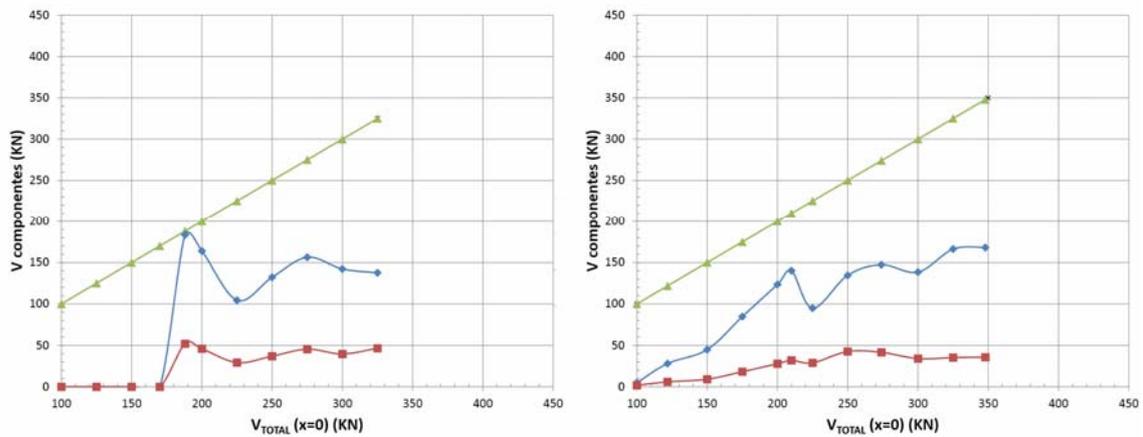


Figura A5.9 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares M2B y M2A

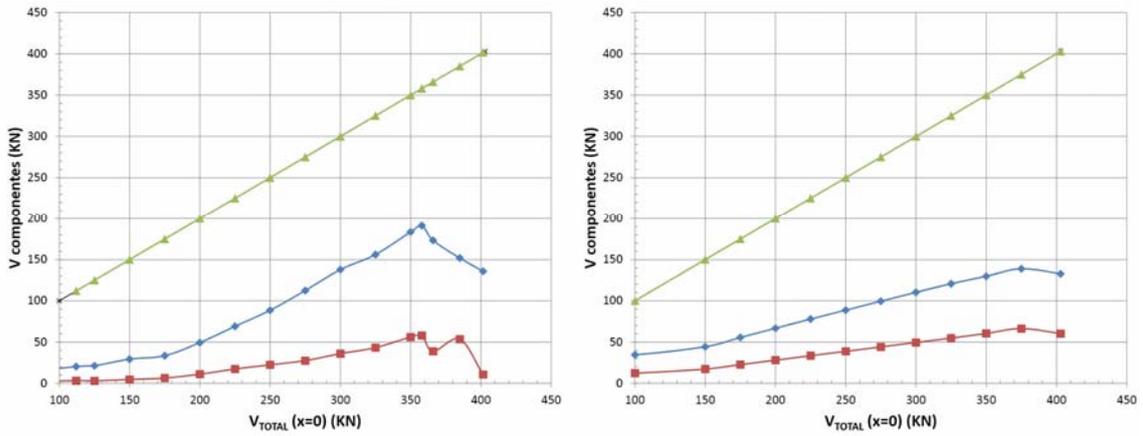


Figura A5.10 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A2B y A2A

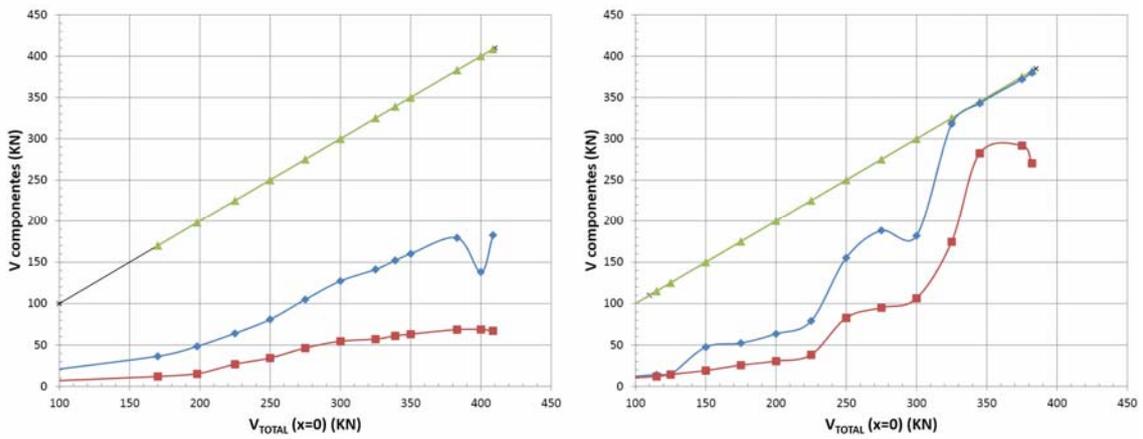


Figura A5.11 Gráfico de las componentes que contribuyen a resistir cortante (hormigón, acero FRP y ala) respecto al cortante total de los ejemplares A3B y A3A