

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Puesta a Punto de Ensayos Lap Peeling y Pull
Off para la Caracterización de Uniones Material
Compuesto-Hormigón

Autor: Javier Naranjo Pérez

Tutores: Jesús Justo Estebaranz y Rafael León Godino

Dep. Mecánica De Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2014



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Puesta a Punto de Ensayos Lap Peeling y Pull Off para la Caracterización de Uniones Material Compuesto-Hormigón

Autor:

Javier Naranjo Pérez

Tutores:

Jesús Justo Estebaranz

Profesor ayudante

Rafael León Godino

Ingeniero Industrial – AICIA

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Grado: Puesta a Punto de Ensayos Lap Peeling y Pull Off para la Caracterización de Uniones Material Compuesto-Hormigón

Autor: Javier Naranjo Pérez

Tutores: Jesús Justo Estebanz y Rafael León Godino

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer al Departamento de Elasticidad y Resistencia de Materiales por la oportunidad que me ha brindado para realizar este Trabajo.

Cabe destacar la labor realizada por los dos tutores, D. Jesús Justo Estebaranz y D. Rafael León Godino, por su buen hacer a la hora de guiar en la realización de este Trabajo y la implicación que han tenido a la hora de corregir los errores surgidos.

Sin olvidar al Profesor D. Antonio Blázquez, al cual hay que agradecer que se haya podido emplear su modelo teórico.

Por último agradecer a todo el personal del LERM que se ha portado de manera excelente a la hora de ayudarme con los problemas surgidos.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	vii
LISTA DE DIAGRAMAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xvii
LISTA DE TABLAS	xix
CAPÍTULO I Introducción	21
I.1 ANTECEDENTES	23
I.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	24
I.3 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS	26
I.3.1 Definición	26
I.3.2 Clasificación	27
I.3.3 Aplicaciones	30
I.4 TIPOS DE REFUERZO PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	32
I.4.1 Encamisado de hormigón	34
I.4.2 Placas de acero.....	35
I.4.3 Pretensado exterior	36
I.4.4 Refuerzo con FRP	38
I.4.4.1 Refuerzo a flexión	40
I.4.4.2 Refuerzo a cizalladura.....	41
I.4.4.3 Near Surface Mounting Reinforcement (NSMR)	42
I.4.4.4 Confinamiento de columnas.....	43

I.4.4.5	Refuerzo de estructuras de mampostería	44
I.4.4.6	Sistemas de Pretensado	45
I.5	PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA UNIÓN MATERIAL COMPUESTO-HORMIGÓN.....	46
I.6	ESTADO DEL ARTE DE ENSAYOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LA UNIÓN MATERIAL COMPUESTO-HORMIGÓN	50
I.6.1	Ensayo a flexión (bending test).....	50
I.6.2	Ensayo de cortadura o lap shear	52
I.6.3	Ensayo de pelado o lap peeling	53
I.6.4	Ensayo pull off	54
I.6.5	Ensayo Shear Torsion	55
I.6.6	Ensayo de compresión	55
I.7	OBJETIVOS DEL TRABAJO	57
I.8	CONTENIDO DEL TRABAJO	58
CAPÍTULO II	Campaña de Ensayos.....	61
II.1	ENSAYO LAP PEELING	64
II.1.1	Fabricación de las probetas de cfrp.....	66
II.1.1.1	Fabricación del laminado de fibra de carbono	66
II.1.1.2	Curado del laminado de fibra de carbono	74
II.1.2	Pegado del laminado de fibra de carbono al hormigón.....	75
II.1.3	Puesta a punto del ensayo lap peeling.....	82
II.1.3.1	Montaje del ensayo	83
II.1.3.2	Realización del ensayo	85
II.1.3.3	Ensayos de prueba.....	86

II.1.4	Estudio de la longitud efectiva.....	95
II.1.4.1	LP-200 (I).....	95
II.1.4.2	LP-200 (II).....	98
II.1.4.3	LP-200 (III).....	100
II.1.4.4	LP-50 (I).....	102
II.1.4.5	LP-50 (II).....	104
II.1.4.6	LP-50 (III).....	106
II.1.4.7	Comparación de los ensayos.....	108
II.1.5	Estudio variando el espesor del laminado.....	112
II.1.5.1	LP-50 G (I).....	112
II.1.5.2	LP-50 G (II).....	115
II.1.5.3	LP-50 G (III).....	116
II.1.5.4	Comparación de los ensayos.....	118
II.1.6	Comparación de resultados con modelo teórico.....	122
II.2	ENSAYO DE PULL OFF.....	126
II.2.1	Fabricación de material compuesto (hand lay-up).....	127
II.2.2	Trepanación de hormigón con corona.....	129
II.2.3	Pegado del disco a la probeta.....	131
II.2.4	Herramientas necesarias para realizar el ensayo.....	135
II.2.5	Modo de realizar el ensayo.....	136
CAPÍTULO III	Conclusiones y Desarrollos Futuros.....	139
III.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DE LOS ENSAYOS.....	141

III.2	NUEVOS PARÁMETROS DE ESTUDIO EN PRÓXIMAS CAMPAÑAS DE ENSAYOS	147
	BIBLIOGRAFÍA	149
	CAPÍTULO IV ANEXOS.....	151
IV.1	ANEXO A: PROTOCOLO DEL ENSAYO DE LAP PEELING	153
IV.2	ANEXO B: PROTOCOLO DEL ENSAYO DE PULL OFF	159

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama I.3.1. <i>Clasificación en función del tipo de refuerzo (Elaboración propia)</i>	28
Diagrama I.3.2. <i>Clasificación en función del tipo de matriz (Elaboración propia)</i>	29
Diagrama I.4.1. <i>Tipos de refuerzos (Elaboración propia)</i>	33
Diagrama I.5.1. <i>Factores que afectan a la calidad de la unión material compuesto-hormigón: soporte de hormigón (Elaboración propia)</i>	47
Diagrama I.5.2. <i>Factores que afectan a la unión material compuesto- hormigón: refuerzo de FRP (Elaboración propia)</i>	48
Diagrama I.5.3. <i>Factores que afectan a la unión material compuesto- hormigón: factores externos (Elaboración propia)</i>	49

LISTA DE FIGURAS

Fig. I.3.1. <i>The Eyecatcher</i> (Fuente: [3]).	31
Fig. I.3.2. <i>Pasarela Fiberline sobre el ave Madrid- Barcelona, a su paso por Lleida</i> (Fuente: [4]).	31
Fig. I.4.1. <i>Aspecto típico de un pilar durante el proceso de ejecución de un refuerzo con encamisado de hormigón armado</i> (Fuente: [4]).	35
Fig. I.4.2. <i>Pretensado exterior de vigas</i> (Fuente: [4]).	37
Fig. I.4.3. <i>Refuerzo a flexión con tiras de CFRP de una losa de hormigón. Primera foto: cara inferior. Segunda foto: cara superior</i> (Fuente: [5]).	40
Fig. I.4.4. <i>Refuerzo a flexión de vigas de hormigón con tiras de CFRP, en Polonia</i> (Fuente: [5]).	41
Fig. I.4.5. <i>Refuerzo a cizalladura (y a flexión) de viga de hormigón con tiras de CFRP, en el puente Duttweiler en Zurich</i> (Fuente: [5]).	41
Fig. I.4.6. <i>Refuerzo a flexión de una losa de hormigón en la zona de momento negativo usando la técnica NSMR, en una planta industrial en Stuttgart</i> (Fuente: [5]).	42
Fig. I.4.7. <i>Refuerzo sísmico de columnas de hormigón con láminas de CFRP, en el estadio Reggio Emilia en Italia</i> (Fuente: [5]).	43
Fig. I.4.8. <i>Varilla de fibra de carbono embebida en el espacio entre los ladrillos como refuerzo, Castillo Vercelli en Italia</i> (Fuente: [5]).	44
Fig. I.4.9. <i>Rehabilitación de juntas de dilatación utilizando tiras pretensadas de CFRP y anclajes con placas de acero, en un puente de carretera en Heilbronn</i> (Fuente: [5]).	45
Fig. I.6.1. <i>Esquema de un ensayo de flexión en una viga de hormigón reforzada con FRP (Elaboración Propia)</i>	51
Fig. I.6.2. <i>Apertura de grietas y rotura por flexión</i> (Fuente: [11]).	52

Fig. I.6.3. Esquema del ensayo Lap Shear, vista en alzado (Elaboración Propia).	53
.....	53
Fig. I.6.4. Esquema del ensayo Lap Peeling, vista en alzado (Elaboración Propia).	53
.....	53
Fig. I.6.5. Corte transversal de la probeta de Pull Off (Elaboración Propia).	54
.....	54
Fig. I.6.6. Configuración del ensayo de Pull Off (Fuente: [14]).	55
.....	55
Fig. I.6.7. Probetas cilíndricas reforzadas con material compuesto sometidas a ensayos de compresión (Fuente: [15]).	56
.....	56
Fig. II.1.1. Efecto de las condiciones de humedad y temperatura en los ensayos de Lap Peeling (Fuente: [11]).	65
.....	65
Fig. II.1.2. Rollo de fibra de carbono pre-preg (Elaboración propia).	67
.....	67
Fig. II.1.3. Corte de la lámina a 400cm de longitud. (Elaboración propia).	68
.....	68
Fig. II.1.4. Láminas cortadas (Elaboración propia).	68
.....	68
Fig. II.1.5. Apilado de las láminas de CFRP (Elaboración propia).	69
.....	69
Fig. II.1.6. Última capa donde se deja la capa protectora adherida (Elaboración propia).	69
.....	69
Fig. II.1.7. Bolsa de vacío intermedia previo a la compactación (Elaboración propia).	70
.....	70
Fig. II.1.8. Bolsa de vacío intermedia compactada (Elaboración propia).	70
.....	70
Fig. II.1.9. Plancha para hacer la bolsa (Elaboración propia).	71
.....	71
Fig. II.1.10. Cierre del perímetro con corcho (Elaboración propia).	71
.....	71
Fig. II.1.11. Lámina de nylon sobre el conjunto (Elaboración propia).	72
.....	72
Fig. II.1.12. Tejido absorbedor y tomas de vacío (Elaboración propia).	72
.....	72
Fig. II.1.13. Colocación del cromato en los bordes exteriores de la plancha (Elaboración propia).	73
.....	73
Fig. II.1.14. Bolsa de vacío completa con la compactación (Elaboración propia).	73
.....	73
Fig. II.1.15. Autoclave (Elaboración propia).	74
.....	74

Fig. II.1.16. Gráfica y tabla con los valores del ciclo empleado para el curado en autoclave (Elaboración propia).....	75
Fig. II.1.17. Corte del laminado de CFRP con la sierra de disco de diamante (Elaboración propia).	76
Fig. II.1.18. Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia).....	77
Fig. II.1.19. Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia).....	77
Fig. II.1.20. Limpieza de la superficie de los laminados con acetona (Elaboración propia).	78
Fig. II.1.21. Desbastado del hormigón con una amoladora (Elaboración propia).	79
Fig. II.1.22. Desbastado del hormigón con una amoladora II (Elaboración propia).....	79
Fig. II.1.23. Adhesivo aeronáutico de dos componentes, EA-9394 (Elaboración propia).....	80
Fig. II.1.24. Mezcla de los componentes (Elaboración propia).....	81
Fig. II.1.25. Aplicación de presión mediante gatos y pesas (Elaboración propia).	81
Fig. II.1.26. Curado del adhesivo con las dos estufas (Elaboración propia).....	82
Fig. II.1.27. Esquema del ensayo de pelado (Elaboración propia).....	83
Fig. II.1.28. Útil para el ensayo (Elaboración propia).....	83
Fig. II.1.29. Sistema de deslizamiento con los pernos y la placa uniforme (Elaboración propia).	84
Fig. II.1.30. Funcionamiento del útil (Elaboración propia).	85
Fig. II.1.31. Montaje del ensayo. IPE abajo (Elaboración propia).....	85
Fig. II.1.32. Disposición del ensayo con la carga en el extremo (Elaboración propia).....	87
Fig. II.1.33. Rotura por el hormigón (Elaboración propia).....	88
Fig. II.1.34. Carga en el borde con el hormigón (Elaboración propia).	89

Fig. II.1.35. <i>Fallo en el hormigón (Elaboración propia)</i>	93
Fig. II.1.36. <i>Montaje del ensayo (Elaboración propia)</i>	96
Fig. II.1.37. <i>Ejecución del ensayo LP-200 I (Elaboración propia)</i>	97
Fig. II.1.38. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-200 I (Elaboración propia)</i>	97
Fig. II.1.39. <i>Ejecución del ensayo LP-200 II (Elaboración propia)</i>	99
Fig. II.1.40. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-200 II (Elaboración propia)</i>	99
Fig. II.1.41. <i>Ejecución del ensayo LP-200 III (Elaboración propia)</i>	101
Fig. II.1.42. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-200 III (Elaboración propia)</i> . ..	101
Fig. II.1.43. <i>Ejecución del ensayo LP-50 I (Elaboración propia)</i>	103
Fig. II.1.44. <i>Vista de la rotura para el ensayo LP-50 I (Elaboración propia)</i> .	103
Fig. II.1.45. <i>Ejecución del ensayo LP-50 II (Elaboración propia)</i>	105
Fig. II.1.46. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-50 II (Elaboración propia)</i>	105
Fig. II.1.47. <i>Ejecución del ensayo LP-50 III (Elaboración propia)</i>	107
Fig. II.1.48. <i>Vista de la rotura para el ensayo LP-50 III (Elaboración propia)</i>	107
Fig. II.1.49. <i>Ejecución del ensayo LP-50 G I (Elaboración propia)</i>	113
Fig. II.1.50. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-50 G I (Elaboración propia)</i>	114
Fig. II.1.51. <i>Ejecución del ensayo LP-50 G II (Elaboración propia)</i>	115
Fig. II.1.52. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-50 G II (Elaboración propia)</i> . .	115
Fig. II.1.53. <i>Ejecución del ensayo LP-50 G III (Elaboración propia)</i>	117
Fig. II.1.54. <i>Vista de la rotura del ensayo LP-50 III (Elaboración propia)</i>	117
Fig. II.2.1. <i>Configuración del ensayo de Pull Off (Fuente: [14])</i>	126
Fig. II.2.2. <i>Aplicación de la resina a la fibra fuera del bloque de hormigón (Elaboración propia)</i>	127
Fig. II.2.3. <i>Pegado de la lámina de CFRP al hormigón (Elaboración propia)</i> .	128
Fig. II.2.4. <i>Corona circular de vidia (Elaboración propia)</i>	129
Fig. II.2.5. <i>Perforadora de hormigón (Elaboración propia)</i>	130
Fig. II.2.6. <i>Trepanado del bloque de hormigón (Elaboración propia)</i>	131

Fig. II.2.7. <i>Adhesivo aeronáutico de dos componentes, EA-9394 (Elaboración propia)</i>	132
Fig. II.2.8. <i>Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia)</i>	133
Fig. II.2.9. <i>Lijado del disco de acero (Elaboración Propia)</i>	133
Fig. II.2.10. <i>Mezcla de los componentes (Elaboración propia)</i>	134
Fig. II.2.11. <i>Pegado del disco con el adhesivo (Elaboración propia)</i>	134
Fig. II.2.12. <i>Máquina de ensayo de Pull Off (Elaboración propia)</i>	135
Fig. II.2.13. <i>Realización del ensayo (Elaboración propia)</i>	136
Fig. II.2.14. <i>Rotura del hormigón I (Elaboración propia)</i>	137
Fig. II.2.15. <i>Rotura del hormigón II (Elaboración propia)</i>	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico II.1.1. <i>Ensayo de prueba 2 (Elaboración propia).</i>	90
Gráfico II.1.2. <i>Ensayo de prueba 3 (Elaboración propia).</i>	91
Gráfico II.1.3. <i>Ensayo de prueba 4 (Elaboración propia).</i>	92
Gráfico II.1.4. <i>Ensayo de prueba 5 (Elaboración propia).</i>	93
Gráfico II.1.5. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 I.</i>	98
Gráfico II.1.6. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 II.</i>	100
Gráfico II.1.7. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 III.</i>	102
Gráfico II.1.8. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 I.</i>	104
Gráfico II.1.9. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 II.</i>	106
Gráfico II.1.10. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 III.</i>	108
Gráfico II.1.11. <i>Comparación de los 3 ensayos para L=200 mm.</i>	109
Gráfico II.1.12. <i>Comparación de los 3 ensayos para L=200 mm (I).</i>	109
Gráfico II.1.13. <i>Comparación de los 3 ensayos para L=50 mm.</i>	110
Gráfico II.1.14. <i>Comparación de los 6 ensayos realizados para el estudio de la L_f.</i>	110
Gráfico II.1.15. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G I.</i>	114
Gráfico II.1.16. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G II.</i>	116
Gráfico II.1.17. <i>Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G III.</i>	118
Gráfico II.1.18. <i>Comparación de los 3 ensayos para el espesor de 5 capas.</i>	119
Gráfico II.1.19. <i>Comparación de los 3 ensayos para el espesor de 10 capas.</i>	119
Gráfico II.1.20. <i>Comparación de los 6 ensayos realizados para el estudio del espesor del laminado de CFRP.</i>	120
Gráfico II.1.21. <i>Modelo Resistencia de Materiales. Desplazamiento transversal (Elaboración Propia).</i>	123

Gráfico II.1.22. <i>Modelo Resistencia de Materiales. Cortante (Elaboración Propia)</i>	124
Gráfico II.1.23. <i>Modelo Resistencia de Materiales. Flector (Elaboración propia)</i>	124
Gráfico II.1.24. <i>Modelo Resistencia de Materiales. Tensión peeling en el adhesivo (Elaboración propia)</i>	125

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1.1. <i>Valores máximos y coeficiente de variación (Elaboración propia).</i>	111
Tabla II.1.2. <i>Valores máximos y coeficiente de variación (Elaboración propia).</i>	120
Tabla II.1.3. <i>Área bajo la curva de los 6 ensayos del estudio del espesor (Elaboración propia).</i>	121
Tabla III.1.1. <i>Relación existente entre las cargas para el estudio de los dos espesores (Elaboración propia).</i>	144
Tabla III.1.2. <i>Área bajo la curva para los 6 ensayos correspondientes al estudio del espesor (Elaboración propia).</i>	145

CAPÍTULO I

Introducción

I.1 ANTECEDENTES

El presente documento se enmarca bajo la normativa de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla para la obtención de los créditos de la asignatura “Trabajo Fin de Grado” y así obtener el título de Grado en Ingeniería Civil (Plan 2011).

El departamento adjudicador del Trabajo ha sido el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras siendo los tutores D. Jesús Justo Estebaranz y D. Rafael León Godino.

I.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La puesta en marcha de este Trabajo tiene su origen en un Proyecto I+D en el que está implicada la Universidad de Sevilla.

Dicho Proyecto de investigación tiene como nombre NUREMCO. Este nombre es un acrónimo de Nuevas Tecnologías de Refuerzo con Materiales Compuestos. Su objetivo general es investigar sobre nuevos sistemas de refuerzos estructurales basados en materiales compuestos, desarrollando el conocimiento actual y generando nuevas tecnologías relacionadas, sostenibles y respetuosas con el medioambiente.

Ante las perspectivas económicas, la situación particular que afronta el sector y dando respuesta a la nueva conciencia social que es la sostenibilidad, la rehabilitación estructural está llamada a ocupar el vacío dejado por el sector de la edificación de nueva construcción y la reducción en el número de licitaciones de obra pública. En el ámbito de la rehabilitación mediante refuerzos estructurales es por tanto donde los materiales compuestos encuentran un gran campo de aplicación en el futuro.

Por una parte, la rehabilitación o refuerzo de estructuras se ejecuta para incrementar la vida útil de éstas. Se puede llevar a cabo en estructuras que se encuentran dañadas, mal ejecutadas o simplemente que requieren de una mayor capacidad portante como consecuencia del aumento de las solicitaciones sobre la misma. Este aumento del tiempo de uso de una determinada edificación u obra civil representa en sí misma una medida en pro del uso eficiente de los recursos, reduciendo el impacto sobre el entorno.

Por otra parte, los materiales compuestos no presentan degradación por corrosión y son muy resistentes a los ataques químicos, por lo que su empleo en refuerzos permitiría obtener soluciones con una necesidad prácticamente nula de mantenimiento y, por extensión, con una mayor durabilidad y sostenibilidad.

Debido a que estos sistemas de refuerzo se encuentran aún en desarrollo, los ensayos asociados se encuentran asimismo en una etapa inicial, de modo que muchos de los ensayos que se hallan en la bibliografía son propuestas de distintos investigadores y no están normalizados.

El contenido de este documento es, por tanto, una parte del desarrollo de la investigación llevada a cabo dentro del marco del Proyecto NUREMCO. En concreto, este trabajo se encarga de poner a punto ensayos que permiten caracterizar la unión de Material Compuesto-Hormigón.

En los apartados siguientes de este capítulo se elabora una introducción en la que primero se describen los Materiales Compuestos, para después hablar de su aplicación en sistemas de rehabilitación y refuerzo. Finalmente se hace referencia a los diferentes ensayos existentes para evaluar la calidad de este tipo de refuerzos.

I.3 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

El presente apartado es una introducción a los Materiales Compuestos. En primer lugar se establece su definición, elaborada a partir de distintas fuentes. Una vez definidos, se procede a su clasificación, según diferentes criterios. Por una parte, atendiendo al tipo de refuerzo, y por otra, al tipo de matriz.

I.3.1 Definición

Se define el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales, con interfases de separación entre ellos, para formar un nuevo material [1]. Hay varias características que matizan esta definición, de forma que en este grupo tienen cabida los materiales que:

- Están formados por 2 o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase. Por ello, no pertenecen a los materiales compuestos aquellos materiales polifásicos, como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambian la composición de las fases presentes.

El motivo de la elaboración de materiales compuestos es aunar las propiedades individuales de los constituyentes y a su vez obtener propiedades

que no pueden ser alcanzadas por éstos actuando aisladamente. De esta manera, las propiedades mecánicas de un material compuesto son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes. Así, se puede decir que se produce el fenómeno de la **sinergia** (literalmente *trabajando en conjunto*), vocablo con el cuál Richard Buckminster Fuller definía el hecho de que el trabajo de dos o más agentes actuando en conjunto es mayor al esperado considerando la suma de las acciones de los agentes por separado [2].

Algunas de las propiedades que más interés tienen en este tipo de materiales son:

- Alta resistencia mecánica y/o rigidez.
- Resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión.
- Poco peso específico.
- Buen aislamiento térmico, aislamiento acústico.
- Larga vida a fatiga.

En todo material compuesto se distinguen dos componentes:

- El **refuerzo**. Se presenta en fase discontinua o discreta. Actúa como elemento resistente.
- La matriz. Se presenta en fase continua. Actúa como ligante; transmite los esfuerzos al agente reforzante y protege y da cohesión al material. Es la responsable de las propiedades físicas y químicas.

I.3.2 Clasificación

Ejemplos sencillos y conocidos por todos de materiales compuestos son el hormigón y los neumáticos. Sin embargo, existe una enorme variedad dentro del

campo de los materiales compuestos, de forma que se observan muchos y muy diferentes tipos de materiales compuestos avanzados.

Una clasificación general pudiera ser la que se aporta en el Diagrama I.3.1, elaborado a partir de [1], en el que se establecen dos grupos principales de materiales compuestos en función del *tipo de refuerzo*:



Diagrama I.3.1. Clasificación en función del tipo de refuerzo (Elaboración propia).

El **refuerzo con partículas** es usado para mejorar propiedades concretas: modificar la conductividad térmica y eléctrica, aumentar la resistencia a la termofluencia, modificar la dureza... Un ejemplo de este tipo de materiales: inclusiones de plomo en acero.

El **refuerzo con fibras** da como resultado materiales con excelentes propiedades mecánicas.

Realmente los compuestos **de una sola capa** están formados por múltiples láminas pero con las mismas propiedades y orientaciones de fibra.

Los compuestos **multicapa** se dividen a su vez en laminados e híbridos. Los **laminados** están compuestos por láminas que siendo del mismo material se disponen con orientaciones diferentes. En cambio los **híbridos** son paneles formados por láminas de diferentes materiales constituyentes.

Otra clasificación muy común es la que atiende al *tipo de matriz*, que aparece en el Diagrama I.3.2.

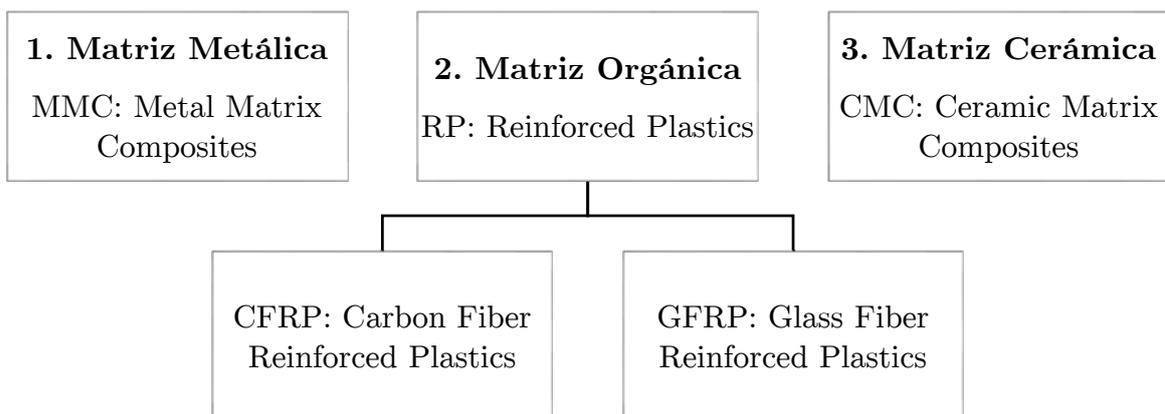


Diagrama I.3.2. Clasificación en función del tipo de matriz (Elaboración propia).

I.3.3 Aplicaciones

El uso de materiales compuestos de alta tecnología (resina epoxy con fibras de carbono, boro o Kevlar) está relativamente extendido en ámbitos como el de la **industria aeronáutica**. Se utilizan para construir componentes como las alas, el fuselaje y el tren de aterrizaje de los aviones. También en las industrias naval y automovilística la utilización de compuestos se está incrementando en los últimos años.

Dentro de la **industria deportiva**, este tipo de materiales han experimentado un gran despliegue, utilizándose en la fabricación de raquetas de tenis, cañas de pescar, palos de golf, esquís, pértigas,...

En contraposición, en la **industria de la construcción** este tipo de materiales no se ha utilizado sino tímidamente. Existen ciertamente algunos ejemplos de utilización de Plásticos Reforzados con Fibra¹ en elementos con función estructural. Tal es el caso de infraestructuras erigidas como *The Eyecatcher* (Fig. I.3.1), que fuera símbolo de la Swissbau 99, hoy en día reconstruido en Basilea donde sirve como edificio de oficinas, fabricado completamente con material compuesto [3]. También de pasarelas peatonales y puentes de carretera fabricados con FRP, como la ubicada en Lleida sobre el tren de alta velocidad Madrid-Barcelona (Fig. I.3.2).

¹ Los Plásticos Reforzados con Fibra se referencian con las siglas FRP (Fiber Reinforced Plastic) en este documento.



Fig. I.3.1. *The Eyecatcher* (Fuente: [3]).



Fig. I.3.2. *Pasarela Fiberline sobre el ave Madrid- Barcelona, a su paso por Lleida*
(Fuente: [4]).

I.4 TIPOS DE REFUERZO PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Como ya se adelantó en la justificación del trabajo, ante la situación particular que afronta el sector de la construcción, la rehabilitación estructural está llamada a ocupar el vacío dejado por la reducción en el número de licitaciones de obras de nueva construcción.

En el ámbito de la rehabilitación mediante refuerzos estructurales es por tanto donde los materiales compuestos encuentran un gran campo de aplicación en el futuro.

Las estructuras de hormigón armado pueden necesitar ser reforzadas debido a uno o varios de los siguientes factores:

1. Incrementos de carga debidos al aumento de las cargas vivas (live loads), que son aquellas que no son permanentes, al aumento de la carga rodada (wheel loads), a la instalación de maquinaria pesada,...
2. Daños estructurales ocasionados por el fuego, la corrosión del acero, el impacto de vehículos,...
3. Mejora de las condiciones de uso: limitaciones de flecha, reducción de la abertura de grietas,...
4. Modificación del sistema estructural por eliminación de muros, columnas y/o otras actuaciones.
5. Errores constructivos o en la planificación de la obra: dimensiones de diseño erróneas o mal ejecutadas, falta de armadura,...

En general la instalación de refuerzos repercutiría en un comportamiento más rígido de la estructura. Retrasaría la formación de grietas o las cerraría en

estructuras con grietas preexistentes. Se conseguiría por lo tanto la mejora de servicio y durabilidad buscada por todos los métodos de refuerzos de estructuras.

En el Diagrama I.4.1 se pretenden representar los principales sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón armado, desde los más tradicionales hasta los más innovadores y avanzados. Dichos sistemas se describen en los siguientes apartados, que han sido elaborados principalmente a partir de [5].

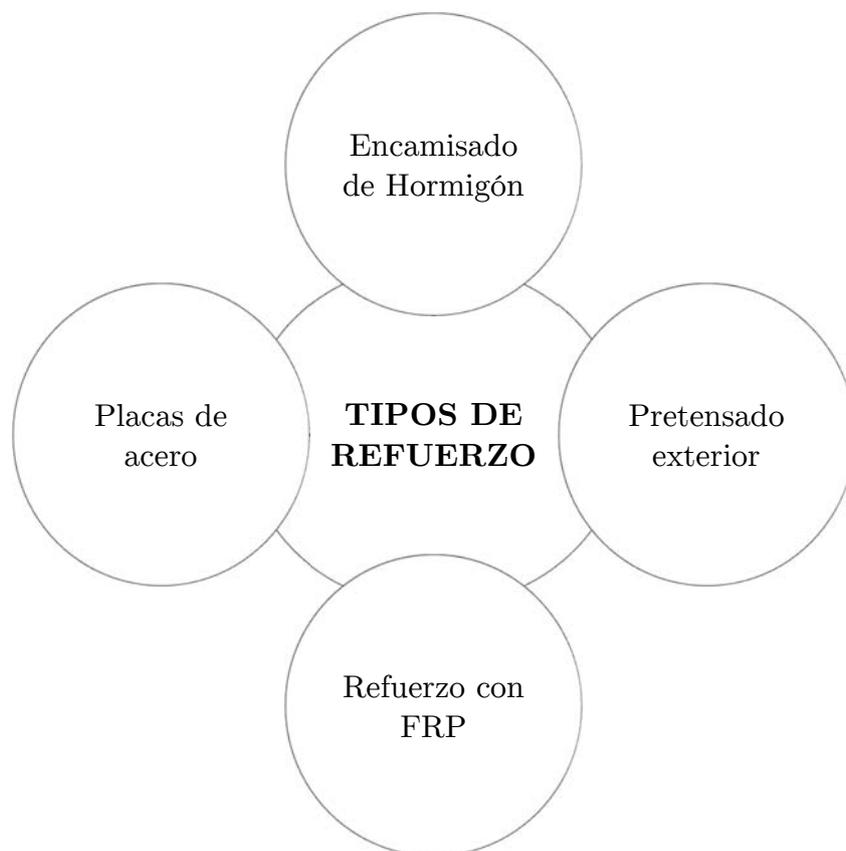


Diagrama I.4.1. *Tipos de refuerzos (Elaboración propia).*

I.4.1 Encamisado de hormigón

El encamisado de hormigón consiste básicamente en realizar un recrecido de la sección de trabajo. En el proceso, la estructura original se envuelve con una corona de hormigón, que incorpora una nueva armadura que dará continuidad al soporte y conectará elásticamente el nuevo elemento de refuerzo con los elementos estructurales horizontales (ver Fig. I.4.1). La ampliación de la sección transversal del elemento existente repercutiría en el aumento de su carga última.

Los efectos de retracción por secado del hormigón deben considerarse en el diseño y la ejecución. Si las deformaciones están restringidas, pueden inducir tensiones de tracción en la nueva porción de la columna. Por ello, en ocasiones es necesario ejecutar juntas entre el elemento existente y el refuerzo, las cuales se rellenan más tarde con morteros de baja retracción. Antes de realizar el refuerzo es necesario picar el hormigón original. Con este método se deja a la vista el árido del hormigón viejo, de modo que se mejora la adherencia entre hormigón nuevo y viejo.

Los encamisados de hormigón suelen ser de **aplicación** en elementos con sobrecarga de compresión, tanto centrada como excéntrica. Se emplea en pilares y soportes.

Este tipo de refuerzo presenta algunos **inconvenientes** que se desarrollan a continuación:

- El aumento del tamaño del elemento estructural hace que éste método tenga una aplicación limitada debido a que puede ser inviable su ejecución en función de las instalaciones adyacentes o de los servicios que preste la estructura.

- La difícil ejecución en edificios activos, tales como hospitales, escuelas,.. debido al ruido de los equipos necesarios para la construcción y el tiempo necesario (encofrados, bombas, vibradores,..)



Fig. I.4.1. *Aspecto típico de un pilar durante el proceso de ejecución de un refuerzo con encamisado de hormigón armado (Fuente: [4]).*

I.4.2 Placas de acero

El refuerzo con paneles de acero consiste en pegar y/o atornillar placas de acero a la superficie de elementos de hormigón armado. Los métodos de conexión, ya sean adhesivos o mecánicos, permiten la transferencia de carga (cortadura, tracción o compresión) entre el hormigón y el acero. Este refuerzo permitiría rigidizar conexiones o proporcionar una capacidad de tracción adicional. En general, la colocación de dichas placas podría aumentar sustancialmente la resistencia, rigidez, ductilidad y estabilidad del elemento de hormigón armado.

Para que se desarrolle toda la capacidad del refuerzo, es necesario que la adhesión entre el elemento de hormigón y la placa de acero sea adecuada. Para conseguir máxima adhesión, es imprescindible realizar una limpieza abrasiva a la placa de acero, e igualmente ejecutar un acabado superficial en la superficie de hormigón por medios mecánicos. Cuando existen vibraciones, es necesaria la utilización de anclajes de resina o de tornillos pasantes. En situaciones críticas, se considera la combinación de uniones adhesivas y mecánicas.

El refuerzo con placas de acero se ha venido utilizando tradicionalmente en vigas, para aumentar su resistencia a flexión o a cortante.

Los **inconvenientes** principales del refuerzo con placas de acero son:

- Pueden presentar corrosión, por lo que es necesario su mantenimiento.
- El peso de las placas de acero puede representar un problema de instalación.
- La estética del diseño inicial de la estructura se vería modificada.

I.4.3 Pretensado exterior

El pretensado exterior es un sistema que consiste en la colocación de unos elementos que se conectan con la estructura de hormigón y a los que se les realiza un tesado (sistema de post-tesado). Estos elementos suelen ser barras o tendones de acero (Fig. I.4.2), o incluso placas. El tesado de estos elementos proporciona a la estructura de hormigón un aumento inmediato de su resistencia última. El postesado mejora la capacidad portante de la estructura, ayudándola a soportar sobreesfuerzos en condiciones de tracción, esfuerzo cortante, flexión y torsión. La técnica de postesado también se puede utilizar para eliminar el

desplazamiento no deseado en los miembros y para convertir elementos discontinuos en miembros continuos.

Esta técnica de postesado se ha venido usando muy prolíficamente en la construcción de puentes de gran luz, aunque también tiene otras aplicaciones como la del refuerzo de vigas en general.



Fig. I.4.2. *Pretensado exterior de vigas (Fuente: [4]).*

Algunas de las **desventajas** principales de este sistema de refuerzo son:

- Los tendones están expuestos a las influencias ambientales: incendios, vandalismo, productos químicos agresivos...
- Como los tendones no están unidos al hormigón (o sólo en puntos concretos), la resistencia última puede no desarrollarse en el diseño final, con lo que no se aprovecha toda la capacidad del acero, con la pérdida de rentabilidad que ello supone.
- Para ciertas secciones transversales el manejo de los dispositivos de tensado puede ser complicado.

I.4.4 Refuerzo con FRP

En la última década, el uso de material compuesto para reforzar elementos de hormigón se ha convertido en una de las tecnologías más prometedoras de la ingeniería de materiales o la ingeniería estructural. Supone una alternativa a las tradicionales técnicas nombradas anteriormente tales como el refuerzo con placas de acero, el encamisado de hormigón o el post-tensado externo.

Este nuevo tipo de refuerzo consiste básicamente en pegar placas o láminas de CFRP a la superficie de hormigón, utilizando una resina epoxy.

El refuerzo con material compuesto se está convirtiendo en una alternativa fuerte debido a una serie de características que le dan ventaja respecto a los sistemas tradicionales. Algunas de estas **ventajas**, de forma esquemática, son:

- Alta resistencia en relación a su peso específico.

La respuesta del CFRP ante tensiones axiales es elástica lineal, y su porcentaje de deformación elástica es pequeño, siendo su deformación plástica nula. Su tensión última se encuentra entre 1700 y 3000 MPa y su deformación última se sitúa en torno al 2-3%.

Además, un CFRP puede llegar a soportar tracciones 8 veces mayores que las que soportaría un acero, pesando aun así un quinto de lo que pesaría un mismo volumen de este metal.

- Resistencia a la corrosión.

Esto aumentaría la vida útil de la estructura y reduciría los costes de reparación y mantenimiento.

- Bajo peso.

Las facilidades de manipulación e instalación se incrementan con el bajo peso de los materiales. Su ligereza elimina la necesidad de grandes estructuras de soporte.

- Fácil instalación.

Los procedimientos de instalación son relativamente fáciles y limpios. Además de rápidos; el tiempo de curado no excede las 24 horas.

- Sin necesidad de acabado superficial.

Normalmente no es necesario pintar el refuerzo. Adicionalmente, el laminado se puede realizar en una amplia gama de colores para proporcionar una agradable apariencia de larga duración.

- Versatilidad.

Los refuerzos están disponibles en diferentes formas para adaptarse a las diferentes necesidades: placas, láminas, tiras, tendones,... Sus dimensiones son así mismo personalizadas, lo que reduce o elimina los empalmes y las articulaciones.

- No modifican las dimensiones ni el peso de la estructura original de forma significativa.

En función de la disposición de las láminas en el elemento de hormigón a reforzar, conseguiremos un aumento de la carga última ante esfuerzos de flexión, compresión, cortante... Así pues se distinguen los siguientes sistemas:

I.4.4.1 Refuerzo a flexión

Vigas, placas y columnas pueden ser reforzadas a flexión mediante el uso de CFRP como puede verse en las Fig. I.4.3 y Fig. I.4.4. La dirección de las fibras debe ser paralela a la de la tensión de tracción.



Fig. I.4.3. *Refuerzo a flexión con tiras de CFRP de una losa de hormigón. Primera foto: cara inferior. Segunda foto: cara superior (Fuente: [5]).*



Fig. I.4.4. *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón con tiras de CFRP, en Polonia*
(Fuente: [5]).

I.4.4.2 Refuerzo a cizalladura

El refuerzo a cizalladura se realiza en vigas. La dirección de la fibra se coloca perpendicular (Fig. I.4.5) o en ángulos de 45° respecto al eje de la viga.



Fig. I.4.5. *Refuerzo a cizalladura (y a flexión) de viga de hormigón con tiras de CFRP, en el puente Duttweiler en Zurich* (Fuente: [5]).

I.4.4.3 Near Surface Mounting Reinforcement (NSMR)

Cualquier refuerzo externo con CFRP es susceptible a daños por colisión, de alta temperatura, fuego y rayos ultravioletas. Para superar estos inconvenientes se ha propuesto la técnica NSMR. Consiste en realizar unas ranuras en el hormigón de una profundidad menor que el recubrimiento mecánico de la sección y adherir las tiras o mechones de fibra en dichas ranuras (Fig. I.4.6).



Fig. I.4.6. Refuerzo a flexión de una losa de hormigón en la zona de momento negativo usando la técnica NSMR, en una planta industrial en Stuttgart (Fuente: [5]).

I.4.4.4 Confinamiento de columnas

El confinamiento se aplica generalmente a elementos sometidos a compresión, con el objetivo de mejorar su capacidad de carga o, en caso de acondicionamiento sísmico, para aumentar su ductilidad en la región potencial de rótula plástica, por ejemplo en columnas, como se puede ver en la Fig. I.4.7.

El confinamiento puede ser beneficioso también en zonas no sísmicas, donde, por ejemplo, se requiere capacidad de supervivencia ante ataques explosivos.

También puede ser una solución cuando es necesario aumentar la capacidad de carga axial de una columna debido al aumento de las cargas verticales. Por ejemplo, al añadir una nueva planta a un edificio existente o cuando un puente debe ser ampliado.



Fig. I.4.7. Refuerzo sísmico de columnas de hormigón con láminas de CFRP, en el estadio Reggio Emilia en Italia (Fuente: [5]).

I.4.4.5 Refuerzo de estructuras de mampostería

Aplicaciones prácticas en los últimos años han demostrado que el CFRP es un material válido para el refuerzo de estructuras de mampostería, especialmente las de considerable histórica importancia.

Uno de los primeros trabajos de investigación en todo el mundo se llevó a cabo en Empa, Suiza. Tiras y tejidos de CFRP se aplicaron a los muros de mampostería utilizando adhesivos epoxy. Las paredes fueron analizadas bajo ciclos de carga estática en el laboratorio. Se demostró que la capacidad de deformación en el plano de los muros de mampostería después de la aplicación de refuerzo aumentaba hasta un 300%, si el final de la tiras de CFRP estaba anclado correctamente.

A partir de entonces, un considerable número de edificios históricos, especialmente en Italia (Fig. I.4.8), Grecia y Portugal, han sido adaptados rehabilitados con material compuesto.

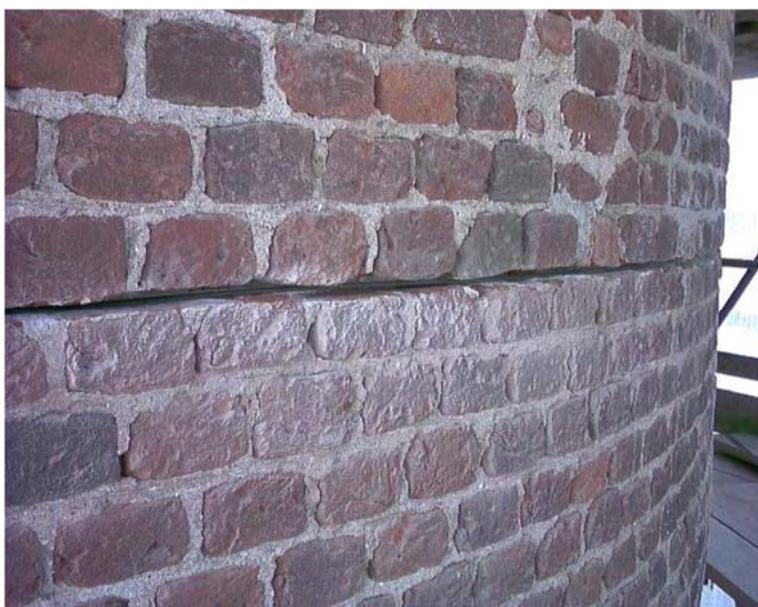


Fig. I.4.8. *Varilla de fibra de carbono embebida en el espacio entre los ladrillos como refuerzo, Castillo Vercelli en Italia (Fuente: [5]).*

I.4.4.6 Sistemas de Pretensado

Los sistemas de pretensado con material compuesto son equivalentes a los sistemas de pretensado tradicionales, sin más que sustituir los ya clásicos tendones de acero de pretensado por barras o tiras hechas de CFRP. Este tipo de refuerzos externos se pueden observar en la Fig. I.4.9. Estos sistemas aún no están muy desarrollados debido a que requieren unos dispositivos de sujeción o de anclaje especiales y los sistemas de instalación aún no están perfeccionados. Necesitarían un mayor estudio para que su aplicación fuese segura.



Fig. I.4.9. Rehabilitación de juntas de dilatación utilizando tiras pretensadas de CFRP y anclajes con placas de acero, en un puente de carretera en Heilbronn (Fuente: [5]).

I.5 PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA UNIÓN MATERIAL COMPUESTO-HORMIGÓN

Cuando se acomete una actuación de refuerzo de una estructura de hormigón armado con material compuesto, el parámetro que garantiza el éxito de dicho refuerzo es la calidad de la unión entre los dos materiales.

La razón por la que dos cuerpos son capaces de asociarse para trabajar en conjunto es por la creación de una interfase entre estos dos materiales. Si se crea esta interfase, eso significa que existe una interacción potencial entre los dos cuerpos, que es a lo que se le puede llamar “apetencia”.

La “apetencia” entre el hormigón y la nueva capa de material compuesto va a depender de factores de distinta naturaleza. Estos factores van a ser los que realmente influyan en la creación y la estabilidad de la interfase entre la superficie de hormigón y el refuerzo, y permitirán evaluar la adherencia y la efectividad de la unión.

En primer lugar, se encuentran los factores que se refieren al soporte de hormigón. El acabado superficial de la cara a la que se adhiere el refuerzo es un parámetro a considerar ya que si la superficie no es lo suficientemente rugosa puede que el pegado no sea correcto y deslicen entre sí el refuerzo y el soporte, de modo que los materiales no trabajaren en conjunto. Por otra parte, si la unión falla por el soporte, cuanto mayor sea la resistencia del hormigón, mayor será la carga a la que se produzca el despegue del laminado de CFRP.

En el Diagrama I.5.1 se contemplan los principales factores del soporte de hormigón que afectan a la calidad de la unión entre él y el material compuesto.

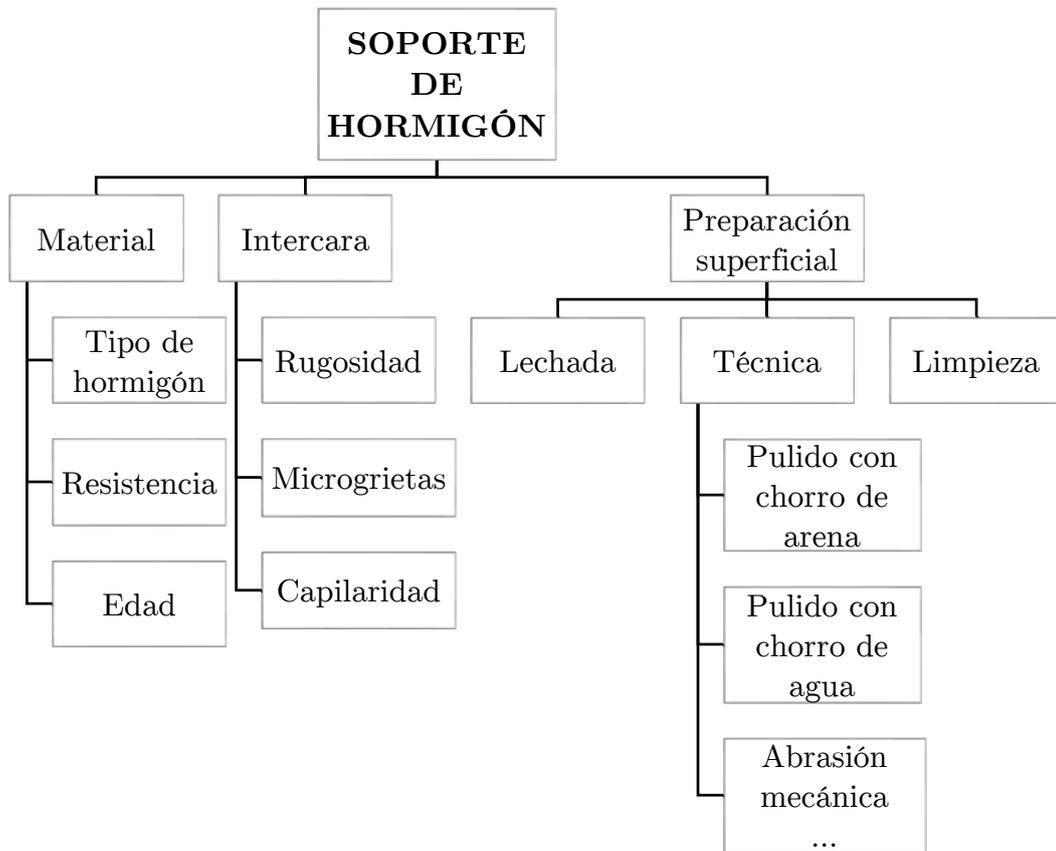


Diagrama I.5.1. Factores que afectan a la calidad de la unión material compuesto-hormigón: soporte de hormigón (Elaboración propia).

En segundo lugar, se encuentran los factores del propio refuerzo. El tipo de material, su laminado, el proceso de fabricación... afectan al comportamiento del refuerzo. También las características del adhesivo utilizado para pegar ambos componentes va a ser un factor que influye en la efectividad de la unión, incluso puede influir en la resistencia de la misma si el fallo es cohesivo (rotura por el adhesivo). La técnica utilizada para pegar ambos componentes es importante controlarla. Hay que respetar los tiempos de curado para que la unión tenga la calidad esperada.

En el Diagrama I.5.2 se especifican los principales factores que dependen del refuerzo.

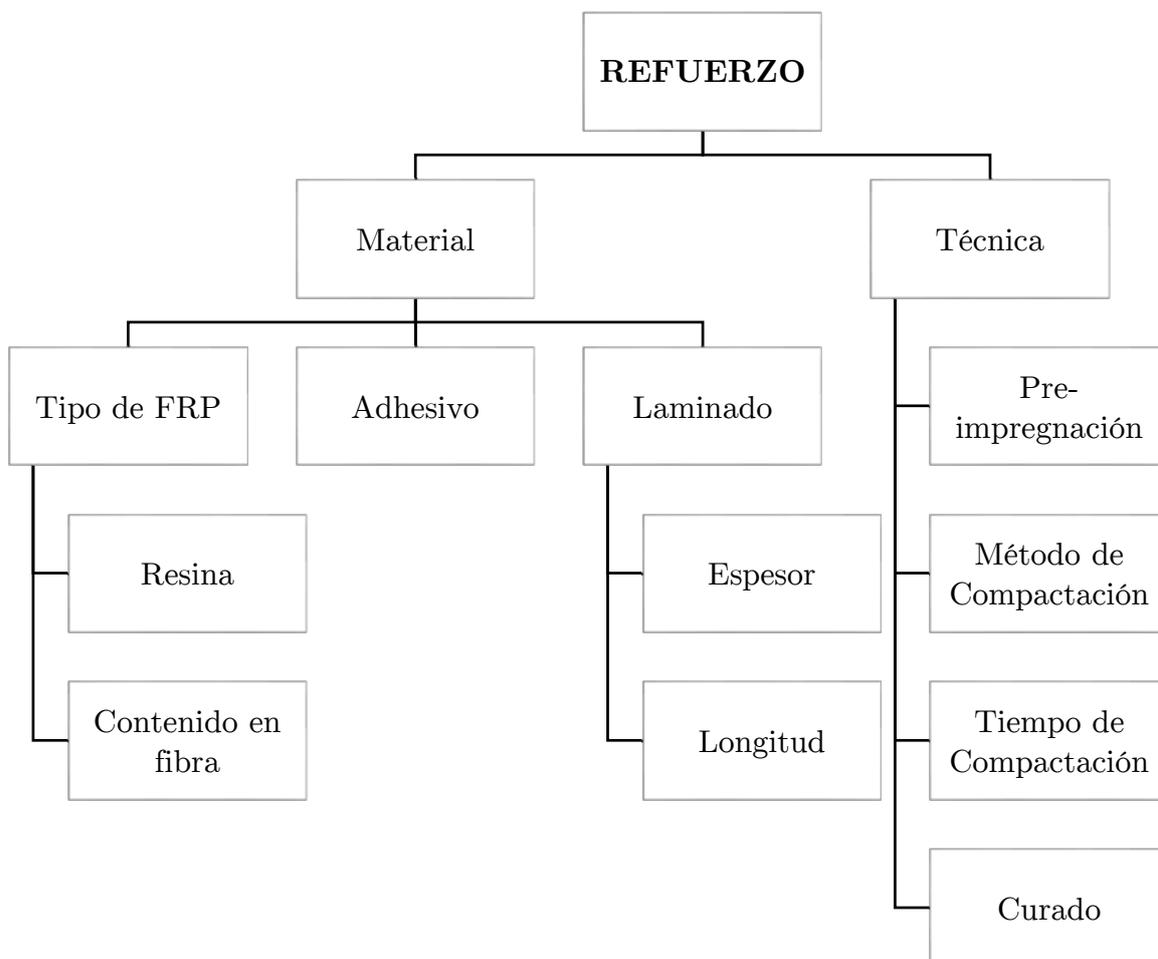


Diagrama I.5.2. Factores que afectan a la unión material compuesto- hormigón: refuerzo de FRP (Elaboración propia).

Por último en el Diagrama I.5.3 se hace referencia a otros factores que pudieran influir en la calidad de la unión y su resistencia.

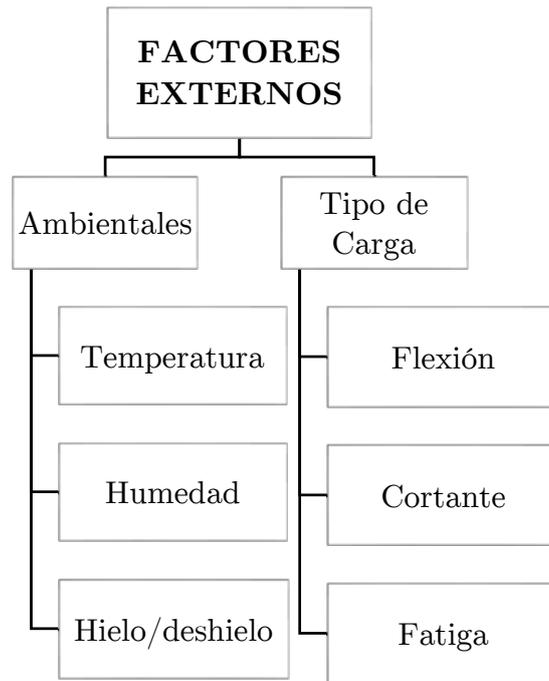


Diagrama I.5.3. Factores que afectan a la unión material compuesto- hormigón:
factores externos (Elaboración propia).

El estudio paramétrico de los factores individuales para evaluar su influencia relativa en la efectividad de la unión es un campo de investigación interesante que ya algunos autores han abordado en artículos como [6], [7], [8], [9], [10].

I.6 ESTADO DEL ARTE DE ENSAYOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LA UNIÓN MATERIAL COMPUESTO-HORMIGÓN

El desarrollo de los ensayos para caracterizar la calidad de la unión entre el hormigón y el refuerzo de material compuesto viene de la mano de la creciente aplicación de esta nueva técnica de refuerzo.

Para poder optimizar el diseño de este tipo de refuerzos y que su aplicación sea segura y exitosa, es imprescindible llevar a cabo un estudio de los diferentes parámetros que influyen en la calidad de dicha técnica.

Debido a que estos sistemas de refuerzo se encuentran aún en desarrollo, los ensayos asociados se encuentran asimismo en una etapa inicial, de modo que muchos de los ensayos que se hallan en la bibliografía son propuestas de distintos investigadores y no están normalizados.

De manera general podemos distinguir dos clases de ensayos: los ensayos a nivel de viga (apartado I.6.1) y los ensayos a nivel de probeta (apartados I.6.2, I.6.3, I.6.4, I.6.5 y I.6.6).

I.6.1 Ensayo a flexión (bending test)

Para evaluar el aumento de resistencia conseguido con los refuerzos a flexión y a cortante con material compuesto se pueden plantear los ya clásicos

ensayos de flexión en vigas con el refuerzo aplicado, como se puede ver en la Fig. I.6.1 [11].

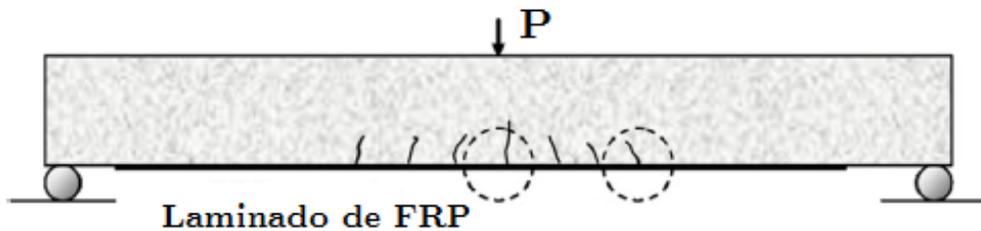


Fig. I.6.1. Esquema de un ensayo de flexión en una viga de hormigón reforzada con FRP (Elaboración Propia).

Del tipo de rotura observado en estos ensayos de flexión (ver Fig. I.6.2), se han desarrollado los dos ensayos que se especifican en los siguientes apartados. Al romper la viga por flexión, se producen grietas en la parte de hormigón traccionada. Estas grietas aún permanecen cosidas por el refuerzo de material compuesto, de forma que en él se desarrollan dos estados de carga diferenciados, aplicados en direcciones perpendiculares entre sí: uno de cortadura (shear) y otro de pelado (peel).

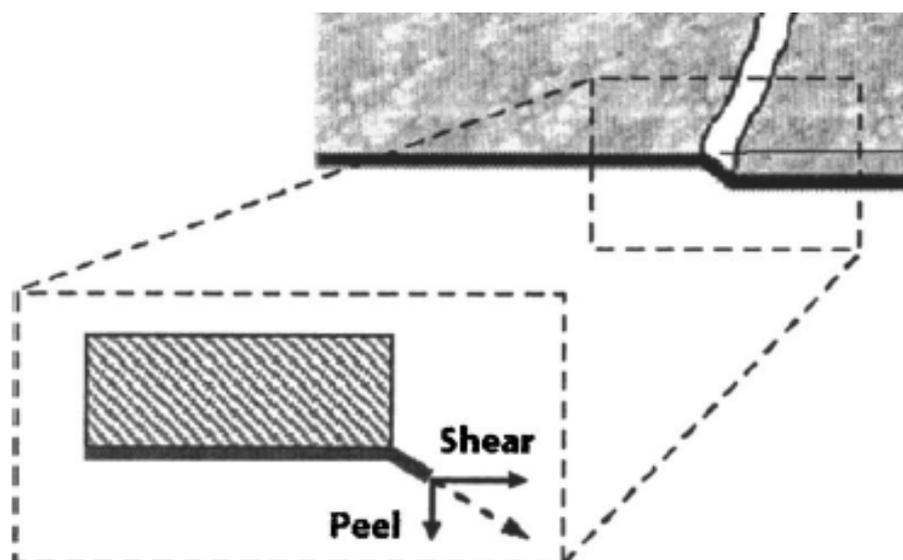


Fig. I.6.2. Apertura de grietas y rotura por flexión (Fuente: [11]).

También se puede evaluar el comportamiento a flexión en fatiga sin más que modificar el tipo de carga. Se puede realizar el ensayo con una carga P dinámica, realizando diferentes ciclos.

I.6.2 Ensayo de cortadura o lap shear

El ensayo que se está elaborando con mayor asiduidad para caracterizar la unión entre el hormigón y el laminado de FRP es el ensayo de cortadura o Lap Shear. Es un ensayo que no se encuentra normalizado.

La probeta está formada por un bloque de hormigón, generalmente prismático, al que se le adhiere un laminado de CFRP de menores dimensiones.

El ensayo consiste en tirar del laminado de CFRP con una fuerza N_x paralela a la fibra hasta llevar la probeta a rotura. Se puede entender a la vista del esquema de la Fig. I.6.3:

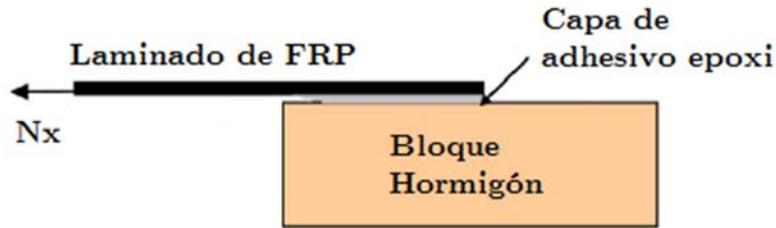


Fig. I.6.3. Esquema del ensayo Lap Shear, vista en alzado (Elaboración Propia).

Para realizar el ensayo, se necesita una máquina que sea capaz de agarrar el laminado de FRP y tirar de ella con una carga estática creciente hasta llevar la probeta a rotura.

I.6.3 Ensayo de pelado o lap peeling

El ensayo de pelado o Lap Peeling tampoco es un ensayo normalizado. Consiste en aplicar una carga perpendicular al laminado de CFRP, tal y como se muestra en la Fig. I.6.4:

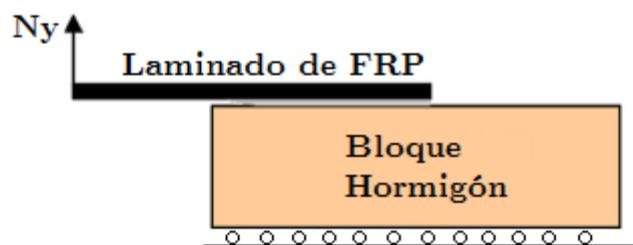


Fig. I.6.4. Esquema del ensayo Lap Peeling, vista en alzado (Elaboración Propia).

El ensayo consiste, como se aprecia, en tirar del laminado en sentido vertical hasta producir la separación entre la superficie del hormigón y la lámina. Para lograr la separación, es necesario romper la conexión existente.

En cuanto a los parámetros del ensayo, al igual que ocurre en el Lap Shear, se necesita una máquina que sea capaz de agarrar el laminado de FRP, pero esta vez en sentido transversal a la fibra, y tirar de ella hasta llevar la probeta a rotura.

I.6.4 Ensayo pull off

El ensayo de Pull Off sí está normalizado. Puede encontrarse en la ASTM D4541 [12] y en la Normativa Española UNE-EN 1542-2000 [13].

Básicamente consiste en realizar una trepanación en una probeta con el refuerzo aplicado y pegarle un disco del que después se tira a tracción con una célula de carga.

En la Fig. I.6.5 puede observarse el corte de una probeta típica de ensayo Pull Off y en la Fig. I.6.6 una realización de dicho ensayo.

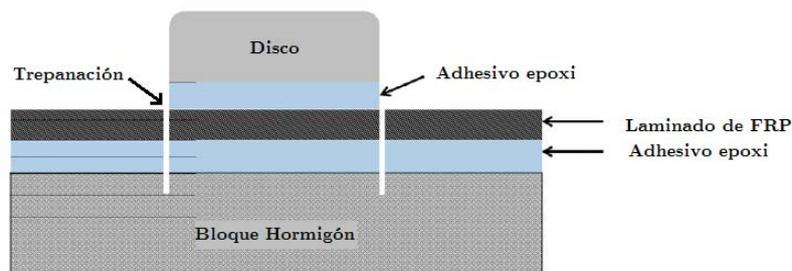


Fig. I.6.5. *Corte transversal de la probeta de Pull Off (Elaboración Propia).*

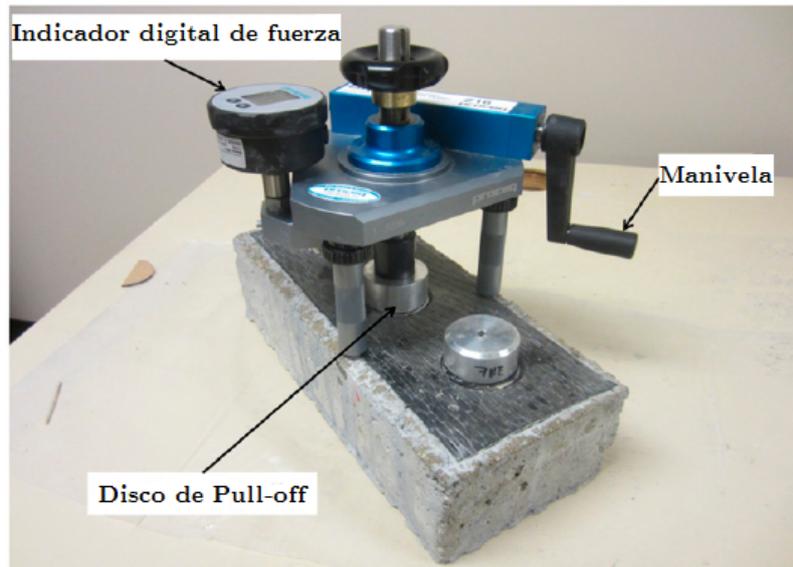


Fig. I.6.6. Configuración del ensayo de Pull Off (Fuente: [14]).

I.6.5 Ensayo Shear Torsion

El ensayo de Shear Torsion no se encuentra normalizado. Se plantea como una variante del ensayo Pull Off, aplicado en el mismo tipo de probeta. En él, en vez de aplicar una carga axial con la célula de carga, se aplica un momento torsor con una llave dinamométrica para producir el despegue.

I.6.6 Ensayo de compresión

Otro posible ensayo a realizar es el ensayo a compresión de probetas cilíndricas con un refuerzo con material compuesto. Puede ser muy útil para realizar refuerzos del tipo confinamientos de columnas.

En la Fig. I.6.7 se presentan dos probetas reforzadas con CFRP rotas a compresión.



Fig. I.6.7. *Probetas cilíndricas reforzadas con material compuesto sometidas a ensayos de compresión (Fuente: [15]).*

I.7 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos de este trabajo son:

- **Puesta a punto de los ensayos Lap Peeling y Pull Off:** Uno de los objetivos de este trabajo es describir cómo se realizan los ensayos Lap Peeling y Pull Off, es decir, la fabricación de los materiales necesarios y de distintos útiles que permitan su correcta realización y el modo en que se realiza el ensayo.

Para garantizar que los ensayos muestran resultados correctos se elaboran una serie de ensayos de prueba que permitan identificar los posibles errores y su futura corrección.

- **Elaboración de los Protocolos de Ensayo:** De un modo esquemático y mencionando paso a paso las distintas fases que hay que seguir para hacer los ensayos se establecen los protocolos de ensayos, tanto para el Lap Peeling como para el Pull Off.
- **Estudio de parámetros que afectan al ensayo Lap Peeling:** A la hora de realizar los ensayos, existen distintos factores que inciden o pueden incidir en los resultados. Es objeto de este trabajo comprobar los posibles parámetros que afectan al ensayo de Lap Peeling como son la longitud de pegado (L_f) y el espesor del laminado de CFRP.

I.8 CONTENIDO DEL TRABAJO

El documento está dividido en 3 capítulos que desarrollan el contenido del Trabajo. Asimismo, se incluyen al final unos anexos con los Protocolos de Ensayo de Lap Peeling y Pull Off.

En el **Capítulo I** se ha establecido una introducción sobre el refuerzo de hormigón con materiales compuestos, así como el estado del arte de los distintos ensayos existentes en la actualidad para la caracterización de la unión de ambos materiales.

Igualmente, se ha comentado la justificación del trabajo. El Proyecto NUREMCO persigue analizar el refuerzo exterior de hormigón con CFRP, por lo que existe una relación directa entre este trabajo y dicho proyecto.

En el **Capítulo II** se muestran las dos campañas de ensayo para el Lap Peeling y para el Pull Off.

En primer lugar se describe la fabricación de los distintos materiales necesarios para la puesta a punto de los ensayos.

En segundo lugar se realizan los ensayos siguiendo un análisis de distintos parámetros que puedan influir en los resultados. Primero se realiza la campaña de ensayos para estudiar la longitud de pegado y posteriormente para estudiar la influencia del espesor del laminado.

Por último se analizan los resultados y se comparan los resultados con un modelo teórico.

En el **Capítulo III** se muestran las conclusiones extraídas de los ensayos realizados. Se comprueba si existe alguna relación entre los dos modelos de ensayo realizado (ya que se produce con un proceso de carga similar) o si por el contrario no hay tal relación.

Además, se comentan los posibles desarrollos futuros basados en el presente trabajo. Tal y como se mencionó anteriormente, es posible la realización de una campaña de ensayos más amplia que permita conocer a ciencia cierta el comportamiento del ensayo Lap Peeling, como por ejemplo, establecer la relación con el ensayo Pull Off o ser capaces de explicar el comportamiento de las curvas de los ensayos y la tendencia que muestran.

En los **Anexos A y B** se explican los dos protocolos de ensayo de un modo esquemático, diferenciando los distintos pasos que hay que seguir para la correcta realización de ambos ensayos.

CAPÍTULO II

Campaña de Ensayos

En el presente capítulo se tratan los diferentes ensayos realizados, tanto la preparación y la realización, así como el análisis y comparación de los resultados obtenidos.

En primer lugar se describe el ensayo Lap Peeling, del cual se habló en la introducción. Para la realización de este ensayo es necesario un laminado de CFRP adherido a una cara de un bloque de hormigón. Por tanto, primero se explicará el proceso de fabricación de los materiales, tanto el laminado de CFRP como el hormigón, y el proceso que hay que seguir para pegarlos, para posteriormente describir la realización del ensayo y analizar los resultados.

Para comprobar la correcta realización del ensayo y poder caracterizar su comportamiento mediante expresiones matemáticas se hará una comparación con un modelo teórico.

En segundo lugar y por último, se describe el ensayo Pull Off. Al igual que en el caso anterior, se comienza explicando el proceso de fabricación de los laminados de CFRP, el cual se ha realizado mediante el método *hand lay-up*. Además, se describe el tratamiento que hay que emplear en el hormigón para poder realizar un trepanado que garantice un área de pegado real que permita obtener la tensión de rotura. Finalmente se describen tanto la puesta a punto del ensayo, como el modo de realizarlo.

II.1 ENSAYO LAP PEELING

Tal como se comentó en el capítulo 1, el ensayo de Lap Peeling se realiza sobre un bloque de hormigón reforzado exteriormente con laminados de fibra de carbono y consiste en aplicar una carga en la dirección perpendicular al laminado para determinar la resistencia al pelado de la unión.

Se tira del laminado en sentido vertical hasta producir la separación entre la superficie del hormigón y dicho laminado. Tal y como se puede consultar en [16], para lograr la separación, es necesario romper la conexión existente, la cual se produce por diversos mecanismos, que son: conexión mecánica, difusión, absorción, apetencia electrónica... El primero es, con diferencia, el mecanismo dominante. Este mecanismo asume que la mayor fuente de adhesión se debe a la conexión de la resina dentro de las irregularidades de la superficie del hormigón.

Entre las propiedades de este ensayo, que pueden presentar ciertas ventajas respecto a los otros ensayos, destacan las siguientes:

- El fallo de la unión tiene lugar a una velocidad controlada.
- La fuerza necesaria es una medida directa del trabajo de desprendimiento.
- El fallo puede alcanzarse bajo un modo de cargas mixto, permitiendo de esta manera la evaluación de las energías de fractura críticas bajo los distintos estados de carga.

Además, según han estudiado otros autores los resultados obtenidos varían según las condiciones de temperatura y humedad a la que se haya sometido el ensayo, [11].

Como se muestra en la Fig. II.1.1, el pico más alto es el primero, ya que la resistencia es mayor. Cuando se produce el primer fallo, el desplazamiento vertical va aumentando, pero debido a la pérdida de resistencia, la carga disminuye.

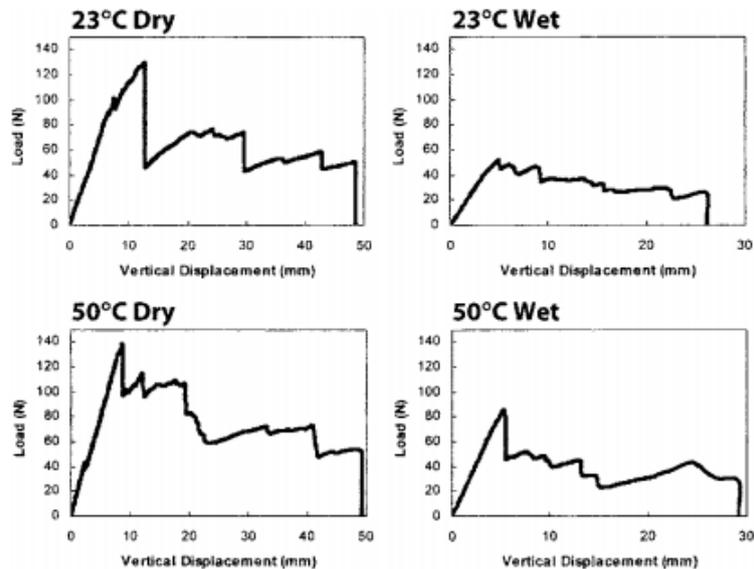


Fig. II.1.1. Efecto de las condiciones de humedad y temperatura en los ensayos de Lap Peeling (Fuente: [11]).

La diferencia entre un acondicionamiento húmedo y otro seco reside en la disminución de la carga necesaria para producir un mismo desplazamiento. Como se puede observar, la relación entre la carga máxima en acondicionamiento seco y húmedo es del orden de la mitad, siendo más desfavorable el húmedo. Además, las probetas secas muestran una caída más señalada de la resistencia.

En los apartados siguientes se procede a explicar el proceso de fabricación de las probetas y la realización de los ensayos. La campaña de ensayos consiste en analizar la influencia de distintos parámetros, que son la longitud de pegado y el espesor del laminado de CFRP.

Para establecer una media razonable, se realizarán 3 ensayos por cada parámetro, para los cuales se ha empleado un bloque de hormigón previamente fabricado con una resistencia de 35 MPa (f_{ck}) y con unas dimensiones de 600x150x150 mm, el cual será empleado para todos los 3 ensayos.

II.1.1 Fabricación de las probetas de cfrp

Las probetas con las que se realizan estos ensayos tienen dos componentes a fabricar por separado: el bloque de hormigón y el laminado de material compuesto. Después de fabricados, estos dos componentes se unirían con un adhesivo. La propia resina, generalmente epoxi, que se utiliza para fabricar el material compuesto puede servir de adhesivo, sin embargo, en este caso se ha empleado un adhesivo aeronáutico de altas prestaciones, EA-9394.

II.1.1.1 Fabricación del laminado de fibra de carbono

Para la realización de estos ensayos se van a fabricar laminados de material compuesto que posteriormente van a ser curados en **autoclave**.

Para el manejo de los materiales compuestos, es muy importante hacerlo en unas condiciones precisas de temperatura y humedad, para que la resina se encuentre en las condiciones más óptimas y se obtengan así las mejores propiedades. Debido a estos hechos, se utiliza una sala limpia para la preparación de piezas de material compuesto. Esta sala posee doble puerta tipo esclusa sin acceso directo al exterior y el interior (suelos, paredes y techos). Es fácilmente inspeccionable y limpiable.

Para el proceso de fabricación de las láminas de fibra se utilizan preimpregnados, que son unas láminas preparadas que incluyen la fibra y la resina.

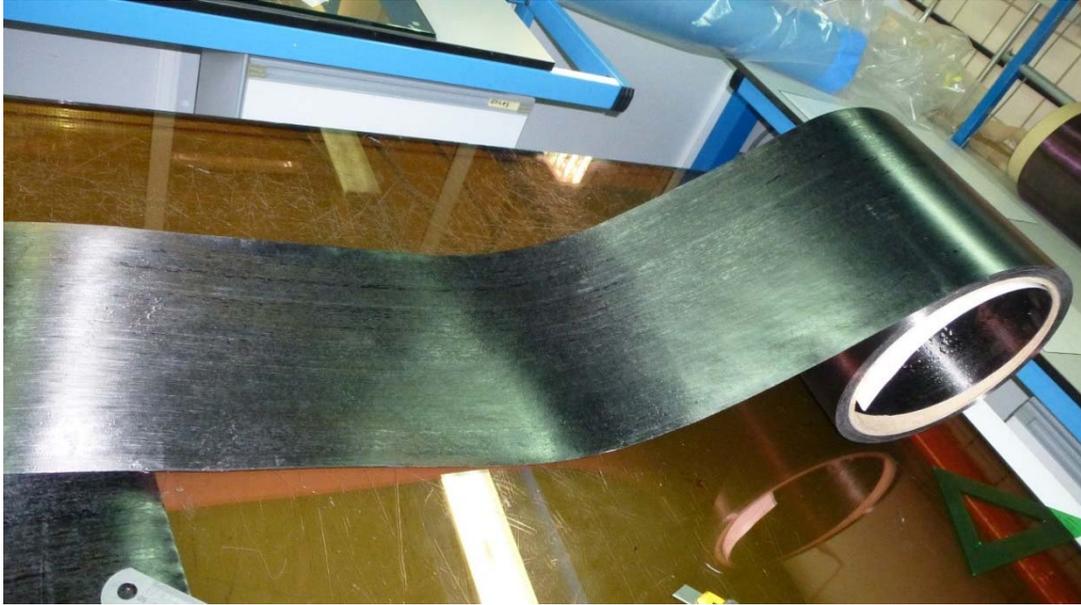


Fig. II.1.2. *Rollo de fibra de carbono pre-preg (Elaboración propia).*

Dichos materiales se van desenrollando y cortando según unas longitudes determinadas. Se ha elegido un rollo de fibra de 30 cm de ancho (Fig. II.1.2) y se han cortado las láminas con una longitud de 400 cm (Fig. II.1.3), ya que hay que tener en cuenta que los bordes de la pieza curada deben ser desechados (ya que no cumplirán con las condiciones de orientación de fibra, fracción volumétrica de fibra y espesor exigidas a toda la pieza).



Fig. II.1.3. Corte de la lámina a 400cm de longitud. (Elaboración propia).

Las probetas de fibra de carbono que se van a emplear, son de 5 capas y de 10 capas. En la Fig. II.1.4 se ven las 5 capas cortadas para proceder a su apilado. Para las probetas de 10 capas, se detallará a continuación el procedimiento. No obstante, el apilado se realiza en ambos casos de la misma manera.

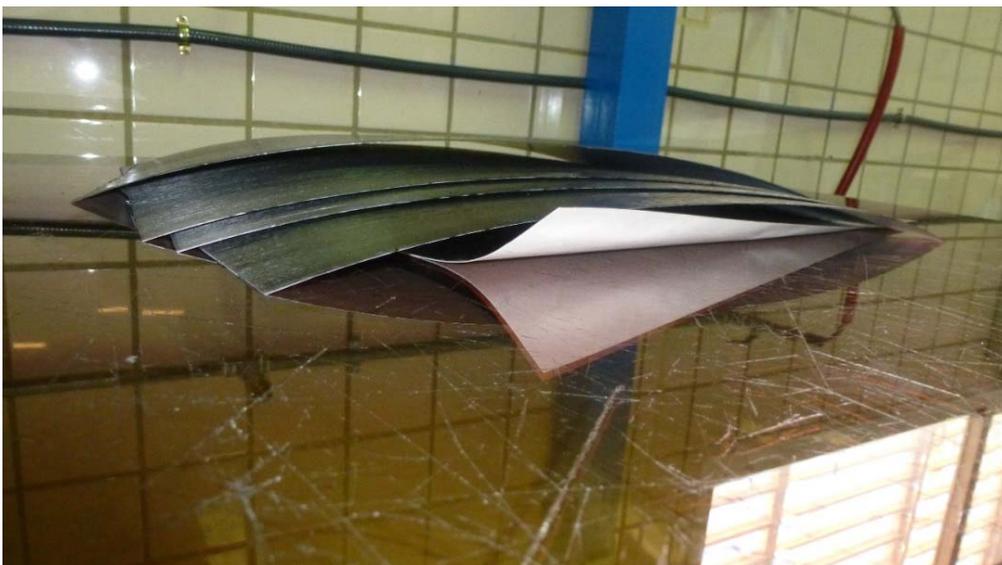


Fig. II.1.4. Láminas cortadas (Elaboración propia).

Una vez se tienen las láminas cortadas, se apilan de la siguiente manera:

- Se coloca una con la capa protectora hacia el útil de apoyo.
- Se coloca la segunda haciendo presión entre ambas capas de fibra. (Fig. II.1.5)
- Se retira la capa protectora.
- Se sigue el proceso hasta llegar a la última lámina, a la cual no se le quita la capa protectora. (Fig. II.1.6)



Fig. II.1.5. *Apilado de las láminas de CFRP (Elaboración propia).*

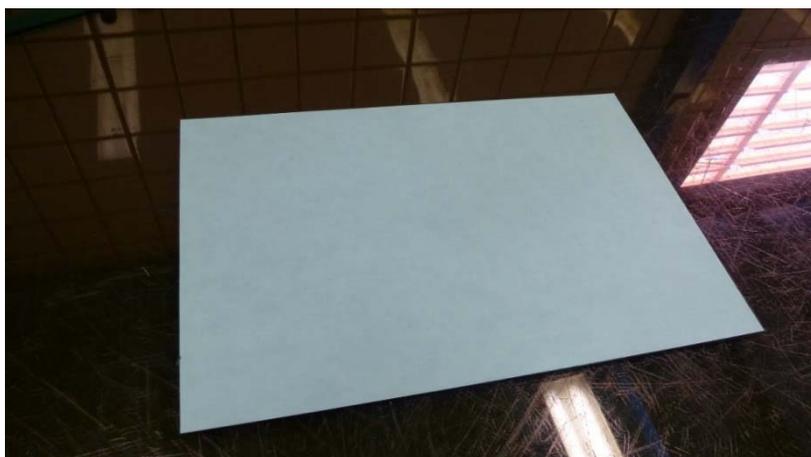


Fig. II.1.6. *Última capa donde se deja la capa protectora adherida (Elaboración propia).*

Para las probetas de 10 láminas, con el fin de mejorar la compactación, cada 5 capas apiladas se realiza una bolsa intermedia de vacío (Fig. II.1.7 y Fig. II.1.8) (similar a la bolsa de vacío final, descrita a continuación), que se dejará actuar alrededor de 10 minutos.



Fig. II.1.7. *Bolsa de vacío intermedia previo a la compactación (Elaboración propia).*



Fig. II.1.8. *Bolsa de vacío intermedia compactada (Elaboración propia).*

Una vez se han compactado todas las láminas, se procede a realizar la bolsa de vacío. Dicha bolsa es importante ya que ayuda a compactar las láminas y protege a la resina de quemarse durante el proceso de curado. Para empezar, hay que quitar las capas protectoras de todas las caras (Fig. II.1.9). En primer lugar se cierra el perímetro de la pieza con corcho (Fig. II.1.10), de forma que se absorba la resina sobrante y se evite que la resina fluya fuera de la pieza.



Fig. II.1.9. *Plancha para hacer la bolsa (Elaboración propia).*



Fig. II.1.10. *Cierre del perímetro con corcho (Elaboración propia).*

A continuación se protege el conjunto con una lámina de nylon (Fig. II.1.11) y sobre éste se pone tejido absorbedor de aire a modo de almohadilla para colocar sobre ella la parte inferior de las tomas de vacío (Fig. II.1.12).

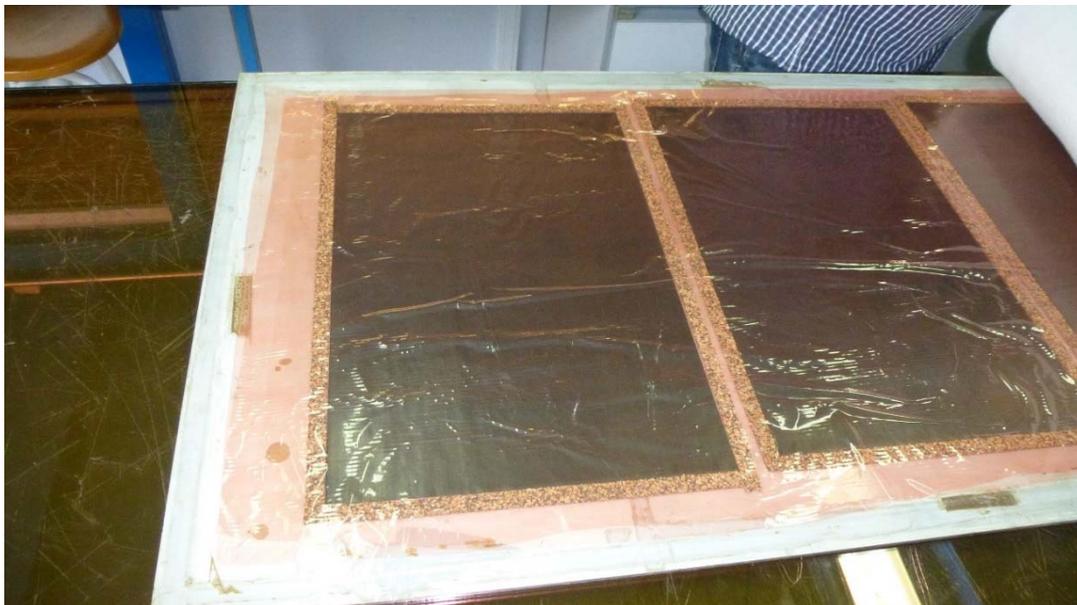


Fig. II.1.11. *Lámina de nylon sobre el conjunto (Elaboración propia).*



Fig. II.1.12. *Tejido absorbedor y tomas de vacío (Elaboración propia).*

Alrededor de la pieza se hace un cuadrado de cinta de cromato (Fig. II.1.13), sobre el que se sellará el plástico de cierre de la bolsa. Finalmente se coloca la parte superior de las tomas de vacío y se succiona. (Fig. II.1.14).



Fig. II.1.13. *Colocación del cromato en los bordes exteriores de la plancha (Elaboración propia).*

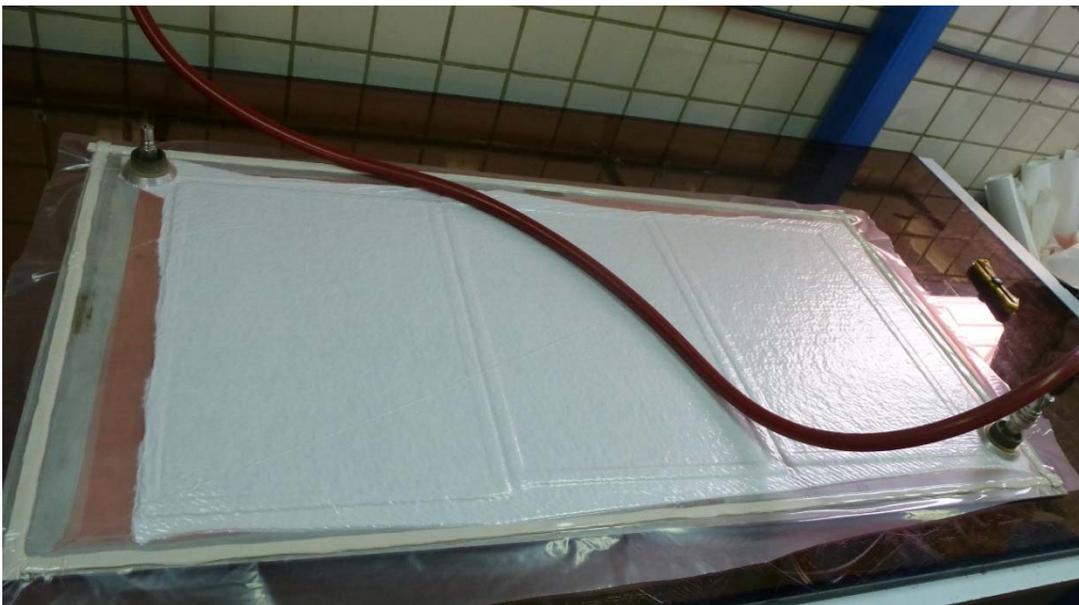


Fig. II.1.14. *Bolsa de vacío completa con la compactación (Elaboración propia).*

II.1.1.2 Curado del laminado de fibra de carbono

Una vez fabricado el material, se procede a realizar el curado de la pieza.

En el autoclave, la pieza se introduce con la bolsa de vacío y se conectan las tomas (Fig. II.1.15).



Fig. II.1.15. *Autoclave (Elaboración propia).*

El sistema consta de una cámara cerrada herméticamente en la que se introduce un gas en unas determinadas condiciones de temperatura y presión.

El tiempo de proceso dentro de la máquina suele oscilar entre 4 horas para piezas de poco espesor (de 0 a 10 mm aproximadamente) hasta 8 horas para grandes espesores (a partir de 10 mm). En ambos casos el tiempo de polimerización oscila entre las 2 y 3 horas.

En este caso, el ciclo empleado precisa un tiempo de polimerización de 2 horas y 10 minutos a una temperatura de 180°C tal y como puede apreciarse en la Fig. II.1.16



Fig. II.1.16. Gráfica y tabla con los valores del ciclo empleado para el curado en autoclave (Elaboración propia).

II.1.2 Pegado del laminado de fibra de carbono al hormigón

Para unir el laminado de fibra de carbono al bloque de hormigón es necesario realizar un acondicionamiento previo de ambos materiales.

Una vez fabricado el panel de fibra de carbono, éste se debe cortar para extraer las probetas que se van a unir con el hormigón. Para cortar este panel se utiliza una sierra de disco de diamante, controlando los cortes con un calibre, de forma que se respeten las dimensiones de las probetas tal y como se muestra en la Fig. II.1.17.



Fig. II.1.17. *Corte del laminado de CFRP con la sierra de disco de diamante
(Elaboración propia).*

Además, es necesario lijar la superficie de la probeta que se va a pegar al hormigón. Esta operación se realiza con un cepillo dispuesto en un taladro (Fig. II.1.18 y Fig. II.1.19).

Para garantizar la limpieza de la superficie que se va a pegar, se aplica acetona (Fig. II.1.20) en dicha cara para eliminar cualquier mota de polvo provocada al lijar.



Fig. II.1.18. *Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia).*



Fig. II.1.19. *Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia).*

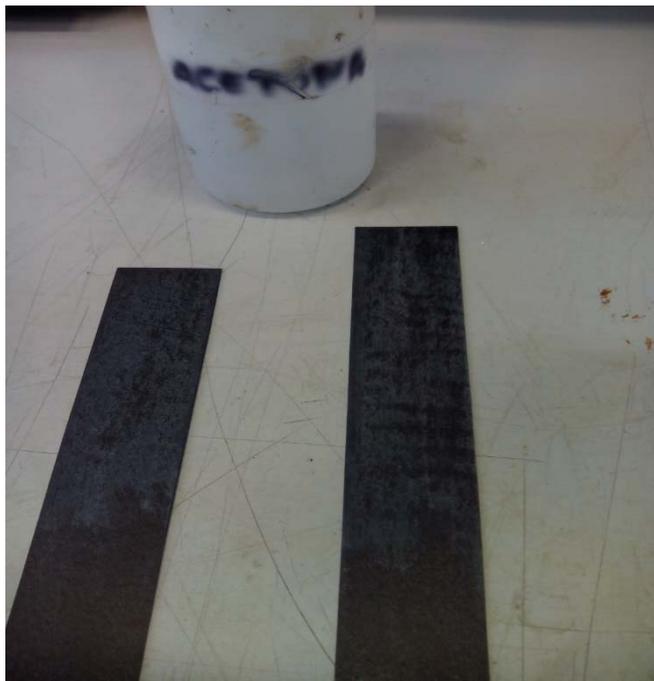


Fig. II.1.20. *Limpieza de la superficie de los laminados con acetona (Elaboración propia).*

De la misma forma, es necesario desbastar la superficie del hormigón sobre la que se va a adherir la probeta de material compuesto. Este proceso se lleva a cabo con un disco especial para desbastar piedra (Fig. II.1.21). Los áridos del hormigón deben estar a la vista después de realizar este pulido (Fig. II.1.22).



Fig. II.1.21. *Desbastado del hormigón con una amoladora (Elaboración propia).*



Fig. II.1.22. *Desbastado del hormigón con una amoladora II (Elaboración propia).*

Una vez realizada la preparación de los materiales, se procede a pegar la probeta de fibra de carbono al hormigón. Para ello se debe utilizar un adhesivo. Este adhesivo puede ser, en general, la propia resina del material compuesto, como es el caso del método *hand lay-up*. También se pueden emplear otros adhesivos, como por ejemplo resina de poliéster o adhesivo aeronáutico EA-

9394, que presentan mejores propiedades. Estos últimos se suelen emplear para métodos de fabricación con láminas pre-preg.

Para pegar ambos materiales, primero se marcan las dimensiones del laminado de CFRP sobre el bloque de hormigón. Además se puede colocar teflón alrededor de esta zona de pegado para evitar que fluya el adhesivo y aumente el área de contacto. El adhesivo se extiende tanto en la cara del hormigón como en la de la probeta de fibra, de manera uniforme. Se debe aplicar presión para que se adhieran bien ambos componentes. Esta presión se puede aplicar con un peso en la cara horizontal del bloque y con unos gatos que aprietan una tabla en las caras verticales (Fig. II.1.25).

Para realizar el pegado se utilizó adhesivo aeronáutico EA-9394, el cual es un adhesivo de altas prestaciones. Este adhesivo consta de dos componentes (A y B), tal como se muestra en la Fig. II.1.23, mezclados en una proporción de 100/17 respectivamente (Fig. II.1.24).



Fig. II.1.23. Adhesivo aeronáutico de dos componentes, EA-9394 (Elaboración propia).



Fig. II.1.24. Mezcla de los componentes (*Elaboración propia*).



Fig. II.1.25. Aplicación de presión mediante gatos y pesas (*Elaboración propia*).

El tiempo de curado del adhesivo es de 90 minutos si se deja a una temperatura de 66°C. Para alcanzar esta temperatura, y debido a que el bloque de hormigón es de grandes dimensiones y no cabe en el horno, se disponen

estufas cerca de las caras donde previamente se pegan las probetas de fibra (Fig. II.1.26). La temperatura que se alcanza en las caras se va controlando con un sensor termopar, para no exceder nunca los 80°C que inhabilitarían el adhesivo. Posteriormente se deja enfriar la probeta para poder realizar el ensayo en condiciones estándares.

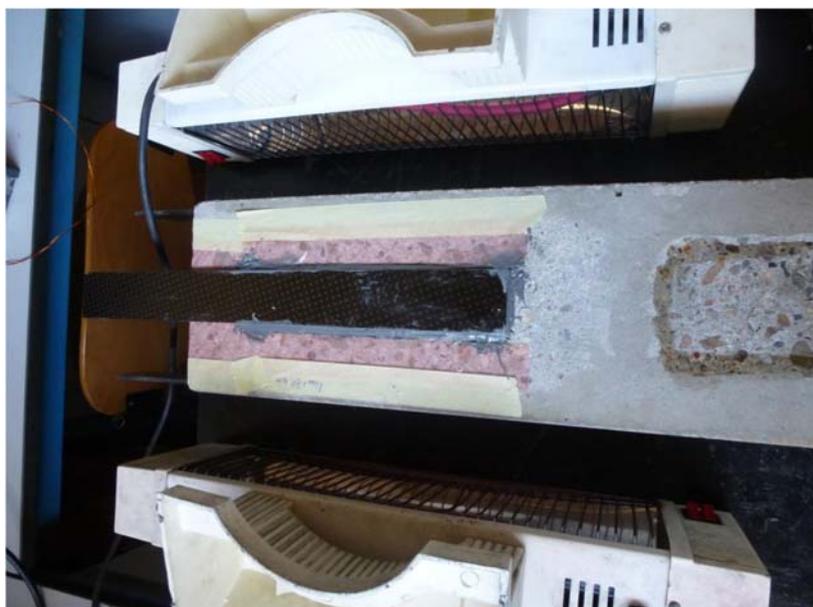


Fig. II.1.26. *Curado del adhesivo con las dos estufas (Elaboración propia).*

II.1.3 Puesta a punto del ensayo lap peeling

El ensayo consiste en aplicar una carga vertical, perpendicular a la dirección de la fibra (Fig. II.1.27). El giro de la probeta lleva consigo un desplazamiento del bloque de hormigón, el cual debe estar permitido para así no añadirle tensiones tangenciales al ensayo.

Además de permitir el desplazamiento del bloque de hormigón, es preciso un sistema que permita mantener la dirección de la carga vertical, que es la dirección en la que la máquina aplica la carga, tras producirse los

desplazamientos horizontales. Para ello, se diseña un útil que se une a la probeta rígidamente y tiene permitido el giro para mantener la carga vertical, (Fig. II.1.28).

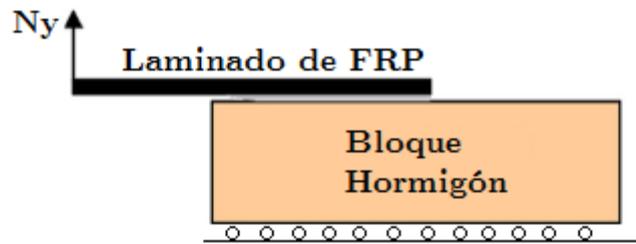


Fig. II.1.27. Esquema del ensayo de pelado (Elaboración propia).

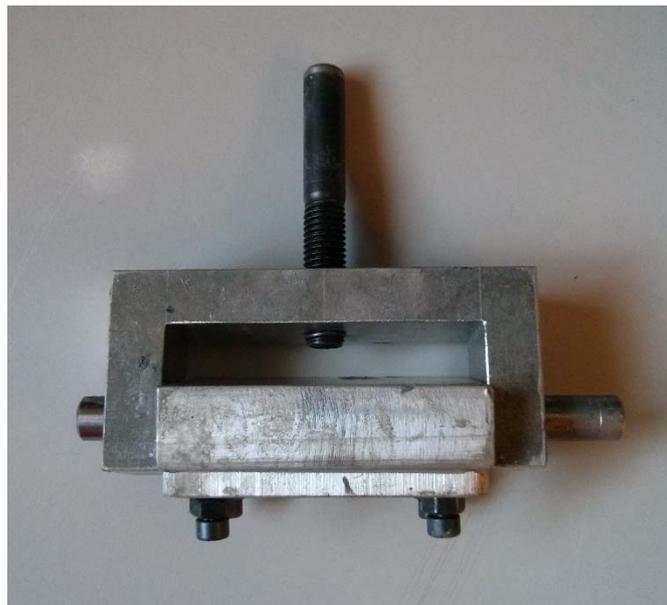


Fig. II.1.28. Útil para el ensayo (Elaboración propia).

II.1.3.1 Montaje del ensayo

Una vez fabricada la probeta, ésta se debe disponer en la máquina de ensayo. Para tirar mediante las mordazas, la probeta debe colocarse en posición horizontal, apoyada sobre una viga de acero de sección IPE (Fig. II.1.31).

Para permitir el desplazamiento horizontal, se colocan unos rodillos (pernos) colocados sobre el IPE (Fig. II.1.29), y encima una placa uniforme, para que así el apoyo del bloque de hormigón sobre los rodillos sea uniforme.



Fig. II.1.29. *Sistema de deslizamiento con los pernos y la placa uniforme (Elaboración propia).*

La disposición de las mordazas en la máquina es perpendicular al ancho de la fibra, por lo que es necesario un útil que permita realizarlo. El útil mostrado en la Fig. II.1.28, como ya se dijo anteriormente, tiene permitido el giro, por lo que se solidariza con el del laminado de CFRP (Fig. II.1.30).



Fig. II.1.30. *Funcionamiento del útil (Elaboración propia).*

II.1.3.2 Realización del ensayo

Se tira del laminado sujetando el útil, lo más cerca posible del bloque de hormigón, hasta que se produce el despegue completo. La célula de carga que se utiliza es de 5 kN.



Fig. II.1.31. *Montaje del ensayo. IPE abajo (Elaboración propia).*

II.1.3.3 Ensayos de prueba

Antes de proceder a realizar los ensayos sobre los que se centra este trabajo, se realizaron diversos ensayos de prueba para comprobar el buen funcionamiento de los útiles, de la máquina, de los rodillos, etc.

En total, se realizaron 6 ensayos previos con distintas características. Los laminados de CFRP tenían un ancho de 40 mm y un espesor variable. La longitud de todos ellos fue de 350 mm, de los cuales 200 mm se encontraban pegados al hormigón, 50 mm se usaban como una longitud libre de pegado en el extremo del bloque de hormigón y 100 mm estaban destinados a ser la longitud para poder tirar con comodidad.

La **longitud libre (L_{free})** es recomendable considerarla porque en las esquinas de la probeta de hormigón con la fibra adherida se produce una concentración de tensiones que hace que el hormigón rompa en cuña por esta esquina.

- **Ensayo 1**

El primer ensayo se realizó sobre un laminado de **3.7mm** de espesor y con la carga aplicada en el extremo (Fig. II.1.32). La capa de adhesivo no se encontraba limitada por láminas de teflón, por lo que el área de contacto era excesiva y las tensiones, por consiguiente, más pequeñas.



Fig. II.1.32. *Disposición del ensayo con la carga en el extremo (Elaboración propia).*

El fallo se produjo en el hormigón tal y como se muestra en la Fig. II.1.33.

A la hora de realizar el ensayo y tomar los datos, se produjo un error en el sistema, por lo que no se pudieron guardar. No obstante, la carga no superó los 50 N.



Fig. II.1.33. *Rotura por el hormigón (Elaboración propia).*

- **Ensayo 2**

La segunda probeta tenía las mismas características que la anterior, la única diferencia es que la carga, en lugar de en el extremo, para reducir el brazo y así poder obtener una carga mayor y que se representase con mayor fidelidad en las gráficas, se decidió colocar cercana al borde del hormigón, tal y como se muestra en la Fig. II.1.34.



Fig. II.1.34. Carga en el borde con el hormigón (Elaboración propia).

Igualmente, la rotura se produjo en el hormigón a una carga de iniciación de grieta de **103.2 N** tal y como se representa en el Gráfico II.1.1. El comportamiento de la gráfica es análogo en todos los ensayos, exceptuando pequeñas irregularidades comentadas en cada caso, por lo que la descripción es semejante a todas ellas.

El ensayo comienza con un aumento de la carga lineal hasta producirse la iniciación de la grieta, el cual representa el valor de carga máximo. A continuación desciende el nivel de la carga hasta mantener una tendencia constante en el valor de la carga. Con el número de ensayos realizados no se ha podido explicar dicho fenómeno, por lo que en futuras campañas de ensayo se pretende analizarlo.

Finalmente, cuando la grieta alcanza el extremo y se produce el despegue completo, deja de haber carga.

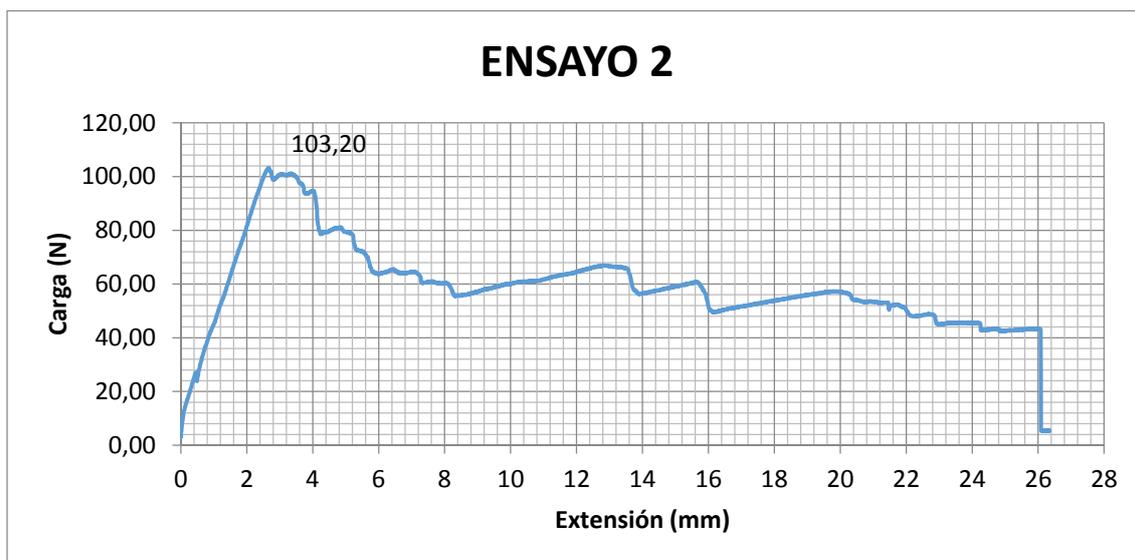


Gráfico II.1.1. *Ensayo de prueba 2 (Elaboración propia).*

- **Ensayo 3**

El tercer ensayo fue completamente análogo al anterior pero dejando una longitud libre de pegado (L_{free}) de 25 mm. Esta disminución de la longitud libre representa un menor brazo para la carga actuante, lo que se traduce en un menor momento, y por tanto una mayor carga de fallo teórica.

Por tanto, en este caso, la carga de iniciación de grieta tendría que ser mayor y como puede comprobarse en el Gráfico II.1.2, efectivamente se cumple esta suposición. La carga fue de **105.29 N**.

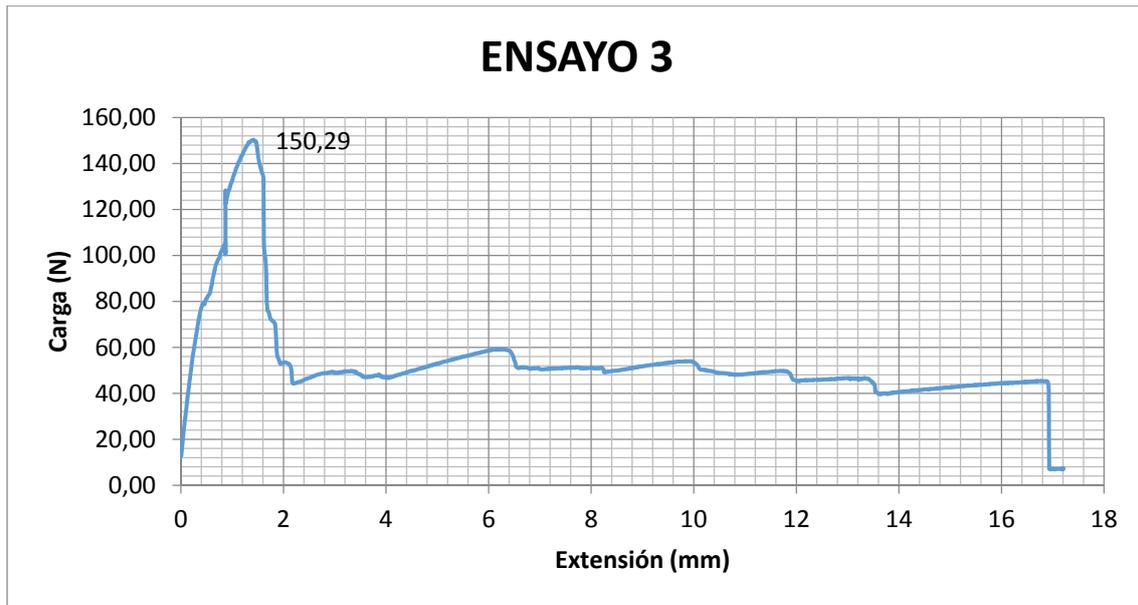


Gráfico II.1.2. *Ensayo de prueba 3 (Elaboración propia).*

- **Ensayo 4**

En este caso, la longitud libre de pegado fue de 0 mm, es decir, toda la cara inferior del laminado de fibra de carbono se encontraba adherida al hormigón. Como el brazo es nulo (despreciando la mitad del ancho del útil), la carga teórica debería ser la mayor de las tres, y como puede comprobarse en el Gráfico II.1.3, ésta fue de **154.70 N**.

Efectivamente, el valor de la carga ha aumentado con la disminución del brazo de la carga.

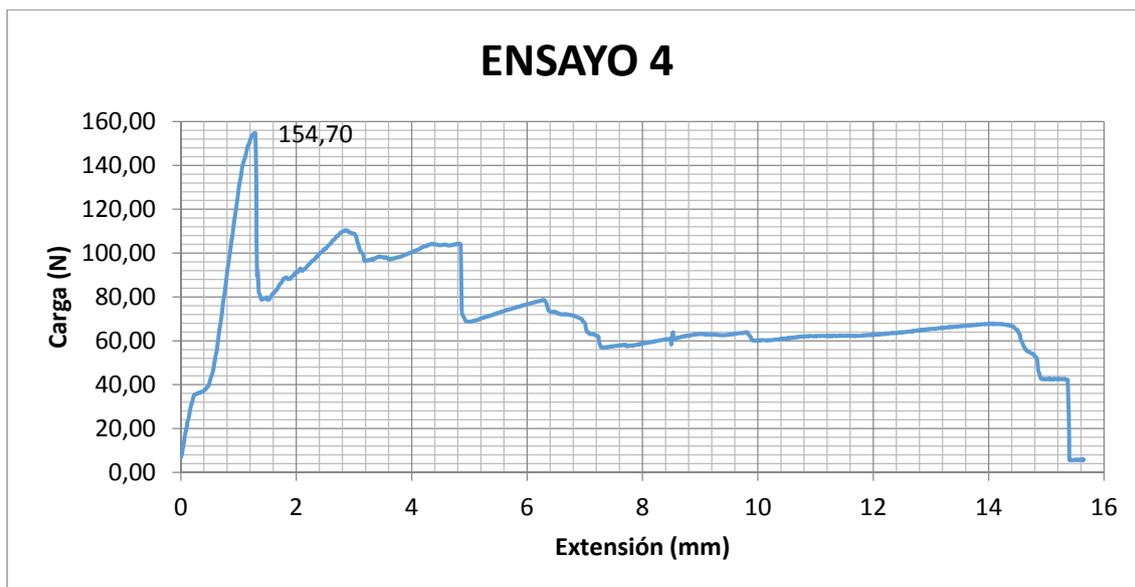


Gráfico II.1.3. *Ensayo de prueba 4 (Elaboración propia).*

- **Ensayo 5**

Este ensayo se realizó a una probeta con un espesor de **0.95 mm**, por lo que la flexibilidad era mayor y la curva muestra una mayor extensión con menor carga.

El modelo de fallo es el mismo que en los casos anteriores, ya que se produjo el fallo en el hormigón (Fig. II.1.35).

La longitud libre era de 50 mm. La carga de iniciación de grieta obtenida fue de 37.78 N (Gráfico II.1.4)

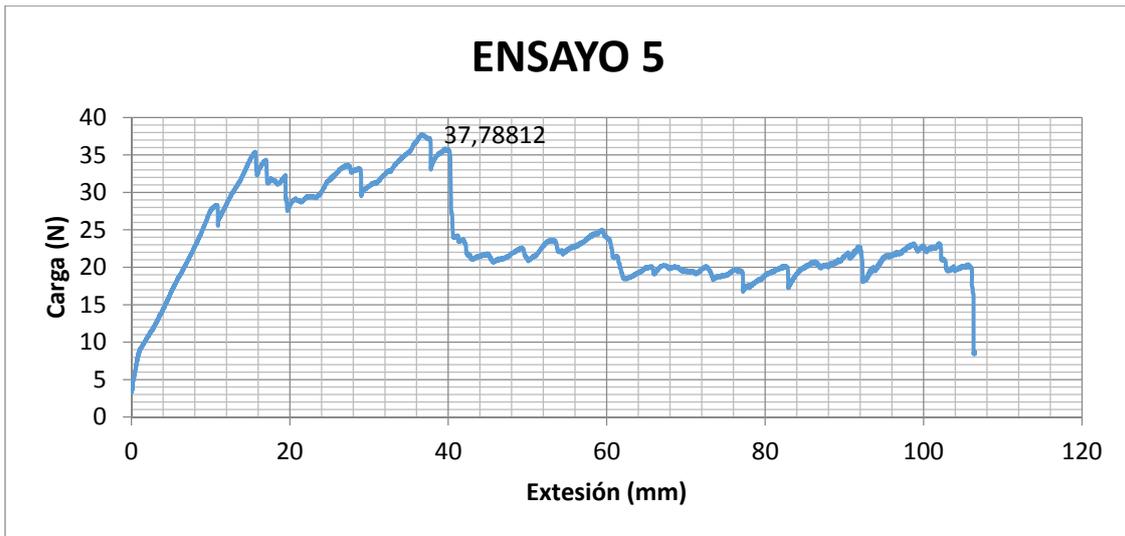


Gráfico II.1.4. Ensayo de prueba 5 (Elaboración propia).



Fig. II.1.35. Fallo en el hormigón (Elaboración propia).

- **Ensayo 6**

Este ensayo pretendía ser análogo al anterior pero con una longitud libre de pegado de 0 mm, sin embargo, un fallo en la calibración de la máquina propició que se desechara debido a los falsos resultados obtenidos.

Como resultado de los 6 ensayos de prueba realizados, se han ido subsanando los distintos errores que tenían lugar.

En primer lugar, se cambió el sistema de deslizamiento de los pernos. Se empleó una viga de acero de sección en U en lugar de la placa anteriormente mostrada. Con dicha viga, la deformación a flexión debida al peso del bloque de hormigón es considerablemente menor, por lo que se produce un deslizamiento más eficiente.

Cabe también comentar el diseño del útil. En un principio tenía un margen de 2 mm a cada lado de las dos placas que giran pero debido al roce continuo en uno de los ensayos, se desbastó 2 mm más a cada lado (ya que es lo máximo que se podía). De esta manera, no se presenta resistencia al giro y no se ven alterados los resultados.

Por último, se decidió colocar una placa de acero sobre el bloque de hormigón ya que éste se levantaba al aplicar la carga. No obstante, en los futuros ensayos pertenecientes tanto al estudio de la longitud de pegado, como al estudio del espesor del laminado de CFRP no se colocó ya que no se producía tal levantamiento.

II.1.4 Estudio de la longitud efectiva

Una vez realizados los ensayos de prueba, habiendo llevado a cabo satisfactoriamente la puesta a punto del ensayo, se estudian diferentes parámetros para ver la relación existente entre estos y los resultados obtenidos.

Se decide hacer un análisis con distintas longitudes de pegado y otro con distintos espesores. Este apartado se centrará en el primero de ellos.

Con un modelo de cálculo utilizando la teoría de la Elasticidad y Resistencia de Materiales realizado por Antonio Blázquez (profesor del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras), se obtiene una longitud efectiva de 10 mm, pero debido a la dificultad para realizar un pegado de esas magnitudes, se hará un análisis comparativo entre dos longitudes mayores, cuyos resultados tendrán que ser similares. Dicho modelo se explica más detenidamente en el Apartado II.1.6.

La campaña de ensayos se hará en tres probetas distintas para cada longitud, de forma que se pueda establecer una media y así poder desechar los resultados que no sean coherentes.

El espesor de todos los laminados era el mismo, 5 capas, es decir, 1 mm. El ancho de 40 mm y la longitud libre de pegado de 50 mm.

II.1.4.1 LP-200 (I)

La primera longitud que se ensayó fue 200 mm. En las Fig. II.1.36 y Fig. II.1.37 se puede ver el montaje del ensayo, donde puede apreciarse la viga IPE, el carril con los rodillos que permite el deslizamiento y el útil que permite el giro.

La rotura (Fig. II.1.38) se produjo de diferentes formas. En algunas zonas se produjo un fallo en la última capa de hormigón. En otras, se produjo un fallo adhesivo, es decir, no hubo suficiente adherencia entre el hormigón y la capa de adhesivo, por lo que se separaron.

Sin embargo, el fallo que más destaca en la zona central, es el fallo cohesivo, es decir, a ambos lados queda una capa de adhesivo. Esto puede deberse a distintos factores. Por ejemplo, un mal curado del adhesivo debido a que no ha alcanzado la temperatura idónea durante el tiempo especificado o a una falta de presión que haya dejado aire en el interior.



Fig. II.1.36. *Montaje del ensayo (Elaboración propia).*



Fig. II.1.37. Ejecución del ensayo LP-200 I (Elaboración propia).



Fig. II.1.38. Vista de la rotura del ensayo LP-200 I (Elaboración propia).

La gráfica del ensayo (Gráfico II.1.5) muestra una irregularidad en la zona central. Dichos altibajos en la carga se produjeron debido al choque del

útil con la mordaza, lo que no le permitía el giro adecuadamente y se solucionó manualmente.

Como puede verse, el valor de la carga para la que se produjo la iniciación de la grieta fue de **45.29 N**.

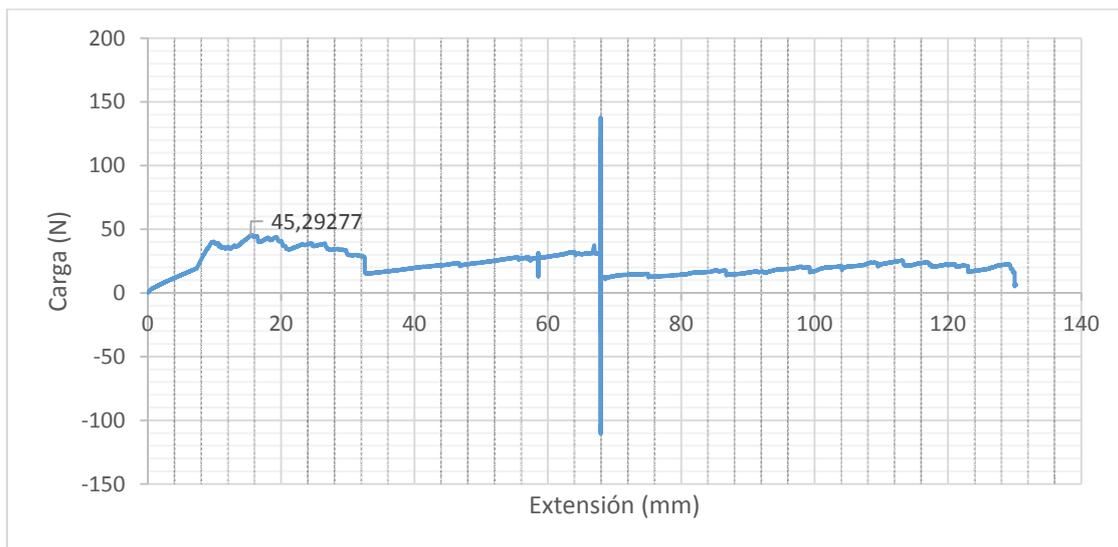


Gráfico II.1.5. Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 I.

II.1.4.2 LP-200 (II)

El segundo ensayo fue de las mismas características que el anterior (Fig. II.1.39). La rotura se produjo en las mismas condiciones (Fig. II.1.40), así que, teniendo en cuenta que el proceso de curado del adhesivo fue el mismo, se advierte claramente que no hubo un curado adecuado.



Fig. II.1.39. Ejecución del ensayo LP-200 II (Elaboración propia).



Fig. II.1.40. Vista de la rotura del ensayo LP-200 II (Elaboración propia).

La curva de este ensayo (Gráfico II.1.6) no presenta ninguna irregularidad. El pico mayor se produce a **32.79 N** y a partir de esa carga, el

valor disminuye hasta quedarse en un valor con una tendencia constante. Esto se debe a un fenómeno al que no se le dio una respuesta, por lo que en campañas futuras se prevé poder explicar dicho comportamiento. Los sucesivos picos se deben a la naturaleza heterogénea del hormigón, que muestra distintas resistencias según el tipo de grava que se encuentra la grieta.

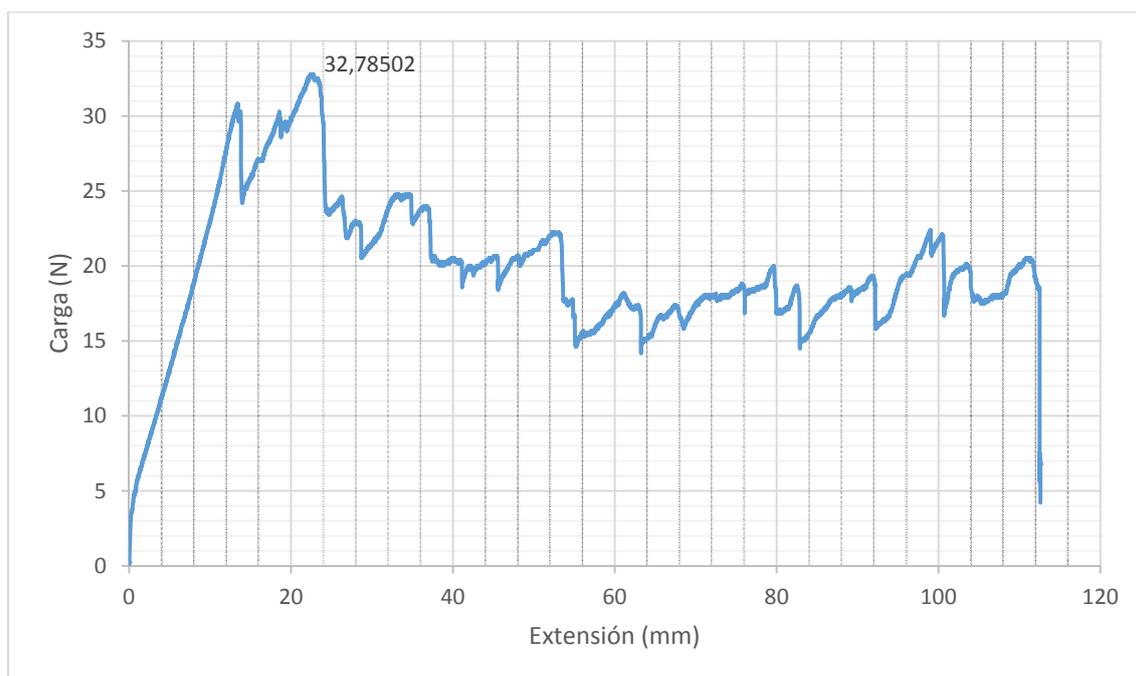


Gráfico II.1.6. *Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 II.*

II.1.4.3 LP-200 (III)

El tercer ensayo para la primera longitud (Fig. II.1.41) tuvo un proceso de curado igual pero sí alcanzó la temperatura necesaria. Esto se traduce en un fallo más homogéneo (Fig. II.1.42) en la capa de hormigón. Se puede apreciar la capa de teflón que limita el área de pegado para así controlar mejor la tensión media de rotura.



Fig. II.1.41. Ejecución del ensayo LP-200 III (Elaboración propia).



Fig. II.1.42. Vista de la rotura del ensayo LP-200 III (Elaboración propia).

La curva de este ensayo (Gráfico II.1.7) define un comportamiento análogo a los mostrados anteriormente. La carga de iniciación de grieta fue de

37.79 N, similar a la anterior, además de los sucesivos picos aproximadamente constantes en carga debidos a la naturaleza del hormigón.

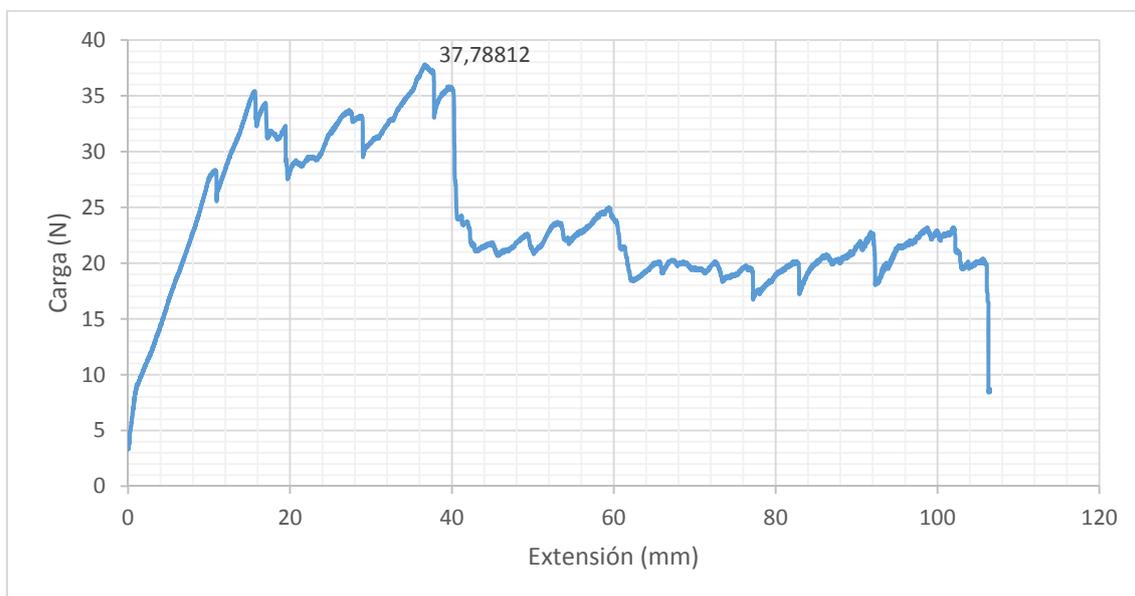


Gráfico II.1.7. Resultados obtenidos para el ensayo LP-200 III.

II.1.4.4 LP-50 (I)

La otra longitud estudiada es de 50 mm de longitud pegada. Las demás dimensiones de la probeta son idénticas. El primer ensayo (Fig. II.1.43) se realizó obteniéndose un fallo eminentemente en la capa de hormigón (Fig. II.1.44), aunque aparecen contornos de adhesivo a ambos lados, por lo que se volvió a repetir un fallo cohesivo propiciado por un mal curado.



Fig. II.1.43. *Ejecución del ensayo LP-50 I (Elaboración propia).*



Fig. II.1.44. *Vista de la rotura para el ensayo LP-50 I (Elaboración propia).*

La curva del ensayo (Gráfico II.1.8) muestra una tendencia muy parecida. Se produce un pico al comienzo que marca el inicio de la grieta con un

valor de **41.87 N**, posteriormente, desciende hasta mantenerse constante. La longitud de pegado afecta a la máxima extensión que se produce. Al ser más corta en este caso la longitud, se produce el despegue completo antes que en los ensayos con 200 mm de longitud pegada, los cuales presentaban la misma tendencia a lo largo de todo el recorrido una vez se había producido el pico mayor. En este caso, la tendencia es semejante con un tiempo de ensayo de menor duración.

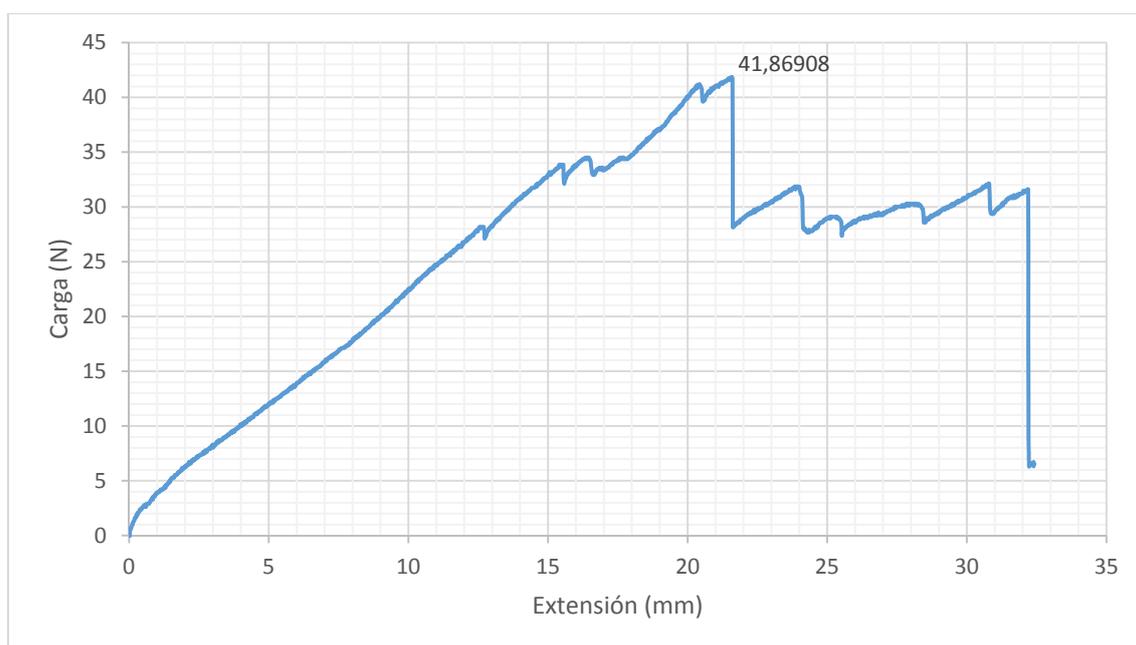


Gráfico II.1.8. *Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 I.*

II.1.4.5 LP-50 (II)

El segundo ensayo para la longitud de 50 mm (Fig. II.1.45) tuvo un comportamiento idéntico. El proceso de curado del adhesivo fue el mismo, por lo que se produjo el mismo tipo de fallo (Fig. II.1.46), mayoritariamente por el hormigón, aunque con algunas zonas con fallo cohesivo.



Fig. II.1.45. Ejecución del ensayo LP-50 II (Elaboración propia).



Fig. II.1.46. Vista de la rotura del ensayo LP-50 II (Elaboración propia).

La curva del ensayo muestra un comportamiento parecido. La carga de iniciación de grieta se produjo a **32.79 N**, y la máxima extensión no fue alta,

con un valor de 25 mm, ya que la grieta alcanza rápidamente el extremo final por ser la longitud de pegado pequeña.

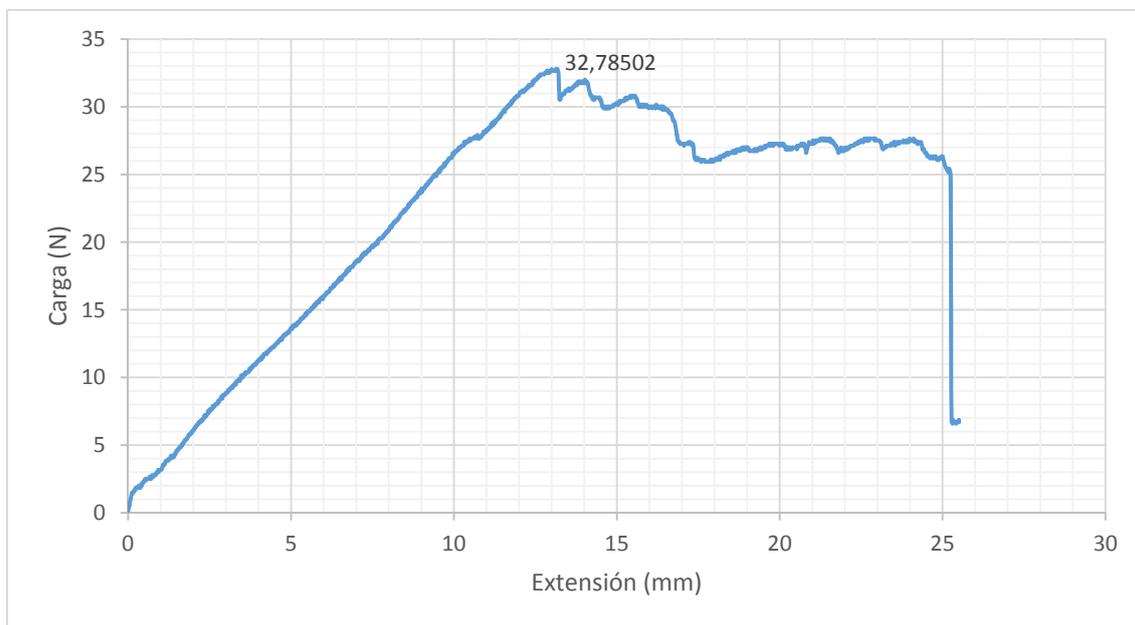


Gráfico II.1.9. Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 II.

II.1.4.6 LP-50 (III)

La tercera repetición para la longitud de 50 mm (Fig. II.1.47) se ensayó bajo las mismas condiciones que los predecesores.

El tercer ensayo tuvo una rotura bastante más homogénea, caracterizada por el fallo en el hormigón (Fig. II.1.48).



Fig. II.1.47. Ejecución del ensayo LP-50 III (Elaboración propia).



Fig. II.1.48. Vista de la rotura para el ensayo LP-50 III (Elaboración propia).

El gráfico del ensayo muestra el pico al que se produce la iniciación de la grieta, con un valor de **33.31 N**. A diferencia de los demás, al comienzo se

observa un cambio en la pendiente, esto es efecto del ajuste de los tornillos del útil, que no se encontraban perfectamente apretados.

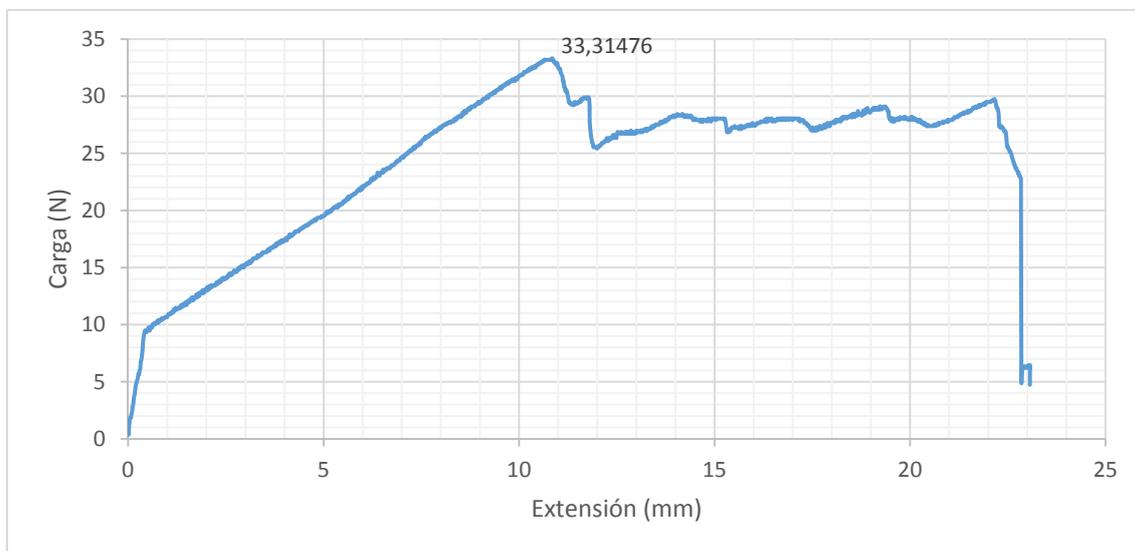


Gráfico II.1.10. Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 III.

II.1.4.7 Comparación de los ensayos

Para poder hacer una comparación fiable, es necesario que las circunstancias del ensayo sean las mismas.

Para ello, se representarán los tres ensayos de la misma longitud en una sola gráfica para así poder compararlas.

Las curvas de los tres ensayos correspondientes a la longitud pegada de 200 mm (Gráfico II.1.11) muestran la misma estructura.

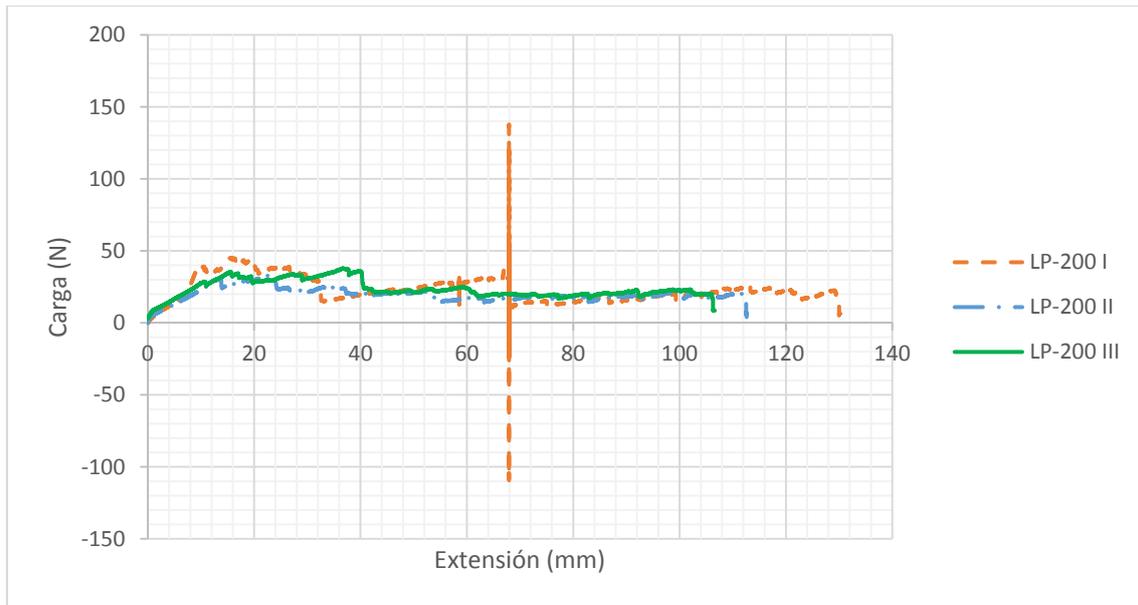


Gráfico II.1.11. Comparación de los 3 ensayos para $L=200$ mm.

No obstante, debido al ajuste manual que se hizo en el primero y que se representa en la gráfica como una variación de carga, es más claro mostrar las gráficas hasta ese determinado punto (Gráfico II.1.12), además que lo que se muestra a posteriori es fruto de la longitud pegada y en los tres casos el comportamiento es el mismo.

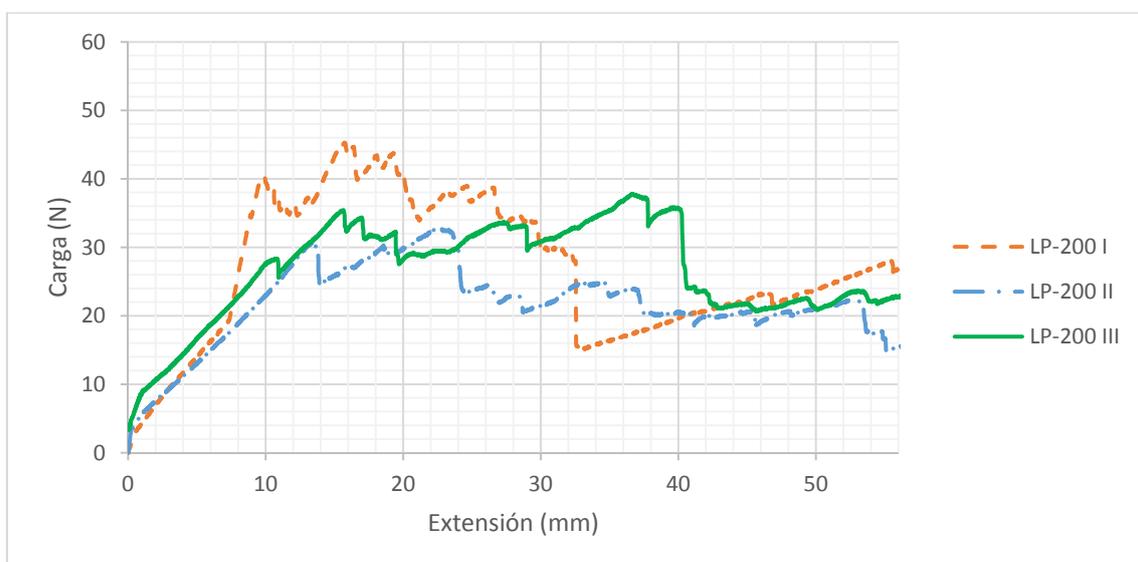


Gráfico II.1.12. Comparación de los 3 ensayos para $L=200$ mm (I).

Al igual, los tres ensayos para la longitud pegada de **50 mm** se superponen de una manera bastante razonable. El primero de ellos tiene un pico mayor, pero del mismo orden de magnitud (Gráfico II.1.13).

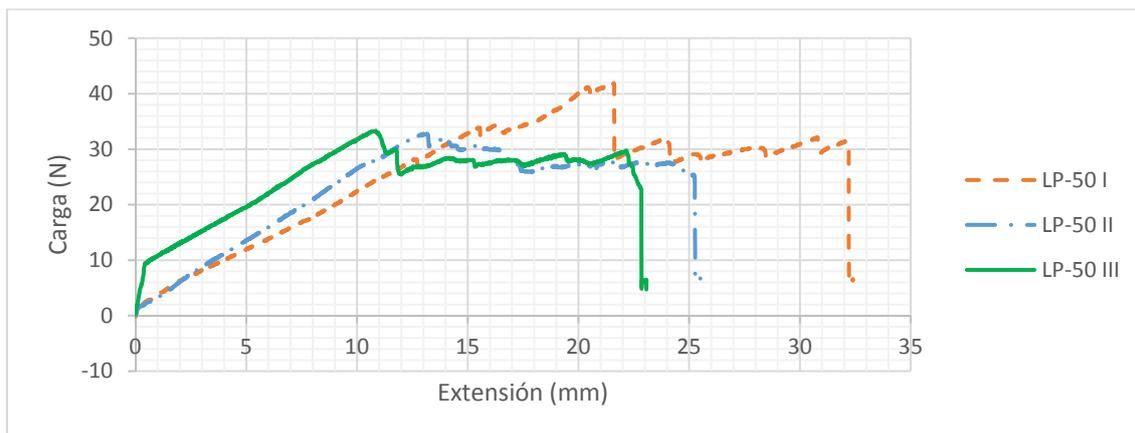


Gráfico II.1.13. Comparación de los 3 ensayos para $L=50$ mm.

Para hacer un resumen visual, se muestran en el Gráfico II.1.14 los 6 ensayos. Los tres ensayos semejantes se muestran con el mismo tipo de línea. Se ha obviado el final de los ensayos con una longitud de pegado de 200 mm ya que no aportan información relevante.

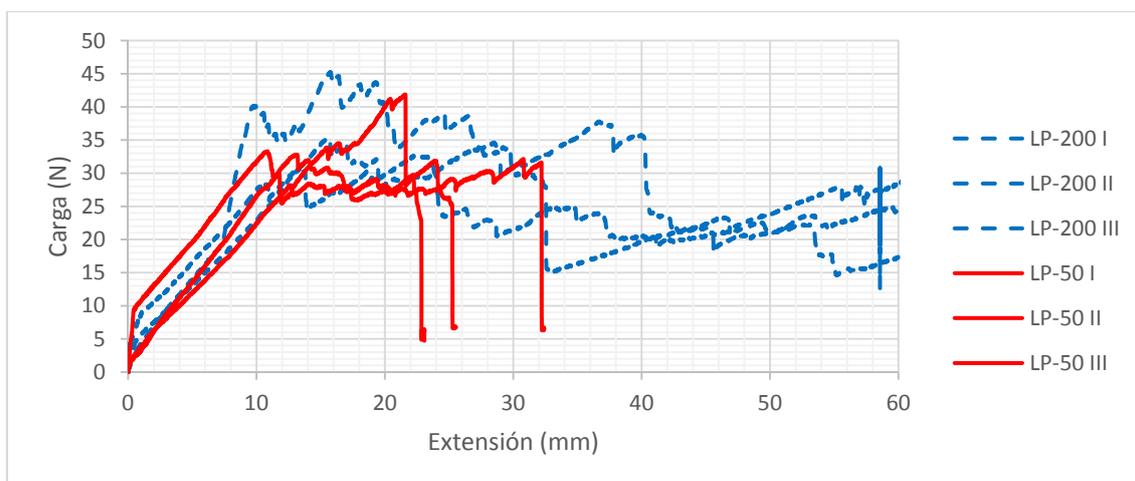


Gráfico II.1.14. Comparación de los 6 ensayos realizados para el estudio de la L_f .

En la Tabla II.1.1 se resumen los valores máximos de los ensayos mostrados en el Gráfico II.1.14.

ENSAYO	VALOR DE LA CARGA (N)	MEDIA (N)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (N)	COEF. VARIACIÓN (%)
LP-200 I	45,29277	38,62197	6,29543	16,3001251
LP-200 II	32,78502			
LP-200 III	37,78812			
LP-50 I	41,86908	35,98962	5,09865	14,1669911
LP-50 II	32,78502			
LP-50 III	33,31476			

Tabla II.1.1. Valores máximos y coeficiente de variación (Elaboración propia).

Como se puede apreciar, las 6 gráficas muestran los picos aproximadamente en el mismo entorno y las dos medias muestran valores muy cercanos. Posteriormente, disminuyen hasta mantenerse aproximadamente constantes. La diferencia es que los ensayos con una mayor longitud de pegado tienen una mayor deformación porque la grieta tiene que hacer un mayor recorrido, aunque este hecho no condiciona la resistencia de la unión. Por tanto, se puede concluir que la longitud de pegado mayor que la calculada en el modelo teórico no influye como aportación a la resistencia.

II.1.5 Estudio variando el espesor del laminado

Al igual que la longitud de pegado tiene sus efectos en los resultados, el espesor de las probetas de CFRP es posible que también influya.

Para comprobarlo, se han analizado dos espesores distintos. Uno de 5 capas (1 mm) y el otro de 10 capas (2 mm). Para nombrar los ensayos de 10 capas se le añade una G al final para indicar que es el grueso. La longitud de pegado es de 50 mm y el ancho del laminado de CFRP de 40 mm.

La campaña de ensayos se hará en tres probetas distintas para cada espesor, de forma que se pueda establecer una media y así poder desechar resultados que no sean coherentes.

Los tres ensayos correspondientes a las probetas de 5 capas son los mismos del apartado anterior (LP-50 I; LP-50 II y LP-50 III), por lo que por simplicidad, solo se expondrán los ensayos correspondientes al espesor de 10 capas.

II.1.5.1 LP-50 G (I)

El primer ensayo para el grosor de 10 capas, se realizó en las mismas condiciones que los anteriores (Fig. II.1.49), por lo que la única diferencia es el espesor del laminado de FRP.



Fig. II.1.49. Ejecución del ensayo LP-50 G I (Elaboración propia).

La rotura muestra un fallo en la capa de hormigón (Fig. II.1.50). En los bordes del área de pegado se advierte una capa de adhesivo, pero debe despreciarse ya que se encontraba una capa de teflón entre el adhesivo y el hormigón para controlar el área real de pegado, por lo que no influye en la resistencia debido a la naturaleza desmoldeante del teflón.



Fig. II.1.50. Vista de la rotura del ensayo LP-50 G I (Elaboración propia).

La curva del ensayo (Gráfico II.1.15) tiene un valor de carga para el que se produce el inicio de la grieta mayor que en los casos anteriores. A continuación, disminuye hasta mantenerse en un valor constante, con algunos picos debido a la naturaleza heterogénea del hormigón.

En este caso, el valor de la carga es de **75.18 N**.

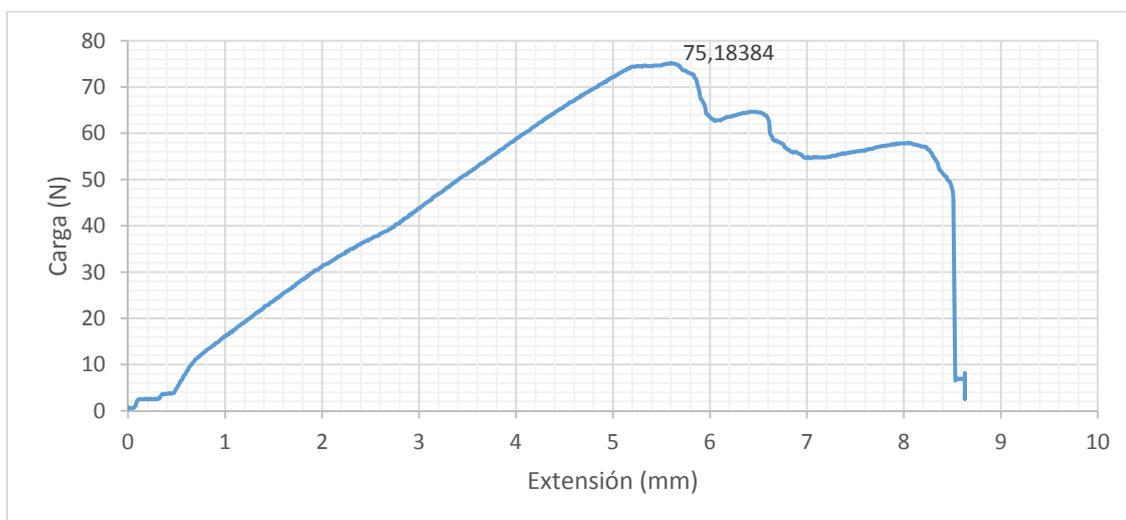


Gráfico II.1.15. Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G I.

II.1.5.2 LP-50 G (II)

El segundo ensayo (Fig. II.1.51) tuvo la misma clase de fallo, donde además puede apreciarse restos del teflón empleado para garantizar un área de pegado más ajustada a la real (Fig. II.1.52).

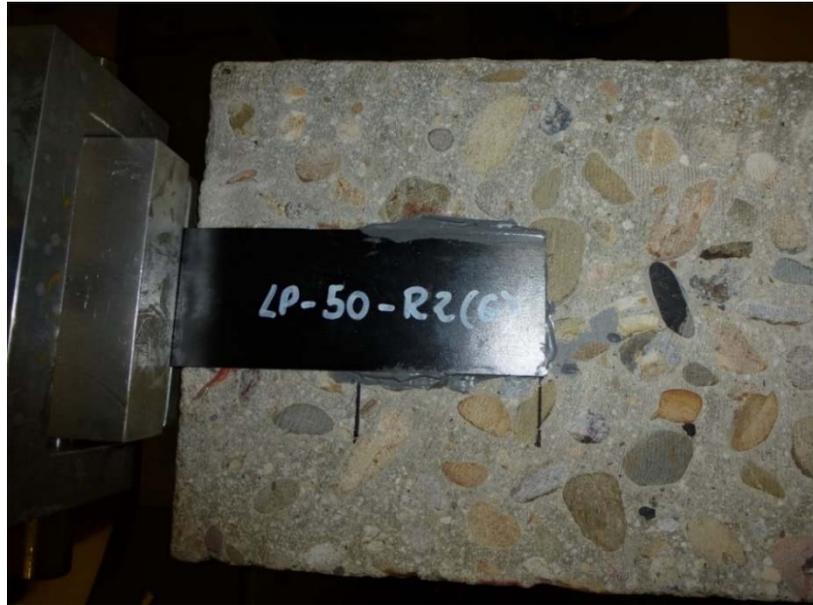


Fig. II.1.51. *Ejecución del ensayo LP-50 G II (Elaboración propia).*



Fig. II.1.52. *Vista de la rotura del ensayo LP-50 G II (Elaboración propia).*

La representación gráfica del ensayo marca una carga de inicio de la grieta de **67.68 N** (Gráfico II.1.16). Además, al comienzo del ensayo se advierte un cambio en la pendiente durante los primeros 20 N, esto se debe nuevamente a un ajuste inicial del útil del ensayo, que al no tener una buena sujeción, permitía el desplazamiento sin variar la carga.

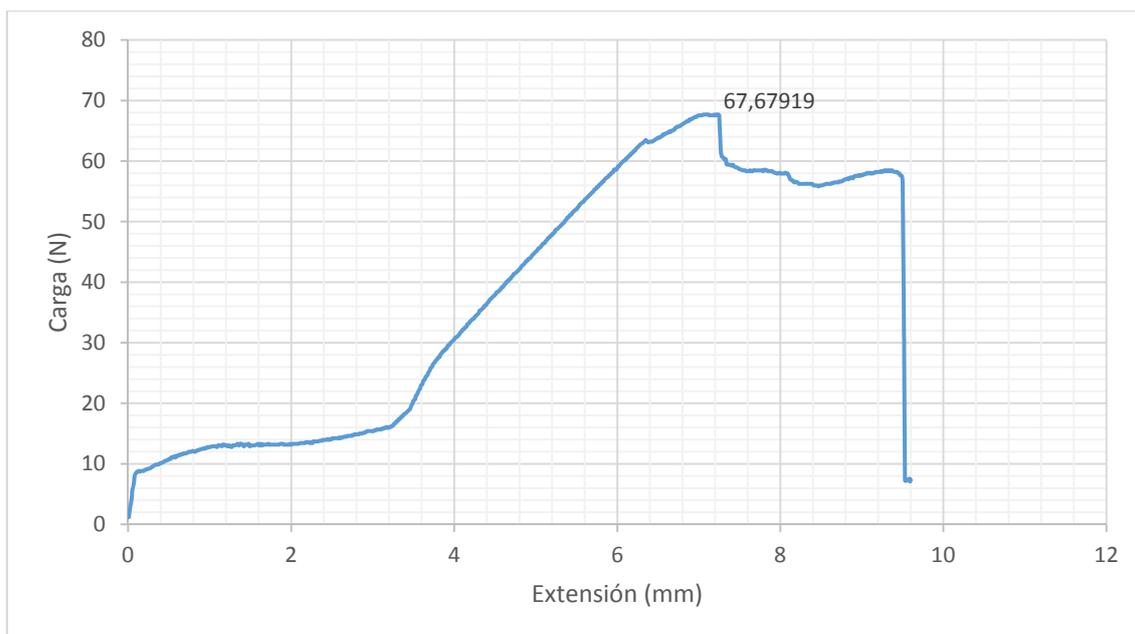


Gráfico II.1.16. Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G II.

II.1.5.3 LP-50 G (III)

El tercer ensayo (Fig. II.1.53) cumple con las expectativas y muestra el mismo tipo de fallo (Fig. II.1.54), al igual que la misma tendencia en la curva del ensayo.

En este caso, el valor de la carga de iniciación de grieta es de **73.08 N** (Gráfico II.1.17), y luego se produce una caída hasta mantenerse constante hasta el despegue completo.



Fig. II.1.53. *Ejecución del ensayo LP-50 G III (Elaboración propia).*



Fig. II.1.54. *Vista de la rotura del ensayo LP-50 III (Elaboración propia).*

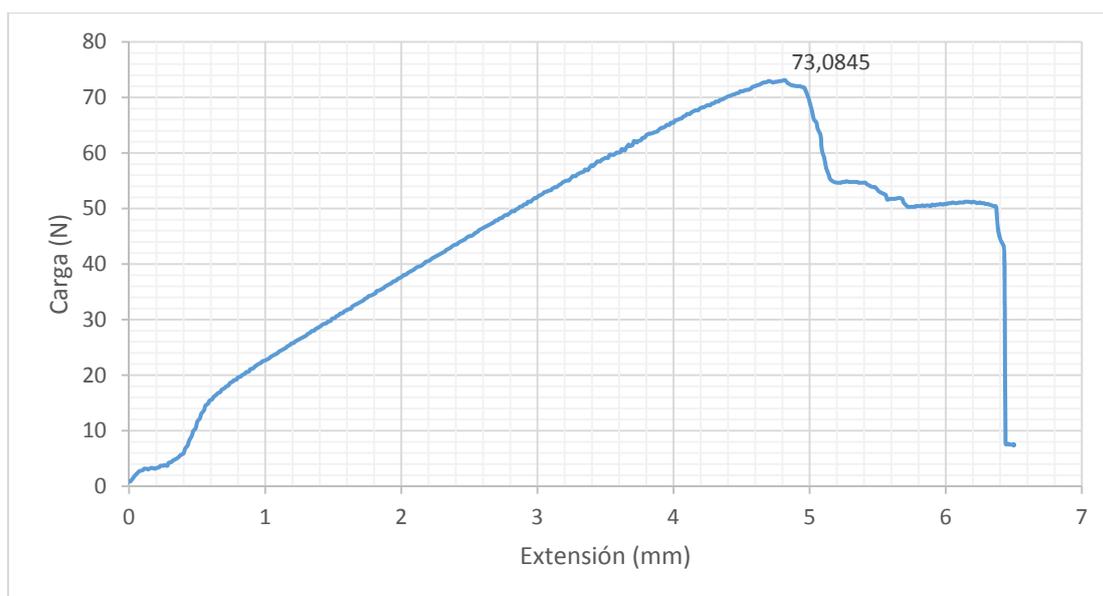


Gráfico II.1.17. Resultados obtenidos para el ensayo LP-50 G III.

II.1.5.4 Comparación de los ensayos

Al igual que para el parámetro de la longitud de pegado, se puede establecer una comparación entre ambos espesores estudiados para comprobar si existe una relación o una influencia en los resultados.

Para ello, se representarán los tres ensayos del mismo espesor en una sola gráfica para así, posteriormente, poder comparar ambas gráficas.

Las curvas de los tres ensayos correspondientes al espesor de 5 capas muestran una fiable similitud (Gráfico II.1.18).

Igualmente, el Gráfico II.1.19 muestra las tres nubes de puntos para los tres ensayos con mayor espesor. Las tres funciones presentan un comportamiento similar con la salvedad del caso del ensayo LP-50 G II que, como ya se explicó anteriormente, debido a un reajuste inicial se muestra desplazada a la derecha.

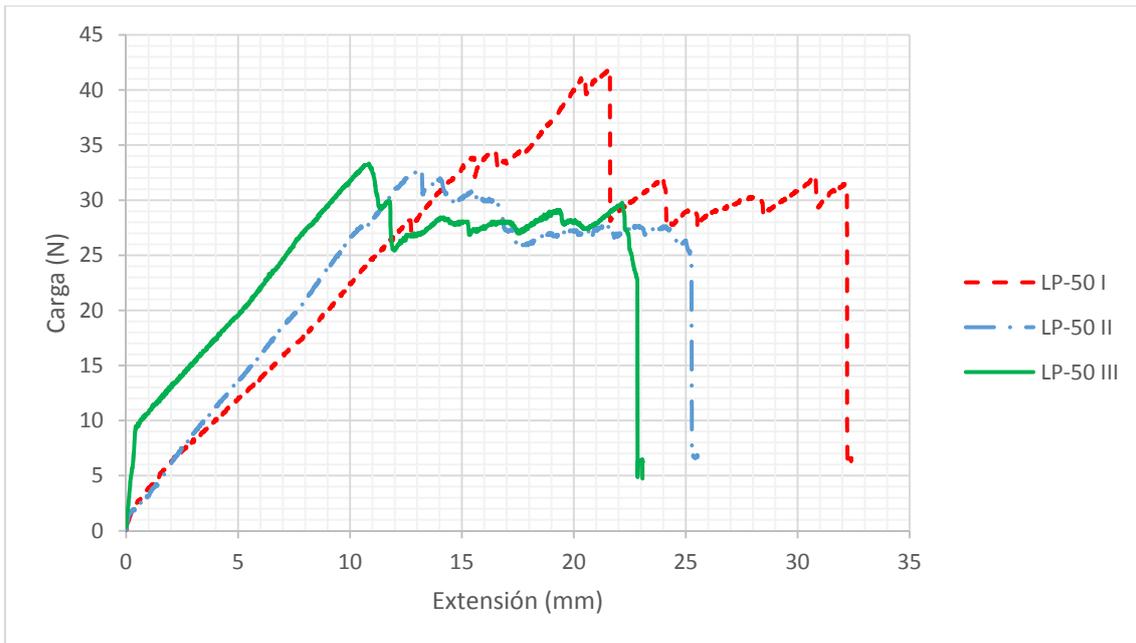


Gráfico II.1.18. Comparación de los 3 ensayos para el espesor de 5 capas.

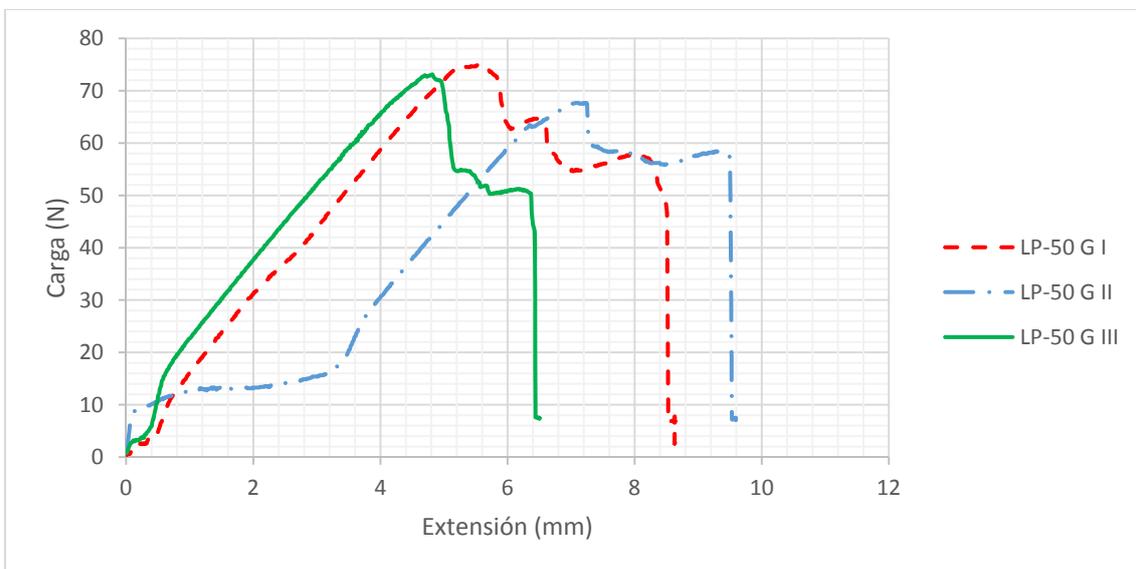


Gráfico II.1.19. Comparación de los 3 ensayos para el espesor de 10 capas.

Para tener una percepción global, se muestra en el Gráfico II.1.20 los 6 ensayos. Los tres ensayos semejantes se muestran con el mismo tipo de línea.

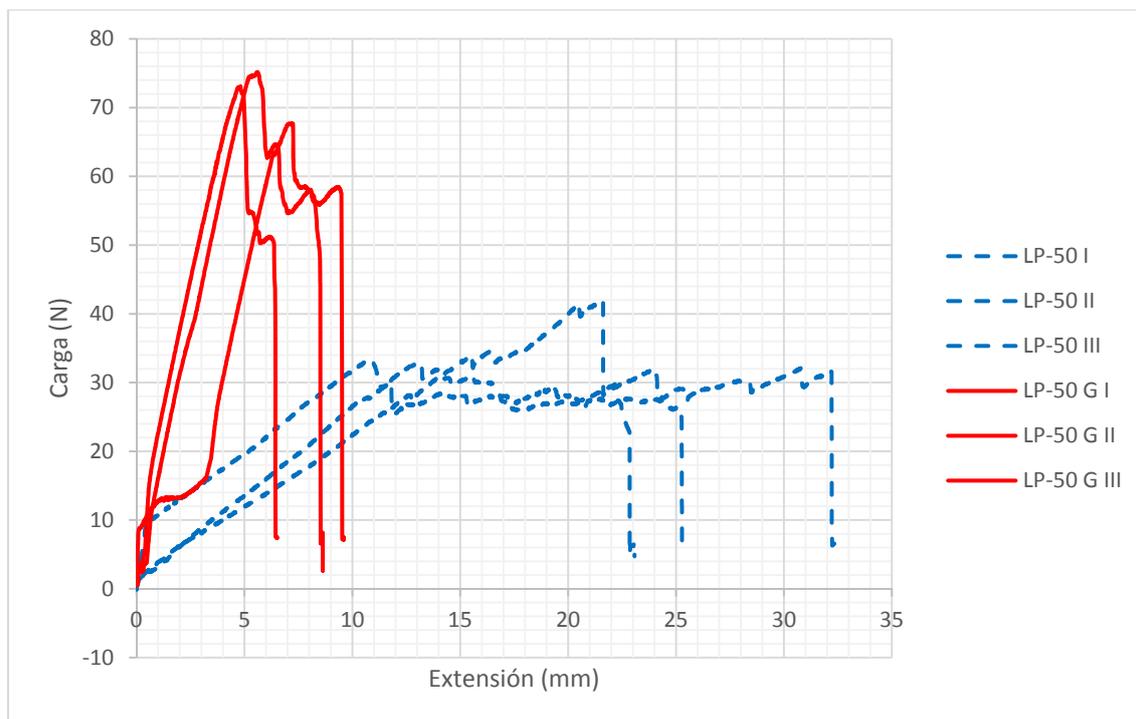


Gráfico II.1.20. Comparación de los 6 ensayos realizados para el estudio del espesor del laminado de CFRP.

En la Tabla II.1.2 se resumen los valores máximos de los ensayos mostrados en el Gráfico II.1.20.

ENSAYO	VALOR DE LA CARGA (N)	MEDIA (N)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (N)	COEF. VARIACIÓN (%)
LP-50 I	41,86908	35,98962	5,09865	14,1669911
LP-50 II	32,78502			
LP-50 III	33,31476			
LP-50 G I	75,18384	71,98251	3,87179	5,3787876
LP-50 G II	67,67919			
LP-50 G III	73,08450			

Tabla II.1.2. Valores máximos y coeficiente de variación (Elaboración propia).

Como se puede apreciar, las 6 gráficas no muestran los mismos valores de carga máxima. Los ensayos con un mayor espesor tienen una carga mayor. Por

tanto, se puede concluir que a un espesor mayor del laminado de CFRP le corresponde una mayor carga de iniciación de grieta y por tanto una mayor resistencia a la unión.

Sin embargo, puede suceder que el área encerrada por las curvas sea razonablemente parecida, lo que se traduce en una energía necesaria para producir el despegue total parecida.

Para calcular el área bajo la curva se emplea la herramienta matemática Matlab v.2013. Las distintas áreas se muestran a continuación en la Tabla II.1.3.

ENSAYO	ÁREA (N·mm)	MEDIA (N·mm)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (N·mm)	COEF. VARIACIÓN (%)
LP-50 I	817	649,87857	144,81499	22,2833916
LP-50 II	571			
LP-50 III	562			
LP-50 G I	405	352,58827	56,73525	16,091077
LP-50 G II	361			
LP-50 G III	292			

Tabla II.1.3. Área bajo la curva de los 6 ensayos del estudio del espesor (Elaboración propia).

El área encerrada bajo las curvas de los laminados de menor espesor es más grande. Es decir, es necesario aplicar mayor energía para producir el despegue completo de dichos laminados.

II.1.6 Comparación de resultados con modelo teórico

Una vez realizado los ensayos y analizado los resultados obtenidos, se puede establecer una comparación con el modelo teórico.

Estudio 1: Longitudes de pegado

Los primeros ensayos de la campaña se realizaron para comprobar experimentalmente que existe una **longitud efectiva (Le)**, que se define como la longitud mínima para la cual aumentando la longitud de anclaje no aumenta la carga máxima. Si la longitud de anclaje (L_f) es menor que esta longitud mínima, dicha longitud de anclaje influye en la resistencia de la unión; no se desarrolla su capacidad máxima.

Con el modelo anteriormente mencionado realizado por el profesor Antonio Blázquez se puede establecer una comparación cualitativa entre los resultados experimentales obtenidos en los ensayos y los que ofrecen este modelo.

Este modelo consiste en considerar una viga de longitud L sobre un lecho de muelles que se encuentra libre en $x=0$ y con carga (F_x , F_y , M_z) en el extremo $x=L$.

La viga de longitud L viene a representar el laminado de CFRP, siendo L la longitud pegada L_f .

El lecho de muelles representa la acción del adhesivo, de forma que el hormigón se considera un sólido rígido en este modelo.

Para representar el ensayo de Lap Peeling las condiciones de carga serían:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_x=0 \\ F_y=P \\ M_z=P \cdot d, \text{ siendo } d \text{ la distancia libre de pegado (Lfree)}. \end{array} \right.$$

El modelo se programa en Matlab y se introducen las características del laminado de CFRP y del adhesivo, además de las dimensiones de la probeta. Una vez ejecutado se obtienen los siguientes resultados.

En el Gráfico II.1.21 se representa el desplazamiento transversal del laminado de CFRP en mm respecto la longitud anclada, x , también en mm.

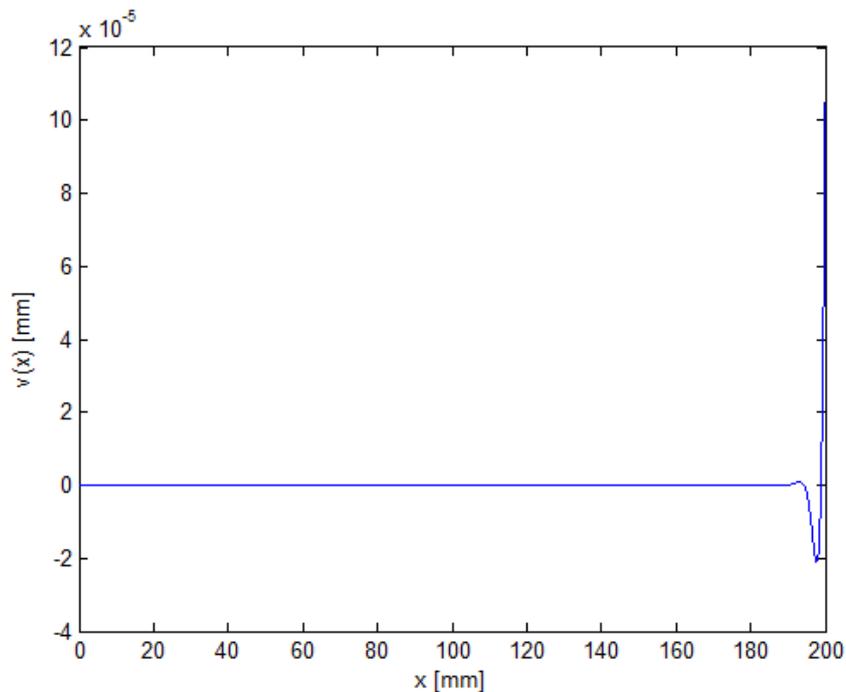


Gráfico II.1.21. *Modelo Resistencia de Materiales. Desplazamiento transversal*
(Elaboración Propia).

En el Gráfico II.1.22 y Gráfico II.1.23 se representa el esfuerzo cortante en el laminado expresado en N y el momento flector en el laminado, también en N, respectivamente, frente a la longitud anclada, x , en mm.

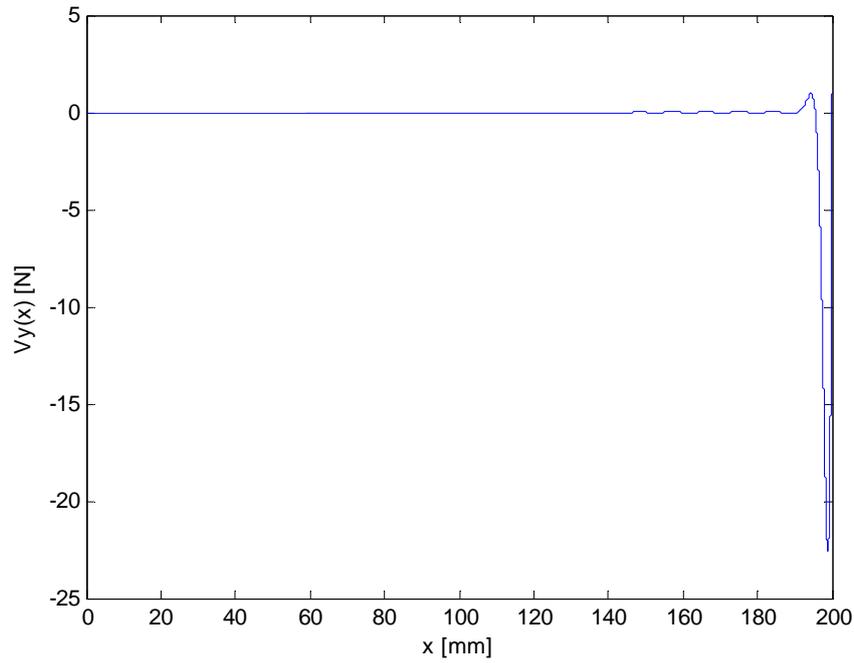


Gráfico II.1.22. *Modelo Resistencia de Materiales. Cortante (Elaboración Propia).*

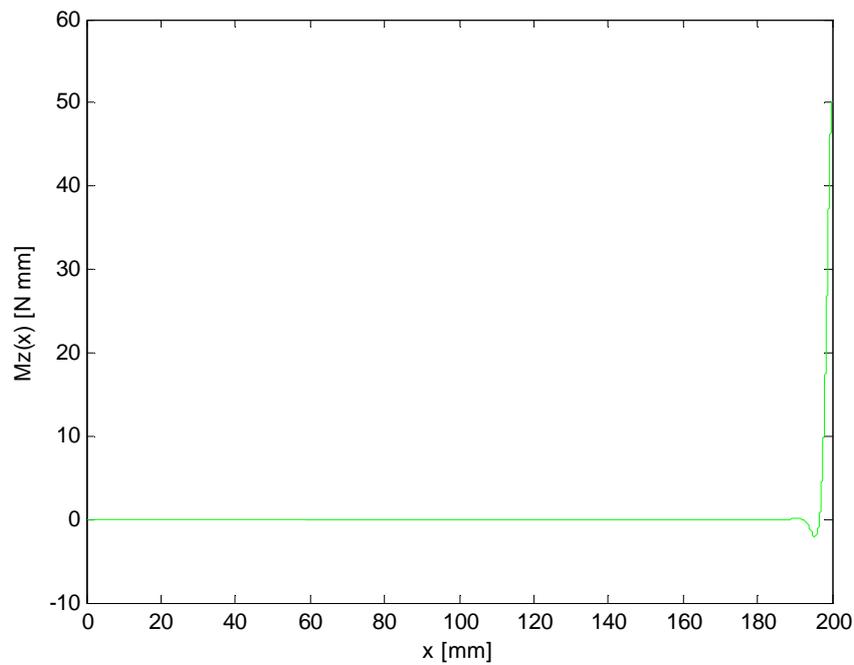


Gráfico II.1.23. *Modelo Resistencia de Materiales. Flector (Elaboración propia).*

En el Gráfico II.1.24 se muestra la tensión de pelado (MPa) frente a la longitud anclada, x , en mm.

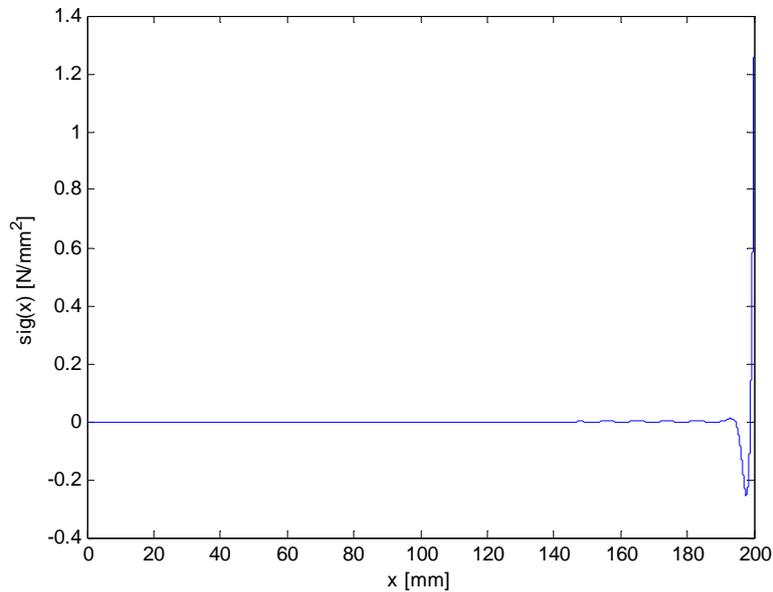


Gráfico II.1.24. *Modelo Resistencia de Materiales. Tensión peeling en el adhesivo (Elaboración propia).*

Según podemos observar en los Gráfico II.1.21, Gráfico II.1.22, Gráfico II.1.23 y Gráfico II.1.24, tanto las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos comenzarían a uniformizarse entre los primeros 10 y 20 mm, de forma que podríamos considerar esta longitud la longitud efectiva L_e .

Tal y como se expresó en el apartado II.1.4, la campaña de ensayos que se ha realizado presentan los mismos resultados para distintas longitudes de pegado. Es por eso que se evidencia la existencia de una longitud efectiva a partir de la cual no tiene influencia en la resistencia.

La longitud efectiva debe ser menor que la mínima empleada, es decir, menor de 50 mm. Por tanto, este modelo se ajusta bien a dicho valor, ya que se obtiene una longitud efectiva entre 10 y 20 mm.

II.2 ENSAYO DE PULL OFF

La caracterización de las uniones entre hormigón y fibra de carbono puede obtenerse mediante ensayos que permitan conocer la resistencia a la tracción. Tal es el caso del ensayo “Pull Off”. Se trata de un ensayo normalizado que ha obtenido gran popularidad en los últimos años debido a la facilidad en su realización y al bajo coste.

Sin embargo, la pequeña escala en la que se localiza el ensayo, la cual produce una alta variabilidad en los resultados, y las condiciones de carga, que no son las cargas a la que se someterá realmente en su vida en servicio, dificultan una correcta interpretación de los resultados.

El ensayo consiste en realizar una trepanación en una probeta con el refuerzo aplicado y pegarle un disco del que después se tira a tracción con una célula de carga. En la Fig. II.2.1 puede observarse una realización del ensayo.

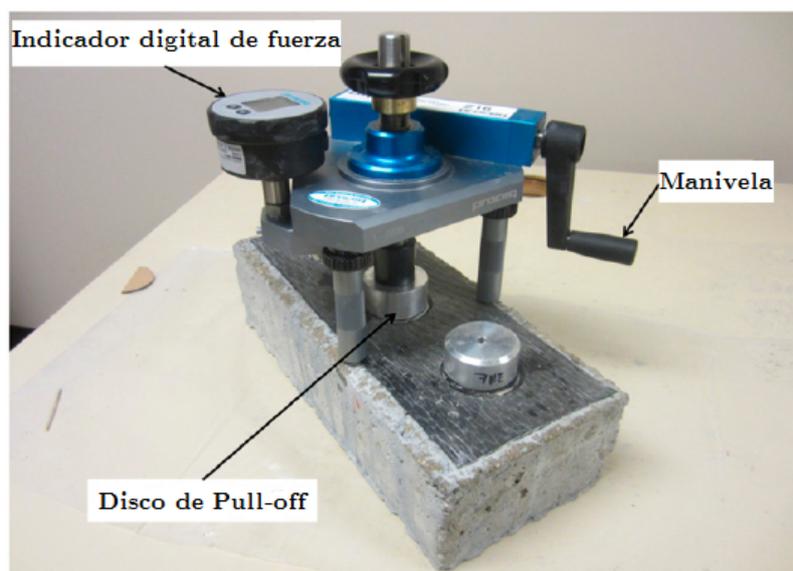


Fig. II.2.1. Configuración del ensayo de Pull Off (Fuente: [14]).

Este apartado tratará de describir la realización del ensayo y su puesta a punto, así como un ensayo de prueba para comprobar la puesta a punto efectuada.

II.2.1 Fabricación de material compuesto (hand lay-up)

El primer paso para poder realizar el ensayo es fabricar el material compuesto. El procedimiento empleado en este caso se denomina *hand lay-up* y consiste en colocar capas secas de fibra y posteriormente impregnarlas manualmente. Sin embargo, el número de capas decidido, debido al grosor de las láminas de fibra, es de 1.

Se comienza por obtener las láminas de fibra necesarias. Se toman dos láminas de fibra unidireccional y se colocan paralela una a la otra sobre una mesa de trabajo, para realizar la preparación fuera del bloque de hormigón.



Fig. II.2.2. Aplicación de la resina a la fibra fuera del bloque de hormigón (Elaboración propia).

A continuación, se le aplica la resina a las láminas de fibra mediante un rodillo especial para evitar la pérdida de adhesivo (Fig. II.2.2). Para ello, previamente hay que obtener la resina. Se trata de una resina epoxi la cual se acelera mediante un catalizador con una proporción de **100/15** respectivamente.

Una vez obtenida la mezcla adecuadamente agitada, se le aplica a las dos caras de las láminas. Posteriormente, con la misma mezcla, se aplica una capa de imprimación al bloque de hormigón, la cual le concederá una mayor adherencia a la unión, además de una mayor uniformidad en las tensiones.

Las láminas con la resina aplicada se colocan sobre el bloque de hormigón imprimado y se extiende una última capa de resina con el rodillo para garantizar la unión de la lámina con el hormigón (Fig. II.2.3).



Fig. II.2.3. *Pegado de la lámina de CFRP al hormigón (Elaboración propia).*

Finalmente, se le aplica presión y temperatura para acelerar el proceso de polimerización.

II.2.2 Trepanación de hormigón con corona

El tiempo de curado es de 8-10 horas a una temperatura de 60°C o de 15 horas a una temperatura de 50°C. Una vez dicho proceso ha concluido, se procede a realizar un trepanado en el bloque de hormigón.

Se emplea una perforadora de hormigón (Fig. II.2.5) con una corona de widia de 60mm de diámetro exterior (Fig. II.2.4). La profundidad es de 15mm, ya que es la profundidad referida en la Norma UNE-EN 1542-2000 [13] para la realización del ensayo Pull Off.



Fig. II.2.4. *Corona circular de widia (Elaboración propia).*



Fig. II.2.5. *Perforadora de hormigón (Elaboración propia).*

La perforadora posee un sistema de refrigeración interno mediante una conexión con una fuente de agua, el cual favorece el corte del cilindro y del laminado de CFRP. En un primer intento, pensando que sería suficiente, se realizó un trepanado con un sistema de refrigeración externo manualmente, pero el resultado no fue satisfactorio ya que el laminado de CFRP se había separado del bloque de hormigón, (Fig. II.2.6).

Posteriormente, se colocó la fuente de agua para que se refrigerase por dentro de la corona y el resultado sí fue el deseado.

El resultado es un cilindro de hormigón de 15mm de altura que sigue unido al resto del bloque. Esta trepanación tiene como finalidad garantizar el área de pegado del disco (que más tarde se describirá) y así poder saber la tensión a la que se produce el fallo de la unión.



Fig. II.2.6. *Trepanado del bloque de hormigón (Elaboración propia).*

II.2.3 Pegado del disco a la probeta

Una vez se ha realizado el trepanado en el bloque de hormigón, hay que pegarle un útil para poder tirar y realizar la extracción. Dicho útil consiste en un disco de acero del mismo diámetro que el interior de la corona, es decir, de 54mm.

Se emplea un adhesivo con una resistencia mayor que la empleada para unir las láminas de fibra de carbono y el bloque de hormigón, para así garantizar que la rotura no se producirá en la unión con el disco. El adhesivo utilizado es EA-9394 de dos componentes (Fig. II.2.7), un adhesivo para la industria aeroespacial de altas prestaciones. Las proporciones para el primer

componente (Part A) y para el segundo componente (Part B) son de **100 y 17** respectivamente.



Fig. II.2.7. Adhesivo aeronáutico de dos componentes, EA-9394 (Elaboración propia).

Previamente a la aplicación del adhesivo, es necesario realizar una serie de tratamientos superficiales que permitan una adecuada adherencia entre la fibra y el disco de acero.

Debido a la resina en la cual está impregnada la fibra y a la prácticamente nula rugosidad del acero, el adhesivo no se impregna bien y se produce un resbalamiento entre ambos materiales. Para ello, se procede a lijar tanto el laminado como el disco de acero para así garantizar una correcta adherencia. El proceso se realiza con un papel de lija de alta rugosidad para hacerlo de una manera más rápida y eficiente tal y como se muestra en las Fig. II.2.8 y Fig. II.2.9.

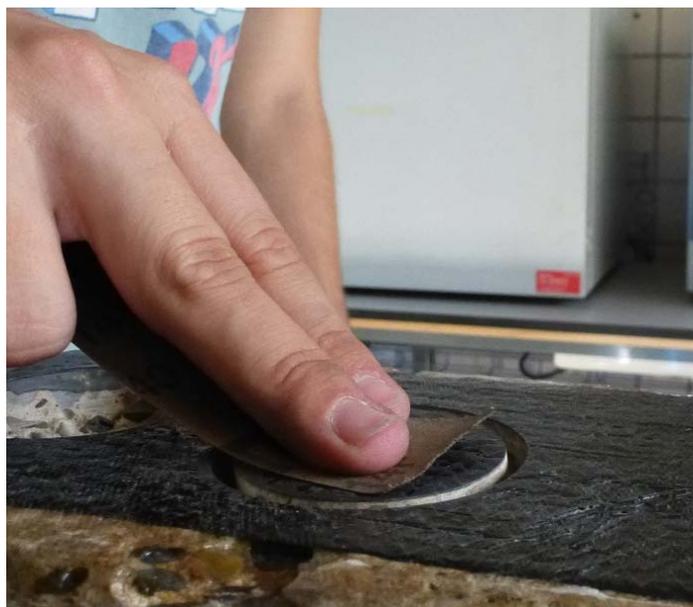


Fig. II.2.8. *Lijado del laminado de CFRP (Elaboración propia).*



Fig. II.2.9. *Lijado del disco de acero (Elaboración Propia).*

Una vez se han lijado ambas caras, se aplica el adhesivo en las proporciones anteriormente mencionadas (Fig. II.2.10).



Fig. II.2.10. Mezcla de los componentes (*Elaboración propia*).

En la Fig. II.2.11 se muestra el disco de acero ya pegado a la fibra, además del adhesivo que ha rebosado. Dicho adhesivo sobrante se elimina para que no haya alteración del área pegada y así de la tensión de rotura.



Fig. II.2.11. Pegado del disco con el adhesivo (*Elaboración propia*).

Para acelerar el proceso de curado del adhesivo, se aplica presión y temperatura. Se introduce en un horno a 66°C durante un tiempo de 90 minutos, valores especificados por el fabricante.

II.2.4 Herramientas necesarias para realizar el ensayo

Tras el curado del adhesivo, se puede realizar el ensayo. Para eso, es necesaria una máquina de ensayo Pull Off.

La máquina consiste en un bastidor que aplica la carga de tracción mediante la acción de una manivela que se gira manualmente y de una célula de carga pasante en el que se registra la carga. Consta de un manómetro de presión en el que se muestra la carga de fallo en kN o en N/mm^2 (Fig. II.2.12).



Fig. II.2.12. *Máquina de ensayo de Pull Off (Elaboración propia).*

II.2.5 Modo de realizar el ensayo

El ensayo consiste en ir girando la manivela hasta que se produce el despegue (Fig. II.2.13). El resultado obtenido nos da la resistencia a la tracción expresada en kN o N/mm².

Al haber realizado un trepanado en el bloque de hormigón, la rotura se produce en dicha zona localizada. Además, la profundidad a la que se produce el despegue es aproximadamente de 15mm, que es la profundidad a la que se hizo el trepanado.



Fig. II.2.13. *Realización del ensayo (Elaboración propia).*

En las Fig. II.2.14 y Fig. II.2.15 se puede apreciar cómo se ha producido la rotura por el hormigón.



Fig. II.2.14. *Rotura del hormigón I (Elaboración propia).*



Fig. II.2.15. *Rotura del hormigón II (Elaboración propia).*

CAPÍTULO III

Conclusiones y Desarrollos Futuros

III.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DE LOS ENSAYOS

La elaboración de este Trabajo pretende establecer un análisis sobre los distintos ensayos que puedan caracterizar la unión de un hormigón reforzado externamente con un laminado de FRP. Más concretamente, se ha llevado a cabo la puesta a punto del ensayo Lap Peeling y del ensayo Pull Off, los cuales presentan unas condiciones de carga similares.

Fabricación de las probetas

En este apartado, se ha descrito el proceso de fabricación de los laminados de CFRP mediante la utilización de Pre-preg y autoclave o mediante el método *hand lay up* para los ensayos de Lap Peeling y Pull Off, respectivamente.

Posteriormente, se ha comentado el pegado de los laminados en bloques de hormigón ya fabricados, siguiendo algunos tratamientos superficiales que garanticen una correcta adherencia.

Además de dichos tratamientos, se han colocado láminas de teflón marcando los bordes del laminado de CFRP para que así el adhesivo sobrante no ayude a la resistencia de la unión. Con esto, se ha pretendido ajustar el área de pegado al área real para poder obtener la tensión de rotura con una mejor aproximación.

En el caso de ensayo de Pull Off, además, hay que realizar un trepanado con una corona circular al conjunto CFRP-hormigón.

Realización de los ensayos de Lap Peeling y Pull Off

Una vez se han fabricado las probetas se procede a describir la realización de los ensayos. En el caso del ensayo de Lap Peeling, al ser un ensayo no normalizado, es necesario realizar una puesta a punto más compleja que para el Pull Off. Precisa de un útil de ensayo que tiene permitido el giro sobre un eje para que se solidarice con el del laminado de CFRP. Además, como la mordaza aplica la carga en dirección vertical en un punto fijo, ha sido necesario diseñar un sistema de deslizamiento mediante rodillos, para permitir el movimiento en dirección horizontal, ya que de la otra forma se añadirían tensiones tangenciales al ensayo.

Posteriormente, se realizan los ensayos correspondientes al estudio de parámetros que influyan en los resultados.

En primer lugar, se analiza la influencia de la longitud del laminado de CFRP pegado al hormigón, L_f . Se comprueba que existe una longitud efectiva, a partir de la cual los resultados no varían. Debido a que dicha longitud está en torno a los 10-20 mm y es complejo pegar tan poca longitud, se ensayan dos longitudes superiores (50 mm y 200 mm), cuyos resultados deben ser iguales.

En segundo lugar, se analiza la influencia del espesor del laminado de CFRP pegado al hormigón, L_f . Se ensayan dos espesores distintos: 1 mm y 2 mm, respectivamente.

Por otra parte, el ensayo de Pull Off precisa de un disco macizo de acero que se pega al laminado de CFRP. Dicho disco tiene el mismo diámetro que la cara interior de la corona que se usó para realizar el trepanado.

Se emplea una máquina de Pull Off, que consiste en un bastidor que aplica la carga mediante un tornillo que se enrosca en el disco de acero. Además, consta de una célula de carga pasante que registra la carga.

Conclusiones de los resultados en los ensayos de Lap Peeling

El estudio de los dos parámetros mencionados anteriormente en el ensayo Lap Peeling conlleva una serie de resultados de los que se pueden obtener diversas conclusiones.

El estudio de la longitud pegada consistía en realizar 3 ensayos para una longitud de 200 mm y 3 ensayos para una longitud de 50 mm. En todos ellos, el bloque de hormigón empleado era el mismo, y las dimensiones del laminado de CFRP eran idénticas; 40 mm de ancho y 1 mm de espesor.

Los 6 ensayos realizados, tanto los 3 de la longitud de 200 mm como los 3 de la longitud de 50 mm, presentan un valor de iniciación de grieta muy similares, en torno a los 36 N. Además, la desviación estándar y los coeficientes de variación son, igualmente, muy similares. Es por esto, que se advierte que la longitud de pegado no influye en la capacidad resistencia de la unión, o que de existir, debe ser inferior a 50 mm. Más adelante, se comparó con el modelo teórico que había realizado el profesor Antonio Blázquez y con los resultados obtenidos se concluyó que la longitud efectiva debe estar en torno a los 20 mm. Es decir, sí existe una longitud efectiva a partir de la cual, la resistencia no aumenta.

Por otra parte, se realizó un estudio de la influencia del espesor del laminado de CFRP. Al igual que para el primer estudio, se realizaron 6 ensayos

distintos; 3 ensayos para un espesor del laminado de 1 mm y 3 ensayos para un espesor del laminado de 2 mm.

Debido a que los 3 ensayos para el espesor de 1 mm son los mismos que 3 de los ensayos que se utilizaron también en el estudio anterior, el valor de pico para el que se produce la iniciación de la grieta está en torno a 36 N.

No obstante, los 3 ensayos correspondientes al espesor de 2 mm difieren bastante en dicho valor. La media de estos es de 71 N aproximadamente, por lo que es el doble que la anterior. Sin la realización de más ensayos es difícil concluir si existe una relación lineal a lo largo de todos los espesores, o es por contra, una relación lineal hasta un valor máximo, tal y como ocurre con la longitud.

En la Tabla III.1.1 se puede apreciar la relación que existe entre las dos medias de los dos espesores. Como puede apreciarse, existe una relación lineal a priori.

ENSAYO	VALOR DE LA CARGA (N)	MEDIA
LP-50 I	41,86908	35,98962
LP-50 II	32,78502	
LP-50 III	33,31476	
LP-50 G I	75,18384	71,98251
LP-50 G II	67,67919	
LP-50 G III	73,08450	
	Relación=	2,00009086

Tabla III.1.1. *Relación existente entre las cargas para el estudio de los dos espesores (Elaboración propia).*

En dicho estudio también se ha analizado el área bajo la curva de los 6 ensayos. Aunque el valor de iniciación de grieta sea el doble para el espesor mayor, cabía la posibilidad que la energía necesaria para producir el despegue

completo fuese similar. Sin embargo, a la vista de la Tabla III.1.2, se puede decir que es necesaria una mayor energía para producir el despegue completo de los laminados de CFRP más finos, pero la resistencia de la unión es menor (del orden de la mitad que para los otros laminados).

ENSAYO ²	ÁREA (N·mm)	MEDIA
LP-50 I	817	649,87857
LP-50 II	571	
LP-50 III	562	
LP-50 G I	405	352,58827
LP-50 G II	361	
LP-50 G III	292	

Tabla III.1.2. Área bajo la curva para los 6 ensayos correspondientes al estudio del espesor (Elaboración propia).

Por otra parte, los tipos de rotura que se han dado en los ensayos son muy similares en todos ellos. En la mayoría de los casos se ha producido una rotura por el hormigón, aunque no en la totalidad de la unión. En algunas zonas aparecían roturas adhesivas (rotura entre la capa de adhesivo y el hormigón) y roturas cohesivas (rotura del adhesivo), por lo que se intuyó que el curado del adhesivo no había sido el adecuado debido a no dejarlo el tiempo suficiente.

A la vista de los resultados obtenidos, es evidente que el curado del adhesivo debe ser el necesario especificado por el fabricante y que debe ser cumplido para garantizar una unión resistente. Este fenómeno es importante que se realice adecuadamente en obra para no alterar la calidad de la unión material compuesto-hormigón.

² La letra “G” en el nombre de los ensayos indica que el espesor del laminado de CFRP es de 2 mm.

Conclusiones extraídas de la puesta a punto del ensayo Pull Off

La puesta a punto del ensayo Pull Off también permitió obtener ciertas conclusiones.

Las primeras de estas conclusiones se refieren al proceso de fabricación de las probetas. La fase más crítica de la fabricación es el trepanado del bloque de hormigón con la corona (ver apartado II.2.2). Lo más importante es asegurarse de que el sistema de refrigeración de la máquina con la que se realiza el trepanado funciona correctamente, ya que las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso pueden dañar la probeta.

Al igual que ocurre en los ensayos de Lap Peeling, es importante respetar el tiempo y las condiciones de curado del adhesivo que se emplea para pegar a la probeta el disco sobre el que se aplica la fuerza en el ensayo. Si dicha unión no fuese correcta, podría invalidar el ensayo ya que se despegaría el disco de la probeta sin que ésta llegase a romper. Asimismo, es importante controlar el flujo de adhesivo para que al pegar el disco el área de pegado sea la establecida.

III.2 NUEVOS PARÁMETROS DE ESTUDIO EN PRÓXIMAS CAMPAÑAS DE ENSAYOS

En este trabajo se han estudiado la influencia de dos parámetros: la longitud de pegado del laminado y el espesor del laminado. No obstante, para poder explicar mejor el comportamiento de estos ensayos, es necesario la realización de una serie de campañas futuras que tengan en cuenta otra serie de parámetros o ampliar estos mismos.

Entre los distintos estudios posibles cabría destacar:

- **Acabado de la superficie del hormigón:** Se puede realizar un análisis para comprobar la influencia de la superficie de hormigón cuando se realiza el desbastado, aplicando diferentes rugosidades.
- **Resistencia del hormigón:** Teniendo en cuenta que las roturas tienden a ocurrir en el bloque de hormigón, es muy posible que la resistencia de éste último sea un factor determinante a la hora de hallar la resistencia de la unión.
- **Comportamiento después del fallo del ensayo Lap Peeling:** Debido a la tendencia de las gráficas de Lap Peeling de mantenerse en una línea aproximadamente constante de carga y el hecho de no saber a qué se debe este fenómeno, se puede hacer un estudio más completo del ensayo Lap Peeling para poder darle respuesta a esta cuestión.
- **Concluir la relación para el espesor:** Como se ha dicho en el apartado III.1, la relación entre los valores de iniciación de grieta es lineal; a doble espesor, doble valor. Sin embargo, puede haber un punto a partir del cual el espesor no influya porque el espesor sea demasiado

grande. Es por tanto, una posible campaña de futuro para concluir dicha relación.

- **Modelar con MEF:** Al tratarse de ensayos poco comunes, no hay evidencias de modelos realizados utilizando el MEF, por lo que sería útil realizarlo para así tener un modelo matemático al que poder referirse a la hora de realizar ensayos y comprobar si se han realizado bien (tanto los ensayos, como el modelo).
- **Parámetros que afectan al tipo de rotura:** Debido a que la mayoría de las roturas que han tenido lugar han sido por el hormigón, se puede realizar un estudio para ampliar los parámetros que puedan afectar al tipo de rotura, además, como se ha visto, el curado del adhesivo.
- **Comparación de los modelos de Pull Off y Lap Peeling:** Los ensayos de Lap Peeling y Pull Off aplican un tipo de carga similar y la resistencia obtenida es la misma, resistencia a la tracción de la unión. Es por esto, que puede elaborarse una comparación entre los resultados obtenidos mediante los dos ensayos para comprobar si los resultados obtenidos son similares, o al menos, tienen alguna relación que pueda evidenciarse.

En el caso de haberla, el ensayo Pull Off presenta una serie de ventajas frente al Lap Peeling que decantarían la balanza a favor de su realización. Por ejemplo, el número de ensayos que se puede realizar con una misma probeta es mayor, el tiempo de realización del ensayo es menor, es más económico y la máquina de ensayo es portátil y de menores dimensiones que una máquina de ensayo fija.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. París, J. Cañas, J. Marín y A. Barroso, *Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos.*, Sevilla: Sección de Publicaciones de ETSI de la US..
- [2] «wikipedia,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto. [Último acceso: 8 2014].
- [3] T. Keller, «Multifunctional and Robust Composite Material Structures for Sustainable Construction,» de *CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Beijing, China, 2010.
- [4] A. Espeche, J. León y H. Corres, *Refuerzo de pilares con encamisado de hormigón. Un enfoque distinto..*
- [5] M. Motavalli y C. Czaderski, «FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review,» 2007.
- [6] A. Garbacz, M. Górká y L. Courard, «Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems,» 2005.
- [7] A. GARBACZ, L. COURARD y B. BISSONNETTE, «A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering,» vol. 61, nº 1, 2013.
- [8] J. Silfwerbrand, «Improving Concrete Bond in Repaired Bridge Decks,» 1990.
- [9] L. Courard, T. Piotrowski y A. Garbacz, «Near-to-surface properties

- affecting bond strength in concrete repair,» 2013.
- [10] L. Courard, «Parametric Study for the Creation of the Interface between Concrete and Repair Products,» 2000.
- [11] C. Au y O. Büyüköztürk, «Peel and Shear Fracture Characterization of Debonding in FRP Plated Concrete Affected by Moisture,» 2006.
- [12] «ASTM D4541. Standard Test Method for Pull Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers».
- [13] «UNE-EN 1542-2000. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón.,» 2000.
- [14] O. R. Mata y R. A. Atadero, «Evaluation of Pull-Off Tests as a FRP–Concrete Bond Testing Method in the Laboratory and Field,» 2014.
- [15] O. Gunes, D. Lau, C. Tuakta y O. Büyüköztürk, «Ductility of FRP–concrete systems: Investigations at different length scales,» 2013.
- [16] V. M. Karbhari, M. Engineer y D. A. Eckel, «On the durability of composite rehabilitation schemes for concrete: use of a peel test».

CAPÍTULO IV

ANEXOS

IV.1 ANEXO A: PROTOCOLO DEL ENSAYO DE LAP PEELING

Para la realización del ensayo Lap Peeling es necesario seguir una serie de pasos, tanto de fabricación de materiales como de tratamiento de ellos. A continuación se muestran dichos pasos.

- Cortar las láminas de fibra de carbono del rollo con fibra pre-preg a la longitud requerida.



- Apilar las láminas de fibra de carbono.



- Realizar una bolsa de vacío y compactar. Para ello se coloca corcho en los bordes de las piezas y a continuación, una lámina de nylon cubriendo las piezas. Posteriormente, se coloca tejido absorbedor con las tomas de vacío. Por último, se añade cinta de cromato en los bordes y se cubre todo con una capa de teflón.



- Curar el laminado de CFRP en el autoclave. Se selecciona un ciclo de curado acorde a las características del material a introducir. En este caso un ciclo de 2 horas y 10 minutos a 180°C.



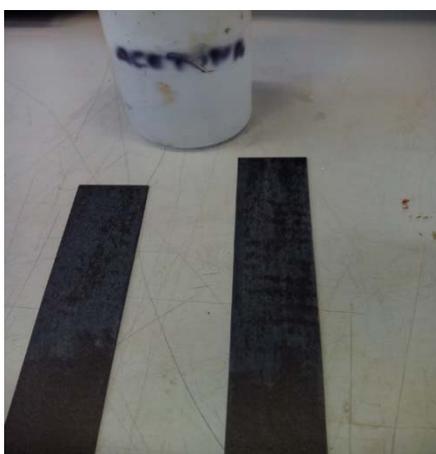
- Resanar el laminado de CFRP mediante una sierra de disco de diamante y cortar el laminado en el ancho de las probetas.



- Lijar el laminado por la cara que se va a adherir al bloque de hormigón mediante un cepillo dispuesto en un taladro.



- Limpiar la superficie del laminado mediante acetona.



- Desbastar la superficie del hormigón que se va a adherir mediante el empleo de una amoladora con disco para piedra.



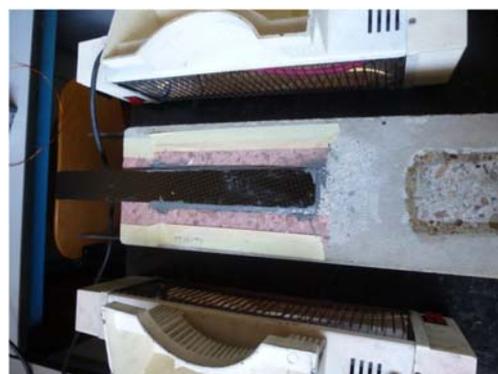
- Limpiar la superficie del hormigón con el empleo de acetona.
- Colocar láminas de teflón, o similar, sobre la superficie de hormigón en las marcas de los bordes de la probeta para garantizar que el adhesivo sobrante no ofrezca resistencia a la unión.



- Realizar la mezcla de los componentes del adhesivo aeronáutico EA-9394 en las siguientes proporciones: Part A, 100%; Part B, 17%.



- Colocar una capa fina de adhesivo tanto en la cara del laminado de CFRP como en el hormigón.
- Aplicar presión y temperatura durante 1,5 horas a 66°C.



- Montar el ensayo con la viga IPE, los rodillos, la placa de acero y el bloque de hormigón en horizontal con el laminado hacia arriba.



- Colocar el útil en la mordaza y colocar el laminado entre las dos placas del útil.



- Aplicar la carga con control de desplazamiento a una velocidad de 4 mm/min hasta que se produzca el despegue completo.

IV.2 ANEXO B: PROTOCOLO DEL ENSAYO DE PULL OFF

El ensayo de Pull Off requiere una serie de pasos a seguir, para poder realizarlo correctamente, los cuáles se exponen a continuación.

- Colocar las láminas de fibra de carbono necesarias sobre una mesa de trabajo.
- Aplicar la resina (100/15 de resina epoxi y catalizador, respectivamente) en las dos caras de las láminas con la ayuda de un rodillo.



- Realizar una capa de imprimación sobre la cara del hormigón.
- Extender las láminas anteriores sobre la cara del hormigón y aplicar presión con la ayuda del mismo rodillo.



- Aplicar presión y temperatura para el curado de la resina.
- Realizar un trepanado en el bloque de hormigón con el laminado, con la ayuda de una corona circular colocada en una perforadora.



- Lijar el laminado de CFRP con un papel de lija de grano medio.



- Lijar el disco de acero por la cara que se va a adherir con un papel de lija de grano medio.



- Pegar el disco de acero a la probeta. Para ello se emplea adhesivo aeronáutico EA-9394.



- Eliminar adhesivo sobrante para no alterar los resultados obtenidos.
- Aplicar presión y temperatura. Dejar 1,5 horas a 66°C.
- Colocar la máquina de Pull Off para realizar el ensayo. Introducir el tornillo de la máquina en el agujero realizado en el disco.



- Aplicar la carga accionando la manivela hasta que se produzca el despegue del disco de acero.

