

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	19
2	MATERIALES COMPUESTOS	23
2.1	FIBRAS	29
2.1.1	Características mecánicas de las fibras	34
2.1.2	Resistencia al ataque químico	38
2.1.3	Exposición a los rayos ultravioletas	38
2.1.4	Conductividad eléctrica	38
2.1.5	Estabilidad térmica	38
2.2	MATRIZ	39
2.2.1	Naturaleza de la matriz	39
2.2.2	Propiedades de las matrices	39
2.3	UNIÓN FIBRA Y MATRIZ SINTÉTICA	41
2.4	ADHESIVOS	43
2.5	EL MATERIAL COMPUESTO	46
2.5.1	Características mecánicas del material compuesto	47
2.5.2	Ensayos de control de las características mecánicas del MC	47
2.5.3	Resistencia al fuego del sistema de MC	49

2.5.4	Coeficientes de seguridad	50
2.6	SISTEMAS DE APLICACIÓN	51
2.6.1	Hojas o tejidos “in-situ”	51
2.6.2	Laminado	52
2.6.3	Barras	52
2.6.4	NSM (Near Surface Mounted)	53
3	RECOMENDACIONES DE DISEÑO	55
3.1	CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y SEGURIDAD ESTRUCTURAL	55
3.1.1	Bases Generales de Cálculo	55
3.1.2	Criterios Generales de Diseño	58
	3.1.2.1 <i>Situaciones Accidentales</i>	59
	3.1.2.2 <i>Durabilidad</i>	60
3.2	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE REFUERZO CON MATERIALES COMPUESTOS	60
3.3	ESTADO LÍMITE DE AGOTAMIENTO FRENTE A SOLICITACIONES NORMALES. REFUERZO A FLEXIÓN	62
3.3.1	Consideraciones generales	62
3.3.2	Modos de fallo	63
3.3.3	Comprobación modo de fallo 1 y 2	65
3.3.4	Formulación para flexión simple	68
	3.3.4.1 <i>Estado de cargas previo</i>	68
	3.3.4.2 <i>Verificación en rotura</i>	70

3.3.5	Comprobación frente al arrancamiento o fallo a rasante en el extremo del refuerzo	73
3.3.6	Despegue producido por fisuras a cortante	74
3.3.7	Despegue producido por fisuras a flexión	74
3.3.8	La ductilidad como criterio de respuesta segura frente al colapso	77
3.3.9	Consideraciones especiales	78
3.3.9.1	<i>Refuerzo de estructuras pretensadas o postesadas</i>	78
3.3.9.2	<i>Trabajo a compresión</i>	78
3.3.9.3	<i>Refuerzo mediante pretensado externo con FRP</i>	79
3.4	REFUERZO FRENTE A ESFUERZOS CORTANTES	80
3.4.1	Introducción	80
3.4.2	Configuraciones del refuerzo. Canto útil	82
3.4.3	Dimensionamiento del refuerzo a cortante	85
3.4.3.1	Agotamiento de las bielas comprimidas de hormigón	86
3.4.3.2	Agotamiento por tracción en el alma	86
3.4.3.3	Otros documentos de referencia	91
3.5	CONFINAMIENTO	93
3.5.1	Consideraciones Generales	93
3.5.2	Presión de confinamiento efectiva	95
3.5.2.1	<i>Influencia de la envoltura parcial.</i>	98
3.5.2.2	<i>Influencia de la forma de la sección.</i>	98

3.5.3	Modelo de Lam y Teng (2003a,b)	100
3.5.3.1	<i>Secciones circulares</i>	100
3.5.3.2	<i>Secciones rectangulares</i>	101
3.5.4	Recomendaciones de cálculo	102
3.5.4.1	<i>Deformación última efectiva del FRP</i>	104
3.5.4.2	<i>Influencia de la forma de la sección</i>	105
3.6	ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	105
3.6.1	Estado de cargas previo	105
3.6.2	Limitación de las tensiones máximas	106
3.6.3	Estado Límite de Fisuración	106
3.6.3.1	<i>Condiciones generales.</i>	106
3.6.3.2	<i>Cálculo del ELS de Fisuración con el FIB Bulletin 14</i>	107
3.6.4	Estado Límite de Deformación	109
3.6.5	Estado Límite de Vibraciones	110
3.7	EJEMPLOS DE DISEÑO	111
3.7.1	Ejemplo de refuerzo a flexión	111
3.7.1.1	<i>Planteamiento del problema</i>	111
3.7.1.2	<i>Notación</i>	112
3.7.1.3	<i>Capacidad resistente de la viga original</i>	113
3.7.1.4	<i>Estado previo al refuerzo y deformaciones existentes</i>	115
3.7.1.5	<i>Flector respuesta de la viga reforzada</i>	117
3.7.1.6	<i>Estados tensionales en servicio</i>	120

3.7.2	Ejemplo de refuerzo a cortante	123
3.7.2.1	<i>Planteamiento del Problema</i>	123
3.7.2.2	<i>Análisis de la estructura y cargas actuantes sobre la viga</i>	124
3.7.2.3	<i>Análisis de la necesidad de refuerzo</i>	125
3.7.2.4	<i>Comprobación en situación accidental</i>	126
3.7.2.5	<i>Determinación de la cuantía del refuerzo.</i>	126
3.7.3	Ejemplo de confinamiento de acuerdo con CNR-DT 200/2004	130
3.7.3.1	<i>Planteamiento del problema</i>	131
3.7.3.2	<i>Caso 1: Confinamiento integral.</i>	131
3.7.3.3	<i>Caso 2: Confinamiento parcial.</i>	133
4	RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS DE APLICACIÓN	135
4.1	INTRODUCCIÓN	135
4.2	RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN	135
4.3	RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA EJECUCIÓN	136
4.3.1	Preparación del soporte	136
4.3.2	Procedimiento de aplicación de hojas o tejidos de FRP	142
4.3.3	Procedimiento de aplicación de laminados de FRP	149
4.3.4	Procedimiento de aplicación de barra y laminados de FRP en rozas (sistema NSM)	152
4.3.5	Puesta en servicio de la estructura	157
4.3.6	Protección y acabado	158

4.4	RECOMENDACIONES PARA RECEPCIÓN, MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN	159
4.4.1	Recepción	159
4.4.2	Mantenimiento y explotación	160
4.5	SEGURIDAD	160
5	RECOMENDACIONES DE CONTROL DE CALIDAD EN REFUERZOS CON FRP EN PUENTES	165
5.1	INTRODUCCIÓN	165
5.2	RECEPCIÓN DE LOS MATERIALES	166
5.3	PREPARACIÓN DEL SOPORTE	167
5.4	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS	170
5.5	INSTALACIÓN DE TEJIDO U HOJA	171
5.6	INSTALACIÓN DEL LAMINADO	172
5.7	CONTROL FINAL DE OBRA, ENSAYOS DE ADHERENCIA	173
5.8	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y MEDIDAS CORRECTORAS COMO RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE ADHESIÓN	177
5.9	PRUEBAS DE CARGA	178
5.10	RECOMENDACIONES DE CAPACITACIÓN Y/O CERTIFICACIÓN DE PERSONAL (INFORMATIVO)	178
5.10.1	Requisitos de aplicación y control de calidad	178
5.10.2	Reconocimiento de la competencia de personas	179
5.10.3	Esquema general de procedimiento de certificación de personas	180

6	EJEMPLOS DE REALIZACIONES	183
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
	ANEXO I: NOTACIONES Y SÍMBOLOS	199

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Material compuesto reforzado con partículas o con fibra	26
Figura 2.2.	Disposición en desarrollo helicoidal, tras la impregnación automática del MC in situ	26
Figura 2.3.	MC ejecutado in situ, con espolvoreo de árido final, listo para recibir un enfoscado de terminación	26
Figura 2.4.	Protección de una pila (Lisboa, puente “Vasco da Gama”) mediante encapsulamiento con camisa de MC e inyección de adhesivo. Permite una puesta en obra bajo agua	27
Figura 2.5.	Sujeción temporal de las camisas prefabricadas de MC realizadas con fibra de vidrio, previo a la inyección de adhesivo estructural que desplaza el agua. El adhesivo empleado debe ser compatible con soporte mojado	27
Figura 2.6.	Laminados preformados preparados para su adhesión	27
Figura 2.7.	Formatos variados: en barra, circulares preformados, etc.	28
Figura 2.8.	Sistema de refuerzo con NSM	28
Figura 2.9.	Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de carbono	30
Figura 2.10.	Proceso de fabricación de la fibra de carbono	30

Figura 2.11. Fibra de vidrio bidireccional	36
Figura 2.12. Fibra de aramida	36
Figura 2.13. Fibra de carbono	36
Figura 2.14. Diagramas tensión-deformación de las fibras de carbono, vidrio y Kevlar 49	37
Figura 2.15. Diagrama tensión-deformación de resinas termoestables	41
Figura 2.16. Ejemplo de daño por fuego	50
Figura 2.17. Sistema de refuerzo por moldeo manual	51
Figura 3.1. Ejemplo de rotura de refuerzo	59
Figura 3.2. Esquema del procedimiento de cálculo para refuerzo con materiales compuestos	61
Figura 3.3. Ejemplo de tablero de hormigón reforzado con fibras	62
Figura 3.4. Fallo por compresión excesiva del hormigón	63
Figura 3.5. Fallo por rotura del refuerzo	63
Figura 3.6. Fallo por cortante en el apoyo	64
Figura 3.7. Fallo por arrancamiento del hormigón de recubrimiento, en la zona de anclaje del refuerzo	64
Figura 3.8. Fallo por despegue del refuerzo en la zona de anclaje	64
Figura 3.9. Fallo por despegue del refuerzo inducido por una fisura de flexión	65
Figura 3.10. Fallo por despegue del refuerzo inducido por una fisura de cortante	65
Figura 3.11. Sección genérica sometida a esfuerzos normales	66
Figura 3.12. Dominios de deformación	67
Figura 3.13. Sección rectangular	68
Figura 3.14. Plano de deformación	68

Figura 3.15. Esfuerzos a nivel de sección	69
Figura 3.16. Sección rectangular	70
Figura 3.17. Plano de deformación	70
Figura 3.18. Esfuerzos a nivel de sección	71
Figura 3.19. Distribución de fisuras de rasante en un elemento sin reforzar (a) y reforzado (b)	73
Figura 3.20. Despegue del refuerzo por fisuración de cortante	74
Figura 3.21. Viga de hormigón reforzado con FRP, sometida a flexión	75
Figura 3.22. Distribución de tensiones normales en refuerzo y hormigón, y tensiones tangenciales	75
Figura 3.23. Diferentes tipos de refuerzos de cortante	83
Figura 3.24. Refuerzos en U en vigas de sección en T	83
Figura 3.25. Mechas para el anclaje de las bandas en caras laterales	90
Figura 3.26. Curvas tensión-deformación de hormigón confinado con FRP	94
Figura 3.27. Acción de confinamiento en secciones circulares	96
Figura 3.28. Efecto de la separación entre bandas en el confinamiento	98
Figura 3.29. Área efectivamente confinada en secciones rectangulares	99
Figura 3.30. Modelo tensión-deformación de hormigón confinado con materiales compuestos	100
Figura 3.31. Notación propuesta	113
Figura 3.32. Esquema de fuerzas sin el refuerzo de fibra	114
Figura 3.33. Esquema lineal para obtención de elongación inicial en paramento traccionado	115
Figura 3.34. Esquema de rotura con la contribución del material compuesto $A_r E_f$	117
Figura 3.35. Esquema en servicio con la contribución del material compuesto $A_r E_f$	120
Figura 3.36. Ejemplo de pilar con confinamiento integral	131

Figura 3.37. Ejemplo de pilar con confinamiento parcial	133
Figura 4.1. Foto de reparación del soporte a base de morteros estructurales, previa a la aplicación del refuerzo con FRP	137
Figura 4.2. Patrón de rugosidades según el International Concrete Repair Institute	138
Figura 4.3. Ejemplo de preparación de soporte	139
Figura 4.4. Geometría de reparación mediante parcheo por mortero	140
Figura 4.5. Ejemplo de fuerza de empuje al vacío	140
Figura 4.6. Prescripción de preparación de esquinas o curvas	141
Figura 4.7. Foto de prueba de tracción directa para validación de soporte	141
Figura 4.8. Ejemplo: Mezclado de resina bicomponente para impregnación de hojas o tejidos	143
Figura 4.9. Proceso de mezclado de resina bicomponente	143
Figura 4.10. Ejecución de capa de imprimación o encolado mediante rodillo	144
Figura 4.11. Instalación de tejido sobre capa de impregnación	145
Figura 4.12. Estratificación de tejido con rodillo estratificador	146
Figura 4.13. Aplicación de capa de cierre y alisado posterior con llana	147
Figura 4.14. Esquema de diseño (ver recrecido para evitar empuje al vacío)	147
Figura 4.15. Preparación soporte, capa de impregnación y colocación de tejido	147
Figura 4.16. Estratificación con rodillo	148
Figura 4.17. Colocación de mechas de anclaje en cabeza de compresión: taladro e inyección de resina	148
Figura 4.18. Colocación de mechas de anclaje en cabeza de compresión: colocación, apertura zona exterior e impregnación de resina	148
Figura 4.19. Colocación de mechas de anclaje en cabeza de compresión: capa de cierre y estratificación	148

Figura 4.20. Acabado	149
Figura 4.21. Adhesivo aplicado con tiempo frío con fallo entre capas por falta de mojado.	149
Figura 4.22. Aplicación de adhesivo sobre soporte y sobre laminado previa a la instalación	150
Figura 4.23. Ejecución de operación de apriete con rodillo de goma para eliminación de aire entre capas	151
Figura 4.24. Ejemplo de puente reforzado con laminados	152
Figura 4.25. Barra de fibra de carbono	153
Figura 4.26. Dimensiones a definir en las rozas	154
Figura 4.27. Realización de rozas: máquina, disco, control de geometría e imagen general	155
Figura 4.28. Limpieza de rozas con aire a presión previa a inyección	155
Figura 4.29. Llenado de rozas con resina: manual y máquinas con caudal controlado	156
Figura 4.30. Esquema de nivel óptimo de resina	156
Figura 4.31. Colocación de barras en resina	157
Figura 4.32. Posibles acabados	159
Figura 5.1. Ensayo pull-off	174
Figura 5.2. Ensayo de tracción directa y valor obtenido en ensayo	175
Figura 5.3. Termografía	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Materiales compuestos	24
Tabla 2.2.	Matrices poliméricas u orgánicas	25
Tabla 2.3.	Composición de la fibra de vidrio	32
Tabla 2.4.	Propiedades de las fibras de Carbono, Vidrio y Kevlar 49 a 20° C	34
Tabla 2.5.	Propiedades de las fibras	35
Tabla 2.6.	Valores típicos de las propiedades de las fibras	37
Tabla 2.7.	Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster usadas en los materiales compuestos	40
Tabla 2.8.	Propiedades genéricas de las resinas	44
Tabla 2.9.	Ensayos a realizar para clasificación del adhesivo apto para refuerzo estructural	46
Tabla 2.10.	Propiedades MC	47
Tabla 2.11.	Métodos de ensayo para FRP (tomada de S806-12 (2012))	48
Tabla 2.12.	Formato y dimensiones de tejidos	51
Tabla 2.13.	Formato y dimensiones de laminados	52
Tabla 2.14.	Formato y dimensiones de barras	52
Tabla 3.1.	Ecuaciones para el cálculo de la resistencia y deformación última en las guías	103