

**CONSEJO NACIONAL ITALIANO DE INVESTIGACION (CNR)**

COMITÉ ASESOR DE RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN

# **Guía para el Diseño y Construcción de Sistemas FRP Pegados Externamente para el Reforzamiento de Estructuras Existentes**

**Materiales, Estructuras de Concreto Reforzado, Estructuras de  
Concreto Presforzado y Estructuras de Mampostería**



**CNR-DT 200 R1/2014**

**Este documento está sujeto a derechos de autor**

**Ninguna parte de esta publicación puede ser almacenada o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, grabación) sin el consentimiento previo por escrito del Consejo Nacional Italiano de Investigación. La reproducción de este documento es permitida para uso personal, no comercial**

*El Consejo Nacional Italiano de Investigación  
agradece  
a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil  
y su Rector, Ec. Mauro Toscanini,  
por haber promovido y sostenido la difusión en lengua española  
del documento CNR-DT- 200R1/2014  
y agradece  
al Prof. Antonio La Tegola y el Prof. Walter Mera  
por haber dirigido la presente edición  
en lengua española*

---

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREFACIO .....</b>	<b>1</b>
1.1	PROPOSITO.....	1
1.2	SIMBOLOS .....	2
<b>2</b>	<b>MATERIALES .....</b>	<b>6</b>
2.1	INTRODUCCION .....	6
2.2	CLASIFICACION DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO CON FRP.....	6
2.2.1	Propiedades Mecánicas de sistemas de reforzamiento FRP .....	7
2.2.2	Sistemas precurados .....	9
2.2.3	Sistemas impregnados <i>in situ</i> .....	10
2.2.4	Sistemas pre-impregnados .....	13
2.3	CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES .....	13
2.3.1	Tareas y responsabilidades de los profesionales .....	13
2.4	TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO, PRESERVACION, MANEJO Y USO .....	14
<b>3</b>	<b>BASES DE DISEÑO PARA REFORZAMIENTO FRP .....</b>	<b>16</b>
3.1	REQUISITOS BASICOS .....	17
3.2	REQUISITOS DE DURABILIDAD .....	17
3.3	PRINCIPIOS GENERALES DEL DISEÑO DE REFORZAMIENTO.....	17
3.3.1	Generalidades .....	17
3.3.2	Vida de servicio y carga de diseño.....	18
3.3.3	Propiedades de los materiales FRP y valores de cálculo .....	18
3.3.4	Capacidad de diseño.....	18
3.4	FACTORES PARCIALES .....	19
3.4.1	Factor parcial $\gamma_m$ para FRP .....	19
3.4.2	Factores parciales $\gamma_{Rd}$ para modelos de resistencia .....	19
3.5	PROBLEMAS ESPECIALES DE DISEÑO Y FACTORES DE CONVERSION .....	19
3.5.1	Acciones ambientales y factores de conversión ambientales.....	19
3.5.2	Modalidad de carga y factores de conversión para efectos de larga duración .....	21
3.5.3	Resistencia a las acciones causadas por impacto y explosiones .....	22
3.5.4	Vandalismo .....	22
3.6	LIMITACIONES DE REFORZAMIENTO EN CASO DE FUEGO .....	22
<b>4</b>	<b>REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO Y PRESFORZADO.....</b>	<b>24</b>
4.1	VALIDACION DE LA RESISTENCIA RESPECTO AL DESPEGAMIENTO EN EL SOPORTE.....	24
4.1.1	Mecanismos de rotura por el despegamiento del soporte .....	24
4.1.2	Verificación de seguridad relativo a la separacion de las láminas en el soporte .....	25
4.1.3	Resistencia al Estado Límite Ultimo por separación de lámina en el extremo (modo 1).....	26
4.1.4	Resistencia al Estado Límite Ultimo por separación de lámina intermedio (modo 2)....	27
4.1.5	Verificación de las tensiones de interfase para el Estado Límite de Servicio.....	28
4.2	REFORZAMIENTO A FLEXION.....	30
4.2.1	Generalidades .....	30
4.2.2	Análisis del comportamiento al Estado Límite Ultimo.....	30
4.2.3	Análisis del comportamiento al Estado Límite de Servicio .....	34
4.2.4	Ductilidad.....	37
4.3	REFORZAMIENTO AL CORTE .....	37

4.3.1	Generalidades .....	37
4.3.2	Configuraciones de reforzamiento .....	37
4.3.3	Resistencia de diseño al corte de elementos reforzados FRP .....	37
4.4	REFORZAMIENTO TORSIONAL .....	41
4.4.1	Generalidades .....	41
4.4.2	Configuraciones de reforzamiento .....	41
4.4.3	Resistencia de diseño torsional de elementos reforzados FRP .....	41
4.5	CONFINAMIENTO .....	42
4.5.1	Generalidades .....	42
4.5.2	Resistencia de diseño a compresión axial o con pequeña excentricidad de elementos confinados .....	44
4.5.3	Ductilidad de los elementos a flexo-compresión confinados con FRP .....	48
4.6	REFORZAMIENTO DE FLEXION DE ELEMENTOS DE CONCRETO PREFORZADO .....	49
4.6.1	Uso de FRP para elementos de concreto pretensado y postensado .....	49
4.7	DISEÑO PARA APLICACIONES SISMICAS .....	49
4.7.1	Generalidades .....	50
4.7.2	Principios generales para reforzamiento FRP .....	50
4.8	INSTALACION Y DETALLES CONSTRUCTIVOS .....	53
4.8.1	Control de calidad y preparación del sustrato .....	53
4.8.2	Recomendaciones para la instalación .....	54
4.9	EJEMPLOS NUMERICOS .....	56
<b>5</b>	<b>REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA .....</b>	<b>57</b>
5.1	GENERALIDADES .....	57
5.1.1	Objeto y ámbito de aplicación .....	57
5.1.2	Reforzamiento de edificios históricos y monumentales .....	57
5.1.3	Criterio de diseño de reforzamiento FRP .....	57
5.2	VALIDACION DE LA SEGURIDAD .....	58
5.2.1	Modelación estructural .....	58
5.2.2	Criterios de verificación .....	58
5.2.3	Verificación de la seguridad .....	59
5.3	EVALUACION DEL ESFUERZO DE DESPEGAMIENTO .....	60
5.3.1	Consideraciones generales y modos de falla .....	61
5.3.2	Resistencia de diseño para despegamiento del extremo de la lámina/banda .....	61
5.3.3	Resistencia de diseño por despegamiento intermedio .....	64
5.3.4	Resistencia de pegado en presencia de acciones normales a la superficie de pegado .....	65
5.3.5	Dispositivos mecánicos de anclaje .....	65
5.4	REQUISITOS DE SEGURIDAD .....	65
5.4.1	Reforzamiento de paneles de mampostería .....	65
5.4.2	Áreas de amarre y dintel .....	74
5.5	REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CON SIMPLE Y DOBLE CURVATURA .....	76
5.5.1	Arcos .....	76
5.5.2	Bóvedas de curvatura simple: bóvedas de cañón .....	77
5.5.3	Bóvedas de doble curvatura: domos .....	78
5.5.4	Bóvedas de doble curvatura sobre una planta cuadrada .....	79
5.6	CONFINAMIENTO DE COLUMNAS DE MAMPOSTERIA .....	79
5.6.1	Diseño de elementos confinados cargados axialmente .....	80
5.6.2	Confinamiento de columnas circulares .....	82
5.6.3	Confinamiento de columnas cuadradas o rectangulares .....	83

5.7	DISEÑO PARA APLICACIONES SISMICAS .....	86
5.7.1	Generalidades .....	86
5.7.2	Criterio de selección para reforzamiento FRP .....	87
5.8	DETALLES DE CONSTRUCCION Y INSTALACIONES .....	88
5.8.1	Control de calidad y preparación de subtrato .....	88
5.8.2	Recomendaciones para instalación .....	89
5.9	EJEMPLOS NUMERICOS .....	90
<b>6</b>	<b>CONTROL Y MONITOREO .....</b>	<b>91</b>
6.1	CONTROL DE CALIDAD EN EL SITIO DE CONSTRUCCION .....	91
6.2	CONTROL DE CALIDAD DURANTE LA INSTALACION .....	91
6.2.1	Pruebas semi-destructivos .....	91
6.2.2	Pruebas no destructivos .....	93
6.3	CALIFICACION DEL PERSONAL .....	93
6.4	MONITOREO DEL SISTEMA DE REFORZAMIENTO .....	94
<b>7</b>	<b>APENDICE A (COMPONENTES CONSTITUYENTES DE FRP Y SUS CARACTERISTICAS FISICO-MECANICAS) .....</b>	<b>95</b>
7.1	GENERALIDADES .....	95
7.2	FIBRAS USADAS EN COMPUESTOS .....	98
7.2.1	Tipos de fibras disponibles en el mercado y su clasificación .....	98
7.2.2	Tejidos no impregnados .....	103
7.3	MATRICES DE LOS COMPUESTOS FRP .....	105
7.3.1	Resinas epóxicas .....	105
7.3.2	Resinas de poliéster .....	105
7.3.3	Otros tipos de resinas .....	106
7.4	ADHESIVOS .....	106
<b>8</b>	<b>APENDICE B (TECNICAS DE FABRICACION) .....</b>	<b>108</b>
8.1	GENERALIDADES .....	108
8.1.1	Pultrusión .....	108
8.1.2	Laminación .....	109
8.1.3	Pre-impregnado <i>in situ</i> .....	110
<b>9</b>	<b>APENDICE C (RELACION ESFUERZO-DEFORMACION UNITARIA DE FRP) .....</b>	<b>111</b>
9.1	COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS COMPUESTOS .....	111
9.2	ESTADO PLANO DE TENSIONES .....	113
9.2.1	Efecto de acción de la carga en direcciones diferentes a la simetría del material .....	114
9.3	CRITERIOS DE FALLA .....	117
<b>10</b>	<b>APENDICE D (DESPEGAMIENTO) .....</b>	<b>120</b>
10.1	FALLA DEBIDO A DESPEGAMIENTO .....	120
10.2	PEGADO ENTRE FRP Y EL CONCRETO .....	121
10.2.1	Energía específica de fractura .....	122
10.2.2	Ley de adherencia .....	123
10.2.3	Longitud óptima de anclaje .....	124
10.2.4	Despegamiento debido a fisuras por flexión .....	125
10.3	PEGADO ENTRE FRP Y LA MAMPOSTERIA .....	125
10.3.1	Energía específica de fractura .....	126
10.3.2	Ley de adherencia .....	128
10.3.3	Longitud óptima de pegado .....	129
10.3.4	Despegamiento debido a fisuras por tensión .....	129

<b>11 APENDICE E (REFORZAMIENTO A FLEXO-COMPRESION DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO)</b> .....	<b>130</b>
11.1 RESISTENCIA DE DISEÑO A FLEXO-COMPRESION DE ELEMENTOS REFORZADOS FRP .....	130
<b>12 APENDICE F (CONCRETO CONFINADO)</b> .....	<b>132</b>
12.1 LEY CONSTITUTIVA DEL CONCRETO CONFINADO .....	132
<b>13 APENDICE G (EJEMPLOS DE REFORZAMIENTO FRP)</b> .....	<b>134</b>
13.1 DATOS GEOMETRICOS, MECANICOS Y DE CARGA.....	134
13.2 HIPOTESIS DE VARIACIONES DE DESTINO DE USO .....	135
13.3 DISEÑO DE REFUERZO POR FLEXIONAL.....	135
13.4 DISEÑO DE REFUERZO PARA CORTE.....	136
13.5 DISEÑO DE REFUERZO DE COLUMNAS .....	139
13.5.1 Confinamiento de columnas sujetas a fuerza axial ligeramente excéntrica.....	142
13.5.2 Confinamiento y reforzamiento de columnas sujetas a flexo-compresión con gran excentricidad .....	144
<b>14 APENDICE H (EJEMPLOS REFORZAMIENTO FRP EN ESTRUCTURAS DEMAMPOSTERIA)</b> .....	<b>146</b>
14.1 DATOS GEOMETRICOS, MECANICOS Y DE CARGA.....	146
14.2 VERIFICACION A FLEXO-COMPRESION DE LOS PANELES .....	149
14.3 DISEÑO DE FRP PARA FLEXO-COMPRESION.....	152
14.4 CAPACIDAD PARA CORTE .....	153
14.5 DISEÑO DE FRP PARA CORTE.....	155
14.6 DISEÑO POR VOLCAMIENTO SIMPLE .....	156

## 1 PREFACIO

Cinco años después de la noticia de la aprobación de CNR-DT 200/2004, el *Comité Asesor de Recomendaciones Técnicas para la Construcción* ha promovido una revisión del documento. Al grupo original de estudio se le confió la tarea de actualizar el documento basado en los resultados de las últimas investigaciones, tanto teóricas como experimentales, emprendidas a nivel internacional durante los últimos cinco años. Esto se logró usando la investigación desarrollada en Italia bajo el proyecto Reluis (2005-2008), fundado por el departamento de Protección Civil, en el cual, un capítulo específico estaba dedicado a los “Materiales innovadores para Mitigación de Riesgos en Estructuras Existentes”.

Durante el proceso de revisión, el Comité también tomó en consideración la última revisión de las siguientes guías internacionales:

- 440.2R-08: “Guía para el Diseño y Construcción de Sistemas FRP Externamente Fijados para Reforzamiento de Estructuras de Concreto”, Instituto Americano del Concreto (ACI), comité 440, 2008;
- ISIS Manual de Diseño No. 4: “Rehabilitación FRP de Estructuras de Concreto Reforzado” ISIS Canada Corporation, 2008.

El documento ha sido sujeto a una investigación pública desde abril a junio del 2013. Luego de esto, se implementaron modificaciones y/o integraciones.

En octubre 10 del 2013, en el CNR en Roma, Italia, el documento actualizado fue discutido y aprobado por el Comité Asesor de Recomendaciones Técnicas.

### 1.1 PROPOSITO

El propósito de esta guía es proveer, dentro del marco de las regulaciones, un documento para el diseño y construcción de sistemas FRP de pegado externo para reforzamiento de estructuras existentes.

Una guía, por definición no es una regulación obligatoria, sino más bien, representa una ayuda para practicantes interesados en el campo de los materiales compuestos. Aunque, la responsabilidad recae en el usuario de esta guía.

Los siguientes temas serán abordados:

- Materiales
- Conceptos básicos de reforzamiento FRP y cuestiones especiales
- Reforzamiento de estructuras de concreto reforzado y pretensado
- Reforzamiento de estructuras de mampostería

Se proveen guías específicas para el reforzamiento y construcción de concreto reforzado y pretensado, y de estructuras de mampostería sometidas a terremotos de acuerdo a los recientes códigos de diseño nacionales e internacionales.

El primer tema incluye un resumen de algunas ventajas de los materiales FRP. También se incluyen los Apéndices A, B y C que presentan nociones de las características mecánicas de los materiales que componen el FRP. Las diferencias peculiares entre FRP comparado con los materiales tradicionales, tales como su comportamiento anisotrópico y el énfasis en sus leyes constitutivas, han sido resaltados.

Los temas que se conservan son expuestos usando la aproximación a los Códigos Europeos y el estilo típico de los documentos técnicos publicados por la CNR. Las secciones están divididas en *Principios* y *Reglas de Aplicación*. Cada sección está numerada progresivamente, y los principios están marcados con la etiqueta (P).

Los enunciados de los *Principios* incluyen lo siguiente:

- *Enunciados generales y definciones de naturaleza mecánica estructural.*
- *Necesidades reconocidas y/o modelos analíticos aceptados por la comunidad científica, cuyo criterio es universalmente calificado de ser pre-emitente con respecto a posibilidades alternativas, a menos que se establezca especialmente otro criterio.*

*Las reglas de aplicación son procedimientos de valor ampliamente reconocido, siguiendo los principios y cumpliendo los requerimientos.*

El documento contiene los siguientes Apéndices:

- Apéndice A, Caracterización Mecánica de FRP;
- Apéndice B, Técnicas de Producción;
- Apéndice C, Ley Constitutiva y Modos de Falla;
- Apéndice D, Despegamiento;
- Apéndice E, Reforzamiento de Concreto Pre-esfodado;
- Apéndice F, Ley Constitutiva para Concreto Confinado;
- Apéndice G, Ejemplos de Diseños para Reforzamiento FRP de Elementos de Concreto Reforzado;
- Apéndice H, Ejemplos de Diseño para Reforzamiento FRP de Mampostería.

## 1.2 SIMBOLOS

### Notificaciones Generales

- (.)<sub>c</sub> valor de cantidad(.) en relación con el concreto
- (.)<sub>cc</sub> valor de cantidad(.) en relación con el concreto confinado
- (.)<sub>d</sub> valor de diseño de la cantidad (.)
- (.)<sub>f</sub> valor de cantidad(.) en relación con el compuesto de fibra reforzado
- (.)<sub>fib</sub> valor de cantidad(.) referido a la fibra en sí misma
- (.)<sub>k</sub> valor característico de cantidad (.)
- (.)<sub>m</sub> valor de cantidad (.) en relación con la mampostería
- (.)<sub>mat</sub> valor de cantidad (.) referido a la matriz
- (.)<sub>mc</sub> valor de cantidad(.) en relación con la mampostería confinada
- (.)<sub>R</sub> valor de cantidad(.) como resistencia
- (.)<sub>s</sub> valor de cantidad(.) en relación con el acero
- (.)<sub>S</sub> valor de cantidad(.) como solicitud

### Letras Romanas Mayúsculas

- $A_c$  área de la sección transversal del concreto
- $A_f$  área de reforzamiento FRP
- $A_{fib}$  área de fibra
- $A_{s1}$  área de la armadura de acero sujeta a tensión
- $A_{s2}$  área de la armadura de acero sujeta a compresión
- $E_c$  módulo de Elasticidad normal del concreto
- $E_f$  módulo de Elasticidad normal de reforzamiento FRP
- $E_{fib}$  módulo de Elasticidad normal de la fibra
- $E_{mat}$  módulo de Elasticidad normal de la matriz
- $E_s$  módulo de Elasticidad normal de la armadura de acero
- $FC$  factor de confianza
- $F_{max,d}$  valor de diseño de la máxima fuerza de tracción transmisible por el refuerzo FRP al soporte

$F_{pd}$	valore de diseño de la máxima fuerza de anclaje transmisible por el refuerzo FRP pegado sobre una estructura de mampostería en presencia de una fuerza perpendicular al plano de la superficie de pegado
$G_a$	módulo de elasticidad tangencial del adhesivo
$G_c$	módulo de elasticidad tangencial del concreto
$I_o$	momento de inercia de la sección de concreto, fisurada y sin reforzamiento FRP
$I_1$	momento de inercia de la sección de concreto fisurada y con reforzamiento FRP
$I_c$	momento de inercia de la sección homogenizada
$I_f$	momento de inercia de refuerzo FRP alrededor de sueje centroidal, paralelo al eje neutral de la viga
$M_{Rd}$	momento resistente de diseño de la sección reforzada con FRP
$M_{Sd}$	momento flector solicitante de diseño
$M_o$	momento flector solicitante de la sección de hormigón armado en el momento del reforzamiento FRP
$M_1$	momento flector solicitante de la sección de hormigón armado debido a cargas aplicadas después del reforzamiento FRP
$N_{Rcc,d}$	resistencia de diseño axial del elemento de hormigón armado confinado con FRP
$N_{Rmc,d}$	resistencia de diseño axial de la mampostería confinada con FRP
$N_{Sd}$	fuerza axial solicitante de diseño
$P_{fib}$	fracción en peso de las fibras
$P_{mat}$	fracción en peso de la matriz
$T_g$	temperatura de transición vítrea de la resina
$T_{mat}$	temperatura de fusión de la resina
$T_{Rd}$	resistencia de diseño torsional del elemento de hormigón armado reforzado con FRP
$T_{Rd,f}$	resistencia del refuerzo de FRP
$T_{Rd,c}$	resistencia del tensor de compresión del concreto
$T_{Rd,l}$	resistencia de la armadura longitudinal del acero
$T_{Rd,s}$	resistencia de la armadura transversal del acero
$T_{Sd}$	momento de torsión solicitante de diseño
$T_x$	cuenta de hilados en dirección x
$V_{fib}$	fracción en volumen de la fibra
$V_{Rd}$	resistencia de diseño al corte del elemento reforzado con FRP
$V_{Rd,c}$	contribución del tensor de compresión a la resistencia de corte de diseño
$V_{Rd,s}$	contribución de la armadura de acero a la resistencia de corte de diseño
$V_{Rd,f}$	contribución FRP a la resistencia de corte de diseño
$V_{Sd}$	cortante solicitante de diseño
$V_{Rd,m}$	contribución de la mampostería a la resistencia de corte de diseño de la mampostería reforzada

### Letras Romanas Minúsculas

$b$	ancho de la sección
$b_f$	ancho del refuerzo FRP
$d$	distancia desde la fibra de compresión externa hasta el centroide del refuerzo de tensión
$f_{bm}$	resistencia promedio a compresión de los bloques que constituyen la mampostería
$f_{btm}$	resistencia promedio a tracción de los bloques que constituyen la mampostería
$f_{bd}$	resistencia de diseño de la adhesión entre el refuerzo FRP y el concreto (o mampostería)
$f_c$	resistencia (cilíndrica) a compresión del concreto
$f_{ccd}$	resistencia de diseño del concreto confinado
$f_{cd}$	resistencia de diseño a compresión del concreto
$f_{cm}$	resistencia promedio a compresión del concreto
$f_{ctm}$	resistencia promedio a tracción del concreto

$f_{fd}$	resistencia de diseño del refuerzo de FRP
$f_{fdd}$	resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (modo 1)
$f_{fdd,2}$	resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo FRP (modo 2)
$f_{fed}$	resistencia eficaz de diseño del refuerzo al corte de FRP
$f_{fib}$	resistencia de la fibra
$f_{fk}$	resistencia característica del refuerzo de FRP
$f_{fpd}$	resistencia de diseño al despegamiento del refuerzo de FRP en dirección de la misma fibra
$f_i$	presión de confinamiento
$f_{i,eff}$	presión eficaz de confinamiento
$f_{mat}$	resistencia de la matriz
$f_{mm}$	resistencia promedio a compresión de la mampostería
$f_{mm}^h$	resistencia promedio a compresión de la mampostería en dirección horizontal
$f_{mcd}$	resistencia de diseño a compresión de la mampostería confinada con FRP
$f_{md}$	resistencia de diseño a compresión de la mampostería
$f_{md}^h$	resistencia de diseño a compresión de la mampostería en dirección horizontal
$f_{mtm}$	valor promedio de la resistencia a tracción de la mampostería
$f_{vk}$	resistencia característica al corte de la mampostería
$f_{vm}$	resistencia promedio al corte de la mampostería
$f_y$	resistencia a la cedencia de la armadura longitudinal medida <i>in situ</i>
$f_{yd}$	resistencia de diseño a la cedencia de la armadura longitudinal
$h$	altura de la sección
$k_{eff}$	coeficiente de eficiencia de la acción de confinamiento
$k_H$	coeficiente de eficiencia horizontal
$k_V$	coeficiente de eficiencia vertical
$k_\alpha$	coeficiente de eficiencia relacionada al ángulo alfa de las fibras respecto al eje longitudinal del miembro confinado
$l_b$	longitud de anclaje
$l_{ed}$	longitud óptima de anclaje
$p_b$	distancia entre capas de varillas en el confinamiento de columnas de mampostería
$p_f$	espaciamiento de franjas o envolturas continuas de FRP
$s$	medida del desplazamiento
$s_u$	medida del desplazamiento del interfase correspondiente al completo despegue con respecto al soporte
$t_f$	espesor del refuerzo FRP
$x$	distancia del eje neutro al extremo en compresión de la sección transversal

### Letras Griegas Mayúsculas

$\Gamma_{Fk}$	valor característica de la energía específica de fractura
$\Gamma_{Fd}$	valor de diseño de la energía específica de fractura

### Letras Griegas Minúsculas

$\gamma_m$	coeficiente parcial para materiales o productos
$\gamma_{Rd}$	coeficiente parcial para los modelos de resistencia
$\epsilon_o$	deformación unitaria del concreto en el extremo en tensión antes del reforzamiento FRP
$\epsilon_c$	deformación unitaria del concreto en el extremo en compresión
$\epsilon_{ccu}$	deformación unitaria última de diseño del concreto confinado
$\epsilon_{co}$	deformación unitaria del concreto en el extremo en compresión antes del reforzamiento FRP
$\epsilon_f$	deformación unitaria del reforzamiento FRP
$\epsilon_{fd}$	deformación unitaria máxima de diseño del reforzamiento FRP

$\varepsilon_{fd,rid}$	valor reducido de la deformación unitaria máxima de diseño del reforzamiento FRP en el confinamiento de elementos de hormigón aramado o de mampostería
$\varepsilon_{fk}$	deformación unitaria características a la rotura por tracción del reforzamiento FRP
$\varepsilon_{fdd}$	deformación unitaria máxima del compuesto fibro-reforzado compatible con el despegamiento en el soporte
$\varepsilon_{mccu}$	deformación unitaria última a compresión de la mampostería confinada
$\varepsilon_{mcc}$	deformación unitaria última a compresión de la mampostería
$\varepsilon_{s1}$	deformación unitaria de la armadura de acero en tracción
$\varepsilon_{s2}$	deformación unitaria de la armadura de acero en compresión
$\varepsilon_{yd}$	valor de diseño de la deformación unitaria de cedencia del refuerzo de acero
$\eta$	factor de conversión
$\nu_{fib}$	coeficiente de Poisson de las fibras
$\nu_{mat}$	coeficiente de Poisson de la matriz
$\rho_{fib}$	densidad de la fibra
$\rho_{mat}$	densidad de la matriz
$\sigma_c$	tensión en el concreto
$\sigma_f$	tensión en el refuerzo FRP
$\sigma_s$	tensión en la armadura de acero en tracción
$\sigma_{Sd}$	tensión normal en la cara exterior de la mampostería en correspondencia de la superficie de adhesión entre el refuerzo de FRP y la mampostería
$\tau_{b,e}$	tensión tangencial equivalente en la interfase adhesivo-concreto.

## 2 MATERIALES

### 2.1 INTRODUCCION

Esta guía dirige o conduce a las aplicaciones estructurales específicas de materiales compuestos que comprenden , fibras de largo continuo de carbón, vidrio o arámida inmersas en matrices poliméricas y comúnmente referidas como *Fiber Reinforced Polymers* (FRP). Más propiamente FRP puede ser identificado usando iniciales CFRP, GFRP y AFRP cuando comprende fibra de carbón, vidrio o arámida, respectivamente. Materiales continuos de fibra reforzada con matriz polimérica pueden ser considerados como materiales compuestos, heterogéneos y anisotrópicos con un comportamiento prevalente lineal elástico hasta la falla. Son ampliamente usados para el forzamiento de estructuras civiles. Hay muchas ventajas del uso de FRP: tiene un peso ligero, posee buenas propiedades mecánicas y es resistente a la corrosión.

Los compuestos están disponibles en algunos tipos geométricos variando desde láminas con superficies regulares hasta tejidos bidireccionales que son fácilmente adaptables a la forma del elemento que está siendo reforzado. Los materiales compuestos son también convenientes para aplicaciones donde se requiere la preservación estética de las estructuras originales (edificios de interés artístico o histórico) o dónde las técnicas de reforzamiento tradicional no pueden ser efectivamente empleadas. Hay además otros tipos de materiales compuestos comerciales caracterizados por la naturaleza de la matriz (matriz inorgánica) o las fibras (fibras continuas o discontinuas, hechas de acero, basalto o PBO).

El capítulo 2 está dedicado a la clasificación, la certificación de las calificaciones y el criterio de aceptación de sistemas hechos de FRP, así como las tareas y responsabilidades de los usuarios.

El lector que desee adquirir más conocimiento sobre la producción de tecnologías de FRP, las propiedades mecánicas y los criterios de diseño, deberá usar los apéndices A, B y C de estas instrucciones, y cualquiera de los muchos libros disponibles sobre este tema.

### 2.2 CLASIFICACION DE SISTEMAS DE REFORZAMIENTO CON FRP

(1) Desde un punto de vista morfológico, los sistemas de esforzamiento FRP están divididos en:

- sistemas precurados (Sección 2.2.2), manufacturados en varias formas (láminas, bandas, varillas u otros), fabricados mediante pultrusión u otros procesos productivos de validez tecnológica comprobada, y pegados al elemento estructural a ser serforzado;
- sistemas impregnados *in situ* (Sección 2.2.3), manufacturado de hojas o tejidos de fibras uni o multi direccionales impregnadas con una resina que puede servir también como adhesivo con el substrato de interes (concreto, mampostería);
- sistema prepreg (pre-impregnado) (Sección 2.2.4), manufacturados con hojas o tejidos de fibra uni o multidireccional pre-impregnadas con resina parcialmente polimerizada y pegada al substrato a ser reforzado con o sin el uso de una resina pegante.

(2) Desde un punto de vista mecánico, los sistemas de reforzamiento FRP se clasifican basados en sus valores de módulos de elasticidad y capacidad última. Estos valores son medidos bajo tensión uniaxial en la dirección de las fibras. Sistemas precurados deben ser referidos por la unidad de área de FRP (fibra y matriz) y el sistema impregnado únicamente por el área de las fibras secas. Los valores de los módulos de elasticidad y resistencia a la tracción deben ser durables con respecto a la degradación ambiental inducida sobre el compuesto FRP.

Esta clasificación es consistente con la *Guía para calificación de fibra reforzada por la aplicación de reforzamientos de estructuras existentes*, del Ministerio Italiano de Infraestructuras y Transportes.

### 2.2.1 Propiedades Mecánicas de sistemas de reforzamiento con FRP

(1)P En los materiales compuestos FRP, las fibras proveen tanto capacidad de resistencia como rigidez. La matriz, además de proteger las fibras, hace de un medio de transferencia de los esfuerzos entre fibra y fibra y eventualmente entre éstas con el elemento estructural a ser reforzado. En la mayoría de casos, los materiales compuestos son constituidos por fibras caracterizadas por una resistencia y rigidez elevada, pero por valores de deformación unitaria a rotura inferior a aquella de la matriz.

En la Figura 2-1 están representadas cualitativamente las leyes constitutivas de un material FRP unidireccional y su fase constituyente: matriz y fibras. El compuesto, respecto a las fibras, tiene una rigidez menor pero la misma deformación unitaria a rotura  $\epsilon_{fib,max}$ . En efecto, una vez superada dicha deformación unitaria, resulta imposible la transferencia de los esfuerzos de la matriz a las fibras.

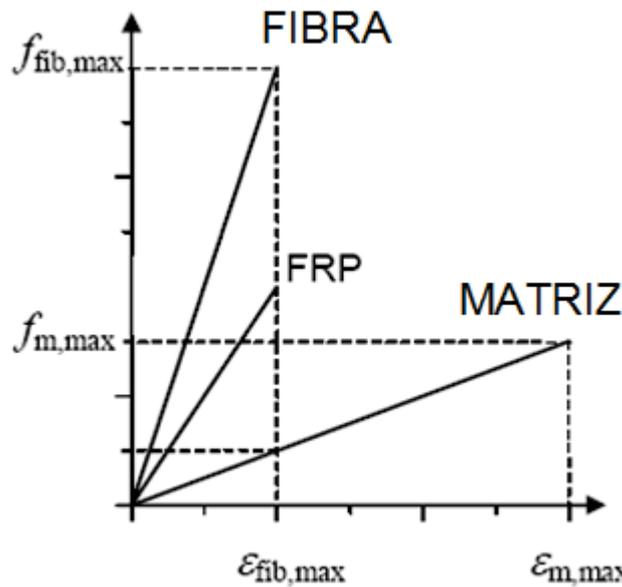


Figura2-1 –Ley constitutiva de fibras, matriz y el compuesto.

La Tabla 2-1 resume las propiedades mecánicas de una lámina precurada comparadas con los valores promedio de las correspondientes fibras. Los valores del módulo Young de elasticidad,  $E_f$ , y esfuerzo ultimo de falla,  $f_f$ , de la lámina son más bajos que aquellos de la fibra en sí misma, mientras que la resistencia última a la tracción es del mismo orden de magnitud para ambos materiales.

Tabla2-1 –Comparación entre las propiedades mecánicas de un producto precurado y las fibras correspondientes.

Producto precurado	Módulo de elasticidad normal [GPa]		Tensión de rotura [MPa]		Deformación unitaria a rotura [%]	
	FRP $E_f$	Fibras $E_{fib}$	FRP $f_f$	Fibras $f_{fib}$	FRP $\epsilon_{fu}$	Fibras $\epsilon_{fib,u}$
CFRP (módulo bajo)	160	210-230	2800	3500-4800	1.6	1.4-2.0
CFRP (módulo alto)	300	350-500	1500	2500-3100	0.5	0.4-0.9

(2) Para material FRP hecho de fibras unidireccionales, el comportamiento mecánico del compuesto puede ser estimado usando modelos micro-mecánicos; por ejemplo, usando la regla de mezclas/(eq. 9.5 en Apéndice C):

$$E_f = V_{fib} \cdot E_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot E_{mat}, \quad (2.1)$$

$$f_f \cong V_{fib} \cdot f_{fib} + (1 - V_{fib}) \cdot f_{mat}, \quad (2.2)$$

donde, además de las cantidades ya introducidas en la Tabla 2-1,  $V_{fib}$  es la fracción volumétrica de las fibras (relación entre el volumen de fibras y el volumen total del compuesto), y  $E_{mat}$  y  $f_{mat}$  son respectivamente el Módulo de Elasticidad normal y la tensión de rotura de la matriz.

La regla de mezclas está basada en la hipótesis de un perfecto pegado entre las fibras y la matriz, y provee una estimación suficientemente exacta del Módulo de elasticidad normal pero no se obtiene la misma seguridad para la resistencia última.

(3) Para la validación del módulo de elasticidad y de la resistencia en una dirección específica de un compuesto impregnado *in situ* se adopta el área de la sección recta del tejido seco dispuesta perpendicular a esa dirección. Esto está justificado por la dificultad en calcular el porcentaje de volumen de las fases, por la incertidumbre de la cantidad efectiva de resina instalada.

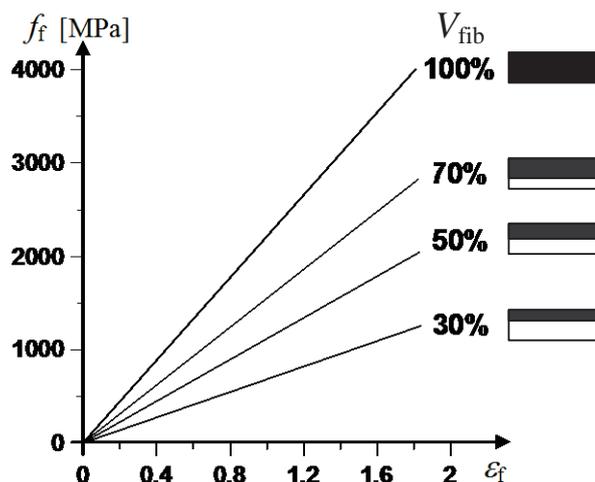
Por ejemplo, un tejido unidireccional de 100mm de ancho (área de las fibras:  $A_{fib} = 70 \text{ mm}^2$ ) se considera impregnado con cantidades variables de resina. Las propiedades de cada componente son reportadas en la Tabla 2-2. La importancia del contenido de resina sobre las propiedades mecánicas de la dirección de las fibras, calculadas usando Ecuaciones (2.1) y (2.2), está resumida en la Tabla 2-3 y en la Figura 2-2.

**Tabla 2-2** – Propiedades de los componentes.

Fibras	Matriz
$E_{fib} = 220 \text{ GPa}$	$E_{mat} = 3 \text{ GPa}$
$f_{fib} = 4000 \text{ MPa}$	$f_{mat} = 80 \text{ MPa}$

**Tabla 2-3** – Influencia de la fracción volumétrica de la fibra,  $V_{fib}$ , sobre las propiedades mecánicas del FRP.

$A_{fib}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{mat}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_f$ [mm <sup>2</sup> ]	$V_{fib}$ [%]	$E_f$ [GPa]	$f_f$ [MPa]	$\epsilon_{fu}$ [%]	$F_{fu}$ [kN]	$E_f \cdot A_f$ [kN]
70	0	70	100	220.0	4000	1.81	280.0	15400
70	30	100	70	154.9	2824	1.82	282.4	15490
70	70	140	50	111.5	2040	1.83	285.6	15610



**Figura 2-2** –Dependencia de la ley constitutiva del compuesto de la fracción volumétrica.

La Tabla 2-3 y la Figura 2-2 se refieren a los valores de  $V_{fib}$  entre 30 % y 70 %. Como un caso límite, la fracción volumétrica de las fibras igual al 100% es también tomada en consideración.

La Tabla 2-3 muestra como las propiedades mecánicas de los compuestos ( $E_f$  and  $f_f$ ) son dependientes de la fracción volumétrica,  $V_{fib}$ . Por el contrario, la máxima carga de tracción,  $F_{fu} = f_f \cdot A_f$ , y rigidez axial,  $E_f \cdot A_f$ , presentan menos variedad (3-4%), preferiblemente debido al decrecimiento en valores de  $E_f$  y  $f_f$  los cuales son compensados por el incremento del área total de la sección transversal de la fibra impregnada,  $A_f$ .

## 2.2.2 Sistemas precurados

(1) Las propiedades mecánicas de los sistemas precurados,  $f_f$  y  $E_f$ , son calculadas usando las siguientes ecuaciones:

$$f_f = F_{fu} / A_f, \quad (2.3)$$

$$E_f = F_{fu} / (A_f \cdot \epsilon_{fu}), \quad (2.4)$$

donde  $F_{fu}$  y  $\epsilon_{fu}$  son la fuerza y deformación unitaria máxima experimentalmente determinada, respectivamente, y  $A_f$ , el área de la sección transversal del sistema precurado.

(2) Los compuestos precurados se caracterizan por una orientación unidireccional de la fibra que permite el uso de la regla de mezclas para determinar el esfuerzo y la rigidez de los compuestos. Sin embargo, tales valores sólo representan una aproximación (típicamente una sobreestimación) por que de otros parámetros relevantes, tales como propiedades de adhesión entre fibras y matriz, presencia de defectos de fabricación, vacíos, o desalineamiento de fibras no son considerados. Se pueden obtener valores confiables de las propiedades mecánicas de FRP con una valoración experimental para asegurar la determinación de parámetros estadísticos apropiados que se toman en cuenta para el proceso de fabricación adoptado.

(3) Las fracciones volumétricas usualmente varían entre el 50 y el 70 %.

### 2.2.3 Sistemas impregnados *in situ*

(1) En caso de impregnación manual, se recomienda limitar la masa de la textura presente en una sola capa de refuerzo para garantizar el gramaje, o densidad de área, que no sobrepasará el valor de  $600 \text{ g/m}^2$  (Sección 7.2.2.1). Para niveles más altos de gramaje se recomienda verificar que la impregnación sea completa. En estos casos, además se sugiere usar sistemas mecánicos de instalación.

(2) No se aconseja usar más de 5 capas.

#### 2.2.3.1 Determinación de $A_{\text{fib}}$

(1) Para el área de la sección transversal,  $A_{\text{fib}}$ , se debe hacer referencia a la hoja de información técnica provista por el fabricante FRP.

El área de la sección transversal de la lámina por unidad de ancho puede ser expresada como sigue:

$$A_{\text{fib}} = \frac{T_x \cdot N_f}{10^4 \cdot \rho_{\text{fib}}} \cdot b_f, \quad (2.5)$$

Donde  $T_x$  es la cuenta de hilados en la dirección principal expresada en  $\text{Tex}[\text{g/km}]$ ,  $N_f$  es el número de hilados por unidad de ancho en la dirección principal expresada en  $[\text{n}^0/\text{cm}]$ ,  $\rho_{\text{fib}}$  es la densidad de fibra  $[\text{g/cm}^3]$ , y  $b_f$  es el ancho de la banda de tejido  $[\text{mm}]$ .

En caso de tejidos con igual número de fibras en dos direcciones ortogonales (tejidos balanceados), el área de tejido en ambas direcciones puede ser computado usando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{fib}} = \frac{p_t}{2 \cdot \rho_{\text{fib}}} \cdot \frac{b_f}{10^3}. \quad (2.6)$$

Donde  $p_t$  se define como la masa del tejido por unidad del área, expresada en  $\text{g/m}^2$ . Para tejido unidireccional (2.6) el área puede ser evaluada como sigue:

$$A_{\text{fib}} = \frac{p_t}{\rho_{\text{fib}}} \cdot \frac{b_f}{10^3}. \quad (2.7)$$

Sin embargo, para propósitos prácticos limitados a tejidos unidireccionales o balanceados, es común referirse al área del tejido al espesor de una placa equivalente hecha de única fibra, lo cual puede ser obtenido como sigue:

$$t_f = \frac{A_{\text{fib}}}{b_f}. \quad (2.8)$$

La Tabla 2-4 resume los parámetros estrictamente necesarios para la determinación del área de la sección transversal para tres diferentes tejidos: 1) tejido llano no balanceado (tejido A), 2) tejido llano balanceado (tejido B), y 3) tejido unidireccional (tejido C).

**Tabla2-4**

Propiedad		Unidad de medida	Tejido A	Tejido B	Tejido C
Masa del tejido		$g/m^2$	187	286	304
Densidad de la fibra		$g/cm^3$	1.76	1.76	1.8
Nºde hilos/cm	trama	Nº/cm	4	6	-
	urdimbre	Nº/cm	8	6	3.8
Cuenta	trama	Tex	67	200	-
	urdimbre	Tex	200	200	800

En caso de tejido no balanceado (tejido A), Ecuación (2.5):

$$A_{fib}^{trama} = \frac{67 [\text{Tex}] \cdot 4 [\text{hilos/cm}]}{10^4 \cdot 1.76 [\text{g/cm}^3]} \cdot 100 [\text{mm}] = 1.52 \text{ mm}^2 \text{ (área resistente en la dirección de la trama)}$$

$$A_{fib}^{urdimbre} = \frac{200 [\text{Tex}] \cdot 8 [\text{hilos/cm}]}{10^4 \cdot 1.76 [\text{g/cm}^3]} \cdot 100 [\text{mm}] = 9.09 \text{ mm}^2 \text{ (área resistente en la dirección del urdimbre)}$$

Para el tejido B, el área de la sección transversal puede ser escrita como sigue (en ambas direcciones):

$$A_{fib} = \frac{200 [\text{Tex}] \cdot 6 [\text{hilos/cm}]}{10^4 \cdot 1.76 [\text{g/cm}^3]} \cdot 100 [\text{mm}] = 6.82 \text{ mm}^2 \text{ ,}$$

$$t_f = \frac{6.82 [\text{mm}^2]}{100 [\text{mm}]} = 0.068 \text{ mm .}$$

Alternativamente, el mismo resultado puede ser obtenido de la Ecuación (2.6), como sigue:

$$A_{fib} = \frac{240 [\text{g/m}^2]}{2 \cdot 10^3 \cdot 1.76 [\text{g/cm}^3]} \cdot 100 [\text{mm}] = 6.82 \text{ mm}^2 .$$

Finalmente, para el tejido C, las Ecuaciones (2.7) y (2.8), obtienen:

$$A_{fib} = \frac{304 [\text{g/m}^2]}{10^3 \cdot 1.80 [\text{g/cm}^3]} \cdot 100 [\text{mm}] = 16.89 \text{ mm}^2 ,$$

$$t_f = \frac{16.89 [\text{mm}^2]}{100 [\text{mm}]} = 0.17 \text{ mm .}$$

### 2.2.3.2 Características mecánicas de sistemas impregnados *in situ*

(1) En este documento, los sistemas impregnados *in situ* son considerados de forma similar a un sistema equivalente de sólo tejido seco ( $A_f = A_{fib}$ ). Las propiedades mecánicas de los compuestos impregnados,  $f_f$  y  $E_f$ , podrán ser evaluadas usando las siguientes ecuaciones:

$$f_f = F_{fu} / A_{fib} \text{ ,} \tag{2.9}$$

$$E_f = F_{fu} / (A_{fib} \cdot \varepsilon_{fu}). \quad (2.10)$$

Para propósitos prácticos, el espesor de los sistemas impregnados *in situ*,  $t_f$ , será computado de acuerdo con la Ecuación (2.8).

### 2.2.3.3 Comparación de características entre sistemas precurado e impregnados *in situ*

La Tabla 2-5 muestra las propiedades mecánicas de dos sistemas: uno, impregnado *in situ* con un tejido de carbón unidireccional y otro, laminado precurado de carbón. Las propiedades mecánicas de estos sistemas son evaluadas usando la hoja de datos técnicos de cada material. Para propósitos de diseño se pueden hacer algunas simplificaciones (Tabla 2-6).

**Tabla 2-5**

Sistema 1	Sistema 2
Tipo: Tejido unidireccional CFRP y epóxica <i>Impregnado in situ</i>	Tipo: Lámina precurada CFRP y resina epóxica <i>Precurada</i>
Propiedades mecánicas*	Propiedades mecánicas**
$t_f = 0.45 \text{ mm}$	$t_f = 1.2 \text{ mm}$
$f_f = 4200 \text{ N/mm}^2$	$f_f = 2800 \text{ N/mm}^2$
$\varepsilon_f = 1.8\%$	$\varepsilon_f = 1.7\%$
$E_f = 235000 \text{ N/mm}^2$	$E_f = 165000 \text{ N/mm}^2$

\* Propiedades referidas a la fibra en sí misma (Ecuación(2.9)(2.10))

\*\* Propiedades referidas al área total del sistema (Ecuación(2.3)(2.4)).

**Tabla 2-6**

Sistema 1	Sistema 2
Tipo: Tejido unidireccional CFRP y epóxica <i>Impregnado in situ</i>	Tipo: Lámina precurada CFRP y resina epóxica <i>Precurada</i>
1) Carga máxima de flexión por unidad de ancho	1) Carga máxima de flexión por unidad de ancho
$f_f \cdot t_f = 1890 \text{ N/mm}$	$f_f \cdot t_f = 3360 \text{ N/mm}$
2) Módulo de elasticidad por unidad de ancho	2) Módulo de elasticidad por unidad de ancho
$E_f \cdot t_f = 105750 \text{ N/mm}$	$E_f \cdot t_f = 198000 \text{ N/mm}$

3a) Comparación de carga máxima de flexión

$$\frac{f_f^{(2)} \cdot t_f^{(2)}}{f_f^{(1)} \cdot t_f^{(1)}} = 1.77$$

3b) Comparación de carga máxima de flexión

$$\frac{E_f^{(2)} \cdot t_f^{(2)}}{E_f^{(1)} \cdot t_f^{(1)}} = 1.87$$

Dos capas de tejido unidireccional (Sistema 1) son necesarias para generar un esfuerzo equivalente y rigidez de la lámina precurada (Sistema 2).

### 2.2.4 Sistema pre-impregnados

(1) Los sistemas de pre-impregnado (*prepreg*) son impregnados directamente en la planta del fabricante y distribuidos en forma de rollos. La resina puede recibir tratamientos de prepolimerización. Un sistema pre-impregnado es una hoja delgada (espesor típico de 0.15 mm), flexible y moderadamente viscoso, con una película adherente (papel silicón o similar) aplicada sobre la superficie para preservar el sistema de contaminación externa. Debe almacenarse apropiadamente bajo condiciones controladas de humedad y temperatura; y el sistema de conexión cruzada deberá ocurrir en el momento de aplicación por medio de tratamientos térmicos.

## 2.3 CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES

Hoy en día, los criterios de aceptación y clasificación de FRP para aplicaciones de reforzamiento están en desarrollo en los códigos europeos.

### 2.3.1 Tareas y responsabilidades de los profesionales

(1) Esta sección se refiere a la responsabilidad y competencias de los fabricantes, diseñadores, contratistas, etc.

#### Diseñador:

- Establecerá claramente la calidad y características del sistema de reforzamiento.
- Dependiendo de la importancia y la extensión de las aplicaciones, los diseñadores informarán al jefe de construcción, la necesidad de pruebas de control de calidad para despegamiento, como se reporta en el Capítulo 6.

#### Contratista/subcontratista:

- Deberán ser calificados para la aplicación de materiales compuestos para concreto y estructuras de mampostería. Las calificaciones serán demostradas a través de documentación de experiencias previas. En particular, el personal responsable por la instalación tendrá una habilidad calificada y específica en la aplicación de los sistemas de reforzamiento FRP para propósitos estructurales.
- Se asegurarán de que los productos cumplan en las especificaciones indicadas por el diseñador. Si el material y los correspondientes requerimientos indicados no están disponibles, entonces se debe hacer un acuerdo con alternativas viables con el diseñador o con el jefe de construcción.

#### Jefe o Gerente de Construcción:

- Tomará decisiones reconociendo la aceptación de los productos.
- Chequeará la concordancia del material con las exigencias del diseñador.
- Chequeará el origen del material provisto.
- Chequeará las características físicas y mecánicas de los productos usando certificados de pruebas provistos por el fabricante.
- Basado en la importancia de la aplicación, el gerente de construcción puede requerir pruebas experimentales para evaluar tanto la calidad de materiales y la afinidad con los valores provistos por el fabricante o proveedor. Dichas pruebas pueden ser llevadas a cabo en laboratorios de experiencia probada y equipados apropiadamente para evaluar las características de los materiales FRP.
- Basados en la importancia de la aplicación, el gerente de construcción puede requerir el desarrollo de una prueba específica para encontrar las características del despegami con respecto a los requerimientos de diseño.

**Fiscalizador:**

Si la estructura reforzada con FRP ha sido probada, el fiscalizador deberá:

- Revisar si la capacidad de los materiales está de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- Verificar que todos los materiales usados han sido aceptados por el gerente de construcción.
- Revisar los resultados de las pruebas experimentales requeridas por el gerente de construcción y determinar si algo más allá de eso es requerido.

**2.4 TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO, PRESERVACION, MANEJO Y USO**

(1) Se dará adecuado transporte, almacenamiento, preservación, manipulación y uso del material FRP para asegurar que las propiedades de cada uno de los componentes no sean alteradas y sean compatibles con las leyes y regulaciones de seguridad.

- Transporte: Cada componente del sistema FRP seleccionado deberá ser convenientemente empacado y transportado de acuerdo a regulaciones y leyes de seguridad.
- Almacenamiento: Para preservar las propiedades del material FRP y asegurar el cumplimiento de leyes y regulaciones de seguridad, el material FRP será almacenado, de acuerdo a las recomendaciones provistas por el proveedor o el fabricante.  
Para preservar las propiedades de las fibras y resinas, el almacenamiento será hecho bajo condiciones de temperatura conveniente (rango sugerido 10-24 °C), en un ambiente seco (humedad menor al 20%), a menos que el fabricante o el proveedor sugieran algo diferente. El laminado u otro material preformado pueden ser dañados al ser doblados o mal apilados. Debido a razones de seguridad, algunos constituyentes totales como agentes reticulantes radioactivos iniciadores (generalmente peróxidos) deberán ser almacenados separadamente de otros reagentes para evitar cualquier contacto accidental que lleve a una polimerización prematura.
- Preservación: Las propiedades de las resinas no polimerizadas pueden cambiar a través del tiempo y son afectadas por la humedad y condiciones de temperatura. Lo último puede además afectar la mezcla de reactividad y propiedades de la resina polimerizada. Los fabricantes deberán indicar el tiempo de almacenamiento (vida en la percha) que asegura que las propiedades de las resinas con establecimiento térmico sean adecuadamente mantenidas. Los constituyentes que exceden su tiempo de vida en la percha, o que sufren degradación o contaminación, no deberán ser usados. Todos los constituyentes considerados no usables deberán ser desechados de acuerdo a las especificaciones del fabricante así como las provisiones de regulaciones y leyes de seguridad.
- Manejo o manipulación: El fabricante proveerá una hoja de datos técnicos reportando toda la información relevante para seguridad (MSDS – *Hoja de datos de material de seguridad*) para todos los constituyentes del material FRP.
- Uso: Las sustancias usadas en combinación con las resinas termoestables son generalmente agentes endurecedores, conectores cruzados, iniciadores (peróxidos), y llenadores. Algunos peligros potenciales del uso de resinas térmicas incluyen:
  - irritación y sensibilización de la piel;
  - inhalación de vapores de solventes, diluyentes o monómeros;
  - incendio o riesgo de explosión debido a grandes concentraciones de sustancias inflamables con llamas o chispas (incluyendo cigarrillo);
  - reacciones exotérmicas entre reagentes que pueden causar incendio o lastimar al personal involucrado;
  - presencia de polvo del manejo o trabajo con el material FRP.

Por lo tanto, es necesario adoptar precauciones cuando se trabaja con dichos productos o con

sus constituyentes.

Los riesgos potenciales asociados con su uso requieren que todos los operadores lean las etiquetas y MSDS cuidadosamente con el fin de mitigar posibles peligros.

Para el manejo de fibras o resinas, el uso de guantes descartables, ropa de trabajo y lentes de protección es recomendable. Los guantes de plástico o caucho deben ser resistentes a los solventes. En presencia de fragmentos de fibra, polvos o vapores de solventes, o cuando se mezclan y aplican resinas, se requieren dispositivos de protección respiratoria, como especifican los fabricantes y proveedores de FRP. El sitio de trabajo deberá siempre estar ventilado en forma adecuada.

### 3 BASES DE DISEÑO PARA REFORZAMIENTO FRP

(1) Este capítulo trata el reforzamiento FRP de estructuras existentes reforzadas y preesforzadas así como de estructuras de mampostería para las cuales se ha determinado que no existe la resistencia adecuada para soportar las solicitaciones. Los mismos principios también se aplican a las estructuras existentes de acero y de madera, pero no están incluidos en este documento.

(2)P Se ha hecho las siguientes consideraciones:

- la elección y el diseño del sistema de reforzamiento están hechos por un ingeniero experimentado y calificado;
- la etapa de instalación es llevada a cabo por personal que tiene la experiencia y las habilidades adecuadas;
- se provee de una apropiada supervisión y control de calidad durante la instalación;
- los materiales de construcción son identificables, clasificados, rastreables y aceptados en el sitio de trabajo.

(3) El sistema de reforzamiento FRP será diseñado para satisfacer los requisitos de servicio, durabilidad y de resistencia al estado límite último (colapso). En caso de incendio, el esfuerzo del sistema seleccionado FRP será adecuado para el período de tiempo de exposición.

(4) El sistema de reforzamiento FRP deberá ser colocado en áreas de la estructura donde los esfuerzos de tracción vayan a ocurrir. El sistema de reforzamiento FRP no debe ser diseñado para soportar esfuerzos de compresión, a menos que esté bien confinado (dentro de los elementos reforzados) o sistemas precurados que adecuadamente provean rigidez axial y flexional.

#### 3.1 REQUISITOS BÁSICOS

(1)P El diseño de sistema de reforzamiento deberá ser desarrollado de acuerdo a los siguientes principios:

- los riesgos a los cuales la estructura puede estar sujeta deberán ser identificados de forma segura, removidos o mitigados;
- la configuración de reforzamiento no deberá ser sensible a los riesgos arriba mencionados y ser capaz de enfrentar daños localizados aceptables;
- eliminación o postergación de los fenómenos de colapso de tipo frágil pre existentes al refuerzo.

(2)P Los requerimientos básicos arriba definidos pueden ser considerados satisfechos si se cumple con lo siguiente:

- los materiales son escogidos basados en la indicación del Capítulo 2;
- el diseño, instalación e inspección del material de reforzamiento están de acuerdo a los requerimientos de este capítulo y en los siguientes capítulos.

(3)P Si el reforzamiento FRP concierne a las estructuras de interés histórico y monumental, se requiere una evaluación crítica de la técnica de reforzamiento con respecto a los estándares para preservación y restauración de acuerdo al vínculo histórico de la estructura.

La actual efectividad de la técnica de reforzamiento será objetivamente probada, y la solución adoptada garantizará la compatibilidad (física, química y mecánica), durabilidad, y resistencia.

### 3.2 REQUISITOS DE DURABILIDAD

(1)P El diseño de sistema de reforzamiento debe asegurar la durabilidad del sistema y efectividad para un servicio total de por vida de la estructura reforzada además en relación a la degradación esperada.

(2) Para asegurar la durabilidad de los elementos reforzados FRP, deberá tomarse en cuenta lo siguiente:

- el destino de uso de la estructura reforzada;
- condiciones ambientales esperadas y proceso de aplicación de las cargas;
- composición, propiedades y desarrollo de la estructura existente y los materiales FRP en concordancia con los productos usados para su instalación;
- elección del sistema de reforzamiento, su configuración, y detalles de construcción;
- calidad de mano de obra y el nivel de control;
- medidas de protección particulares preventivas (*por ejemplo*, temperatura elevada, humedad);
- programa de mantenimiento durante la vida de servicio de la estructura de refuerzo.

(3) Problema de diseño especial (problemas reconocidos de medio ambiente, cargas, etc.) serán identificados en la etapa de diseño para evaluar su relevancia desde un punto de vista de su durabilidad, asignar valores propios de factores de conversión (§ 3.5), y tomar las necesarias provisiones para la protección del sistema FRP adoptado.

(4) Cuando los factores de conversión para un sistema particular FRP no están disponibles, cualquier razón posible de degradación de la configuración de reforzamiento adoptada será seguramente estimada. Tal estimación puede ser perfeccionada a través de modelos técnicos, investigaciones experimentales, experiencia en previas aplicaciones, o cualquier combinación de los factores arriba indicados.

### 3.3 PRINCIPIOS GENERALES DEL DISEÑO DE REFORZAMIENTO

#### 3.3.1 Generalidades

(1)P El diseño con compuestos FRP será llevado a cabo tanto en términos de estado límite último (ELU), y de ser requerido el estado límite de servicialidad (ELS) como lo define el actual código de construcción.

(2)P Las estructuras y los elementos estructurales reforzados con FRP serán diseñados para un esfuerzo de diseño,  $R_d$ , en todas las secciones por lo menos igual al esfuerzo requerido,  $E_d$ , calculado para la carga amplificada de diseño y las fuerzas en tales combinaciones como se estipula en el código de construcción. Se deberá usar la siguiente ecuación:

$$E_d \leq R_d, \quad (3.1)$$

(3) Los valores de diseño son obtenidos de los valores característicos a través de diferentes valores parciales apropiados para cada etapa límite como se indica en el código de construcción. Factores parciales específicos para materiales FRP se indican en este documento.

#### 3.3.2 Vida de servicio y carga de diseño

(1)P Cuando se diseñan elementos reforzados con FRP, la vida de servicio de la estructura deberá

estar de acuerdo con los requerimientos del código de construcción. Además, los mismos factores parciales para los materiales existentes y las mismas cargas de diseño prescritas por el código de construcción para nuevas construcciones serán adoptadas.

### 3.3.3 Propiedades de los materiales y valores de cálculo

(1)P Las propiedades de los materiales FRP a ser usados para el reforzamiento de las estructuras existentes serán determinadas de acuerdo con las indicaciones del Capítulo 2.

(2)P Las propiedades de los materiales existentes en la estructura a ser reforzada serán obtenidas a partir de pruebas en laboratorio o pruebas in-situ y, cuando estén disponibles, de cualquier otro recurso adicional de información (documentos originales del proyecto, alguna documentación extra obtenida subsecuentemente, etc.).

(3) Los valores característicos (5%) serán usados para calcular el esfuerzo máximo y la deformación máxima de los materiales FRP. Los valores promedio serán usados para calcular las propiedades mecánicas de los materiales existentes.

(4) El valor promedio deberá ser usado para calcular el módulo de elasticidad de FRP y materiales preexistentes.

(5) Para la propiedad genérica de un material FRP, el valor de diseño,  $X_d$ , puede ser expresado como sigue:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (3.2)$$

donde  $\eta$ , es un factor de conversión que se usa para problemas especiales de diseño (Sección 3.5),  $X_k$  es el valor característico de la propiedad que está siendo considerada, y  $\gamma_m$  es el factor parcial del material que toma en cuenta el tipo de aplicación (Sección 3.4).

Si tanto el medio ambiente como los factores del estado límite de serviciabilidad son usados, el factor de conversión  $\eta$  es obtenido como el producto del factor medioambiental (Sección 3.5.1),  $\eta_a$ , y el factor estado límite de serviciabilidad (Sección 3.5.2),  $\eta_1$ . En caso del estado límite último, el factor de conversión  $\eta$  es igual a  $\eta_a$  (Sección 3.5.1).

(6) El valor de la propiedad genérica de un material preexistente,  $X_d$ , se obtiene por la relación entre el valor promedio de la propiedad,  $X_m$ , y un factor calibrado de confianza, FC, relacionado con el nivel de conocimiento. Si el código aplicable lo requiere, esta relación es eventualmente dividida por el factor de seguridad del material.

### 3.3.4 Capacidad de diseño

(1) El esfuerzo de diseño,  $R_d$ , puede ser expresado como sigue:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} \quad (3.3)$$

En la Ecuación (3.3),  $R\{\}$  es una función que representa el modelo mecánico considerado (por

*ejemplo*, flexión, corte, etc.), y  $\gamma_{Rd}$  es un factor parcial que se toma en cuenta para aquellos detalles inciertos en el modelo asumido. Las variables en la función  $R\{\}$  son generalmente los valores de diseño de los materiales,  $X_{d,i}$ , usados para reforzamiento o materiales existentes. Los valores nominales de los parámetros geométricos,  $a_{d,i}$ , involucrados en el modelo son también considerados.

(2) Como regla, la contribución del FRP al elemento reforzado no puede resultar mayor del 50% con respecto al elemento no reforzado. Tal limitación no aplica a cargas excepcionales o sísmicas.

### 3.4 FACTORES PARCIALES

#### 3.4.1 Factor parcial $\gamma_m$ para FRP

(1) Para los estados límites últimos, el valor asignado al factor parcial de los materiales FRP  $\gamma_m = \gamma_f$  es igual a 1.10. Sólo cuando ocurre el despegamiento en el caso de estado límite último, los valores de  $\gamma_m = \gamma_{f,d}$  pueden ser escogidos por el diseñador en un rango entre 1.20 a 1.50, dependiendo de la más alta o más baja probabilidad de falla debido al despegamiento. En este caso, los tests desarrollados por el fabricante o el proveedor, sobre la aplicación específica, pueden ayudar a optimizar el proceso de diseño.

(2) Para el estado límite de servicio, los valores de  $\gamma_m = \gamma_f$  pueden ser igual a 1.

#### 3.4.2 Factores parciales $\gamma_{Rd}$ para modelos de resistencia

(1) Para ELU, los valores a ser asignados a los factores parciales  $\gamma_{Rd}$  son reportados en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1**–Factores parciales  $\gamma_{Rd}$ .

Modelo de resistencia	$\gamma_{Rd}$
Flexión y Flexo-compresión	1.00
Corte/Torsión	1.20
Confinamiento	1.10

### 3.5 PROBLEMAS ESPECIALES DE DISEÑO Y FACTORES DE CONVERSION

(1) De aquí en adelante, son reportados algunos de los valores de referencia a ser asignados al factor de conversión,  $\eta$ , (Sección 3.3.3(5)) que afectan tanto a la durabilidad como el comportamiento de los materiales FRP.

#### 3.5.1 Acciones ambientales y factores de conversión ambientales

(1)P Las propiedades mecánicas de los sistemas FRP (*por ejemplo*, resistencia a tracción, deformación unitaria última, y módulo de Elasticidad normal) se degradan bajo condiciones específicas de edad tales como medio ambiente alcalino, humedad (agua más soluciones de cloro), temperaturas extremas, ciclos térmicos, ciclos de congelamiento y deshielo y radiaciones ultravioletas (UV).

(2) Efectos de medioambiente alcalino: En algunas circunstancias la solución alcalina presente en un concreto poroso puede causar degradación de la resina y/o la interfaz entre FRP y el substrato.

Las resinas epóxicas se caracterizan generalmente por su excelente durabilidad incluso en un ambiente alcalino, separado de las resinas de poliuretano usadas para el reforzamiento de las varillas interiores. Además, el vinilester se basa en resinas preferenciales. Si las fibras de vidrio con alto contenido de zirconia son usadas, el sistema FRP podría resultar en un esfuerzo menor comparado al GFRP tradicionalmente usado para aplicación estructural. El daño de la resina debido a un medio ambiente alcalino es por lo general más peligroso que uno debido a la humedad. La resina deberá completar su proceso de curado antes de ser expuesto a un ambiente alcalino.

(3) Efectos de la humedad (agua y solución salina). Los principales efectos de la absorción conciernen a la resina; y puede ser resumido como sigue a continuación: plastificación, reducción de la temperatura de transición vítrea, y reducción de la resistencia y de la rigidez. La absorción de la humedad depende del tipo de resina, espesor, condiciones de curado, interfase de la fibra-resina, condiciones de funcionamiento, composición y calidad de la lámina.

(4) Efectos de temperaturas extremas y ciclos térmicos. Los efectos primarios de la temperatura conciernen a la respuesta viscosa tanto de la resina como de los compuestos. A medida que la temperatura aumenta, el módulo de Elasticidad normal de la resina decrece. Si la temperatura excede la temperatura de transición del vidrio, el desarrollo de los materiales FRP decrece significativamente. En general, los ciclos térmicos no tienen efectos dañinos sobre FRP, sin embargo, pueden causar micro fracturas en sistemas con resinas de alto módulo. Para temperaturas típicas en infraestructuras civiles, un desarrollo no deseado puede ser evitado si se elige un sistema donde la temperatura de transición vítrea sea siempre más alta que la temperatura máxima de servicio de la estructura o componente a ser reforzado. El uso de FRP en presencia de temperaturas de servicio más altas que la temperatura de transición vítrea reducida en  $15^{\circ}$  C. es recomendable. Como precaución, los sistemas de protección especial serán designados con el fin de proveer aislamiento térmico del sistema FRP.

(5) Efectos de ciclos de congelamiento y deshielo. En general, la exposición a ciclos de congelamiento y deshielo no influye en el comportamiento de las fibras, pero decrece la prestación de la resina así como la interfase de la fibra-resina. Para temperaturas bajo  $0^{\circ}$  C, los sistemas de resinas basadas en polímeros pueden mejorar por medio del desarrollo de resistencia y rigidez más altos. Los efectos de la degradación inducidos por el congelamiento y los ciclos de deshielo pueden ser magnificados por la presencia de humedad. Los ciclos favorecen en realidad el incremento y la propagación de las microfracturas provocadas por la presencia de soluciones salinas en ambiente húmedo.

(6) Efectos de las radiaciones ultravioletas (UV). Las radiaciones ultravioletas rara vez degradan el desarrollo mecánico de los sistemas basados en FRP, pero pueden causar que algunas resinas tengan un cierto grado de fragilidad y erosión superficial. En general, el mayor efecto de daño conectado a la exposición UV es la penetración de humedad y otros agentes agresivos a través de la superficie dañada. Los sistemas basados en FRP pueden ser protegidos de tales daños por medio de la adición de aditivos a la resina o proveyendo de protecciones adecuadas.

(7) La Tabla 3-2 sugiere los valores a asignar al factor de conversión medioambiental  $\eta_a$  dependiendo del tipo de fibra/resina y de las condiciones de exposición. El diseñador podrá usar estos valores cuando falte más información sobre evidencia de pruebas para el material que se está usando y las condiciones medioambientales esperadas.

Los valores que se reportan en la tabla pueden ser incrementados en un 10 % (sin embargo,  $\eta_a \leq 1$  será siempre un valor estable a satisfacer) siempre que se usen protecciones adecuadas. Tales protecciones necesitan ser mantenidas en la estructura reforzada durante su vida total y ser probada

experimentalmente y probado efectivamente en la protección del sistema FRP respecto a la exposición al medio ambiente.

**Tabla3-2**– Factores de conversión ambiental  $\eta_a$  para varias condiciones de exposición y varios sistemas de FRP.

Condiciones de exposición	Tipo de fibra/resina	$\eta_a$
Internos	Vidrio/Epóxico	0.75
	Arámidico/Epóxico	0.85
	Carbón/Epóxico	0.95
Externos	Vidrio/Epóxico	0.65
	Arámidico/Epóxico	0.75
	Carbón/Epóxico	0.85
Medioambiente agresivo	Vidrio/Epóxico	0.50
	Arámidico/Epóxico	0.70
	Carbón/Epóxico	0.85

### 3.5.2 Modalidad de carga y factores de conversión para efectos de larga duración

(1)P Las propiedades mecánicas (*por ejemplo, resistencia a tracción, la deformación unitaria última, y módulo de Elasticidad normal*) de sistemas basados en FRP se degradan como resultado de una deformación plástica (creep) y fatiga.

(2) Efectos de cargas a largo tiempo, viscosidad y relajación. Para sistemas basados en FRP, la deformación plástica y la relajación dependen de las propiedades tanto de las fibras como de las resinas. Por lo general, las resinas termoendurecidas (poliésteres no saturados, ésteres de vinilo, resina epoxídica y resinas fenólicas) son menos viscosas que las resinas termoplásticas (polipropileno, nylon, policarbonatos, etc.), ya que la presencia de fibras reduce la viscosidad de la resina, tales fenómenos son más pronunciados cuando la carga se aplica transversalmente a las fibras o cuando los compuestos tienen una baja porcentual en volumen de fibras. La cantidad de deformación puede ser reducida limitando a bajos esfuerzos de servicio. Los sistemas CFRP, AFRP, y GFRP son respectivamente el menos, el moderadamente y el más propenso a la ruptura por deformación.

(3) Efectos de fatiga. El desarrollo de sistemas FRP bajo condiciones de fatiga necesita también ser considerado. Dicho desarrollo depende de la composición de la matriz y, moderadamente, del tipo de fibra. En particular, el tipo de fibra puede oponerse a la formación y propagación de fisuras.

(4) Para evitar fallas en los elementos reforzados con FRP, bajo tensión continua o carga cíclica, el nivel de tensión puede ser limitado reduciendo los valores de diseño y usando un factor de conversión,  $\eta_1$ , cuyos valores son reportados en la Tabla 3-3.

**Tabla3-3**– Factor de conversión para efectos de larga duración  $\eta_1$  para varios sistemas FRP en cargas de servicio

Modalidad de carga	Tipo de fibra/resina	$\eta_1$
--------------------	----------------------	----------

Carga de larga duración	Vidrio/Epóxico	0.30
	Arámidico/Epóxico	0.50
	Carbón/Epóxico	0.80
Cíclico	Todos	0.50

### 3.5.3 Resistencia a las acciones causadas por impacto y explosiones

(1) Los test realizados en el laboratorio o en porciones de estructuras *in situ* sujetas a la acción de explosivos ha mostrado un mejor comportamiento con el sistema AFRP en comparación con los sistemas CFRP y GFRP. Las pruebas en edificios a escala real han demostrado cómo la técnica de usar capas alternativas de AFRP caracterizadas por diferentes módulos de elasticidad e impregnadas con matriz epóxica, con estratos de resina elastomérica (poliuria) con elevadísima deformación y tenacidad, permiten la disipación de energía generada en el impacto o explosión, mientras está conteniendo el efecto de la deflagración y previniendo la penetración de restos de rocas dentro de las estructuras.

### 3.5.4 Vandalismo

(1)P Los materiales componentes de FRP son particularmente sensibles a los cortes e incisiones producidos por herramientas cortantes .

(2) Si los materiales FRP son instalados sobre elementos localizados en áreas de acceso público, se necesita considerar sistemas especiales de protección para prevenir daños del sistema FRP debido a algún acto de vandalismo. La seguridad del elemento estructural deberá revisarse, asumiendo que el sistema FRP ya no está más en su lugar. El Estado Límite Ultimo será verificado usando las combinaciones de acciones *cuasi-permanentes* con factores parciales de materiales *desituaciones excepcionales*.

## 3.6 LIMITACIONES DE REFORZAMIENTO EN CASO DE FUEGO

(1)P Los materiales FRP son particularmente sensibles a altas temperaturas que pueden darse durante un incendio. Cuando la temperatura de servicio excede la temperatura de transición vítrea de la resina (o la temperatura de fusión en el caso de materiales semi-cristalinos), tanto la resistencia y la rigidez del sistema FRP instalado son drásticamente reducidas. En caso de aplicarse FRP como reforzamiento externo al concreto o elementos de mampostería, la exposición a altas temperaturas produce una acelerada degradación del pegado entre el sistema FRP y el substrato. Como resultado, el despegamiento de los compuestos FRP pueden tener lugar así como la degradación de la efectividad del reforzamiento.

(2) Con respecto a la exposición al fuego, las propiedades mecánicas de los elementos reforzados con FRP pueden ser mejoradas mediante el uso de capas adecuadas de coberturas protectoras. Se sugiere emplear una cobertura capaz de reducir el esparcimiento de llamas así como la producción de humo. Es además recomendado emplear una cobertura protectora que tenga certificados oficiales. Mayores especificaciones que reconocen la aplicación de sistemas de coberturas protectoras se reportan en las Secciones 4.8.2.3 y 5.8.2.3.

(3) En caso de fuego, las estructuras reforzadas estarán de acuerdo con las situaciones mencionadas en la lista siguiente, en las cuales el símbolo  $E_d$  indica el efecto de carga indirecta térmica:

- Situación excepcional con reforzamiento FRP:  $E_d \neq 0$ , cuando el sistema de reforzamiento ha

sido diseñado para soportar un tiempo pre-fijado de exposiciones al fuego. Se considerarán cargas aplicadas para las *combinaciones excepcionales* del código de construcción. La capacidad de los elementos, la cual es reducida para tomar en cuenta la duración de la exposición al fuego, será calculada usando valores unitarios de los coeficientes parciales.

- Situación sucesiva a un evento excepcional:  $E_d = 0$ , cuando el sistema no tiene reforzamiento. En este caso las acciones deben ser aquellas previstas para la *combinación casi permanente* y la capacidad de los elementos reducidas adecuadamente para tener en cuenta el tiempo de exposición a fuego.

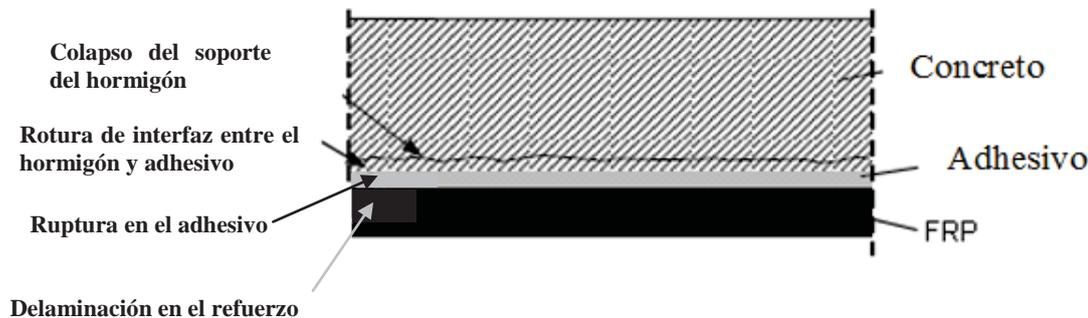
## 4 REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO Y PRESFORZADO

### 4.1 VALIDACION DE LA RESISTENCIA RESPECTO AL DESPEGAMIENTO EN EL SOPORTE

#### 4.1.1 Mecanismos de falla por el despegamiento del soporte

(1)P Cuando los elementos de concreto reforzado tienen reforzamiento con compuestos FRP, el rol del pegamento entre el concreto y el FRP es de gran relevancia debido al mecanismo de falla frágil asociado con el despegamiento (pérdida de adhesión). De acuerdo al criterio de diseño de la jerarquía de la resistencia, la falla debido al despegamiento no debe preceder a la falla de flexión o de corte del elemento reforzado.

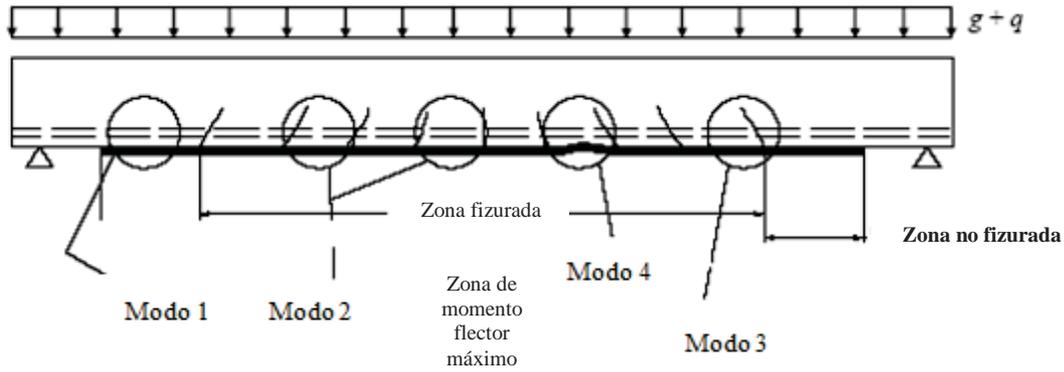
(2)P La pérdida de adhesión entre FRP y el concreto puede concernir tanto las láminas u hojas aplicadas a las vigas de concreto reforzado por reforzamiento a la flexión o al corte. Como se muestra en la Figura 4-1, el despegamiento puede tener lugar dentro del adhesivo, entre el concreto y el adhesivo, en el concreto en sí mismo, o dentro del reforzamiento FRP (por ejemplo en la interfaz entre dos capas adyacentes pegadas entre ellas). Cuando se realiza la instalación apropiada, la fuerza de adhesión es generalmente mucho más alta que el esfuerzo de tensión del concreto, además la falla ocurre dentro del mismo concreto en la forma de remoción de una capa de material (el espesor puede variar de unos cuantos milímetros a toda la cubierta de concreto).



**Figura4-1** –Pérdida de adhesión entre FRP y el concreto.

(3)P Modos de falla de despegamiento para reforzamiento por flexión son esquemáticamente representadas en la, Figura4-2 y pueden ser clasificadas en las siguientes cuatro categorías.

- Modo 1 (separación de la lámina en el extremo)
- Modo 2 (separación de la lámina tipo intermedio, causado por fisuras debidas a la flexión en la viga)
- Modo 3 (separación de la lámina causado por fisuras diagonales de corte en la viga)
- Modo 4 (separación de la lámina causado por irregularidades y rugosidades de la superficie de concreto)

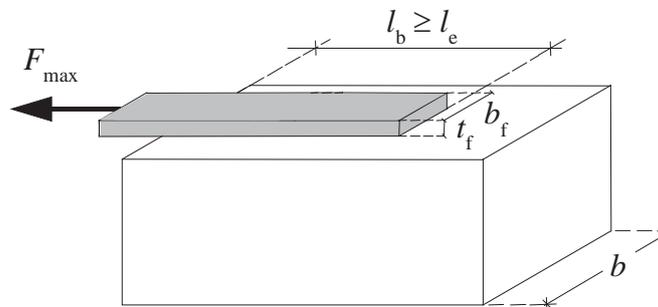


**Figura4-2** –Viga reforzada a flexión con láminas de FRP: modos de rotura por separación de las láminas en el soporte.

- (4) La siguiente sección muestra solo los Modos 1 y 2, ya que son los más frecuentes en situaciones ordinarias. Para mitigar el riesgo de los otros dos modos de falla, se puede aplicar las indicaciones reportadas en el párrafo 4.8
- (5) Mayores detalles sobre despegamientos y criterios de diseño para los modos 1 y 2 son provistos en el ApéndiceD.

**4.1.2 Verificación de seguridad relativo a la separación de las láminas en el soporte**

- (1)P Antes de diseñar para flexión y corte, se requiere conocer la evaluación de la máxima fuerza transmisible desde el concreto a la FRP, así como la evaluación de la tensión normal y tangencial que se generan en la interfaz concreto-FRP. El primer requerimiento es necesario para la verificación al Estado Límite Ultimo; la segunda para aquel del Estado Límite de Servicio.
- (2)P La Figura 4-3representa un típico prueba de adherencia.El valormáximo de la fuerza soportable por el sistema FRP antes del despegamiento depende de la longitud, $l_b$ , del área de pegado. La longitud de pegado $l_e$ ,es definida como la longitud óptima de anclaje. Esta corresponde a la mínima longitud de anclaje que asegura la transmisión del máximo esfuerzo de adherencia.



**Figura4-3** –Fuerza máxima transmisible entre FRP y el concreto.

- (3) La longitud de pegado óptima de diseño,  $l_{ed}$ , puede ser estimada como sigue:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\}, \quad (4.1)$$

donde:

- $E_f$  y  $t_f$  son el módulo de elasticidad normal en dirección de la fuerza y el espesor de la FRP, respectivamente;
- $\Gamma_{Fd}$  es el valor de diseño de la energía específica de fractura;
- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$ ,  $cons_u = 0.25$  mm es el valor último del desplazamiento entre FRP y concreto (ver el Apéndice C);
- $\gamma_{Rd} = 1.25$  es un coeficiente correctivo.

El valor de diseño de la energía específica de fractura está dado por la siguiente relación:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}, \quad (4.2)$$

donde:

- $f_{cm}$  y  $f_{ctm}$  son los valores medios de las resistencias de compresión y tensión, respectivamente, evaluados *in situ*; si los datos experimentales no están disponibles, la resistencia promedio a tracción del concreto puede ser deducida usando  $f_{cm}$  de acuerdo con la especificación del código de construcción.
- $FC$  es el factor de confianza;
- $k_b$  es el factor de corrección geométrica y la función de la relación entre la FRP y el ancho del concreto,  $b_f/b$ .  $k_b$  es definido con la siguiente ecuación:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1. \quad (4.3)$$

Con valor de  $b_f/b \geq 0.25$  (si  $b_f/b < 0.25$ ,  $k_b$  es igual a 1.18).

- $k_G$  es un factor correctivo adicional calibrado desde resultados experimentales e igual a 0.023 mm o 0.037 mm para precurado y compuesto impregnados *in situ*, respectivamente.

Cuando FRP es usado para el reforzamiento estructural de una losa y aplicado usando diferentes bandas colocadas lado a lado, cada una teniendo un ancho igual  $ab_f$ ,  $k_b$  pueden ser calculadas por la ecuación (4.3) asumiendo que el ancho  $b$  es de centro a centro la distancia entre las dos bandas.

#### 4.1.3 Resistencia al Estado Límite Último por separación de lámina en el extremo (modo 1)

(1) Para despegamiento final de la lámina/hoja, la longitud de pegado provista es igual a o más larga que la longitud de pegado óptima, el esfuerzo último de diseño,  $f_{fd}$ , es definido como el máximo esfuerzo permitido antes del despegamiento de los extremos (Figura 4-3) y puede ser

calculado como sigue:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}, \quad (4.4)$$

donde  $\gamma_{f,d}$  es el factor parcial indicado en la Sección 3.4.1 y  $\Gamma_{Fd}$  es la energía de fractura en (4.2), respectivamente.

(2) Para una longitud de pegado ( $l_b$ ) más corta que la longitud de diseño óptima de pegado ( $l_{ed}$ ), el esfuerzo último de diseño será reducido de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left( 2 - \frac{l_b}{l_{ed}} \right). \quad (4.5)$$

(3) Cuando los dispositivos especiales de anclaje son usados (barras transversales FRP, envoltura en U con hojas FRP, etc.), la carga máxima  $F_{max}$  (Figura 4-3) debe ser directamente evaluada con pruebas experimentales ad-hoc con el fin de usar valores más altos de  $f_{fdd}$  en comparación al valor calculado usando las ecuaciones (4.4) y (4.5).

#### 4.1.4 Resistencia al Estado Límite Ultimo por separación de lámina intermedio (modo 2)

(1)P Para prevenir fallas por mecanismo de despegamiento intermedio, la variación del esfuerzo  $\Delta\sigma_f$ , en el sistema FRP entre dos fisuras subsecuentes no deberían exceder el límite  $\Delta\sigma_R$ . El máximo valor generalmente depende de las características de la ley constitutiva de adherencia entre el concreto y el FRP (ver Apéndice D), la distancia entre fisuras en el concreto, y el nivel de esfuerzo,  $\sigma_f$ , en el refuerzo FRP.

(2) Alternativamente, un procedimiento simplificado puede ser usado. La tensión máxima calculada en el sistema FRP en ELU será menor que  $f_{fdd,2}$  calculando como sigue:

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot 2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}}, \quad (4.6)$$

donde,  $k_{G,2}$  es un factor correctivo calibrado sobre resultados experimentales e igual a 0.10 mm con respecto al tipo de refuerzo,  $k_q$  es un coeficiente que considera las condiciones de la carga y es igual a 1.25 para cargas distribuidas y 1.0 para todas las otras configuraciones de carga.

Consecuentemente, el valor de la deformación unitaria máxima de diseño es:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0, \quad (4.7)$$

donde  $\varepsilon_{sy}$  es la deformación unitaria de cálculo de la armadura de acero pre existente, en correspondencia de la cedencia, calculado por la correspondiente tensión media dividida para el factor de confianza FC (Sección 3.3.3(6)), y  $\varepsilon_0$  es la deformación unitaria de tensión máxima pre existente antes de que FRP sea aplicado y es calculado de acuerdo a la Sección 4.2.2.2.

#### 4.1.5 Verificación de las tensiones de interfase para el Estado Límite de Servicio

(1)P Para vigas reforzadas con FRP, las concentraciones de tensión (corte y tensiones normales) que ocurren en el concreto y la interfaz FRP junto a fisuras transversales en el concreto o en los extremos del refuerzo FRP. Las concentraciones de tensión pueden causar fisuras en la interfaz.

(2) Bajo condiciones de servicio, las fisuras en la interfaz deberían ser evitadas, especialmente cuando el elemento reforzado pudiera ser sujeto a fatiga y a ciclos de congelamiento/deshielo. Para los análisis, un comportamiento elástico tanto para el concreto como para el acero puede ser considerado.

(3) Para condiciones de carga raras o frecuentes, la tensión tangencial “equivalente”  $\tau_{b,e}$ , en la interfaz de adhesivo-concreto, será más pequeña que el esfuerzo diseñado de pegado,  $f_{bd}$ , entre el refuerzo FRP y el concreto de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\tau_{b,e} \leq f_{bd} \cdot \quad (4.8)$$

(4) El valor de diseño de adhesión entre el FRP y el concreto,  $f_{bd}$ , es una función de la resistencia media a tracción del concreto,  $f_{ctm}$ , como sigue:

$$f_{bd} = 0.21 \cdot \frac{k_b}{\gamma_b} \cdot \frac{f_{ctm}}{FC}, \quad (4.9)$$

donde  $\gamma_b$  es igual a 1.0 para la condición rara de carga; 1.2 para condiciones frecuentes de carga, mientras que  $k_b$  puede ser obtenido de la Ecuación (4.3).

(5) La tensión tangencial “equivalente”,  $\tau_{b,e}$ , está definida como sigue:

$$\tau_{b,e} = k_{id} \cdot \tau_m \cdot \quad (4.10)$$

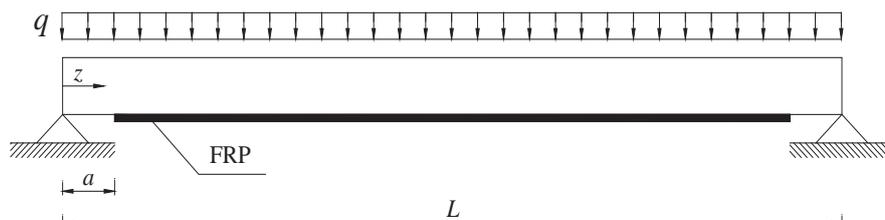
donde  $k_{id}$  representa un coeficiente ( $\geq 1$ ), que cuenta para la concentración de tensiones tangenciales y normales junto a los extremos de anclaje (Apéndice D):

$$k_{id} = \left( k_\sigma^{1.5} + 1.15 \cdot k_\tau^{1.5} \right)^{2/3}, \quad (4.11)$$

donde:

- $k_\sigma = k_\tau \cdot \beta \cdot t_f$ ,
- $k_\tau = 1 + \alpha \cdot a \cdot \frac{M_{(z=a)}}{V_{(z=a)} \cdot a}$ ,
- $M_{(z=a)}$  es el momento flector actuante en la sección donde el reforzamiento FRP termina (Figura 4-4),
- $V_{(z=a)}$  es la fuerza de corte actuante sobre la sección donde termina el reforzamiento FRP, colocada a una distancia  $z=a$  desde la extremidad de la viga,
- $\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{E_f \cdot t_f}}$ ,

- $\beta = \left( \frac{b_f \cdot 2.30 \cdot K_1}{4 \cdot E_f \cdot I_f} \right)^{1/4}$ ,
- $K_1 = \frac{1}{t_a/G_a + t_c/G_c}$ ,
- $G_a$  y  $G_c$  son el módulo de Elasticidad tangencial del adhesivo y del concreto, respectivamente,
- $t_a$  es el espesor nominal del adhesivo,
- $t_c$  es el espesor efectivo del concreto (valores típicos para  $t_c$  son 20 ÷ 30 mm).



**Figura4-4** –Definición de parámetros geométricos de una viga.

- $\tau_m$  es la tensión tangencial promedio de acuerdo a la teoría de Jourawski:

$$\tau_m = \frac{V_{(z=a)} \cdot t_f \cdot (h-x)}{I_c/n_f}, \quad (4.12)$$

siendo:

- $h$  la altura de la sección,
- $x$  la distancia desde la fibra de compresión extrema al eje neutro,
- $I_c$  el momento de inercia de la sección homogenizada, parcializada si en presencia de fisuraciones,
- $E_c$  el módulo de Elasticidad normal para el concreto,
- $n_f = E_f/E_c$  coeficiente de homogenización, correspondiente a la combinación de carga considerada (rara o frecuente).

(6) Si el anclaje se provee usando una envoltura en U, los efectos de tensiones normales pueden ser despreciados y el coeficiente  $k_\sigma$  puede ser asumido igual a cero.

(7) Cuando se calcula la tensión de anclaje en el ELS, se tiene en cuenta solo el incremento de la característica de la sollicitación que corresponde a las variaciones de carga luego de la aplicación del refuerzo.

## 4.2 REFORZAMIENTO A FLEXION

### 4.2.1 Generalidades

(1)P El reforzamiento a la flexión es necesario para los elementos estructurales sujetos a un momento flector más grande que el correspondiente momento resistente. Para simplificación se trata del caso de la flexión uniaxial recta, por ejemplo cuando el eje de la sollicitación coincide con un eje de simetría de la sección.

(2) El reforzamiento a la flexión con materiales FRP se puede realizar aplicando una o más láminas o una o más bandas al lado en tensión del elemento a ser reforzado.

### 4.2.2 Análisis del comportamiento al Estado Límite Ultimo

#### 4.2.2.1 Generalidades

(1)P El diseño de refuerzo a flexión en el ELU de los elementos reforzados con FRP requiere que el momento resistente a flexión,  $M_{Rd}$ , sea mayor que el momento último de diseño,  $M_{Sd}$ , y debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} . \quad (4.13)$$

(2)P El análisis ELU de los elementos de hormigón armado reforzados con FRP se apoyan en las siguientes hipótesis:

- Las secciones planas permanecen planas hasta la rotura
- Existe una perfecta adherencia entre los materiales componentes (acero-concreto, FRP-concreto).
- El concreto no resiste a tracción.
- Las leyes constitutivas para el concreto y el acero están de acuerdo al código de construcción.
- El FRP es considerado un material elástico lineal hasta que la falla.

(3) El reforzamiento FRP es aconsejado usar para secciones con armadura débil. Las normas de aquí en adelante reportadas se refieren exclusivamente a esta situación.

(4) Se asume que la falla por flexión ocurre cuando se presentan una de las siguientes condiciones:

- se alcanza la máxima deformación unitaria de compresión del concreto,  $\varepsilon_{cu}$  ;
- se alcanza la máxima deformación en el refuerzo FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , y se calcula como sigue:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}, \quad (4.14)$$

Donde,  $\varepsilon_{fk}$  es la deformación característica en la falla del sistema de reforzamiento adoptado;  $\gamma_f$  y  $\eta_a$  son los coeficientes definidos en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3-2 de la sección 3.5.1, respectivamente;  $\varepsilon_{fdd}$  es la máxima deformación debido a despegamiento intermedio como se definió en la Sección 4.7 (generalmente el valor mínimo en la

Ecuación(4.14)corresponde a  $\varepsilon_{fd}$ ).

(5) La capacidad de corte del elemento reforzado debe ser más grande que la demanda de corte correspondiente al caso examinado. Si es necesario un estimado, la capacidad de corte será incrementada de acuerdo a las provisiones de la Sección 4.3.

#### 4.2.2.2 Estado de la estructura previo al reforzamiento FRP

(1)P El esfuerzo en la estructura previo al reforzamiento FRP será considerado cuando FRP es aplicada.

(2) Cuando el momento aplicado debido a la carga existente,  $M_0$ , es más pequeño que el momento de fisuración, el estado deformado en la estructura inicial puede ser despreciado.

(3)P El estado deformativo en la estructura previo a la instalación de FRP puede ser calculado asumiendo el comportamiento elástico lineal del concreto y el acero y, asumiendo que el concreto no soporta tensión.

#### 4.2.2.3 Resistencia de diseño a flexión de los elementos reforzados con FRP

(1)P La resistencia de flexión es analizada de acuerdo a las hipótesis de la Sección 4.2.2.1, utilizando las ecuaciones de equilibrio a la translación y a la rotación.

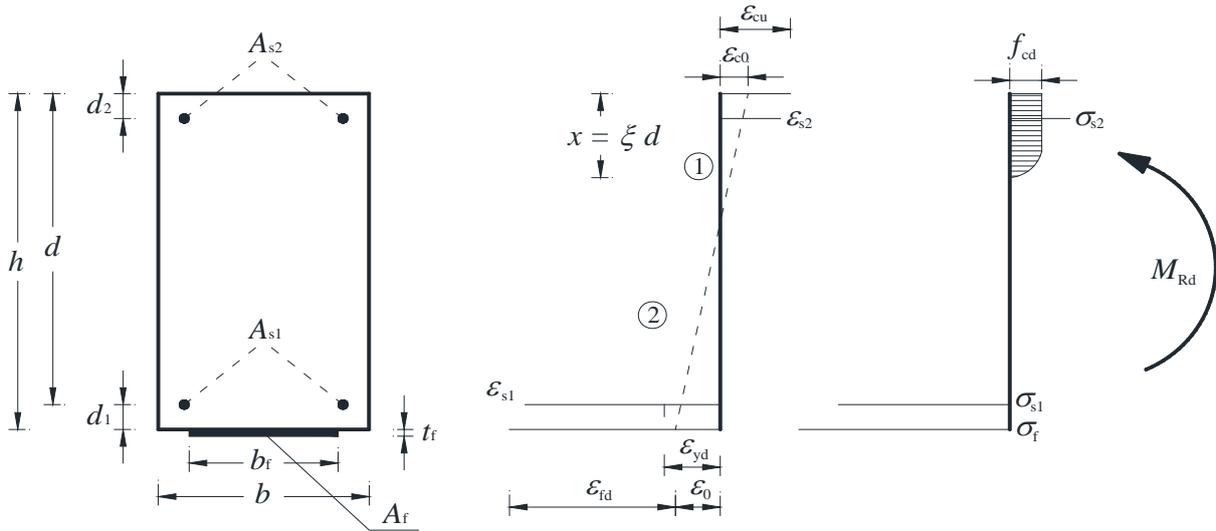
(2) Con referencia a la situación mostrada en la Figure 4-5, se pueden observar dos tipos de falla, dependiendo si la deformación última de FRP (región 1) o la deformación última de compresión del concreto (región 2) es alcanzada.

(3) En la Región 1, la falla ocurre debido a que se alcanza la deformación elástica límite de diseño del sistema FRP. Cualquier diagrama de deformación unitaria correspondiente a tal modo de falla tiene un punto fijado en el valor de la deformación unitaria del FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , como se define en la Ecuación(4.14).

La distribución de las deformaciones a lo largo de la profundidad de la sección del elemento debe ser lineal con el fin de satisfacer la hipótesis fundamental presentada con anterioridad en este capítulo. Deben ser calculadas como sigue:

- (FRP)  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$ ,
- (concreto en compresión)  $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$ ,
- (acero en compresión)  $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ ,
- (acero en tensión)  $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$ ,

Donde, todos los símbolos se muestran en la Figure 4-5. En particular, la posición del eje neutral,  $x$ , es identificada por su distancia desde la fibra de compresión extrema de la sección transversal del elemento;  $\varepsilon_{fd}$  se calcula por medio de la Ecuación(4.14);  $\varepsilon_{cu}$  representa la deformación unitaria última de compresión del concreto (deformación unitaria de diseño);  $\varepsilon_0$  es la deformación unitaria previo al reforzamiento FRP sobre el lado de la tensión y es calculado de acuerdo a la Sección 4.2.2.2.



**Figura4-5** –Modo de falla de un elemento RC reforzado con FRP.

Es comúnmente innecesario chequear el valor de la deformación unitaria última del acero porque los sistemas típicos FRP presentan valores de deformación unitaria última significativamente más pequeños comparados al del acero. Si la deformación unitaria máxima para el acero de acuerdo al código de construcción es excedida, esto será tomado en cuenta cuando se calcule la posición del eje neutro y así como del momento resistente de flexión del elemento.

(4) Cuando el diseño cae en la Región 2, la falla debido a la compresión del concreto (deformación unitaria última igual  $\epsilon_{cu}$ ) ocurre con la cedencia del acero en tracción, mientras la deformación unitaria del FRP no ha alcanzado su máximo valor. La distribución de las deformación unitarias sobre la profundidad del elemento debe ser lineal para satisfacer la hipótesis fundamental presentada al inicio de este capítulo. Ellos deben ser calculados de la siguiente manera:

- (FRP)  $\epsilon_f = \frac{\epsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$ ,
- (concreto en compresión)  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ ,
- (acero en compresión)  $\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$ ,
- (acero en tensión)  $\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$ .

(5) Para ambos modos de fallas, la posición del eje neutro,  $x$ , está usando la ecuación de equilibrio translacional como sigue:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f, \quad (4.15)$$

donde  $f_{cd}$  es igual al resistencia de diseño de compresión del concreto como indica la Sección 3.3.3(6). Cuando se refuerza una estructura joven, se puede aplicar un coeficiente de reducción para la resistencia a duración de largo plazo.

La resistencia a flexión,  $M_{Rd}$ , del elemento reforzado puede ser calculada la siguiente ecuación de equilibrio rotacional:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1], \quad (4.16)$$

donde, el factor parcial  $\gamma_{Rd}$  es igual a 1.00 Tabla 3-1, Sección 3.4.2.

En las Ecuaciones (4.15) y (4.16), los coeficientes no dimensionales  $\psi$  y  $\lambda$  representan la resultante de las tensiones de compresión dividida por  $b \cdot x \cdot f_{cd}$  y la distancia de la fibra extrema de compresión dividida por  $x$ .

(6) Ya que los materiales FRP tienen un comportamiento elástico lineal hasta el punto de falla, la tensión será tomada como el producto del módulo de Elasticidad normal y la deformación unitaria calculada.

#### 4.2.2.4 Resistencia de diseño de flexión de elementos reforzados con FRP en presencia de momento flector y fuerza axial (flexo-compresión)

(1)P Los principios introducidos en la Sección 4.2.2.1, desde (1) hasta (5), todavía se aplican. Sin embargo, la presencia de una fuerza axial,  $N_{Sd}$ , necesita ser considerada cuando se determine la resistencia de flexión del elemento,  $M_{Rd}$ .

(2)P La eficacia del reforzamiento en correspondencia a la zonal nodal columna-viga, debe ser garantizada por medio de la provisión de detalles constructivos adecuados.

(3) Los items (2) hasta (6) de la Sección 4.2.2.3 todavía se aplican a este caso. La Ecuación (4.15) ya no es igual a cero cuando exista una carga axial de diseño,  $N_{Sd}$ .

(4) Alternativamente, es posible determinar la resistencia de flexión del elemento debido a la carga combinada axial y la flexión de acuerdo a las provisiones del Apéndice E.

#### 4.2.2.5 Falla por despegamiento al extremo de la lámina/banda

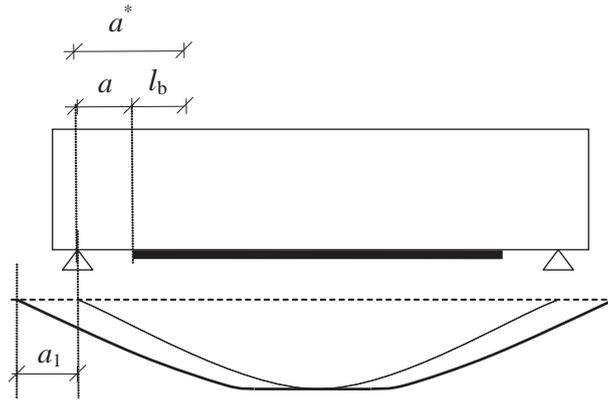
(1)P El despegamiento al extremo de la lámina/banda depende de varios parámetros tales como la localización de una fisura, el tipo de fisuras (fisuras por corte o por flexión), superficies irregulares de concreto, y concentración de tensión cerca de la zona de anclaje.

(2) En el caso del reforzamiento de flexión, una vez que se localiza el punto inicial de aplicación de la lámina/banda de FRP, la tensión de flexión bajo ELU en la sección transversal será limitada a la tensión máxima en el despegamiento al extremo. Este valor es una función de la longitud de pegado la cual depende de la distancia  $a^*$  (Figura 4-6). Para  $a^* \geq l_{ed}$  se recomienda el uso de longitud de pegado  $l_b \geq l_{ed}$  donde el esfuerzo de tensión máximo permitido en el FRP es igual a  $f_{fd}$  Ecuación (4.4). Si  $a^* < l_{ed}$ , la longitud de pegado es  $l_b < l_e$  y el esfuerzo de tensión máximo permitido es igual a  $f_{fd,rid}$  Ecuación (4.5).

(3) Cuando el extremo del sistema FRP está junto a los apoyos del elemento, y las fuerzas de corte puedan inducir a una fisura inclinada, el momento de diseño item (2) se incrementa y se determina como sigue:

$$M = V_{Sd} \cdot a_1, \quad (4.17)$$

donde  $V_{Sd}$  es la fuerza de corte factorada,  $a_1 = 0.9 \cdot d \cdot (1 - \cot \alpha)$ ;  $\alpha$  es el ángulo del refuerzo de acero transversal existente, y  $d$  es la profundidad efectiva del elemento (Figura 4-6).



**Figura4-6** –Variación del diagrama de momento flector.

(4) Cuando se usan dispositivos de anclaje especiales para evitar el despegamiento de la FRP en los puntos de terminación, provisiones previas serán dejadas de lado. Tales dispositivos de anclaje estarán garantizados y basados en pruebas experimentales propias. Las pruebas experimentales serán conducidas por el material asignado para tal aplicación (fibras adhesivas y de refuerzo), para el sistema específico usando (varillas transversales introducidas en el concreto, la envoltura en U con hojas FRP, etc.), para procedimientos de construcción recomendados por el fabricante o proveedor, para preparación de superficies, y para condiciones medioambientales esperadas.

(5) Cuando un momento negativo está presente en los extremos del elemento a ser reforzado, a menos que haya más información o adopción de dispositivos especiales de anclaje, la aplicación FRP será limitada al área de momento positivo, con  $a^*$  iniciando desde el punto de momento cero en la sección.

### 4.2.3 Análisis del comportamiento al Estado Límite de Servicio

#### 4.2.3.1 Asunciones

(1)P Esta sección trata de los siguientes estados límites de servicio:

- límites de tensión (Sección 4.2.3.2);
- control de deflexión (Sección 4.2.3.3);
- control de fisuración (Sección 4.2.3.4).

Otros estados límites de servicio pueden ser relevantes en situaciones particulares, no están enlistados en esta guía.

(2)P En el ELS los siguientes items serán chequeados:

- las tensiones serán controladas para evitar la cedencia del acero y provocar un fenómeno tanto en el concreto como en la FRP;
- excesiva deflexión no debería ocurrir para prevenir el uso normal de la estructura, daño inducido a los elementos estructurales, y daño potencial a los usuarios;
- excesivas fisuraciones podrían reducir significativamente la durabilidad de una estructura, su funcionalidad y consecuentemente el decrecimiento del funcionamiento de la adherencia de la interfase concreto-FRP.

(3)P El diseño en ELS puede ser implementado considerando la deformación unitaria en el

momento de la instalación de FRP. El principio de superposición puede ser usado para el diseño. Las asunciones de diseño son como siguen:

- las secciones transversales permanecen planas;
- el comportamiento del reforzamiento del acero y FRP es lineal elástico;
- el comportamiento del concreto es lineal elástico bajo compresión y tiene capacidad limitada para soportar esfuerzo de tensión, efecto de la *tension stiffening*, pueden ser considerados;
- existe una perfecta adherencia entre el acero y el concreto, y entre el concreto y FRP.

(4)P La primera asunción permite el uso de un valor constante para el módulo Elástico normal para cada material. La segunda implica la lineabilidad del diagrama de deformación unitaria. La tercera, así como la primera, usa la definición de las relaciones modulares ( $\sigma_s / \sigma_c = E_s / E_c = n_s$ ) y ( $\sigma_f / \sigma_c = E_f / E_c = n_f$ ). Tales relaciones modulares son usadas para transformar la actual viga en sección homogénea de concreto. Los valores de la relación modular serán establecidos para tomar en cuenta el flujo plástico (creep), así como condiciones a corto y a largo plazo.

(5)P Si es necesario, la tensión de servicio debido a cargas térmicas, flujo plástico, contracción del concreto, etc, debe ser añadido a la tensión inducida por las cargas aplicadas.

#### 4.2.3.2 Verificación de las tensiones

(1)P La tensión en servicio en el sistema FRP, calculada para la condición de carga casi permanente, deberá satisfacer la limitación  $\sigma_f \leq \eta \cdot f_{tk}$ , donde  $f_{tk}$  es la tensión característica del FRP a la falla y  $\eta$  es el factor de conversión como se sugiere en la Sección 3.5.

Las tensiones de servicio en el concreto y acero serán limitadas de acuerdo al código de construcción.

(2) En presencia de  $M_0$ , momento flector previo al reforzamiento FRP, y asumiendo que  $M_1$  es el momento flector después del reforzamiento FRP, la tensión debida al momento combinado  $M = M_0 + M_1$  puede ser evaluado como sigue:

- tensión en el concreto:  $\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}$ ,  $\sigma_{c0} = M_0 / W_{0,c}^s$ ,  $\sigma_{c1} = M_1 / W_{1,c}^s$ ;
- tensión en el acero:  $\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s0} = n_s \cdot M_0 / W_{0,s}^i$ ,  $\sigma_{s1} = n_s \cdot M_1 / W_{1,s}^i$ ;
- tensión en el FRP:  $\sigma_f = n_f \cdot M_1 / W_{1,f}^i$ .

donde (ver Figure 4-5):

- $W_{0,c}^s = I_0 / x_0$ : módulo de Resistencia de elementos de hormigón armado relacionados a la fibra extrema de compresión del concreto;
- $W_{0,s}^i = I_0 / (d - x_0)$ : el módulo de Resistencia para elementos hormigón armado relacionados con la tensión del acero;
- $W_{1,c}^s = I_1 / x_1$ : módulo de Resistencia de los elementos de hormigón armado reforzado relacionados a la fibra extrema de compresión del concreto;
- $W_{1,s}^i = I_1 / (d - x_1)$ : módulo de resistencia de elementos de hormigón armado reforzado relacionados a la tensión del acero;
- $W_{1,f}^i = I_1 / (h - x_1)$ : módulos de resistencia para elementos de hormigón armado

reforzadores relacionados al sistema FRP.

Cuando el momento aplicado,  $M_0$ , produce fisuras en el elemento de concreto, la determinación del eje neutro así como los del momento de inercia  $I_0$  e  $I_1$  deben ser calculados con respecto a la sección fisurada para condiciones no reforzadas y reforzadas, respectivamente.

#### 4.2.3.3 Control de deflexión

(1)P Las deflexiones exhibidas por estructuras reforzadas con FRP estarán de acuerdo a los requerimientos del código de construcción.

(2)P El modelo de deflexión adoptado simulará el comportamiento real de la estructura. Si es necesario, se tomará en cuenta las fisuraciones.

(3)P El modelo de deflexión adoptado debería tomar en cuenta lo siguiente:

- flujo plástico (creep) y contracción del concreto;
- rigidez del concreto entre las fisuras;
- fisuras existentes previo al reforzamiento con FRP.
- cargas térmicas.
- cargas estáticas y/o dinámicas.
- módulo de Elasticidad normal apropiado del concreto dependiendo del tipo de agregado y la curación del concreto al momento de la carga.

(4) Las deflexiones para vigas reforzadas con FRP pueden ser determinadas por la integración de los diagramas de curvatura. Tales diagramas pueden ser calculados con análisis no-lineales tomando en cuenta la rigidez-tensión del concreto.

Alternativamente, es posible realizar análisis simplificados, similares a los usados por vigas tradicionales de hormigón armado, si es que ellas están soportadas por un conveniente apoyo experimental.

#### 4.2.3.4 Control de fisuración

(1)P Para ELS, el ancho de fisuras será verificado para garantizar el uso apropiado de la estructura y proteger el acero de refuerzo interno.

(2) Las limitaciones del ancho de las fisuras para las estructuras reforzadas con FRP deberá satisfacer los requerimientos del código de construcción.

(3) Actualmente no existen modelos seguros y confiables para cálculo de ancho de fisuras de estructuras de concreto reforzadas con FRP. Varias formulaciones basadas en la experimentación están disponibles en literatura. Tales formulaciones modifican las expresiones usadas para secciones tradicionales de hormigón armado para considerar la presencia del reforzamiento externo. Evidencia experimental muestra que los elementos reforzados con FRP tienen fisuras más pequeñas y mínimamente espaciadas.

(4) Modelos más refinados y seguros pueden ser adoptados cuando se apoyen en resultados experimentales ad-hoc.

#### 4.2.4 Ductilidad

(1)P Para elementos que trabajan a flexión, la ductilidad es una medida de la capacidad del elemento de evolucionar en el rango plástico. Depende tanto del comportamiento de la sección y los modos reales de falla de la totalidad del elemento estructural. La ductilidad se incrementa con la cedencia del acero y la curvatura del elemento reforzado al iniciarse la falla. Puede ser considerado totalmente ausente si el despegamiento se inicia antes de cualquier otro mecanismo de falla.

### 4.3 REFORZAMIENTO PARA CORTE

#### 4.3.1 Generalidades

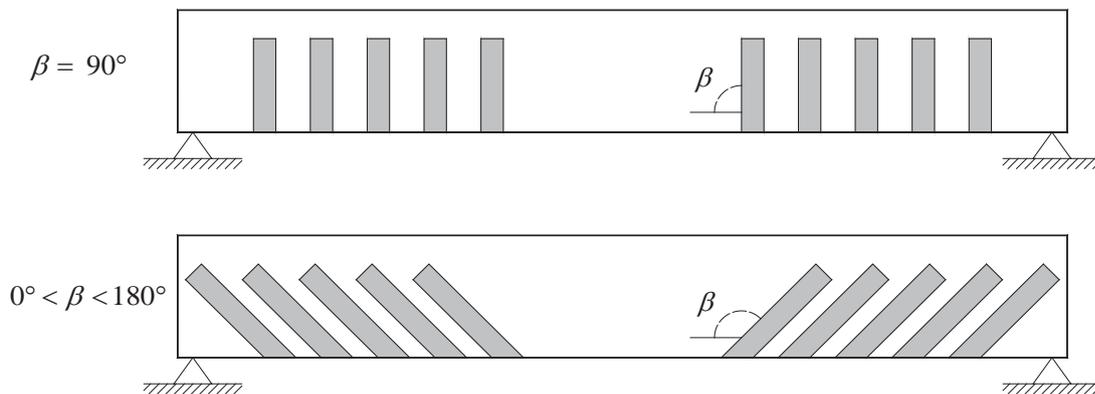
(1)P El reforzamiento paracorte es necesario cuando el esfuerzo de corte aplicado y calculado es más grande que la resistencia de corte del elemento correspondiente. Esta última será determinada considerando las contribuciones tanto del concreto como del reforzamiento transversal de las varillas de acero cuando están disponibles.

(2) El reforzamiento para corte será verificado sólo en ELU.

(3) Esta guía contiene configuraciones específicas donde se consideraron reforzamiento FRP al corte. Otras soluciones también son posibles, si su efectividad es probada y su contribución a la capacidad de corte es cuantificada.

#### 4.3.2 Configuraciones de reforzamiento

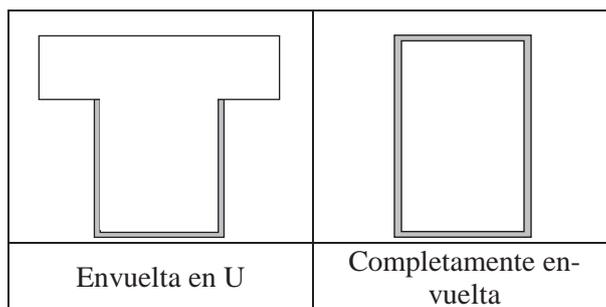
El reforzamiento paracorte se logra aplicando una o más capas de material FRP externamente pegado a la superficie del elemento a ser reforzado (Figura 4-7). El refuerzo externo FRP monodireccional o bidireccional (por ejemplo, tejido) puede ser aplicado en una forma discontinua, con intervalos entre franjas sucesivas, o continuas, con franjas adyacentes una a la otra.



**Figura4-7** –Vista lateral de reforzamiento FRP para corte.

(2) El diseño de reforzamiento FRP depende tanto de la geometría (espaciamiento, ancho y espesor de la FRP) y el ángulo de la fibra con respecto al eje longitudinal del elemento.

(3) La Figura 4-8 muestra configuraciones de refuerzo FRP: vigas envueltas en U o completamente envueltas.



**Figura4-8** –Vista lateral de reforzamiento FRP para corte.

(4) Para el reforzamiento en envoltura en forma de U de secciones rectangulares o en T, la delaminación de la porciones extremas del refuerzo FRP puede ser evitada usando láminas/bandas y/o varillas instaladas en la dirección del eje longitudinal de los elementos. En tal caso, el comportamiento del reforzamiento en forma de envoltura de U puede ser considerado equivalente a aquel elemento de envoltura completa, si la efectividad ofrecida por estos dispositivos es probada.

(5) El reforzamiento paracorte también puede ser conseguido a través de la instalación de varillas FRP en ranuras especiales hechas en la superficie externa del elemento a ser reforzado como reforzamiento montado cerca a la superficie. Este reforzamiento está indicado en este documento. Si se usa, su efectividad deberá ser soportado por resultados experimentales.

### 4.3.3 Resistencia de diseño corte de elementos reforzados FRP

#### 4.3.3.1 Resistencia de diseño al corte

(1) La resistencia de diseño al corte será evaluada como sigue:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \}, \quad (4.18)$$

donde  $V_{Rd,s}$ ,  $V_{Rd,f}$  y  $V_{Rd,c}$  son el acero, FRP y las contribuciones del concreto a la resistencia al corte, respectivamente. Las contribuciones para corte del acero y del concreto serán calculadas de acuerdo a (2) y (4) así como también por el código de construcción.

(2) En el caso del elemento de hormigón armado con una sección transversal rectangular y configuración de pegado lateral FRP, la contribución FRP a la resistencia al corte,  $V_{Rd,f}$ , será calculada como sigue:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{p_f}, \quad (4.19)$$

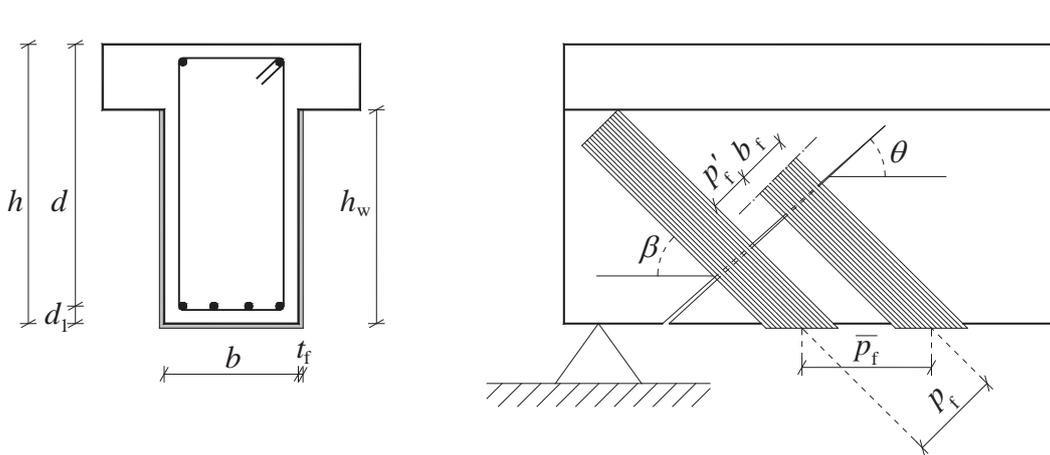
donde (Figura 4-9):

- $d$  es la distancia desde la fibra extrema de compresión al centroide de la tensión del refuerzo de acero.
- $f_{fed}$  es la resistencia eficaz de diseño del refuerzo paracorte FRP, como se establece en la Sección 4.3.3.2.
- $t_f$  es el espesor del refuerzo paracorte FRP.
- $b_f$  y  $p_f$  son respectivamente el ancho y al espaciamiento de las fuerzas FRP, medidas de forma

ortogonal a la dirección de las fibras ( $b_f/p_f = 1.0$  cuando las bandas de FRP son colocadas adyacentes unas a otras o en caso de elementos FRP bidireccionales).

- $\gamma_{Rd}$  está evaluado en la Tabla 3-1, Sección 3.4.2.

En la Ecuación (4.19),  $p_f$  puede ser sustituido con  $\bar{p}_f \cdot \sin \beta$ , donde  $\bar{p}_f$  es el espaciamiento de la banda de FRP medida a lo largo del elemento (Figura 4-9).



**Figura 4-9** –Notación para reforzamiento paracorte usando bandas de FRP.

- (3) Para el reforzamiento externo FRP en la forma de bandas, ancho de bandas,  $b_f$  (mm), y espaciamiento centro a centro entre bandas,  $p_f$  (mm) no excederán las siguientes limitaciones:  $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ ,  $y b_f \leq p_f \leq \min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$ .

El refuerzo externo FRP será sustituido con un sistema diferente en términos de geometría o características mecánicas cuando  $\min\{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$ .

- (4) Para elementos completamente envueltos que tenga una sección transversal circular con diámetro  $D$  y cuando las fibras están colocadas de forma ortogonal al eje del elemento ( $\beta = 90^\circ$ ), la contribución FRP a la resistencia al corte,  $V_{Rd,f}$ , será calculada como sigue:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta. \quad (4.20)$$

#### 4.3.3.2 Resistencia de diseño eficaz FRP

- (1) El despegamiento de FRP puede ser causado por concentraciones de tensión en la interfase concreto-FRP junto a las fisuras de corte (Sección 4.1.3). Un procedimiento simplificado considerando tal fenómeno requiere la introducción de la “tensión eficaz de diseño FRP” definida como la tensión de tracción esperada cuando comienza el despegamiento del FRP.

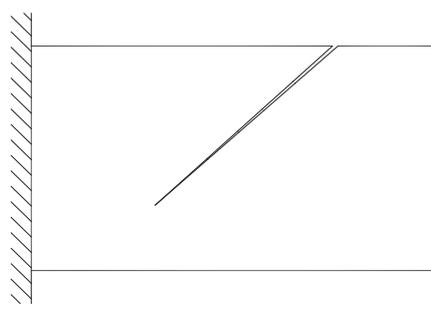
- (2) Para el pegamiento lateral de FRP a una sección transversal rectangular, la tensión eficaz de diseño FRP,  $f_{fed}$ , puede ser calculada como sigue:

$$f_{fed} = f_{idd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right], \quad (4.21)$$

donde  $f_{idd}$  es la tensión eficaz de diseño de despegamiento de FRP calculada de acuerdo a la

ecuación(4.4)y sigue las guías en el siguiente punto (4).  $l_{ed}$  es la longitud de diseño de anclaje dada en la Ecuación(4.1),  $\beta$  es el ángulo entre fibras y el eje longitudinal del elemento,  $d$  es la profundidad efectiva y  $h_w$  es la profundidad de la malla completamente impregnada con la envoltura en U.

Particular atención se le dará al caso de aplicaciones en volado (Figura 4-10), donde se recomienda usar anclaje o dispositivos mecánicos para la envoltura en U. En esta configuración,  $f_{fed}$  puede ser calculado usando la Ecuación (4.21)obviando el siguiente punto (3).



**Figura4-10** –Configuración de volado.

(3) Para elementos completamente envueltos que tengan secciones transversales rectangulares, la tensión eficaz de diseño FRP puede ser calculada como sigue:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[ 1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right], \quad (4.22)$$

donde  $f_{fdd}$  es la tensión eficaz de diseño FRP a ser evaluada como en la Ecuación (4.4), además:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b}, \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0.5, \quad (4.23)$$

donde  $r_c$  es el radio de la esquina de la sección a ser envuelta, y,  $b$  es el ancho del elemento. El segundo término de la Ecuación (4.22) será considerado solamente cuando es mayor que cero.

(4) Cuando se calcula  $k_b$  desde la Ecuación(4.3):

- $b = p_f$  por aplicación discreta de la banda FRP,
- $b = b_f = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$  para los sistemas FRP instalados en forma continua a lo largo de la longitud del elemento.

(5) Cuando se usan dispositivos especiales para anclar las porciones extremas de los sistemas envueltos con FRP en forma de U son probados igualmente tan efectivos como la configuración de reforzamiento totalmente envuelta, la tensión eficaz de diseño FRP puede ser calculada de la Ecuación (4.22). Si este no es el caso, la tensión eficaz de diseño FRP será calculada de acuerdo a la Ecuación(4.21).

(6) Para elementos completamente envueltos que tienen una sección transversal circular de diámetro  $D_y$  cuando las fibras están colocadas ortogonalmente al eje del elemento ( $\beta = 90^\circ$ ), la tensión efectiva de diseño FRP será calculada como sigue:

$$f_{\text{fed}} = E_f \cdot \varepsilon_{f,\text{max}}, \quad (4.24)$$

donde  $E_f$  es el módulo de Elasticidad normal para FRP, y  $\varepsilon_{f,\text{max}}$  representa la máxima deformación unitaria permitida en el FRP igual a  $5 \cdot 10^{-3}$ , a menos que se desarrolle un cálculo más detallado.

## 4.4 REFORZAMIENTO TORSIONAL

### 4.4.1 Generalidades

(1)P El reforzamiento torsional es necesario cuando el momento torsional de diseño y aplicado es mayor que la correspondiente resistencia torsional. La última será determinada considerando las contribuciones tanto del concreto como del refuerzo de acero transversal cuando estén disponibles.

(2) El reforzamiento torsional será verificado solamente en ELU.

(3) Las siguientes secciones de este documento contiene configuraciones específicas de aplicaciones de reforzamiento torsional de FRP. Otras soluciones también son posibles, si la efectividad es probada y al contribución a la capacidad de corte es cuantificada.

### 4.4.2 Configuraciones de reforzamiento

(1) El reforzamiento a torsión se logra por la aplicación de una o más capas de material FRP pegado externamente a la superficie del elemento a ser reforzado (Figura 4-7). El refuerzo externo puede ser aplicado entre bandas, o de forma continua con bandas adyacentes una a la otra.

(2) El diseño de reforzamiento FRP depende del espesor de FRP, de su ancho y de su espaciado. Las fibras serán colocadas en un ángulo de  $\beta = 90^\circ$  con respecto al eje longitudinal del elemento.

(3) El FRP será colocado alrededor de la sección transversal específicamente como un sistema envuelto completamente (Figure 4-8).

(4) El reforzamiento por torsión puede también ser logrado a través de un refuerzo montado cerca de la superficie definido como la instalación de varillas FRP en ranuras específicas hechas expresamente en la superficie exterior del elemento a ser reforzado. Si se lo usa, su efectividad será probada por resultados experimentales.

### 4.4.3 Resistencia de diseño torsional de elementos reforzados FRP

(1)P Lo siguiente aplica a los elementos prismáticos donde un área ideal resistente en forma de anillo puede ser identificada y donde la falta de capacidad torsional no es generada por defectos del refuerzos longitudinal del acero. Lo siguiente será aplicado:

$$T_{\text{Rd,l}} > \min \{ T_{\text{Rd,s}}, T_{\text{Rd,c}} \}, \quad (4.25)$$

donde  $T_{\text{Rd,l}}$ ,  $T_{\text{Rd,s}}$ ,  $T_{\text{Rd,c}}$  son: la resistencia del acero longitudinal existente, del acero vertical, y de las contribuciones del concreto a la capacidad torsional, respectivamente, de acuerdo al código de construcción.

#### 4.4.3.1 Resistencia de diseño torsional

(1) La resistencia de diseño torsional de los elementos reforzados FRP pueden ser evaluados como sigue:

$$T_{Rd} = \min \left\{ T_{Rd,s} + T_{Rd,f}, T_{Rd,l}, T_{Rd,c} \right\}, \quad (4.26)$$

donde  $T_{Rd,s}$ ,  $T_{Rd,l}$ ,  $T_{Rd,c}$  son previamente establecidos. La cantidad  $T_{Rd,f}$  es la contribución FRP a la resistencia de diseño torsional, evaluada por la condición siguiente.

(2) Si la Ecuación (4.26) resulta ser  $T_{Rd} = T_{Rd,s}$ ,  $T_{Rd,f}$  será calculada como sigue:

$$T_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 2 \cdot f_{fed} \cdot t_f \cdot b \cdot h \cdot \frac{b_f}{p_f} \cdot \cot \theta, \quad (4.27)$$

donde el factor parcial  $\gamma_{Rd}$  es igual a 1.20 (Tabla 3-1, Sección 3.4.2),  $f_{fed}$  es la resistencia efectiva de diseño FRP evaluada en la Sección 4.3.3.2,  $t_f$  es el espesor de la banda u hoja FRP,  $b$  y  $h$  son el ancho de la sección y la profundidad, respectivamente.  $\theta$  es el ángulo del tensor en compresión con respecto al eje longitudinal del elemento ( $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ),  $b_f$  y  $p_f$  son el ancho y el espacio de centro de las bandas FRP medidas ortogonalmente a la dirección de la fibra, respectivamente. Para las bandas FRP aplicadas en forma adyacente una a la otra, la relación  $b_f/p_f$  será igual a 1.0.

(3) Para refuerzo externo FRP en la forma de bandas discretas,  $b_f$  (mm), y el espacio de centro a centro entre bandas,  $p_f$  (mm), no excederá las siguientes limitaciones:  $50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm}$ ,  $b_f \leq p_f \leq \min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$ .

El reforzamiento externo FRP será sustituido con sistemas diferentes en términos de geometría o características mecánicas cuando  $\min \{0.5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$ .

(4) En caso de torsión combinada,  $T_{Sd}$ , y corte,  $V_{Sd}$ , se presenta la siguiente limitación:

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,c}} \leq 1, \quad (4.28)$$

donde  $T_{Rd,c}$  y  $V_{Rd,c}$  son establecidos previamente.

El reforzamiento para corte y torsión será calculado separadamente. El área total de reforzamiento está dada por la suma del área considera necesaria para reforzamiento para corte y torsión. El ángulo tensor en compresión,  $\theta$ , será considerado igual a  $45^\circ$  tanto para corte como para torsión.

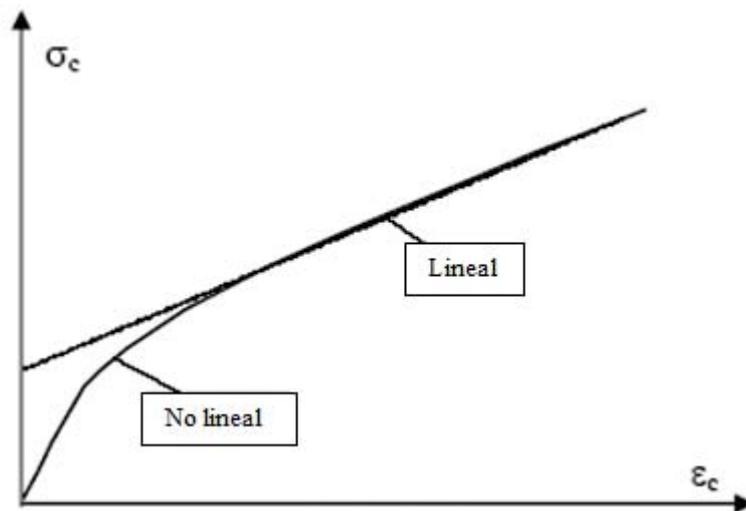
## 4.5 CONFINAMIENTO

### 4.5.1 Generalidades

(1) P El confinamiento apropiado para elementos de concreto reforzado puede mejorar el desempeño estructural. En particular, permite el incremento de lo siguiente:

- resistencia de diseño última y deformación unitaria máxima para elementos bajo esfuerzos axiales centrados o ligeramente excéntricos;
- ductilidad y también la resistencia de diseño bajo sollicitación combinada axial y de flexión, cuando está presente conjuntamente el uso de refuerzos longitudinal FRP (Sección 4.2.2.4 y Apéndice F).

- (2) El confinamiento de los elementos de hormigón armado puede ser logrado con bandas FRP aplicadas a lo largo del perímetro del elemento tanto en envoltura externa continua como discontinua.
- (3)P Un incremento en la resistencia de diseño axial y en la deformación unitaria última del concreto confinado con FRP depende de la presión de confinamiento aplicada. La última es una función de la sección transversal del elemento y la rigidez de FRP.
- (4)P La redistribución de las solicitaciones verticales no puede depender de la ductilidad de los elementos bajo una carga axial concéntrica o ligeramente excéntrica.
- (5)P El confinamiento FRP (FRP es lineal elástico hasta llegar a la falla), a diferencia del confinamiento del acero (el acero tiene un comportamiento elásto-plástico), ejerce una presión lateral sobre los elementos confinados que se incrementa con la expansión transversal de los elementos confinados.
- (6) Un diagrama típico de esfuerzo-deformación unitaria ( $\sigma-\varepsilon$ ) para pruebas de compresión desarrolladas sobre especímenes confinados con FRP se reportan en la Figura 4-11.



**Figura4-11** –Relación esfuerzo-deformación unitaria para concreto confinado con FRP.

- (7) Para valores de deformación unitaria axial,  $\varepsilon_c$ , hasta 2‰, la tensión en el concreto confinado es sólo ligeramente mayor que la exhibida por el concreto no confinado.
- (8) Para valores de esfuerzo axial mayores que 2‰, el diagrama esfuerzo-deformación unitaria es no-lineal y la curvatura de la correspondiente curva esfuerzo versus deformación unitaria decrece gradualmente y se acerca a un valor casi constante. En la sección lineal del gráfico, el concreto confinado gradualmente pierde su integridad debido a la abundante formación de fisuras.
- (9) La falla en el elemento confinado de hormigón armado es atribuido a la ruptura de la banda. Sin embargo, más allá de un valor crítico de deformación unitaria axial, el elemento confinado con FRP pierde de hecho la propia funcionalidad pudiendo absorber solo solicitaciones transversales insignificantes. Como resultado, la falla del elemento de hormigón armado confinado con FRP se alcanza cuando la deformación unitaria del FRP es igual al 4‰.
- (10) Los elementos confinados serán verificados usando solamente ELU.

#### 4.5.2 Resistencia de diseño a compresión axial o con pequeña excentricidad de elementos confinados

- (1) El confinamiento propio puede solamente ser logrado por medio de la instalación de bandas FRP colocado en posición ortogonal al eje del elemento.
- (2) Cuando el refuerzo FRP está instalado alrededor del perímetro del elemento en forma de espiral, la efectividad del confinamiento será evaluada apropiadamente.
- (3)P Si el sistema FRP adoptado no es inicialmente pretensionado, este ejerce un confinamiento pasivo sobre el elemento comprimido. La acción de confinamiento se hace significativa solo después de la fisuración del concreto y la cedencia del refuerzo de acero debido a la expansión lateral incrementada.
- (4)P El diseño en ELU de los elementos confinados con FRP requiere que tanto la carga axial de diseño,  $N_{sd}$ , y la capacidad axial de diseño,  $N_{Rcc,d}$ , satisfagan la siguiente condición:

$$N_{sd} \leq N_{Rcc,d} \quad (4.29)$$

- (5) Para elementos confinados con FRP no esbeltos, la resistencia axial de diseño puede ser calculada como sigue:

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd} \quad (4.30)$$

donde:

- $\gamma_{Rd}$  es el factor parcial igual a 1.10 (Tabla 3-1, Sección 3.4.2),
- $A_c$  y  $f_{ccd}$  representa el área de la sección transversal del elemento y la tensión de diseño del concreto confinado como se indica en el ítem (6), respectivamente,
- $A_s$  y  $f_{yd}$  representan el área y las tensiones de cedencia de diseño del refuerzo de acero existente (como se indica en la Sección 3.3.3(6)), respectivamente.

- (6) La resistencia de diseño,  $f_{ccd}$ , del concreto confinado será evaluada como sigue:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3} \quad (4.31)$$

donde:

- $f_{cd}$  es la resistencia de diseño del concreto no-confinado como se indica en la Sección 3.3.3(6),
- $f_{l,eff}$  la presión lateral de confinamiento efectivo como se define en la siguiente sección.

La Ecuación (4.31) será usada además para incluir el segundo objetivo mencionado en la Sección 4.5.1(1)P.

- (7) El confinamiento es efectivo si  $f_{l,eff} / f_{cd} > 0.05$ .

#### 4.5.2.1 Presión lateral de confinamiento

(1)P La efectividad de los elementos confinados FRP solo depende de una fracción de la presión lateral de confinamiento,  $f_1$ , ejercida por el sistema, llamada la presión lateral efectiva de confinamiento  $f_{l,eff}$ .

(2) La presión lateral efectiva de confinamiento,  $f_{l,eff}$ , es una función de la sección transversal del elemento y la configuración FRP como se indica en la siguiente ecuación:

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_1, \quad (4.32)$$

donde  $k_{eff}$  es un coeficiente de eficiencia ( $\leq 1$ ), definida como la relación entre el volumen del concreto confinado efectivamente,  $V_{c,eff}$ , y el volumen del elemento de concreto,  $V_c$ , sin tomar en cuenta el área del refuerzo interno de acero existente.

(3) La presión lateral de confinamiento será evaluada como sigue:

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}, \quad (4.33)$$

donde  $\rho_f$  es la relación geométrica de reforzamiento como una función de la forma de la sección (circular o rectangular) y de la configuración FRP (envoltura continua o discontinua),  $E_f$  es el módulo de Elasticidad normal de la FRP en dirección de las fibras, y  $\varepsilon_{fd,rid}$  es una deformación unitaria reducida de diseño de FRP.

(4) El coeficiente de eficiencia,  $k_{eff}$ , será expresado como:

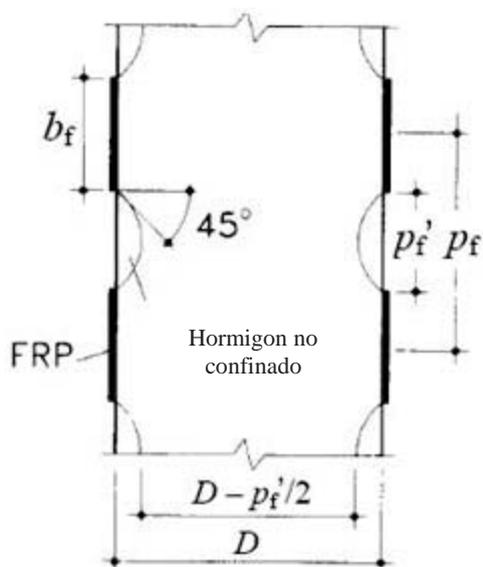
$$k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha. \quad (4.34)$$

(5) El coeficiente de eficiencia horizontal,  $k_H$ , depende de la forma de la sección transversal.

(6) El coeficiente de eficiencia vertical,  $k_V$ , depende de las configuraciones de FRP.

Para los elementos de hormigón armado confinados con envoltura continua de FRP, se asume que  $k_V = 1$ .

Para los elementos de hormigón armado confinados con envoltura de FRP discontinua (Figura 4-12), tales como bandas FRP instaladas con un espaciamiento centro a centro de  $p_f$  y espaciado de  $p'_f$ , reducción en la efectividad del confinamiento debido a la difusión de las tensiones (aproximadamente a 45°) entre dos envolturas subsecuentes serán consideradas.



**Figura4-12** –Confinamiento discontinuo en una sección circular confinada de diámetro D:  
sección vertical diametral

Sin tener cuenta de la forma de la sección, el coeficiente de eficiencia vertical,  $k_v$ , será asumido como sigue:

$$k_v = \left( 1 - \frac{p'_f}{2 \cdot d_{\min}} \right)^2, \quad (4.35)$$

donde  $d_{\min}$  es la mínima dimensión transversal del elemento.

(7) En caso de envoltura discontinua la distancia neta entre las bandas satisficera la limitación  $p'_f \leq d_{\min}/2$ .

(8) Sin tener cuenta de la forma de la sección, el coeficiente de eficiencia,  $k_\alpha$  a ser usado cuando las bandas son espiralmente instaladas con un ángulo  $\alpha_f$  con respecto a la sección transversal del elemento, será expresada como sigue:

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2}. \quad (4.36)$$

(9) La deformación unitaria reducida de diseño de FRP,  $\varepsilon_{fd,rid}$ , será calculada como sigue:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min\{\eta_a \cdot \varepsilon_{rk} / \gamma_f; 0.004\}, \quad (4.37)$$

donde  $\eta_a$  y  $\gamma_f$  representa el factor de conversión medioambiental y factor parcial sugerido en la Tabla 3-2 y en la Sección 3.4.1 respectivamente; el esfuerzo máximo permitido es 0.004 como se indicó en el ítem (9) en la Sección 4.5.1.

#### 4.5.2.1.1 Secciones circulares

(1)P El confinamiento con FRP es particularmente efectivo para secciones transversales circulares sujetas tanto a cargas concéntricas como a cargas axiales ligeramente excéntricas.

(2)P Las fibras instaladas transversalmente al eje longitudinal del elemento reforzado induce a una presión uniforme que se opone a la expansión radial del elemento cargado.

(3) La relación geométrica de reforzamiento,  $\rho_f$ , a ser usado para la evaluación de la presión efectiva de confinamiento en la Ecuación (4.33) será expresada como sigue:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f}, \quad (4.38)$$

donde (Figura 4-12)  $t_f, b_f$  y  $p_f$  representan el espesor de FRP, ancho y espaciamiento, respectivamente, y  $D$  es el diámetro de la sección transversal circular.

En el caso de envoltura continua,  $\rho_f$  se convierte en  $4 \cdot t_f / D$ .

(4) El coeficiente de eficiencia horizontal,  $k_H$ , es igual a 1.0.

(5) La dimensión  $d_{\min}$ , presentada en la Ecuación (4.35) para el cálculo del coeficiente de eficiencia vertical, es definida como el diámetro de sección.

#### 4.5.2.1.2 Secciones cuadradas y rectangulares

(1)P El confinamiento con FRP de elementos con secciones transversales cuadradas o rectangulares produce un incremento marginal de la fuerza de compresión de los elementos. En consecuencia, tales aplicaciones deberán ser cuidadosamente validadas y analizadas.

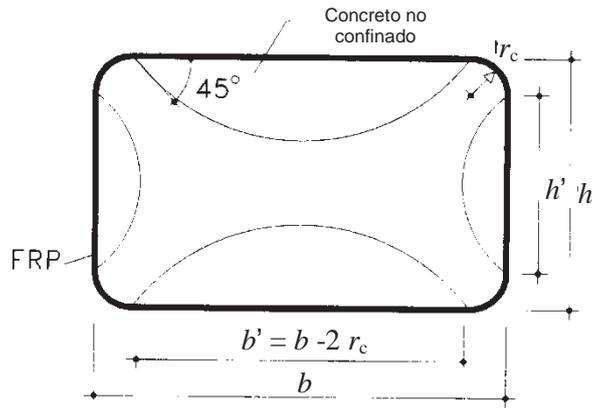
(2) La relación geométrica del reforzamiento,  $\rho_f$ , a ser usado para la evaluación de la presión efectiva de confinamiento será expresada como sigue:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f}, \quad (4.39)$$

donde  $t_f, b_f$  y  $p_f$  representan el espesor de FRP, su ancho y su espaciamiento, respectivamente, y  $b$  y  $h$  son las dimensiones de la sección transversal del elemento rectangular.

En el caso de envoltura continua  $\rho_f$  en la Ecuación (4.39) se convierte en  $2 \cdot t_f \cdot (b + h) / (b \cdot h)$ .

(3) El área efectiva del concreto confinado puede ser considerada como sólo una fracción de toda la sección transversal del concreto (Figura 4-13). La razón para este comportamiento es debido al “efecto arco” que se forma dentro de la sección del concreto. Tal efecto depende de los valores del radio  $r_c$  de la esquina (Sección 4.8.2.2).



**Figura4-13** –Confinamiento de secciones rectangulares.

(4) El coeficiente de eficiencia horizontal,  $k_H$ , el cual toma en cuenta el efecto de arco, será expresado como sigue:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g}, \quad (4.40)$$

donde  $b'$  y  $h'$  son las dimensiones indicadas en la Figura 4-13 y  $A_g$  es el área de la sección transversal.

(5) El efecto del confinamiento FRP no será considerado para secciones transversales rectangulares que tengan  $b/h > 2$ , o  $\max\{b, h\} > 900$  mm, a menos que se lo demuestre con resultados experimentales apropiados.

### 4.5.3 Ductilidad de los elementos a flexo-compresión confinados con FRP

(1)P El confinamiento con FRP puede también lograrse en elementos de concreto bajo flexión combinada y esfuerzo axial (esfuerzo axial con gran excentricidad). El confinamiento resultará en un incremento de la ductilidad mientras la resistencia axial del elemento puede solamente ser ligeramente incrementada.

(2) A menos que se desarrolle un análisis más detallado, la evaluación de la curvatura última de un elemento de concreto confinado con FRP bajo flexo-compresión puede ser compatible si se asume una aproximación parabólica rectangular para la relación esfuerzo-deformación unitaria, caracterizada por una deformación unitaria última  $\varepsilon_{ccu}$ , calculada de esta forma:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}}, \quad (4.41)$$

donde  $f_{cd}$  es la tensión de diseño del concreto no confinado y  $f_{l,eff}$  es la presión de eficacia de confinamiento. En la Ecuación (4.41), la presión eficaz es calculada asumiendo una deformación unitaria reducida de diseño FRP como sigue:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \leq 0.6 \cdot \varepsilon_{fk}. \quad (4.42)$$

(3) Una mejor determinación de la curvatura última y del incremento de resistencia de flexión

de los elementos reforzados con FRP pueden ser obtenidos con la ayuda de leyes constitutivas apropiadas del concreto confinado con FRP (Apéndice F), capaz de modelar más fielmente el comportamiento descrito en la Sección 4.2.2 y la Figura 4-11.

## 4.6 REFORZAMIENTO DE FLEXION DE ELEMENTOS DE CONCRETO PRESFORZADO

### 4.6.1 Uso de FRP para elementos de concreto pretensado y postensado

(1) P La resistencia de flexión de una estructura de concreto pretensado puede ser alcanzada por la aplicación de sistemas FRP no pretensados.

#### 4.6.1.1 Análisis del comportamiento al Estado Límite Último

(1) P La evaluación de la resistencia de flexión de los elementos pretensados sujetos a momento flector será llevada a cabo en los siguientes procedimientos, similares a los descritos en la Sección 4.2.2 para elementos de hormigón armado, con los siguientes cambios:

- la deformación unitaria de refuerzo pretensado es igual a la suma algebraica de la deformación unitaria del concreto que rodea el tendón más la deformación unitaria en el límite de descompresión,  $\bar{\epsilon}_p$ ; esta última representa la deformación unitaria exhibida por la armadura de pretensión, cuando, para una apropiada combinación de las tensiones en el concreto alrededor de la armadura son nulas. (Figura 4-14).
- Si la edad del concreto es tal para considerar haber agotado todo el fenómeno de largo plazo, la deformación unitaria inicial del concreto,  $\epsilon_0$  es igual a la deformación unitaria al momento de la instalación del FRP.
- Si el fenómeno de largo plazo en el concreto no puede ser considerado, el valor de  $\epsilon_0$  es la suma algebraica del valor calculado previamente más la deformación unitaria de largo plazo desarrollado en el substrato de concreto después de tener lugar el reforzamiento de FRP. Para la evaluación de una deformación unitaria de largo plazo, así como cualquier pérdida de pre-tensión, la presencia del sistema de reforzamiento puede ser despreciada.

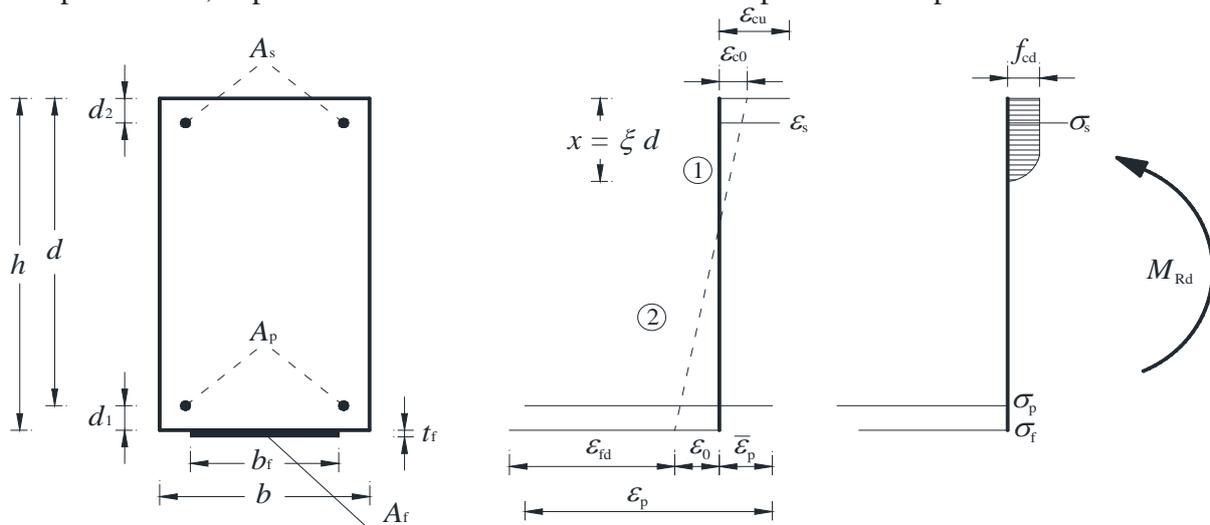


Figura 4-14 – Modo de falla de un elemento reforzado pretensado.

(2) P El alcanzar el ELU debe ser precedido por la cedencia de la armadura de precompresión.

(3) Para mecanismos de falla por despegamiento, referirse a las Secciones 4.1 y 4.2.

#### 4.6.1.2 Análisis del comportamiento en el Estado Límite de Servicio

(1)P En condiciones de servicio las tensiones de trabajo del concreto, del acero y del refuerzo de FRP deben satisfacer las limitaciones previstas en el código de construcción y en forma particular, en lo que se refiere al refuerzo de FRP, de acuerdo con la Sección 4.2.3.2.

(2) Normalmente no se debe tener en cuenta la contribución de refuerzo si es comprimido de forma temporal (por ejemplo a continuación de deformación viscosa del concreto).

### 4.7 DISEÑO PARA APLICACIONES SISMICAS

#### 4.7.1 Generalidades

(1)P Se permitirá reforzar elementos de hormigón armado y los elementos de hormigón pretensado con compuestos FRP cuando la estructura falle en cumplir los requerimientos especificados en el código de construcción.

Esta sección reconoce las provisiones del código de construcción así como las indicaciones provistas por literatura actualizada relacionada a construcciones sísmicas; particular importancia se le da a lo siguiente:

- evaluación de seguridad sísmica;
- requerimientos de seguridad (verificación de estados límite);
- niveles de protección sísmica (magnitud de la acción sísmica asociada);
- métodos de análisis;
- criterio de verificación (distinción entre elementos dúctiles y frágiles);
- características del material.

#### 4.7.2 Principios generales para reforzamiento FRP

(1)P Cuando se usa material FRP para el reforzamiento, los siguientes principios serán considerados:

- remover todos los mecanismos de colapso tipo frágiles(Sección 4.7.2.1);
- remover todos los mecanismos de colapso de piso(“piso blando”) (Sección 4.7.2.2).
- incrementar la capacidad de deformación total de la estructura a través de uso de los siguientes mecanismos(Sección 4.7.2.3):
  - incremento de la capacidad rotacional de las rótulas plásticas potenciales sin cambiar su posición(Sección 4.7.2.3.1);
  - relocalización de las rótulas plásticas potenciales siguiendo el criterio de jerarquía de resistencia,(Sección 4.7.2.3.2).

(2) El tipo y tamaño de sistemas seleccionados FRP, así como la urgencia de instalación FRP tomarán en cuenta lo siguiente:

- irregularidades constructivas mayores (en términos de resistencia y/o rigidez) no pueden ser eliminadas usando FRP como técnica de reforzamiento;
- una mejor regularidad de resistencia puede ser obtenida por el reforzamiento de un número limitado de elementos;
- el incremento de la ductilidad local siempre es ventajoso;
- el reforzamiento localizado no debe reducir la ductilidad total de la estructura.

#### 4.7.2.1 Prevención de mecanismos de colapso frágil

(1)P Deben ser eliminados los mecanismos que producen:

- fallas por corte;
- fallas en columnas por la pérdida de adherencia de las varillas en la zona de superposición;
- fallas en las columnas por pandeo de las varillas longitudinales en compresión;
- fallas por tracción de los paneles de los nudos viga-columna.

##### 4.7.2.1.1 Falla por corte

(1)P El incremento en la capacidad de corte se logrará por medio de la instalación de sistemas FRP con las fibras orientadas perpendicularmente al eje del elemento ( $\beta = 90^\circ$ ) y, si es aplicable, además en otras direcciones.

##### 4.7.2.1.2 Falla de columnas debido a pérdida de adherencia en acero de refuerzo

(1) El deslizamiento del refuerzo de acero existente en columnas de hormigón armado en los sitios de traslape puede ser evitado por medio del confinamiento de la sección transversal del elemento con FRP.

(2) Para las secciones circulares de diámetro  $D$ , el espesor de la FRP que confina la sección transversal del elemento será evaluada como sigue:

$$t_f = \frac{D \cdot (f_1 - \sigma_{sw})}{2 \cdot 0.001 \cdot E_f}, \quad (4.43)$$

donde:

- $\sigma_{sw}$  representa tensión de tracción en el estribo que corresponde al 0,1 % de la deformación unitaria o a la presión de inyección del mortero entre el refuerzo FRP y la columna de hormigón armado, si está presente;
- $f_1$  representa la presión de confinamiento en la zona de superposición con una longitud,  $L_s$ , igual a:

$$f_1 = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\left[ \frac{u_e}{2 \cdot n} + 2 \cdot (d_b + c) \right] \cdot L_s}, \quad (4.44)$$

donde  $f_{yd}$  es la tensión de diseño de la varilla de acero, evaluada como se ha indicado en Sección 3.3.3(6);  $u_e$  es el perímetro de la sección transversal dentro del polígono que circunscribe las varillas longitudinales que tienen un diámetro promedio  $d_b$ ;  $n$  es el número de varillas traslapadas a lo largo de  $u_e$  y  $c$  es el recubrimiento de concreto.

(2) Para secciones rectangulares  $b$  y  $h$ , la Ecuación (4.43) y (4.44) serán determinadas sustituyendo  $D$  con  $\max\{b, h\}$  y reduciendo la efectividad del confinamiento FRP por el uso de  $k_H$  como se define en la Sección 4.5.2.1.2.

##### 4.7.2.1.3 Falla de columnas debido a pandeo de varillas de acero longitudinal

(1) El pandeo del refuerzo de acero vertical existente en las columnas de hormigón armado puede ser evitada por el confinamiento de la sección transversal del elemento con FRP.

(2) El espesor de dicho confinamiento FRP será evaluado como sigue:

$$t_f = \frac{0.45 \cdot n \cdot f_{yd}^2 \cdot d}{4 \cdot E_{ds} \cdot E_f} \approx \frac{10 \cdot n \cdot d}{E_f}, \quad (4.45)$$

donde:

- $n$ , representa el número total de varillas longitudinales sujetas a pandeo;
- $f_{yd}$ , es la tensión de diseño de las varillas de acero longitudinal (Sección 3.3.3(6));
- $d$ , la dimensión de la sección transversal paralela al plano de flexión;
- $E_f$ , el módulo de Elasticidad normal del refuerzo FRP en la dirección de las varillas verticales de acero existente;
- $E_{ds}$ , “módulo reducido” de las varillas de acero definido como sigue:

$$E_{ds} = \frac{4 \cdot E_s \cdot E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2}, \quad (4.46)$$

donde  $E_s$  y  $E_i$  son el módulo de Elasticidad normal y el módulo Tangente de elasticidad de las varillas verticales al inicio del campo plástico.

#### 4.7.2.1.4 Falla debido a tracción de los paneles en la unión viga-columna.

(1) Las uniones viga-columna de los elementos de hormigón armado pueden ser efectivamente reforzadas con FRP solamente cuando el refuerzo FRP es aplicado con las fibras que corren en la dirección de los esfuerzos de tensión principales y si es que el refuerzo FRP está anclado apropiadamente. En cualquier caso, la deformación unitaria máxima para el refuerzo FRP no será mayor que 4%. Cuando el refuerzo FRP no está apropiadamente anclado, el reforzamiento FRP no es considerado efectivo.

#### 4.7.2.2 Remoción de mecanismo de colapso de todo el piso

(1)P Los mecanismos de colapso del piso usualmente empiezan después de la formación de las rótulas plásticas en la parte alta de las columnas y sitios bajos de las estructuras con paredes no verticales. En este caso, el reforzamiento FRP está desarrollado para incrementar la capacidad de flexión de las columnas con la intención de procurar la formación de rótulas plásticas.

#### 4.7.2.3 Incremento de la capacidad total de deformación de una estructura

(1)P La capacidad máxima de deformación de una estructura es una medida de su habilidad para resistir fuerzas sísmicas y depende de la capacidad de deformación de cada uno de los elementos resistentes (vigas, columnas y paredes).

##### 4.7.2.3.1 Incremento de la capacidad deformativa local de los elementos de hormigón armado

(1) La capacidad de deformación de las vigas y columnas puede ser medida a través de la rotación  $\theta$  del extremo de la sección final en comparación a la línea generada entre la sección de momento cero y la sección extrema (rotación de cuerda) a una distancia igual al valor de corte:  $L_v = M/V$ . Esta rotación también es igual a la relación del desplazamiento relativo entre las dos secciones arriba mencionadas y el valor de corte.

(2)P La capacidad de deformación de elementos de hormigón armado en el rango plástico está limitado por la falla del concreto en compresión. El confinamiento FRP incrementa la capacidad última de deformación del concreto comprimido y favorece la ductilidad del elemento reforzado.

#### 4.7.2.3.2 Reubicación estratégica de rótulas plásticas- Criterio de diseño

(1)P La aplicación del criterio de diseño de la capacidad (jerarquía de resistencia) implica la adopción de mecanismos tales como prevenir la formación todas las rótulas plásticas potenciales en las columnas. En el caso de “viga fuerte-columna débil”, típico de las estructuras diseñadas para cargas verticales solamente, las columnas están sub-diseñadas debido a la falta de refuerzo longitudinal. En este caso, es necesario incrementar la capacidad de la columna bajo flexión combinada y carga axial hacia una situación “columna fuerte-viga débil”.

(2)P Cuando el refuerzo FRP es usado para incrementar la capacidad flexional de un elemento, es importante verificar que el elemento es capaz de resistir las fuerzas de corte asociadas con la fuerza de flexión incrementada. Si es necesario, el reforzamiento al corte será tomado en cuenta para evitar fallas prematuras por fragilidad.

#### 4.7.2.3.3 Rotación última de elementos reforzados

(1) La evaluación de la rotación maximade la cuerda,  $\theta_v$ , de un elemento reforzado con confinamiento FRP, será evaluada imponiendo la máxima deformación unitaria del concreto confinado,  $\varepsilon_{ccu}$ , como se establece en la Sección 4.5.3.

### 4.8 INSTALACION Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

(1)P Algunos aspectos tienen influencia sobre la efectividad del material FRP usado como sistemas externamente pegados para reforzamiento de elementos hormigón armado. Sumado a aquellos que se trataron en capítulos anteriores, la preparación de la superficie y la instalación FRP será tratada en esta sección.

#### 4.8.1 Control y preparación del sustrato

(1) El control de calidad del sustrato implica la determinación de las condiciones del concreto, la remoción de cualquier concreto deteriorado o suelto, la limpieza y protección de la corrosión del refuerzo de acero existente, y la preparación del sustrato para recibir el refuerzo FRP.

(2) Cuando se usan dispositivos especiales para anclar apropiadamente el sistema seleccionado FRP, prueba de tales dispositivos será conducida de acuerdo a los documentos estandarización disponibles. Los dispositivos de anclaje serán instalados de acuerdo a las especificaciones del fabricante o proveedor reconociendo tanto el material usado como la preparación de la superficie, condiciones medioambientales, y secuencia de cada fase. La investigación también evaluará los efectos de tales parámetros en el resultado final.

##### 4.8.1.1 Evaluación del deterioro del sustrato

(1) Previo a la aplicación de FRP, el diseñador y el gerente de construcción verificará la calidad del sustrato de concreto siguiendo la prescripción del Capítulo 6. En cualquier caso, la resistencia a compresión del concreto no será menor que  $15 \text{ N/mm}^2$ .

(3) Se sugiere desarrollar tests de control de calidad en toda el área a ser reforzada.

(4)

#### **4.8.1.2 Remoción del concreto defectuoso, restauración del sustrato de concreto y protección del refuerzo existente de acero**

(1) El sustrato de concreto puede haber estado sometido a deterioro físico-químico o de impacto. El concreto deteriorado será removido de todas las áreas dañadas.

(2) La remoción del concreto en mal estado permite la evaluación de las varillas de acero de refuerzo existentes. Las varillas de acero oxidadas serán protegidas de mayor corrosión con el fin de eliminar una posible fuente de deterioro del concreto restaurado.

(3) Una vez que todo el concreto deteriorado ha sido removido, se han tomado las medidas adecuadas para prevenir una mayor corrosión del refuerzo de acero existente y otros fenómenos que causen la degradación del concreto (*por ejemplo*, filtraciones de agua), la restauración del concreto será realizada usando lechadas de cemento libre de encogimiento por la edad.

La rugosidad de la superficie del concreto mayor a 10 mm será nivelada con una pasta epóxica compatible; el material de relleno específico será usado para espesores mayores a 20 mm. Además, las rajaduras más anchas que 0.5 mm dentro del concreto sólido en el sustrato serán estabilizadas usando métodos de inyección epóxica antes que el reforzamiento FRP pueda tener lugar.

#### **4.8.1.3 Preparación del sustrato**

(1) Una vez que el control de calidad del sustrato ha sido realizado, el concreto deteriorado ha sido removido, la sección transversal del concreto ha sido restaurada, y el refuerzo de acero existente ha sido tratado apropiadamente, la superficie del concreto será afinada con chorro de arena. El afinado con chorro de arena proveerá un grado de rugosidad de por lo menos 0.3 mm; y el nivel de rugosidad puede ser medido usando instrumentos apropiados (*por ejemplo*, un perfilómetro laser o un dispositivo óptico que mide el perfil)

(2) Las superficies pobres de concreto que no requieren trabajo de remediación antes de la aplicación FRP, deberán ser tratadas con un agente consolidante antes de que tenga lugar la primera aplicación.

(3) La limpieza de la superficie de concreto removerá cualquier suciedad, polvo, aceite, lubricantes de superficie, partículas extrañas o cualquier otro material inhibidor de pegado.

(4) Todas las esquinas interiores y exteriores y bordes filosos deberán ser redondeados o reducidos a un radio mínimo de 20 mm.

### **4.8.2 Recomendaciones para la instalación**

(1) El reforzamiento FRP de los elementos RC es altamente dependiente de la temperatura ambiental y de la humedad así como de las características del sustrato de concreto.

#### **4.8.2.1 Condiciones de humedad y temperatura en el medioambiente y en el sustrato**

(1) Se sugiere no instalar material FRP cuando el medioambiente es muy húmedo. Un alto grado de humedad puede retrasar el curado de la resina y afectar el desarrollo total del sistema de reforzamiento específicamente para aplicaciones de colocado húmedo.

(2) Los sistemas FRP serán instalados en condiciones de humedad y temperatura como se define en la hoja de datos de los materiales.

(3) Si el curado de refuerzo FRP tiene lugar en condiciones de lluvia, asoleamiento fuerte, grandes variaciones de temperatura, o en presencia de polvo, se deben emplear medidas de protección para asegurar un curado apropiado.

#### **4.8.2.2 Detalles de construcción**

(1) La longitud de anclaje de por lo menos 200 mm será provista por la porción extrema de sistemas FRP usada para reforzamiento de elementos. Alternativamente, se pueden usar conectores mecánicos.

(2) En instalaciones para corte, torsión y confinamiento, y previo a la aplicación FRP, los extremos de la sección transversal serán redondeados para evitar concentraciones de tensión que pudieran resultar en una falla prematura del sistema. El radio de la esquina será mínimo de 20 mm.

(3) El alineamiento propio de las fibras será provisto para aplicación húmeda in-situ. La ondulación del refuerzo FRP será también evitada durante la instalación.

(4) Cuando el refuerzo de fibra de carbón es usado para el reforzamiento de elementos RC y hay potencial para el contacto directo entre el carbón y el refuerzo de acero existente, capas de material de aislamiento serán instaladas para prevenir que ocurra una corrosión galvánica.

(5) Cuando se realizan pruebas semi-destructivas, se sugiere proveer áreas de reforzamiento adicional (“áreas testigo” o “áreas de prueba”) en partes seleccionadas de la estructura que tiene dimensiones de por lo menos  $500 \times 200 \text{ mm}^2$ , con una extensión mínima de  $0.1 \text{ m}^2$  pero no menos de 0.5% del área total reforzada. Las pruebas de las áreas serán realizadas al mismo tiempo que la principal instalación de FRP, usando los mismos materiales y procedimientos en áreas donde la remoción del sistema de reforzamiento FRP no implique alteración de los mecanismos de falla. A eso se suma que las áreas testigo estarán expuestas a las mismas condiciones medioambientales como el principal sistema FRP y serán uniformemente distribuidas sobre la estructura reforzada.

#### **4.8.2.3 Protección del sistema FRP**

(1) Para aplicaciones FRP en exteriores, es recomendado proteger el sistema FRP de la luz solar directa, la cual puede producir alteraciones físico-químicas en la matriz epóxica. Esto puede ser logrado mediante el uso de pintura acrílica de protección si limpia la superficie de los compuestos con una esponja y jabón.

(2) Alternativamente, se puede lograr mejor protección aplicando una capa de empaste o mortero (preferentemente basado en cemento) al sistema de reforzamiento instalado. El empaste, cuyo espesor es recomendado por el fabricante o por el proveedor, será colocado en el sistema de reforzamiento después de tratar la superficie por medio de aplicaciones de la resina epóxica con subsecuente cuarzo espolvoreando en fresco.

(3) Para protección contra el fuego, dos soluciones diferentes pueden ser adoptadas: el uso de paneles intumescentes o la aplicación de empastes protectores. En ambos casos, el fabricante o proveedor indicará el grado de protección contra el fuego como función del espesor del panel o del empaste. Los paneles, generalmente basados en silicatos de calcio, son aplicados directamente al sistema FRP simple y cuando las fibras no sean cortadas durante la instalación. Los empastes protectores representan la solución más ampliamente adoptada para protección contra el fuego y será aplicada como se indica en el ítem(2).

#### **4.9 EJEMPLOS NUMERICOS**

Algunos ejemplos numéricos de reforzamiento FRP de las estructuras RC son reportadas en el Apéndice G.

## 5 REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

### 5.1 GENERALIDADES

#### 5.1.1 Objeto y ámbito de aplicación

(1)P Este capítulo especifica recomendaciones de diseño para elementos de mampostería estructural reforzada con FRP.

(2)P El objetivo primario del reforzamiento FRP es incrementar la resistencia de la estructura de la mampostería. Cuando sea posible, el incremento del desplazamiento estructural compatible a la falla es también recomendado.

#### 5.1.2 Reforzamiento de edificios históricos y monumentales

(1)P El reforzamiento de edificios y monumentos históricos será justificado y cuidadosamente detallado. La técnica de reforzamiento adoptada estará de acuerdo con la teoría de la restauración(ver Sección3.1(3)).

#### 5.1.3 Criterio de diseño de reforzamiento FRP

(1) Las metodologías de reforzamiento expuestas en este documento consisten en la aplicación de materiales FRP en forma de láminas, hojas, bandasuni y bidireccional, y varillas instaladas en los elementos por adhesión o por medio de dispositivos de anclaje mecánicos. El refuerzo FRP puede ser aplicado a las superficies externas de la estructura de mampostería así como en ranuras o hendiduras cortadas en la misma mampostería.

(2) El reforzamiento FRP puede ser empleado por las siguientes razones:

- aumento de la resistencia en paneles, arcos y bóvedas;
- confinamiento de columna con el fin de incrementar la capacidad de compresión y ductilidad.
- la conexión entre elementos (bóveda y nudos de pared, conexiones entre paredes ortogonales, etc.);
- transformación de elementos no estructurales en un elemento estructural que provee rigidez y resistencia adicionales;
- limitación del ancho de fisuras.

(3)P Las aplicaciones de reforzamiento siempre estarán relacionadas al comportamiento total de la estructura consolidada.

(4) El diseño del refuerzo FRP asegurará que el sistema seleccionado esté siempre en tracción. En efecto, la FRP en compresión es incapaz de incrementar el comportamiento del elemento de la mampostería reforzada debido a su pequeña área comparada con la de la mampostería comprimida. Además, la FRP en compresión puede estar sujeta al despegamiento debido a la inestabilidad local.

(5) Para estructuras de mampostería reforzada con FRP y sujetas a cargas cíclicas (*por ejemplo*, sísmicas, variaciones térmicas), la adhesión entre mampostería y FRP puede degradarse notablemente durante el tiempo de vida de la estructura.

En tal caso, podría ser necesario anclar apropiadamente el sistema FRP a la mampostería ya sea

insertando el refuerzo FRP en ranuras convenientes para prevenir la inestabilidad local o aplicar dispositivos de anclaje mecánico.

(6) El reforzamiento mecánico será aplicado a elementos estructurales que tienen propiedades mecánicas adecuadas. Si la mampostería está dañada, no es uniforme, o está fisurada, será reparada con técnicas apropiadas. La selección del material de reforzamiento apropiado (FRP de carbón, de vidrio o arámidico) también tomará en cuenta las propiedades físico-químicas de la mampostería (mayores detalles serán discutidos en la Sección 5.8).

(7) El refuerzo FRP que envuelve completamente al elemento reforzado puede prevenir absorción de humedad. Tales sistemas FRP no deben ser aplicados continuamente sobre áreas extensas de la pared para asegurar la transpirabilidad.

## **5.2 VALIDACION DE LA SEGURIDAD**

### **5.2.1 Modelación estructural**

(1)P El diseño de refuerzo FRP estará basado en un esquema estructural que representa el comportamiento del edificio para el uso futuro esperado.

(2) La estructura puede ser modelada a través de modelos no lineales probados, capaces de simular el comportamiento inelástico y la resistencia a tracción de la mampostería, la cual es despreciable. Los modelos elásticos lineales pueden ser también usados si están de acuerdo con el siguiente ítem (3). La modelación estructural será usada para evaluar fuerzas internas actuando en la mampostería.

(3) Esquemas simplificados pueden también ser usados para describir el comportamiento de la estructura. Por ejemplo, si los esfuerzos de tensión son directamente absorbidos por el sistema FRP, el nivel de tensión puede ser determinado adoptando una distribución simplificada de tensiones que satisface las condiciones de equilibrio pero no necesariamente la congruencia. El uso de distribuciones simplificadas de esfuerzo debería ser cuidadosamente escogido puesto que un nivel estáticamente satisfactorio de tensión podría corresponder un colapso debido al tipo frágil de la mampostería.

(4) En el caso de estructuras con partes regulares o repetitivas, esquemas estructurales parciales pueden ser identificados para permitir una rápida evaluación del comportamiento total de la estructura reforzada.

(5) Los modelos simplificados pueden ser adoptados para verificaciones de mecanismos locales de falla, si su uso está correctamente motivado. En estos casos, el método de análisis de límite es de ayuda.

### **5.2.2 Criterios de verificación**

(1)P Modos posibles de falla de paredes de mampostería reforzadas con sistemas FRP pueden ser resumidos como sigue:

- excesivo fisuramiento debido a esfuerzos tensionales en la pared;
- aplastamiento de la mampostería.
- corte-deslizamiento de la mampostería.
- ruptura del FRP.

- despegamiento de FRP.

Los modelos de falla de las estructuras de mampostería reforzadas con FRP usualmente involucran una combinación de los mecanismos arriba mencionados.

### 5.2.3 Verificación de la seguridad

(1)P La mampostería puede ser considerada un material no isotrópico que exhibe una conducta no lineal. La relación esfuerzo-deformación unitaria puede variar muy significativamente dependiendo si la estructura está construída con bloques artificiales o naturales así como el tipo de mortero empleado.

(2) La mampostería exhibe un comportamiento frágil cuando está sujeto a carga de tensión; además, la correspondiente resistencia a la tensión es insignificante comparada con su resistencia a la compresión. Para propósitos de diseño, es aceptado desprestigiar la resistencia a la tensión de la mampostería.

(3)P Las pruebas de laboratorio muestran que el diagrama esfuerzo-deformación unitaria de la mampostería de bloques sujetos a carga de compresión pueden ser descritas como sigue:

- valores lineales para deformaciones unitarias pequeñas;
- no lineal a medida que la carga incrementa hasta el valor máximo;
- no lineal decreciente para valores mayores a la máxima deformación unitaria, con ablandamiento (softening) por el cual la resistencia del material disminuye.

(4)P El comportamiento de la mampostería por carga de compresión también depende de la disponibilidad del confinamiento transversal. Por el incremento del confinamiento transversal, la fuerza y la ductilidad del material se mejora.

(5)P La resistencia de corte de la mampostería depende de la compresión aplicada que ayuda a la cohesión y fricción del material.

(6) La mampostería en sitio está caracterizada por valores promedio de propiedades mecánicas (Sección 3.3.3(6)). En el caso de mampostería con los bloques pegados con mortero, los valores para la resistencia son como sigue:

- resistencia a compresión vertical,  $f_{mm}$ ;
- resistencia a compresión horizontal,  $f_{mm}^h$ ;
- resistencia a corte,  $f_{vm}$ .

Un valor de referencia de  $f_{mm}^h$  puede ser asumido como 50% de  $f_{mm}$ .

(7) Los valores de las propiedades mecánicas estarán de acuerdo con la Sección 3.3.3.

(8) Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería, la ley constitutiva de mampostería de esfuerzo-deformación unitaria, para estados tensionales monoaxiales, puede ser esquematizada como sigue:

- resistencia a tracción nula;
- compresión: comportamiento lineal hasta la resistencia de diseño,  $f_{md}$ , a la cual corresponde

el valor  $\bar{\varepsilon}_m$  de la deformación; tensión nula para deformaciones mayores a aquella última  $\varepsilon_{mu}$ , tensión constante igual a  $f_{md}$  para deformaciones unitarias comprendidas entre  $\bar{\varepsilon}_m \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{mu}$ .

(9) A menos que estén disponibles datos experimentales, la deformación unitaria de diseño última de la mampostería,  $\varepsilon_{mu}$ , puede ser asumida como 3.5‰.

(10) Alternativamente, diagramas apropiados de esfuerzo-deformación unitaria que involucran el comportamiento descrito en (3)P puede ser usado, si su desarrollo es validado sobre la base de investigaciones experimentales.

(11) La deformación unitaria máxima de diseño permitido al sistema FRP será expresado como sigue:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}, \quad (5.1)$$

donde  $\varepsilon_{fk}$  representa la deformación unitaria característica de FRP a la falla, y  $\varepsilon_{fdd}$  es la máxima deformación unitaria de FRP después de que el despegamiento de FRP tiene lugar (Sección 5.3, Ecuación (5.10)).

Los valores asignados al factor de conversión  $\eta_a$ , y el factor parcial,  $\gamma_f$  son indicados en la Tabla 3-2 y Sección 3.4.1 respectivamente.

En presencia de un alto nivel de humedad,  $\eta_a$  será evaluado con precaución.

(12) La verificación de la seguridad debe ser basada en el principio del Estado Límite Último. Se pueden reconocer dos posibles casos dependiendo del tipo de análisis estructural desarrollado. Si se usan modelos no lineales, la resistencia deberá ser mayor que la demanda. Esta última es calculada de acuerdo al código de construcción vigente. Se debe tener cuidado de asegurar que la solución propuesta no está afectada por la particular discretización adoptada para el cálculo.

Si se adoptan modelos lineales elásticos o esquemas simplificados usando una distribución equilibrada de tensiones que satisfacen las condiciones de equilibrio, pero no necesariamente la congruencia, cada elemento debe ser verificado.

### 5.3 EVALUACION DEL ESFUERZO DE DESPEGAMIENTO

(1)P La adhesión entre mampostería y la FRP es de gran relevancia porque las deformaciones por despegamiento lleva a modos indeseables de fallas frágiles. En el espíritu del criterio de jerarquía de la resistencia dichos mecanismos de falla no deben preceder el aplastamiento plástico de la mampostería.

(2) Debido a la amplia variedad de estructuras de mampostería existentes (*por ejemplo*, arcilla artificial, bloques de concreto para mampostería, piedras cuadradas o no cuadradas, etc.), el despegamiento puede ocurrir en la superficie dishomogénea. Además en las estructuras de mampostería con caras irregulares, una capa de mortero puede ser usada para crear una superficie conveniente para aplicación FRP. El mismo sistema de reforzamiento puede entonces ser conectado a los diferentes materiales caracterizados por diferentes propiedades de la interfaz.

(3) Si la resistencia a tensión del adhesivo usado para instalar el refuerzo FRP es más grande que el del sustrato, la pérdida de adherencia entre el compuesto y la mampostería ocurre por la

decohesión de un estrato superficial del bloque y del mortero.

### 5.3.1 Consideraciones generales y modos de falla

(1)P El despegamiento entre el refuerzo FRP aplicado en bandas aisladas a lo largo de líneas rectas y la mampostería puede ocurrir en los siguientes modos de fallas: despegamiento en el extremo de la placa o despegamiento en la fisura intermedia. En estructuras de mampostería reforzadas con FRP y cargadas a esfuerzos de flexión en el refuerzo FRP en ambos extremos laminados así como también cerca de las ubicaciones de las fisuras existentes, la interfaz de la mampostería con FRP está sometida a altos esfuerzos localizados entre los 150 to 200 mm desde la sección discontinua.

(2)P El despegamiento por corte ocurre cerca de los extremos del refuerzo FRP (secciones de anclaje) y puede ser seguido por la remoción de una porción significativa de bloque (falla de rasgadura), específicamente cuando los esfuerzos de corte en el extremo FRP están combinados con tensiones de flexión normales. Este modo de falla aparece con la formación de fisuras debido al esparcimiento de esfuerzos de anclaje que pueden ser acompañadas por esfuerzos de tensión en la mampostería responsable por su fractura(Figura 5-1).

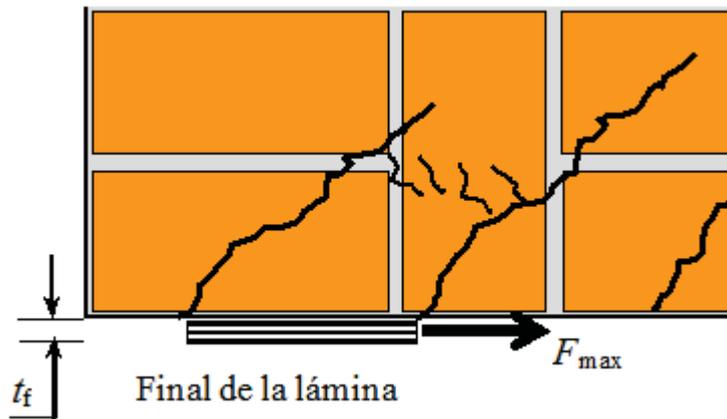


Figura5-1 –Falla debido a rasgadura del ladrillo de anclaje.

(3)P Las tensiones combinadas reducen la resistencia de pegado. En particular, cuando el reforzamiento FRP está aplicado a superficies curvadas o cuando la alta rigidez de flexión del reforzamiento FRP es usado, las tensiones de flexión significantes perpendiculares a la interfaz mampostería-FRP (tensiones de pelado) aumentan, y se reduce la fuerza que puede ser transferida.

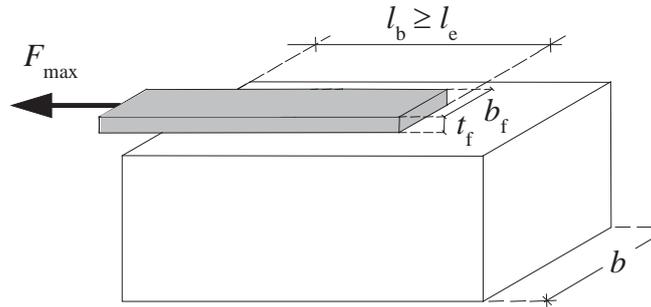
(4)P La efectividad de los sistemas FRP es máxima con respecto a la apertura de fisuras y propagación cuando las fibras aplicadas están inclinadas en dirección ortogonal de la fisura. Las tensiones alrededor de las fisuras generadas por movimientos relativos producen una concentración de tensión en la interfaz mampostería-FRP.

### 5.3.2 Resistencia de diseño para despegamiento del extremo de la lámina/banda

(1)P Las pruebas experimentales de pegado en la Figura 5-2 muestra que el valor máximo de la fuerza transferida desde el refuerzo FRP hasta el apoyo previo al despegamiento FRP depende de la longitud,  $l_b$ , del área pegada.

Este valor aumenta con  $l_b$  hasta una longitud máxima correspondiente,  $l_e$ : mayor incremento del área de pegado no incrementa la fuerza que es posible transferir.

La longitud  $l_e$  es llamada longitud óptima de pegado y corresponde a la longitud mínima de pegado capaz de soportar la máxima fuerza de anclaje.



**Figura5-2** –Máxima fuerza transferida entre FRP y el concreto.

(2) La longitud óptima de pegado,  $l_{ed}$ , será determinada como sigue:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \text{ mm} \right\}. \quad (5.2)$$

Donde  $E_f$  y  $t_f$  son los módulos Elástico normal del refuerzo FRP y el espesor de FRP respectivamente.  $\Gamma_{Fd}$  es el valor de diseño de energía específica de fractura,  $\gamma_{Rd}$  es un coeficiente correctivo igual a 1.5 para piedras pómez (pososas) y bloques perforados, y 1.25 para mampostería calcarenitas y piedras Lecce.  $f_{bd}$  es la resistencia de diseño de pegado entre FRP y la mampostería, y es calculada como sigue:

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}. \quad (5.3)$$

Si los datos experimentales no están disponibles,  $s_u$  en la Ecuación (5.3) es igual a 0.4 mm para piedra pómez (porosas) y bloques perforados, y 0.3 mm para mampostería calcarenitas y piedras Lecce (ver Apéndice D).

El valor de diseño de la energía específica de fractura está calculado como sigue:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}}. \quad (5.4)$$

Los símbolos en la Ecuación (5.4) asumen los siguientes significados:

- $k_b$  es un factor correctivo geométrico.
- $k_G$  es un factor correctivo, expresado en milímetros y dependiente del tipo de mampostería (para sistemas impregnados *in situ*):
  - para mampostería de bloques perforados:  $k_G = 0.031 \text{ mm}$ ;
  - para mampostería de pómez:  $k_G = 0.048 \text{ mm}$ ;
  - para mampostería de piedras calcarenitas y Lecce:  $k_G = 0.012 \text{ mm}$ ;
- $FC$  es un factor de confianza.

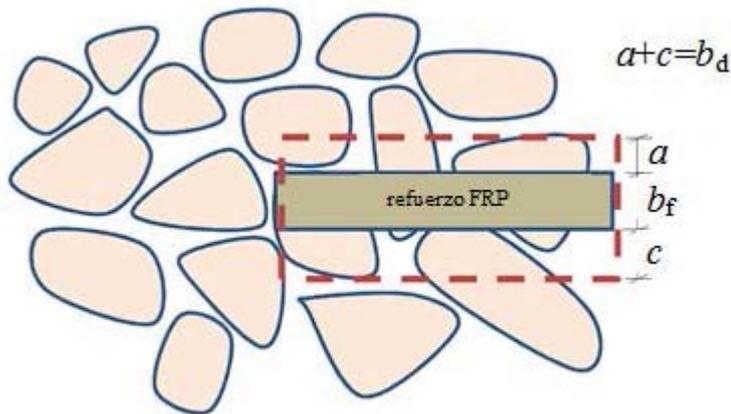
-  $f_{bm}$  y  $f_{btm}$  son las resistencias de compresión y tracción de bloques de mampostería, respectivamente. En ausencia de evidencias experimentales, la resistencia tensional promedio puede ser calculada como  $0.10 f_{bm}$ .

Si los datos experimentales no están disponibles,  $k_b$  puede ser calculada como sigue:

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f / b}{1 + b_f / b}}, \quad (5.5)$$

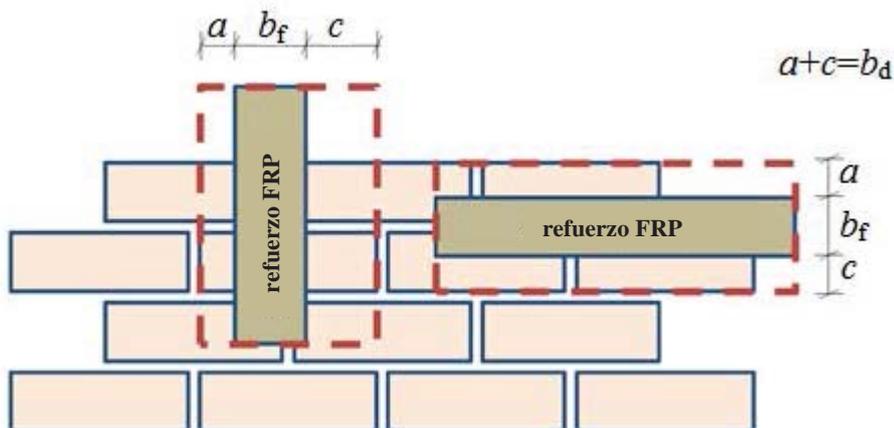
donde  $b$  y  $b_f$  son el ancho del elemento reforzado y FRP, respectivamente. El valor de  $b$  puede ser calculado como una suma de la cantidad  $b_f$  y el ancho del área de distribución de la fuerza de pegado,  $b_d$ .

En el caso de la mampostería con piedras de forma irregular,  $b_d$  puede ser considerado igual al diámetro promedio de las piedras (Figura 5-3).



**Figura 5-3** – La distribución de la resistencia de pegado para piedras de forma irregular.

En el caso de mampostería con piedras de forma regular,  $b_d$  es igual a la dimensión del bloque de soporte en la dirección perpendicular del eje principal FRP (Figura 5-4).



**Figura 5-4** – Distribución de resistencia de pegado para piedras de forma regular.

Para sistemas precurados, los valores de  $k_G$  previamente establecidos serán reducidos en 40%. Las ecuaciones reportadas en el ítem (2) son consideradas válidas cuando usan resinas de baja viscosidad con el fin de asegurar la penetración a través de los poros presentes en el bloque de mampostería.

Los soportes de resina de alta viscosidad y baja porosidad serán usados cuidadosamente.

(3) Cuando el despegamiento involucre las primeras capas de mampostería y la longitud de pegado es más larga o igual a la longitud de pegado óptima, la resistencia de pegado será expresada como sigue:

$$f_{\text{fdd}} = \frac{1}{\gamma_{\text{f,d}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{\text{Fd}}}{t_f}}, \quad (5.6)$$

donde  $\gamma_{\text{f,d}}$  es el factor parcial como se ve en la Sección 3.4.1.

En caso de pegamento sobre mampostería con una junta de mortero a una distancia inferior que la longitud óptima de pegado, la resistencia de diseño en el refuerzo debe ser reducida en un 85% del valor provisto por la fórmula (5.6).

(4) Para longitudes de pegado,  $l_b$ , que sea más pequeña que la óptima  $l_{\text{ed}}$ , la resistencia de diseño de pegado será reducida como sigue:

$$f_{\text{fdd,rid}} = f_{\text{fdd}} \cdot \frac{l_b}{l_{\text{ed}}} \cdot \left( 2 - \frac{l_b}{l_{\text{ed}}} \right). \quad (5.7)$$

(5) Cuando se usan dispositivos especiales de anclaje (ver sección 5.3.5), la resistencia de diseño en el extremo del compuesto, debe ser validada mediante pruebas experimentales.

(6) Cuando los sistemas FRP son aplicados en capas de epoxi intermedias debido a irregularidad sobre la superficie de la mampostería, la resistencia de despegamiento será evaluada en la interfaz entre la capa de regularización y la mampostería, si es que el curado simultaneo de la resina epóxica sobre el mortero y la resina FRP está asegurada. En este caso las Ecuaciones (5.2)-(5.7) son todavía aplicables a menos que haya más requerimientos. El espesor,  $t_h$ , y el módulo de Elasticidad normal,  $E_h$ , del sistema homogéneo hecho de FRP y la capa de regulación será calculada como sigue:

$$t_h = t_f + t_r, \quad E_h = \frac{E_f \cdot t_f + E_r \cdot t_r}{t_h}, \quad (5.8)$$

donde  $t_r$  y  $E_r$  son el espesor y el módulo de elasticidad normal de la capa de regulación, respectivamente. El espesor  $t_r$  puede ser estimado conociendo el volumen del material aplicado a la superficie de la mampostería y asumiendo la capa equivalente a un cilindro sólido. La capacidad de la fuerza de pegamiento será calculada usando las Ecuaciones (5.2)-(5.7) donde  $b_h = b_f + 2 \cdot t_r$ .

### 5.3.3 Resistencia de diseño por despegamiento intermedio

(1) En ausencia de indicadores más seguros, el despegamiento intermedio será desarrollado por la resistencia limitada de despegamiento de FRP al valor de diseño:

$$f_{\text{fdd},2} = \alpha \cdot f_{\text{fdd}} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 2.0). \quad (5.9)$$

En particular, si la distancia desde el extremolibre es menor que  $3 \cdot l_e$ , entonces  $\alpha = 1.5$ .

Asumiendo en la Ecuación (5.1):

$$\varepsilon_{\text{fdd}} = \frac{f_{\text{fdd},2}}{E_f}, \quad (5.10)$$

donde  $E_f$  es el módulo de Elasticidad norma de FRP, los requerimientos del código son implícitamente cumplidos. Sin embargo, la capacidad de la resistencia de despegamiento será verificada por la Sección 5.3.2.

### 5.3.4 Resistencia de pegado en presencia de acciones normales a la superficie de pegado

- (1) Los datos experimentales llevados a cabo en estructuras de mampostería reforzadas con FRP deberían ser usados para la determinación de la resistencia de pegado en caso de tensiones que ocurren perpendicularmente a la superficie de pegamento.
- (2) El mismo procedimiento puede ser usado por sistemas ligeramente curvados de FRP.

### 5.3.5 Dispositivos mecánicos de anclaje

- (1) P La capacidad de pegado puede ser incrementada hasta la falla FRP usando dispositivos mecánicos de anclaje.
- (2) Los dispositivos mecánicos de anclaje serán probados con el fin de proveer evidencias experimentales de funcionalidad del sistema.
- (3) Los dispositivos de anclaje mecánico son descritos como sigue:
  - el engrapamiento (clamping) del refuerzo externo FRP por medio de placas de acero atadas a la mampostería por medio de remaches;
  - anclaje del reforzamiento externo FRP por medio de remaches y clavos de FRP insertados ortogonalmente;
  - después de acanalar la mampostería en una dirección perpendicular a la dirección del refuerzo, insertar una varilla dentro de la ranura encima del reforzamiento externo FRP;
  - adición de una banda FRP pegada perpendicular a la dirección del refuerzo.
- (4) Cuando los dispositivos de anclaje mecánico son usados en combinación con una lámina pre-curada, se genera un comportamiento de presfuerzo dentro del sistema FRP. En este caso, el diseño de la resistencia incluirá el comportamiento pretensado de la lámina.

## 5.4 REQUISITOS DE SEGURIDAD

- (1) A continuación se examinan algunas aplicaciones de refuerzo FRP para comparar mecanismos de colapso local particularmente frecuentes en la práctica.

### 5.4.1 Reforzamiento de paneles de mampostería

- (1) Los paneles de mampostería pueden ser reforzados con FRP para incrementar su capacidad

de carga portante y/o la ductilidad para acciones dentro de un plano o fuera de un plano. En las siguientes secciones se sugieren simples requerimientos para controlar el grado de seguridad del panel de mampostería reforzada. Tales requerimientos no son exhaustivos y deberían estar integrados con mayor análisis que sea conveniente a la complejidad del caso estudiado.

#### **5.4.1.1 Reforzamiento para acciones fuera del plano**

(1) El colapso fuera del plano de los paneles de mampostería es uno de los más frecuentes tipos de falla para los elementos de mampostería estructural. Este modo de falla es principalmente debido a acciones sísmicas y fuerzas secundarias horizontales creadas por la presencia de arcos y bóvedas. El colapso fuera de plano puede aparecer como uno de los siguientes:

- simple volcamiento(Sección 5.4.1.1.1);
- falla vertical de flexión(Sección 5.4.1.1.2);
- falla horizontal de flexión(Sección 5.4.1.1.3).

##### **5.4.1.1.1 Volcamiento simple**

(1) El movimiento kinemático es representado por un volcamiento sobre sí mismo alrededor de una rótula en la parte inferior del panel de mampostería. La rótula es usualmente localizada en la superficie externa del panel.

El colapso por volcamiento puede ocurrir en presencia de las paredes no conectadas a las paredes ortogonales no restringidas en su parte superior. El colapso por volcamiento puede depender de varios factores como las condiciones de borde, esbeltez de la pared y la geometría del elemento de mampostería.

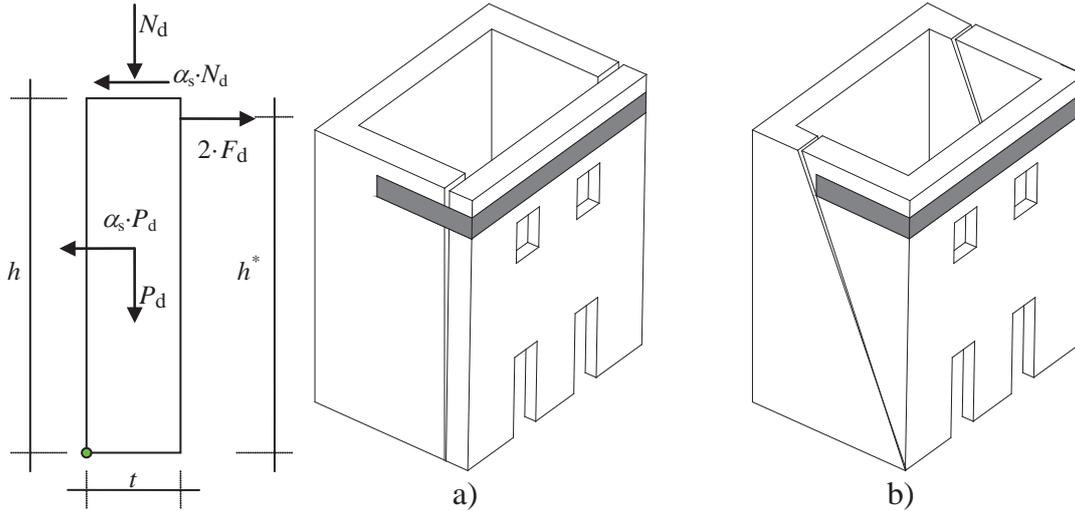
Una posible técnica de refuerzo puede consistir en el uso de FRP aplicado a la porción superior del panel de mampostería y luego anclado apropiadamente a las paredes ortogonales. Cuando existan pilares ortogonales dentro del panel de mampostería, el FRP puede ser modelado para conformar las irregularidades de la superficie. Sin embargo, esta solución puede llevar a esfuerzos tensionales dentro del soporte y posible despegamiento. Los dispositivos de anclaje mecánicos serán usados para mitigar el riesgo de una falla localizada.

Una solución óptima desde un punto de vista de comportamiento, es forrar todo el perímetro del edificio con un sistema FRP seleccionado. Se tendrá un cuidado particular en el redondeo de las esquinas de mampostería para evitar concentración de tensión en el FRP como se indica en la Sección 5.8.2.2.

Como un ejemplo, un panel de mampostería sujetado a las siguientes acciones (valores de diseño) es considerado:

- $P_d$  peso propio del panel,
- $N_d$  fuerza axial actuante en la parte superior del panel,
- $\alpha_s$  relación entre cargas horizontales y verticales,
- $F_d$  esfuerzo en el sistema FRP.

Otras cargas pueden ser aplicadas en el extremo superior de la pared.



**Figura 5-5** –Mecanismos de colapso por simple volcamiento.

Asumiendo que los pisos y las paredes perpendiculares al panel que está siendo estudiado provee una restricción insignificante al panel en sí (Figura 5-5a), una fuerza tensional en el refuerzo FRP puede ser calculada usando la ecuación de momento de equilibrio como sigue:

$$F_d = \frac{1}{2 \cdot h^*} \cdot \left[ \alpha_s \cdot \left( P_d \cdot \frac{h}{2} + N_d \cdot h \right) - (P_d + N_d) \cdot t \right], \quad (5.11)$$

donde  $h^*$  es la distancia entre FRP y la parte inferior del panel de mampostería. Para prevenir un simple volcamiento del panel de mampostería, las dos siguientes condiciones se deberán cumplir:

- Fuerza tensional FRP:

$$F_d \leq F_{Rd}, \quad (5.12)$$

donde:  $F_{Rd} = A_f \cdot f_{fd}$ ,  $f_{fd} = E_f \cdot \varepsilon_{fd}$  y  $A_f$  es el área del refuerzo FRP.

- Rasgadura de FRP desde paredes ortogonales:

$$F_d \leq F_{pd}, \quad (5.13)$$

donde:  $F_{pd} = A_f \cdot f_{idd}$  representa la máxima fuerza de anclaje en el FRP aplicado a una de las dos paredes ortogonales.

Usualmente, la rasgadura es más demandante que la fuerza de tensión en el FRP.

Si la estructura no está completamente envuelta, la instalación de FRP será extendida a las paredes ortogonales, con el fin de evitar mecanismos de falla como en la (Figura 5-5 b). Este cálculo puede ser desarrollado usando un análisis límite y despreciando la contribución de la fuerza cohesiva interna de la mampostería. El mecanismo de colapso (Figura 5-5 b) identifica la superficie de falla que va desde la rótula plástica hasta las dos secciones terminales de FRP.

(2) Adicionalmente, la determinación de tensiones debido al momento flector combinado y carga axial así como la determinación de la fuerza de corte sobre las secciones del panel horizontal, será desarrollado de acuerdo al código de construcción.

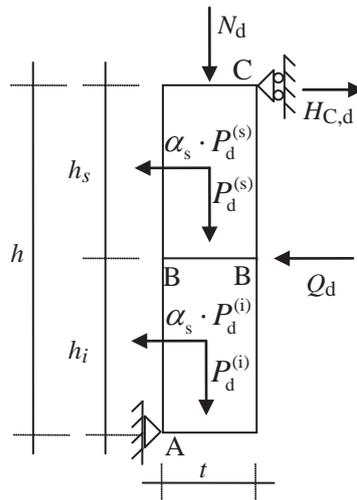
### 5.4.1.1.2 Falla a flexión vertical

(1) Para paneles de mampostería tanto en la parte superior como inferior y sometidas a carga horizontal, la falla puede ocurrir debido a la flexión con la formación de tres rótulas: una en la parte inferior del panel, otra en la parte superior y la última a una cierta altura del panel.

El colapso a flexión puede ocurrir en paneles de mampostería altos y/o paneles restringidos o muy alejados de paredes ortogonales.

En el caso de cargas sísmicas, los paneles de mampostería cargados desde lados opuestos por pisos localizados a diferentes alturas son particularmente sensitivos al colapso por flexión. Este tipo de paneles de mampostería pueden ser reforzados con FRP que tienen fibras que corren en dirección vertical, por ejemplo, una franja unitaria de panel de mampostería está reforzada con FRP y sujeta a la siguiente carga externa (valores de diseño) (Figura 5-6):

- $P_d^{(s)}$  peso propio de la parte superior del panel;
- $P_d^{(i)}$  peso propio de la parte inferior del panel;
- $N_d$  fuerza axial actuante sobre el panel;
- $\alpha_s$  relación entre las cargas horizontales y verticales;
- $Q_d$  acción debido a la carga horizontal sísmica.



**Figura 5-6** –Esquema de cálculo para el mecanismo de colapso por flexión vertical.

Por equilibrio de fuerzas alrededor de A, la reacción horizontal en C puede ser calculada como sigue:

$$H_{C,d} = \frac{h_i \cdot (2 \cdot Q_d + \alpha_s \cdot P_d^{(i)}) + \alpha_s \cdot P_d^{(s)} \cdot (2 \cdot h - h_s) - t \cdot (N_d + P_d^{(s)} + P_d^{(i)})}{2 \cdot h} \quad (5.14)$$

El panel de mampostería en la sección B-B, donde FRP se aplica para prevenir la formación de la rótula, está sujeto a una fuerza axial y momento flector igual a lo siguiente:

$$\begin{aligned} N_{sd} &= N_d + P_d^{(s)}, \\ M_{sd} &= H_{C,d} \cdot h_s - \alpha_s \cdot P_d^{(s)} \cdot \frac{h_s}{2}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

La capacidad del panel de mampostería a la flexión se verifica cuando la siguiente relación se cumple:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \cdot \quad (5.16)$$

La capacidad de flexión del panel de mampostería reforzado,  $M_{Rd}$ , puede ser determinada como una función de las características mecánicas de la mampostería y FRP (Sección 5.2.3), el espesor del panel de mampostería,  $t$ , el valor de la fuerza axial aplicada y el factor parcial para modelos de resistencia,  $\gamma_{Rd}$ , que es igual a 1.00 (Tabla 3-1 in Sección 3.4.2).

(2) La relación esfuerzo-deformación unitaria de compresión para la mampostería se asume rectangular con una tensión de compresión uniforme de  $0.85 f_{md}$ , distribuida sobre una zona confinada de compresión equivalente limitada por los bordes de la sección transversal y una línea recta localizada paralela al eje neutral,  $x$ , a una distancia de  $0.6 \div 0.8 x$ .

(3) La fuerza de corte de diseño,  $V_{Sd}$ , no excederá la resistencia de diseño de corte:

$$V_{Rd,m} = 1 \cdot x \cdot f_{vd}, \quad (5.17)$$

donde  $f_{vd}$  es la resistencia de diseño de corte de la mampostería calculada de acuerdo con el código de construcción.

(4) La resistencia de diseño para el despegamiento del extremo FRP será también verificada.

(5) El refuerzo vertical FRP será colocado en una distancia centro a centro,  $p_f$ , tal que:

$$p_f \leq 3 \cdot t + b_f, \quad (5.18)$$

donde  $b_f$  es el ancho FRP. Se pueden usar mayores espaciamientos centro a centro solamente si es adecuadamente justificado.

#### 5.4.1.1.3 Falla a flexión horizontal

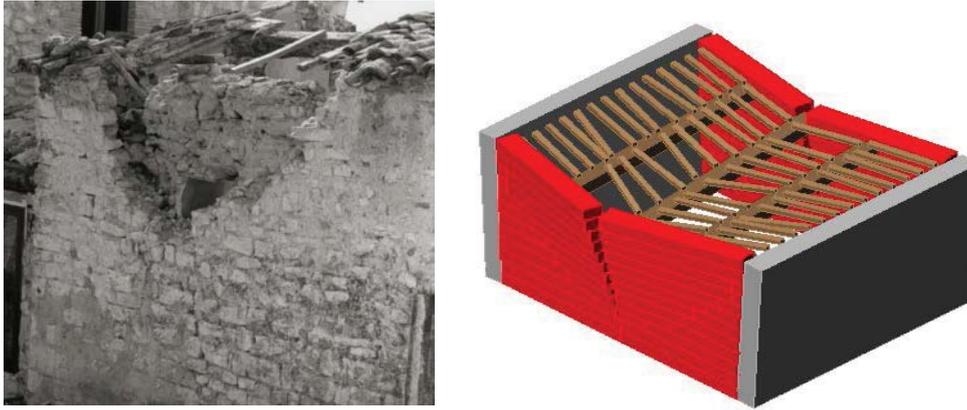
(1) La Figura 5-7 muestra los mecanismo cinemáticos para paneles de mampostería firmemente conectados con paredes transversales pero no restringidas con conexiones en la parte más alta. En esta configuración, la resistencia a las fuerzas horizontales está asegurada por el efecto de arco en la franja superior como se ilustra en la Figura 5-8.

El valor de la carga horizontal uniformemente distribuida,  $q_d$ , la cual puede ser portada por el mecanismo de arco puede ser expresado como sigue:

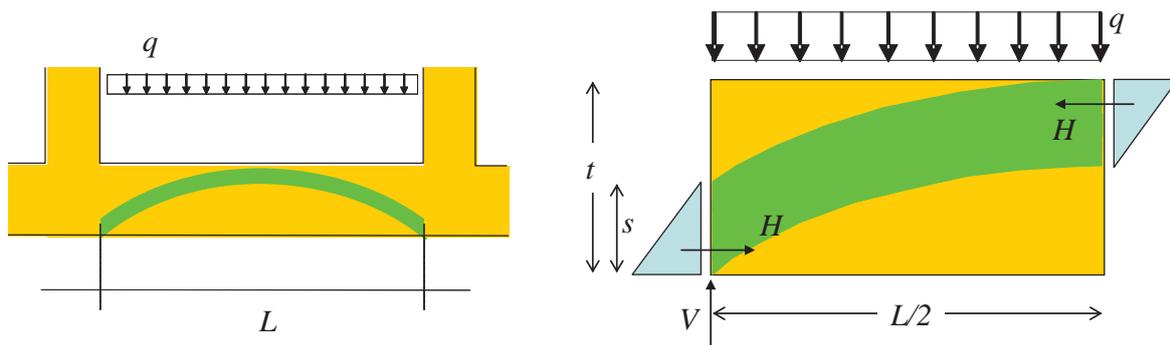
$$q_d = \frac{2 \cdot t^2}{3 \cdot L^2} \cdot f_{md}^h, \quad (5.19)$$

donde  $L$  es el ancho del panel, y  $f_{md}^h$  representa la resistencia de compresión de diseño de la mampostería en dirección horizontal.

Los sistemas FRP pueden ayudar a incrementar el valor de  $q_d$ .



**Figura 5-7** – Colapso por flexión horizontal.



**Figura 5-8** – Colapso por flexión horizontal.

Para una viga de mampostería a ser reforzada, el uso de FRP en forma adecuada previene tales mecanismos de falla proporcionando capacidad flexional a la mencionada franja unitaria. La altura de la franja horizontal de mampostería a ser reforzada con FRP será tomada como la mitad de la altura total del panel a menos que más evaluaciones sean disponibles.

En el ejemplo, el momento flector aplicado,  $M_{sd}$ , es considerado debido a cargas por terremoto o presión del viento con respecto a la inercia de la pared.

- (2) La franja horizontal FRP será verificada además por el piso y el tumbado que interactúan con el panel. En tales casos, el espesor de la franja horizontal puede ser calculado considerando una distribución de tensión de  $45^\circ$ .
- (3) La seguridad a flexión del panel de mampostería es satisfecha cuando la Ecuación (5.16) se cumple, y puede ser determinada como una función de las características mecánicas de la mampostería y FRP y el espesor,  $t$ , del panel de mampostería. A menos que un análisis más detallado esté disponible, la fuerza horizontal debido a la presencia de paredes transversales puede ser considerada igual a cero.
- (4) En las juntas de conexión entre el panel de mampostería y las paredes transversales, se debe realizar una verificación adicional para la fuerza cortante, como muestra la Sección 5.4.1.1.2(3), asumiendo  $f_{vd}$  igual a cero.
- (5) Se debe verificar también el compuesto FRP con relación al despegue en el extremo.
- (6) La verificación de la magnitud de las sollicitaciones de tensión en las paredes transversales cercanas al panel principal de mampostería también será realizada.

### 5.4.1.2 Reforzamiento para cargas en el plano

(1) Los siguientes chequeos serán llevados a cabo por los paneles de mampostería sujetos a carga en plano:

- flexo-compresión en el plano;
- fuerza cortante.

#### 5.4.1.2.1 Flexo-compresión en el plano

(1) Sistemas verticales FRP, simétricamente instalados sobre ambos lados del panel y adecuadamente pegados a la superficie, pueden ser usados para incrementar la resistencia a flexo-compresión.

(2) Un procedimiento simplificado para evaluar la flexo-compresión puede ser desarrollada como se indica en la Sección 5.4.1.1.2(2).

(3) En particular, la resistencia de las secciones extremas delimitadas del panel por la cimentación y el primer nivel o entre dos pisos consecutivos serán calculadas. La contribución FRP debe ser despreciada si los dispositivos de anclaje mecánico no están presentes.

#### 5.4.1.2.2 Resistencia a cortante

(1)P La resistencia a cortante de los paneles de mampostería reforzados con FRP aplicados a ambos lados del panel puede ser incrementada por una aplicación adicional de FRP a ambos lados con fibras colocadas paralelas a la dirección del cortante. Por medio del uso de este sistema, la resistencia de cortante puede ser observada como la combinación de dos mecanismos resistentes: (1) fuerzas de corte debido a la fricción en presencia de cargas de compresión, y (2) para elementos capaces de resistir tensiones que hacen que un mecanismo de cercha se active, y las fuerzas de corte son determinadas por equilibrio interno.

(2) Cuando la formación de un mecanismo de cercha está asegurado, la resistencia de diseño de corte  $V_{Rd}$ , del panel de mampostería reforzado con FRP es calculada como la suma de la contribución de mampostería,  $V_{Rd,m}$ , y la contribución FRP,  $V_{Rd,f}$ , hasta el máximo valor  $V_{Rd,max}$  que induce la falla del tensor comprimido de la cercha:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,m} + V_{Rd,f}; V_{Rd,max} \}. \quad (5.20)$$

Si el reforzamiento del corte es paralelo a las juntas de mortero, las variables arriba definidas pueden ser evaluadas como sigue:

$$V_{Rd,m} = x \cdot t \cdot f_{vd}, \quad (5.21)$$

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.6 \cdot d \cdot (E_f \cdot \varepsilon_{fd}) \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{b_f}{p_f}, \quad (5.22)$$

donde:

- $x$  es la distancia del eje neutro desde la fibra extrema en compresión;
- $t$  es el espesor del panel de mampostería;
- $f_{vd}$  es la resistencia de diseño de corte de la mampostería, valorada de acuerdo al código de construcción, en función de la tensión normal media igual a la relación entre la resultante de los esfuerzos de compresión y el área,  $x \cdot t$ ;

- $E_f$  es el módulo de Elasticidad normal de FRP en la dirección de la fibra;
- $\varepsilon_{fd}$  es la deformación unitaria de diseño del compuesto FRP como lo indica la Ecuación(5.1)
- $t_f$  es el espesor de FRP;
- $b_f$  y  $p_f$ , son el ancho y el espaciamiento centro a centro de las bandas FRP medidas ortogonalmente a la dirección de la fibra, respectivamente. Para las bandas FRP aplicadas adyacentes una a la otra, la relación  $b_f/p_f$  es igual a 1.0.

El coeficiente parcial para el modelo de resistencia,  $\gamma_{Rd}$ , es igual a 1.20 (Tabla 3-1 of Sección 3.4.2). Si el ángulo de fricción,  $\phi$ , de juntas de mortero es más pequeño que  $45^\circ$ , el valor de  $V_{Rd,f}$  provisto por la Ecuación (5.22) será reducido por un factor igual a cotangente ( $90^\circ - \phi$ ). El ángulo  $\phi$  puede ser calculado de la resistencia a compresión y tensión del mortero.

(3) En dirección vertical, el FRP será colocado con el fin de asegurar la formación del mecanismo de cercha como un elemento en tensión. Además, la traslación del diagrama del momento flector será también tomada en cuenta.

(4) La resistencia de diseño de corte del panel de mampostería,  $V_{Rd,max}$ , correspondiente a la falla del tensor en compresión de la cercha puede ser calculada como sigue:

$$V_{Rd,max} = 0.3 \cdot f_{md}^h \cdot t \cdot d, \quad (5.23)$$

donde  $f_{md}^h$  es la resistencia de diseño de compresión paralela a las juntas de mortero.

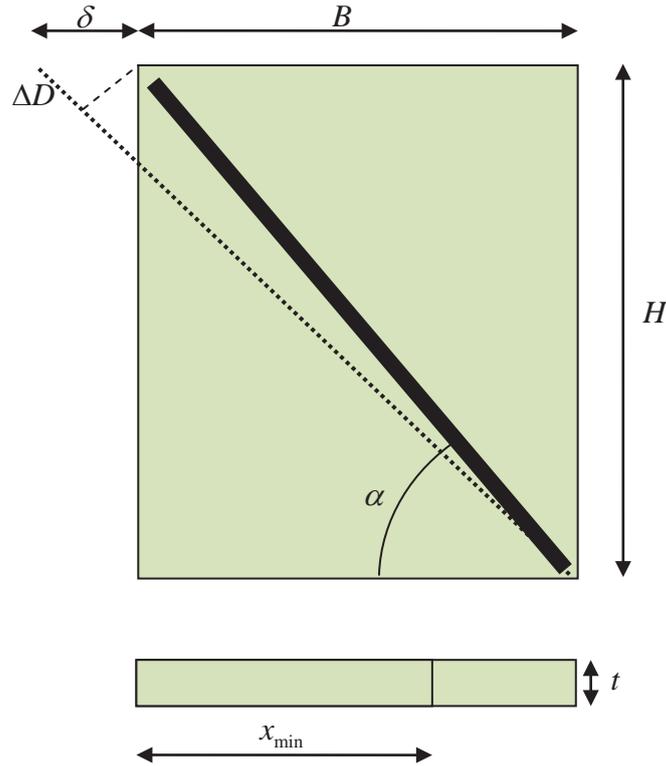
(5)P Cuando solo las fibras verticales de FRP son instaladas, la capacidad de corte del panel de mampostería se mejora debido al incremento en la resistencia de compresión desde la flexión actuante dentro de la mampostería. La resistencia de corte de la mampostería será calculada como sigue:

$$V_{Rd,m} = x \cdot t \cdot f_{vd}, \quad (5.24)$$

donde  $f_{vd}$  es la resistencia de diseño de corte de la mampostería, como indicado en el código de construcción, igual a la relación entre la suma de las fuerzas de compresión y el área entre el elemento de extrema compresión y el eje neutro,  $x \cdot t$ .

(6) Las paredes conformadas por varios paneles delimitados por pisos estructurales pueden ser reforzadas al corte usando FRP ubicada diagonalmente sobre el panel. Esta aplicación FRP requiere la presencia de vigas adheridas o cables en el piso capaces de resistir un desplazamiento horizontal uniforme en el extremo del panel. Pares de diagonales FRP son aplicadas simétricamente a ambos lados del panel.

(7) La resistencia de corte del panel en la Figura 5-9, reforzado con FRP inclinado en ángulo  $\alpha$ , puede ser evaluado despreciando la contribución de la FRP bajo compresión, como en lo siguiente:



**Figura5-9** – Panel reforzado con FRP inclinado por un ángulo  $\alpha$ .

Refiriéndose a laFigura 5-9, el desplazamiento horizontal de la parte alta de la sección transversal es igual a:

$$\delta_{Rd,1} = 0.005 \cdot H . \quad (5.25)$$

En esta sección, la resistencia de corte del panel es:

$$V_{Rd,m} = x_{min} \cdot t \cdot f_{vd} , \quad (5.26)$$

donde  $x_{min}$  es la mínima distancia entre el eje neutro y la fibra de compresión extrema de la sección,  $f_{vd}$  es la resistencia de corte calculada de acuerdo al código de construcción e igual a la relación entre la resultante de los esfuerzos de compresión y el área  $x_{min} \cdot t$ . Además, el máximo desplazamiento horizontal compatible con la deformación unitaria de diseño de FRP es igual a:

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} . \quad (5.27)$$

Además:

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min \{ \delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2} \} = \min \left\{ 0.005, \frac{f_{fdd}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \right\} , \quad (5.28)$$

y, la capacidad de corte se convierte en:

$$V_{Rd} = \frac{\delta_{Rd}}{H} \left( \frac{V_{Rd,m}}{0.005} + \sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f \right), \quad (5.29)$$

donde  $\frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f)$  es la componente horizontal de la FRP que corresponde a un desplazamiento igual a  $\delta_{Rd}$ .

(8) Cuando se usa solamente FRP en la configuración de la Figura 5-9, la resistencia a flexo-compresión del panel será calculada despreciando la contribución de FRP.

### 5.4.2 Areas de amarre y dintel

(1)P Las áreas que conectan diferentes vanos de pared dentro de un panel de mampostería son llamadas áreas de amarre. Su función es doble: (1) restringir a la pared adyacente de asumir deformaciones compatibles con la carga horizontal aplicada, y (2) dar soporte a la pared de mampostería localizada encima de las aberturas.

(2) Debido a la presencia de cargas verticales, se muestran dos efectos en las áreas que están encima de las aberturas: (1) La porción de pared de mampostería encima de la abertura no puede soportar su propio peso y será soportado por un dintel que funciona como viga, y (2) y cuando los vanos de pared que rodean la abertura son delgados y no pueden soportar la carga horizontal debido a la presencia de la misma abertura, el dintel proveerá una adecuada resistencia para soportar los esfuerzos de tensión para asegurar el total equilibrio de la pared.

(3) En las siguientes dos secciones, se presentan tres métodos para diseñar tanto dinteles como áreas de amarre sujetas a cargas sísmicas. (ver Figura 5-10).

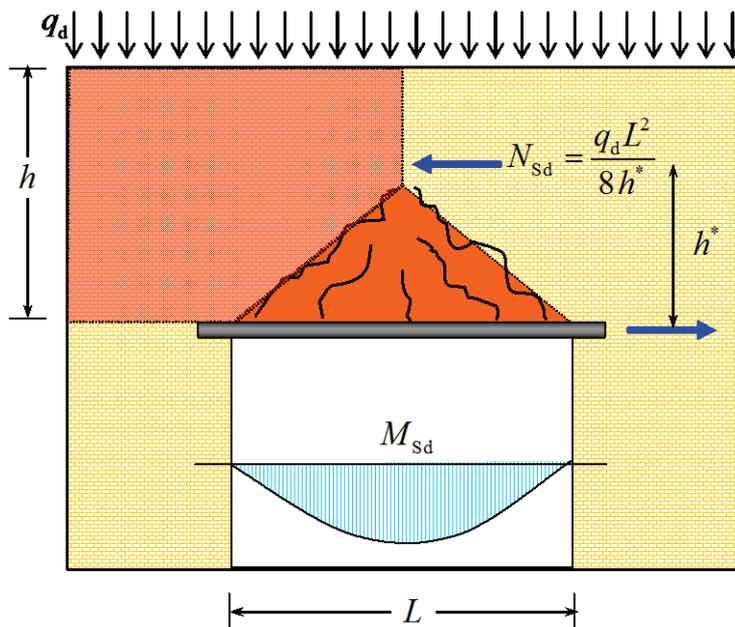


Figura 5-10 –Diseño de dinteles sujetos a flexión combinada y cargas axiales.

### 5.4.2.1 Diseño de dinteles

(1) Los dinteles pueden ser diseñados usando elementos estructurales que tengan tanto resistencia axial y a flexión. Alternativamente se puede usar dinteles que tienen sólo resistencia axial. En el caso primero, los dinteles son capaces de funcionar como una viga portante de esfuerzos tensionales para asegurar todo el equilibrio de la pared.

(2) El soporte a la pared que está encima de la abertura será asegurado por la formación de un elemento de mampostería localizado justo arriba de la abertura donde los esfuerzos de tensión son resistidos por el sistema reforzado FRP. El diseño puede ser desarrollado usando las indicaciones de la Sección 5.4.1.1.3 y considerando la resistencia de compresión de la mampostería en la dirección horizontal,  $f_{md}^h$ .

(3) La porción del dintel reforzado con FRP tendrá una resistencia a flexión,  $M_{Rd}$ , mayor que el momento aplicado, y es calculado como sigue:

$$M_{sd} = \gamma_G \cdot \frac{1}{24} \cdot g \cdot t \cdot L^3, \quad (5.30)$$

donde  $g$  es el peso específico de la mampostería,  $t$  es el espesor de la mampostería,  $L$  es la luz neta de la abertura y  $\gamma_G$  es el factor parcial para el peso propio en el Estado Límite Ultimo. FRP también será capaz de soportar la siguiente fuerza:

$$N_{sd} = \frac{q_d \cdot L^2}{8 \cdot h^*}, \quad (5.31)$$

donde  $q_d$  es la carga vertical de diseño en el Estado Límite Ultimo que actúa sobre el dintel (suma de cargas vivas y muertas factoradas), y  $h^*$  es la palanca interna, a ser asumida no mayor que la distancia  $L$  de la abertura o la altura  $h$  del área de amarre.

### 5.4.2.2 Diseño de las áreas de amarre

(1) Las áreas de amarre reforzadas con FRP serán verificadas por momento flector, corte, y cargas axiales actuando en la conexión de las paredes de mampostería vertical. La resistencia de corte y flexión será calculada de acuerdo a los requerimientos para los paneles de pared de mampostería tomando en cuenta la resistencia de compresión  $f_{md}^h$  paralela a las juntas de mortero.

(2) El refuerzo con FRP de áreas de amarre puede ser alcanzado mediante la instalación de refuerzo con fibras en dirección horizontal a nivel del piso, localizadas encima y debajo de la propia área de amarre. El refuerzo FRP puede ser continuo o discontinuo y es preferentemente aplicado simétricamente tanto a la cara interna como externa de la pared de mampostería. En particular, el refuerzo FRP usado como envoltura del edificio puede funcionar como un reforzamiento de la cara externa de la pared de mampostería.

(3) Para asegurar el comportamiento apropiado con respecto a la fuerza de corte aplicada, el refuerzo FRP con fibras en dirección diagonal podía también ser aplicado a las áreas de amarre. El refuerzo FRP debe ser instalado simétricamente tanto en los lados internos como externos de la pared de mampostería reforzada.

## **5.5 REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CON SIMPLE Y DOBLE CURVATURA**

(1)P Los elementos estructurales con simple o doblecurvaturageneralmente pierden su funcionalidad debido a la formación de rótulas generadas por resistencia tensional despreciable de la mampostería.

(2)P Los sistemas de reforzamiento FRP pueden mejorar la resistencia estructural del elemento con simple o doble curvatura. El diseño puede ser desarrollado en estos elementos usando el criterio de estado límite.

(3)P La característica de la sollicitación de diseño, evaluada usando el ELU será incrementada respecto a la correspondiente resistencia, en analogía de lo prescrito para paneles de mampostería (Sección 5.4.1).

(4)P El refuerzo FRP será usado como reforzamiento externo de una estructura para prevenir la formación de ciertas rótulas y mecanismos de falla. Al principio, las rótulas se consideran ser localizadas en la parte superior o en la parte inferior del elemento estructural. Consecuentemente, el esfuerzo normal transferido desde las rótulas es excéntrica comparada a la superficie media de la estructura. Además, la excentricidad es igual a la mitad del espesor de la estructura.

(5)P El refuerzo FRP retrasa tanto la apertura de fisuras como la formación de rótulas dentro del panel de mampostería. Portanto, el refuerzo FRP puede ser usado para prevenir la formación de rótulas sobre el lado opuesto al que está instalado el sistema FRP.

(6)P El refuerzo FRP no es recomendado cuando el colapso es controlado por falla de corte o aplastamiento de la mampostería, a menos que en el segundo caso, la FRP esté formada por láminas pre-curadas como un arco interno y esté bien anclada a la mampostería.

(7) Los sistemas de reforzamiento FRP pueden también mejorar la resistencia de bóvedas no estructurales.

### **5.5.1 Arcos**

(1) Dos esquemas estructurales pueden ser tomados en consideración:

- esquema de arco: para arcos que descansan en apoyos fijos y/o rótulas;
- esquema de arco-columna: llamados como un esquema de pórtico, para arcos que descansan sobre columnas.

(2)P Generalmente, un arco o estructura de arco-columna tiende a colapsar debido a la formación de por lo menos cuatro rótulas.

(3) Las rótulas pueden ser calificadas como rótula real o seudo rótula. En particular, un posible mecanismo puede ser debido a la formación de tres (reales) rótulas y un doble péndulo (seudo rótula) que lleva a una falla de corte de sólo una porción del arco.

#### **5.5.1.1 Esquema de arco**

(1)P Para prevenir el mecanismo caracterizado por la formación de cuatro rótulas, el refuerzo FRP puede ser pegado ya sea en la parte superior o inferior del arco de mampostería.

(2)P Las rótulas pueden formarse ya sea en la parte inferior como en los apoyos del arco. Las

rótulas en el apoyo del arco pueden ser eliminadas sólo por el uso de sistemas específicos.

- (3) La evidencia experimental muestra que la aplicación del refuerzo FRP en los lados de la superficie del arco no provee un mejoramiento significativo del comportamiento estructural. En tal caso, un prematuro despegamiento del refuerzo FRP de la cara de la mampostería tiene lugar. Tal despegamiento está localizado en la región de arco comprimido y causa inestabilidad típica FRP, seguida por una rápida degradación del pegado entre mampostería y el FRP.
- (4) El refuerzo FRP aplicado a la parte superior es de ejecución difícil.
- (5) El reforzamiento parcial FRP llevado a cabo sobre una porción de la parte inferior o superior previene la posibilidad de formación de rótulas responsables por la activación de un mecanismo kinemático de la estructura. Sin embargo, cuando el reforzamiento FRP está apropiadamente diseñado y concebido, puede incrementar la resistencia última de la estructura.
- (6) Será preferible hacer lo siguiente:
  - realizar completamente el reforzamiento FRP sobre la parte superior o inferior del arco;
  - anclar la FRP con las estructuras verticales.
  - escoger tejido FRP sobre lámina, para mejorar el acomodo de la geometría del arco de mampostería.

### 5.5.1.2 Esquema de arco-columna

- (1) Para estructuras arco-columna, la aplicación del refuerzo FRP a la parte superior o inferior del arco puede ser insuficiente para prevenir desplazamientos relativos de las conexiones arco-columna. En tal caso, es preferible actuar también sobre las columnas.
- (2) Las verificaciones a ser llevadas a cabo son idénticas a aquellas consideradas para el esquema de arco.

### 5.5.2 Bóvedas de curvatura simple: bóvedas de cañón

- (1) En la mayoría de las situaciones, el estudio de las bóvedas de cañón es similar a aquella de una unidad de arco profundo. Consecuentemente, las bóvedas de cañón pueden ser reforzadas con FRP ya sea sobre la parte superior y inferior. Para satisfacer la seguridad de los requerimientos, el reforzamiento FRP será aplicado a lo largo de toda la longitud de la bóveda. Por esta razón, el refuerzo FRP será colocado en la distancia centro a centro,  $p_f$ , calculada como sigue:

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f \quad b_f \leq 2t, \quad (5.32)$$

donde  $t$  es el espesor de la bóveda y  $b_f$  es el ancho de FRP. En caso de bóvedas nervadas, el espesor será considerado igual a aquel de la bóveda y no el del nervio.

- (2) El reforzamiento longitudinal FRP tiene una importancia para hacer una conexión entre los arcos ideales que forman la bóveda de cañón. Este mecanismo es particularmente importante en casos de acciones horizontales.
- (3) Normalmente, se sugiere instalar en dirección longitudinal, por lo menos 10 % del reforzamiento FRP aplicado en dirección transversal. Será incrementado al 25 % por reforzamiento FRP en áreas sísmicas.

(4) Si las bóvedas son usadas en edificios celulares con cuartos de tamaño pequeño, el reforzamiento FRP debería ser instalado sobre las paredes del edificio en lugar de la bóveda.

### **5.5.3 Bóvedas de doble curvatura: domos**

(1)P Los domos tienen esfuerzos de tipo membrana y de tipo flexional.

#### **5.5.3.1 Tensiones tipo membrana**

(1)P En un domo sujeto a cargas verticales se desarrollan tensiones normal de tracción dirigidas a lo largo de los paralelos de los domos. Un típico modelo de fisuración con grietas localizadas a lo largo de los meridianos, es primariamente debido a la resistencia a tracción despreciable de la mampostería. El modelo de fisuras mencionadomodifica la condición de equilibrio del domo mientras se incrementan las fuerzas horizontales donde el domo se conecta a la estructura de apoyo. El uso de reforzamiento FRP aplicado en forma de círculo alrededor de la porción más baja del perímetro del domo puede ayudar a prevenir la formación de fisuras así como reduce la magnitud de la fuerza horizontal actuante en la estructura de apoyo.

(2) El grado de seguridad de un domo de mampostería será desarrollado por la verificación de lo siguiente:

- el esfuerzo de tracción en el refuerzo FRP;
- el despegamiento de FRP de acuerdo a la Sección 5.3.4.

#### **5.5.3.2 Tensiones de tipo flexional**

(1)P La tensión tipo flexión está típicamente localizada donde el domo se une a la estructura portante o al borde de un eventualtragaluz. En particular, la tensión flexional relacionada puede causar colapso de porciones del domo delimitadas por fisuras meridianas. Si la capacidad de carga portante de tales porciones es controlada por falla de la región que conecta al domo con la estructura de apoyo, el domo puede ser reforzado con la aplicación de refuerzo FRP en forma de círculo alrededor de la porción más baja del perímetro del domo. Si la estructura de apoyo del domo no presenta ningún desplazamiento, el mencionado reforzamiento circular FRP es inactivo. En este caso, el refuerzo FRP será aplicado a lo largo de los meridianos del domo.

(2) El grado de seguridad de un domo de mampostería será desarrollado por verificación de lo siguiente:

- flexo-compresión;
- corte;
- despegamiento del FRP.

Para flexo-compresion así como para corte, las fuerzas internas serán evaluadas sobre un elemento unitario de domo de acuerdo a las Secciones 5.4.1.2.1y 5.4.1.2.2.Una posible reducción de resistencia para la capacidad de carga portante del domo reforzado será considerada debido a la complejidad de las fuerzas internas asociadas con el análisis de las estructuras de domo. Se tomarán precauciones en el caso de la flexo-compresión cuando la zona de tensión en una dirección corresponde a una zona de compresión en la dirección opuesta. En tal caso, a menos que se desarrolle un análisis más riguroso, la relación del valor absoluto del momento de diseño aplicado al momento nominal calculado bajo la carga axial aplicada no será mayor que1. Por el contrario, a menos que se desarrolle un análisis más riguroso, la capacidad a flexión específica en cada plano

puede ser asumida igual a 1, resultante de una condición de carga monoaxial.

El diseño de corte coplanar puede ser desarrollado de acuerdo a los primeros dos casos previamente mencionados. Es de notar que la capacidad de corte y flexión será calculada con respecto al resistencia a compresión de diseño de la mampostería considerando las diferencias debido a la carga perpendicular o paralela a la textura de la mampostería (Sección 5.2.3 (6)P).

El diseño de corte ortogonal no puede tomar en cuenta la presencia de refuerzo FRP y será desarrollado en el caso de mampostería no reforzada, considerando la complejidad de las fuerzas internas existentes. Las verificaciones para despegamiento FRP considerarán las tensiones de flexión que actúan perpendicularmente al refuerzo FRP de acuerdo a la Sección 5.3.4.

(3) Para asegurar el correcto comportamiento del sistema FRP aplicado en forma circular alrededor de la porción más baja del perímetro del domo, el refuerzo FRP será anclado de manera segura a la estructura inferior portante por medio de un anclaje mecánico.

#### **5.5.4 Bóvedas de doble curvatura sobre una planta cuadrada**

(1) El reforzamiento FRP de bóvedas de doble curvatura que descansan sobre una planta cuadrada será primeramente instalado sobre las paredes de mampostería del cuarto que soportan la bóveda en sí. Para estructuras cargadas verticalmente, la integridad y la rigidez de las paredes de mampostería de apoyo aseguran que la bóveda está primariamente sujeta a tensiones de compresión. Si este no es el caso, el reforzamiento FRP puede ser instalado dentro de la región de la esquina de las bóvedas donde la tensión flexional en una dirección ortogonal a las diagonales del cuarto, se espera que ocurra.

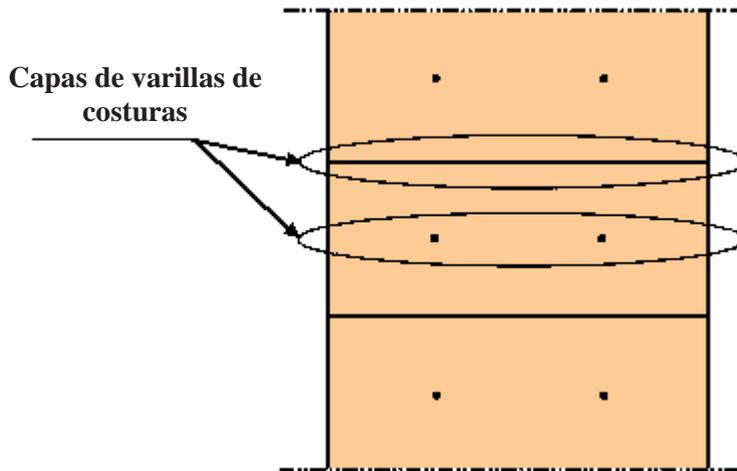
### **5.6 CONFINAMIENTO DE COLUMNAS DE MAMPOSTERIA**

(1)P El refuerzo FRP es típicamente instalado por medio de la envoltura del elemento, donde tal envoltura ejerce un efecto beneficioso sobre la deformación unitaria lateral de la columna mediante la provisión de confinamiento tri-axial. El reforzamiento FRP puede ser empleado ya sea en caso de rehabilitación de estructuras deterioradas o para mejoramiento sísmico.

(2) El confinamiento con compuesto FRP puede ser instalado usando bandas o varillas de FRP. Las bandas de FRP son aplicadas como refuerzo en la forma de envoltura continua o discontinua. En lugar de eso, las varillas FRP son insertadas en orificios esparcidos a través del elemento que requiere mejorarse.

(3) Las varillas FRP son insertadas en los orificios perforados en dos direcciones ortogonalmente a la sección transversal del elemento. Cada juego de varillas insertadas en cualquiera de las dos direcciones representa una “capa de varillas”(Figura 5-11).

Tal refuerzo puede efectivamente contrastar la deformación unitaria transversal de la mampostería. Para asegurar la continuidad entre las varillas FRP y la mampostería circundante, cada orificio es llenado con pasta epóxica o, alternativamente, los extremos de la barra FRP son mecánicamente asegurados a la mampostería.



**Figura5-11** –Vista lateral de una columna con varillas FRP colocadas a lo largo de dos direcciones ortogonales.

- (4) Cuando las bandas y varillas FRP son usadas en la misma aplicación para columnas de reforzamiento de mampostería, es recomendado que tales materiales FRP exhiban similares características mecánicas.
- (5) El confinamiento provisional previo a la instalación de barras verticales es sugerido cuando las columnas muestran fisuras verticales. Un perfil en forma de L que es eventualmente hecho de madera, puede ser usado en columnas con sección transversal rectangular a lo largo de dispositivos con cinturón-portante.
- (6) Confinamiento de estructuras de mampostería con FRP será instalado usando parámetros de diseño mecánico de acuerdo con el código de construcción.

### 5.6.1 Resistencia de diseño de elementos confinados cargados axialmente

- 1) El diseño de columnas de mampostería confinadas con FRP está basado en que el sistema de FRP será apropiado como una función de la geometría del elemento.
- (2) Es recomendado instalar refuerzo FRP con fibras corriendo en dirección ortogonal con respecto al eje vertical del elemento reforzado. La efectividad del refuerzo espiral FRP puede ser adecuadamente probado.
- (3) La resistencia axial del elemento reforzado FRP,  $N_{Sd}$ , debe exceder la fuerza axial de diseño debido a las cargas aplicadas calculadas de acuerdo al código de construcción,  $N_{Rmc,d}$ , como sigue:

$$N_{Sd} \leq N_{Rmc,d}, \quad (5.33)$$

- (4)  $N_{Rmc,d}$ , es dado como sigue:

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md}, \quad (5.34)$$

donde el coeficiente parcial,  $\gamma_{Rd}$ , será igual a 1.10. En el caso de columnas de sección transversal no-circular, internamente confinadas solo con varillas,  $\gamma_{Rd} = 1.25$  (Tabla 3-1, Sección 3.4.2).  $A_m$  representa el área de la sección transversal del elemento confinado con FRP,  $f_{md}$  representa la resistencia a compresión de diseño de la mampostería no confinada, y  $f_{mcd}$  es la resistencia a compresión del elemento confinado.

(5) la resistencia a compresión de diseño,  $f_{mcd}$ , para elementos confinados sujetos a una presión de confinamiento lateral,  $f_1$ , puede ser escrita como sigue:  $f_{l,eff}$ , llamada “presión efectiva de confinamiento”:

$$f_{mcd} = f_{md} \cdot \left[ 1 + k' \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right], \quad (5.35)$$

donde  $k'$  es un coeficiente no dimensional,  $f_{l,eff}$  representa la presión efectiva de confinamiento, y  $\alpha_1$  es un coeficiente igual a 0.5 si no están disponibles más datos.

(6) A menos que se desarrolle un análisis más detallado,  $k'$  puede ser calculado como sigue:

$$k' = \alpha_2 \cdot \left( \frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3}, \quad (5.36)$$

donde  $g_m$  es la masa-densidad de la mampostería expresada como  $kg/m^3$ , y  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  son coeficientes igual a 1.0 si más datos experimentales no están disponibles.

(7) La presión eficaz de confinamiento,  $f_{l,eff}$ , es una función de la forma de la sección transversal y del sistema FRP.

Definiendo  $V_m$  como el volumen del elemento de mampostería a ser reforzado, y  $V_{c,eff}$  como la porción del volumen efectivamente confinado, el siguiente coeficiente de eficiencia puede ser escrito así:

$$k_{eff} = \frac{V_{c,eff}}{V_m}. \quad (5.37)$$

La presión eficaz de confinamiento puede ser definida como una función del coeficiente de eficiencia. A cambio, esto puede ser expresado como el producto de un coeficiente horizontal y vertical de eficiencia,  $k_H k_V$ , respectivamente:

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1. \quad (5.38)$$

(8) Cuando se usan bandas de espiral FRP, la efectividad del confinamiento FRP es penalizada por inclinación de la fibra.  $\alpha_f$  indica la inclinación de la fibra FRP con respecto al plano horizontal de la sección transversal del elemento. El siguiente coeficiente puede ser definido:

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \alpha_f}. \quad (5.39)$$

Este coeficiente penaliza la presión lateral de confinamiento,  $f_1$ , reportado en la Ecuación (5.38). El

reforzamiento FRP desarrollado con varillas FRP insertadas en los orificios no será afectado por este coeficiente.

(9) Para mitigar la deformación axial y prevenir el daño en el Estado Límite de Servicio, la resistencia axial incrementada debido al confinamiento FRP no será mayor que el 50 % de la resistencia a compresión de diseño,  $f_{md}$ , del elemento no confinado.

### 5.6.2 Confinamiento de columnas circulares

(1) La relación geométrica de elementos confinados con FRP cuando tanto las bandas FRP como las varillas son empleadas, pueden ser definida como sigue (Figura 5-12):

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f}, \quad (5.40)$$

donde:

- $t_f$  es el espesor de FRP;
- $b_f$  es el ancho de la banda FRP;
- $D$  es el diámetro de la sección transversal de la mampostería.
- $p_f$  es el espacio centro a centro de las bandas FRP.

En el caso de envoltura continua FRP, la relación  $\rho_f$  se hace igual a  $4 \cdot t_f / D$ .

(2) En condiciones de equilibrio límite, la presión de confinamiento,  $f_1$ , puede ser calculada como sigue:

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}, \quad (5.41)$$

donde  $E_f$  es el módulo de Elasticidad normal de las bandas FRP, y  $\varepsilon_{fd,rid}$  representa el valor reducido de diseño de la deformación unitaria del FRP al colapsar la columna.

(3) La deformación unitaria reducida de diseño por refuerzo FRP puede ser escrita como sigue:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min\{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f; 0.004\}, \quad (5.42)$$

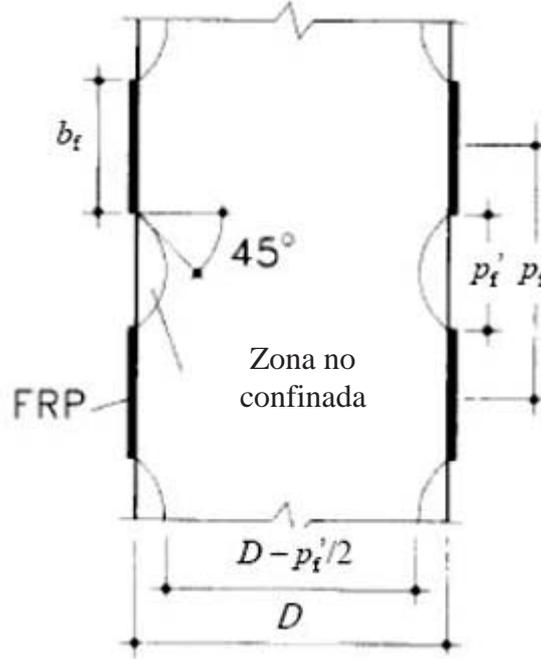
donde  $\eta_a$  es el factor de conversión medioambiental (Tabla 3-2),  $\varepsilon_{fk}$  y  $\gamma_f$ , representa la deformación unitaria máxima de los factores parciales de las bandas FRP, respectivamente (Sección 3.4.1), y 0.004 es un límite de la deformación unitaria convencional (ver Sección 3.4.1).

(4) Para una sección transversal circular reforzada con bandas FRP, el coeficiente horizontal de eficiencia,  $k_H$ , es igual a 1. El coeficiente de eficiencia vertical,  $k_V$ , es también asumido igual a 1 sólo para confinamiento continuo.

(5) Una reducción del volumen confinado (Figura 5-12) se observa en caso de confinamiento no continuo. En tal caso, el coeficiente de eficiencia vertical,  $k_V$ , puede ser calculado como sigue:

$$k_V = \left(1 - \frac{p_f'}{2 \cdot D}\right)^2, \quad (5.43)$$

donde  $p_f'$  es la distancia centro a centro entre dos bandas consecutivas.



**Figura5-12** –Vista frontal del elemento de mampostería circular confinado con bandas discontinuas FRP.

- (6) La distancia centro a centro,  $p_f$ , no será mayor que  $D/2$ .

### 5.6.3 Confinamiento de columnas cuadradas o rectangulares

(1)P El confinamiento FRP de secciones transversales no circulares muestra solo un ligero incremento en la capacidad de carga portante. Además tales aplicaciones serán cuidadosamente analizadas.

(2) El confinamiento externo sobre columnas prismáticas no será considerado cuando  $b/h > 2$  o  $\max\{b, h\} > 900 \text{ mm}$ , a menos que estén disponibles datos experimentales(Figura 5-13).

(3) Como se indica en la Sección 5.6.2(1), la presión confinante,  $f_1$ , de un elemento rectangular que tiene una dimensión  $b \times h$  puede ser calculada como sigue:

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \min \left\{ \rho_{f,x} \cdot E_f + 2 \cdot \rho_{b,x} \cdot E_b ; \rho_{f,y} \cdot E_f + 2 \cdot \rho_{b,y} \cdot E_b \right\} \cdot \varepsilon_{fd,rid}, \quad (5.44)$$

donde los parámetros no dimensionales  $\rho_{f,x}$ ,  $\rho_{f,y}$ ,  $\rho_{b,x}$ ,  $\rho_{b,y}$  son definidos por(Figura 5-13):

$$\rho_{f,x} = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{h \cdot p_f}, \quad \rho_{f,y} = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{b \cdot p_f}, \quad \rho_{b,x} = \frac{n_{b,x} \cdot A_b}{p_b \cdot h}, \quad \rho_{b,y} = \frac{n_{b,y} \cdot A_b}{p_b \cdot b}, \quad (5.45)$$

donde  $n_{b,x}$  y  $n_{b,y}$  representa el número de varillas o barras en la dirección X y Y, respectivamente,  $A_b$  es el área de la sección transversal de la varilla,  $y_p$  la distancia entre dos varillas consecutivas colocadas a lo largo de la misma dirección.

Para una envoltura continua,  $\rho_{f,x}$  y  $\rho_{f,y}$  se convierte en (Ecuación (5.45)):

$$\rho_{f,x} = \frac{4 \cdot t_f}{h}, \quad \rho_{f,y} = \frac{4 \cdot t_f}{b}. \quad (5.46)$$

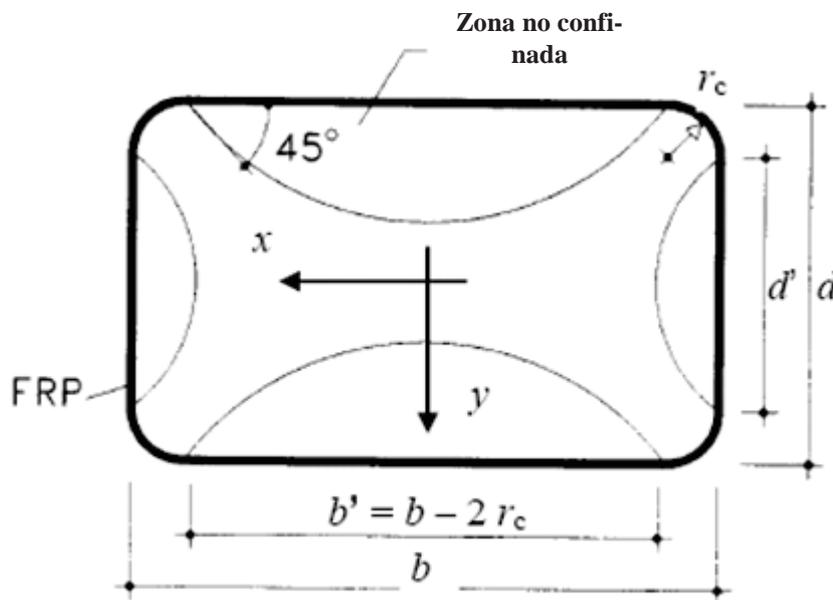
En el caso de una sección transversal rectangular, la Ecuación (5.44) se convierte en:

$$f_1 = 2 \cdot \frac{t_f \cdot E_f}{\max\{b, h\}} \cdot \varepsilon_{fd,rid}, \quad f_1 = \frac{2t_f b_f E_f}{\max\{b, h\} p_f}, \quad (5.47)$$

para refuerzos FRP continuos y discontinuos, respectivamente. Cuando se usa solo varillas, la misma ecuación se convierte en:

$$f_1 = \min\{\rho_{b,x} \cdot E_b; \rho_{b,y} \cdot E_b\} \cdot \varepsilon_{fd,rid}. \quad (5.48)$$

(4) La Figura 5-13 muestra una sección transversal rectangular confinada con un refuerzo continuo FRP. Debido al efecto-arco mostrado en la figura, la sección confinada es solamente una porción del área total de la columna de mampostería. La extensión del área confinada depende del radio circundante adoptado.



**Figura 5-13** – Confinamiento de secciones rectangulares externamente envueltas con FRP.

El coeficiente horizontal de eficiencia está dado por la relación entre el área confinada y el área total de la columna de mampostería,  $A_m$ , como sigue:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_m}, \quad (5.49)$$

donde  $b'$  y  $h'$  son las dimensiones indicadas en la Figura 5-13.

(5) Si el sistema de reforzamiento FRP de (4) es no-continuo, el coeficiente vertical de eficiencia es igual a (Figura 5-12):

$$k_v = \left(1 - \frac{p_f'}{2 \cdot \min\{b, h\}}\right)^2 \quad (5.50)$$

Para un confinamiento continuo,  $k_v$  es igual a 1.

(6) La distancia centro a centro,  $p_f$ , estará de acuerdo con la Ecuación (5.51):

$$p_f \leq \frac{1}{2} \cdot \min\{b, h\} \quad (5.51)$$

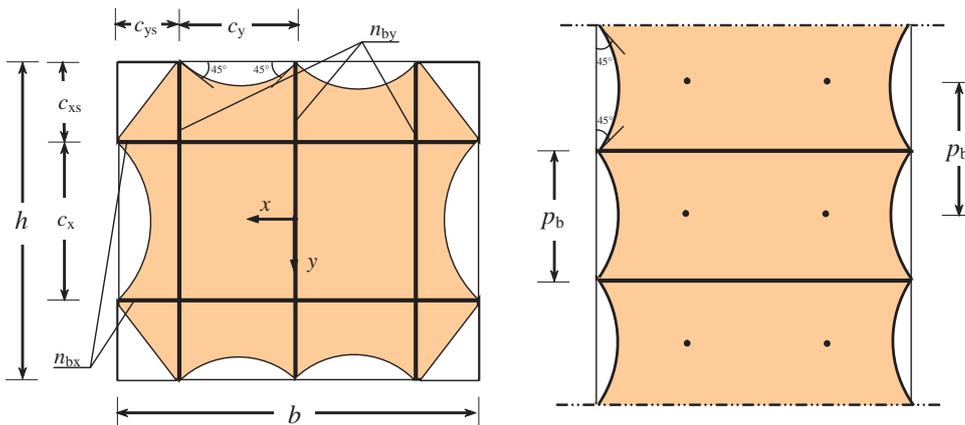
(7) A menos que se haga una determinación más apropiada de la porción del volumen efectivo confinado, el coeficiente de eficiencia,  $k_{eff}$ , puede ser asumido solamente cuando las varillas FRP sean usadas e igual a (Figura 5-14):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v = \left[1 - \frac{1}{3 \cdot b \cdot h} \cdot (c_x^2 \cdot (n_{bx} - 1) + c_y^2 \cdot (n_{by} - 1) + 6 \cdot c_{xs} \cdot c_{ys})\right] \cdot \left(1 - \frac{p_b}{2 \min\{b, h\}}\right)^2 \quad (5.52)$$

En caso de columnas prismáticas con un lado igual  $ab$ , Ecuación (5.52) se convierte en:

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v = \left[1 - \frac{1}{3 \cdot b^2} \cdot (2 \cdot c_b^2 \cdot (n_b - 1) + 6 \cdot c_{bs}^2)\right] \cdot \left(1 - \frac{p_b}{2 \cdot b}\right)^2 \quad (5.53)$$

donde  $n_{bx} = n_{by} = n_b$ ,  $c_x = c_y = c_b$ ,  $c_{xs} = c_{ys} = c_{bs}$ .



**Figura 5-14** – Vista en planta y lateral de confinamiento con varillas FRP.

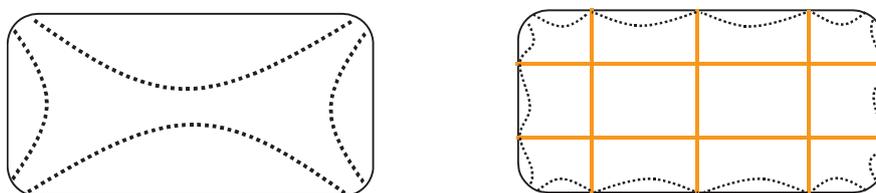
(8) La distancia entre el borde del elemento y la varilla FRP más cercana al borde en sí no será mayor que 1/4 del ancho del elemento. A eso se añade:

$$c_x \leq \frac{h}{5}, c_y \leq \frac{b}{5}. \quad (5.54)$$

La distancia de centro a centro,  $p_b$ , satisficirá  $p_b \leq \max \{c_x, c_y\}$ .

(9) Las varillas FRP insertadas en los orificios hechos a través del elemento reforzado de mampostería serán ancladas a una longitud igual a por lo menos 10 veces el diámetro de la varilla FRP. Cuando esta longitud es mayor que 1/5 de la longitud de la varilla FRP, la fuerza de anclaje estaría adecuadamente distribuída en los dos extremos de la varilla.

(10)P El uso combinado de la envoltura FRP y las varillas internas insertadas en los orificios hechos a través de la sección transversal del elemento puede incrementar el área efectivamente confinada por secciones transversales cuadradas, rectangulares, o secciones transversales más complejas (Figura 5-15).



**Figura 5-15** – Confinamiento de elementos de mampostería con bandas y varillas FRP.

(11) Cuando se usa una combinación de envoltura externa FRP y varillas internas FRP, el coeficiente de eficiencia,  $k_{eff}$ , como indican las Ecuaciones (5.37) y (5.38), puede ser calculado como sigue:

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v = \left[ 1 - \frac{1}{3 \cdot b \cdot h} \cdot \left( c_x^2 \cdot (n_{bx} - 1) + c_y^2 \cdot (n_{by} - 1) + 2 \cdot (c_{xs} - r_c)^2 + 2 \cdot (c_{ys} - r_c)^2 \right) \right] \cdot 1. \quad (5.55)$$

En el caso particular de sección cuadrada ( $b=h$ ),

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v = \left[ 1 - \frac{1}{3 \cdot b \cdot h} \cdot \left( 2 \cdot c_b^2 \cdot (n_b - 1) + 4 \cdot (c_{bs} - r_c)^2 \right) \right] \cdot 1, \quad (5.56)$$

donde  $n_{bx} = n_{by} = n_b$ ,  $c_x = c_y = c_b$ ,  $c_{xs} = c_{ys} = c_{bs}$  y  $r_c$  es el radio de la esquina circular.

## 5.7 DISEÑO PARA APLICACIONES SISMICAS

### 5.7.1 Generalidades

(1)P El reforzamiento FRP de estructuras de mampostería sujetas a acciones sísmicas puede ser realizado cuando el elemento no reforzado no satisface uno o más estados límites de acuerdo al código de construcción.

Esta parte del documento reconoce las provisiones del código de construcción así como las indicaciones provistas en la más moderna literatura relacionada a construcciones sísmicas. De particular importancia es lo siguiente:

- evaluación de la seguridad sísmica;
- requerimientos de seguridad (verificación de estados límite);
- niveles de protección sísmica(magnitud de la acción sísmica asociada);
- métodos de análisis;
- criterio de verificación (distinción entre elementos dúctiles y frágiles);
- características del material a ser usado para el diseño.

### **5.7.2 Criterio de selección para reforzamiento FRP**

(1)P El tipo y tamaño de sistemas seleccionados de FRP considerarán lo siguiente:

- estructuras de mampostería incapaces de soportar acciones verticales y horizontales serán reforzadas o reemplazadas;
- las paredes que terminan en uniones T de mampostería o esquinas de mampostería serán apropiadamente conectadas;
- conexiones no satisfactorias entre pisos y tumbado y paredes verticales se harán efectivas.
- fuerzas horizontales generadas de cubiertas, arcos y bóvedas serán tomadas por elementos estructurales apropiados;
- los pisos efectivamente conectados a paredes verticales serán apropiadamente rigidizados en su plano para ser capaces de transferir fuerzas horizontales a las paredes verticales localizadas en la dirección de la acción sísmica. Ellos también proveerán restricción al movimiento de las paredes verticales localizadas en dirección ortogonal;
- elementos de alta vulnerabilidad para los cuales el reforzamiento no es posible realizar, serán eliminados.
- en el caso de edificaciones fuertemente irregulares (en términos de resistencia y/o rigidez), el reforzamiento FRP, es usualmente incapaz de proveer confiabilidad a la estructura. Puede ser usado por unos cuantos elementos estructurales para concederle un mínimo de regularidad a la estructura;
- los elementos reforzados con FRP que incrementan la ductilidad local son siempre recomendados;
- el reforzamiento local FRP no debe reducir la ductilidad total de la estructura.

(2)P El reforzamiento con FRP es típicamente destinado a lo siguiente:

- reforzamiento total o parcial, reemplazo o reconstrucción de los elementos estructurales;
- modificación del comportamiento de toda la estructura por medio de la conexión de diferentes elementos estructurales.

(3)P El diseño de refuerzo FRP incluirá lo siguiente:

- selección racional de la técnica de refuerzo;
- selección de la técnica apropiada y/o material;
- dimensionamiento preliminar del refuerzo FRP;
- análisis estructural, tomando en cuenta la estructura reforzada con FRP;
- verificaciones de seguridad de la estructura reforzada en los elementos reforzados y recientemente añadidos (las verificaciones de seguridad de los elementos existentes reparados o reforzados serán realizadas de acuerdo a esta guía).

## 5.8 DETALLES DE CONSTRUCCION Y INSTALACIONES

(1)P Algunos aspectos tienen influencia sobre la efectividad del material FRP usado como sistemas externamente pegados para el reforzamiento de elementos de mampostería. En adición a lo ya discutido en capítulos anteriores, la superficie de preparación e instalación de FRP son además críticas.

### 5.8.1 Control de calidad y preparación de subtrato

(1)P El control de calidad del soporte implica la determinación de las condiciones de la mampostería, remoción o reconstrucción de cualquier bloque deteriorado o flojo de la mampostería, limpieza y remoción de una porción de la mampostería sujeta a humedad, vegetación o algo similar.

(2)P Cuando se usan dispositivos especiales para anclar apropiadamente el sistema FRP seleccionado, las pruebas de estos dispositivos serán conducidas de acuerdo con los documentos estandarizados disponibles. Los dispositivos de anclaje estarán instalados de acuerdo a las especificaciones del fabricante o proveedor reconociendo el material usado así como la superficie de preparación, las condiciones medioambientales, y la secuencia de cada fase. La investigación también evaluará los efectos de tales parámetros en el resultado final.

#### 5.8.1.1 Evaluación del deterioro del subtrato

(1) Previo a la aplicación de FRP, se deben realizar pruebas de homogeneidad de la porción reforzada de la estructura para asegurar la calidad apropiada del soporte de la mampostería.

(2) Las pruebas de caracterización mecánica de la mampostería serán desarrolladas en por lo menos 1 por cada  $100\text{ m}^2$  de área a ser reforzada, con un mínimo de 2 pruebas por cada área homogénea. Las pruebas serán efectuadas de acuerdo a, por lo menos, uno de los siguientes factores:

- prueba de compresión sobre una muestra de mampostería;
- prueba de corte sobre una muestra de mampostería ;
- prueba de gatos planos (flat jack);
- prueba de corte con gatos;
- prueba de dilatómetro para mampostería no uniforme;
- prueba de ultrasonido.

(3) Cuando las pruebas de homogeneidad son efectuadas en toda el área a ser reforzada, excepto por las áreas críticas, ellas serán distribuidas de acuerdo a una malla cuadrada espaciada 1 m aparte para áreas menores que  $5\text{ m}^2$ , y proporcionalmente incrementadas para áreas más grandes. Las pruebas serán realizadas de la siguiente manera:

- martillado a mano del área interesada;
- análisis de Rayos X;
- velocidad de ultrasonido en modo de superficie cercana;
- velocidad registrada de pulso sónico (con martillo instrumentado y medidor de aceleración);
- penetrómetro;
- termografía;
- tomografía.

### **5.8.1.2 Remoción y reconstrucción de apoyos defectuosos de mampostería**

- (1) El sustrato de mampostería puede haber sufrido deterioros físicos-químicos, físicos-mecánicos o impactos. La mampostería deteriorada será removida de las áreas dañadas.
- (2) La remoción de mampostería defectuosa permite examinar las características tanto de la mampostería natural y artificial como del mortero. Cuando ocurre una exfoliación, pulverización, fisuración o procesos de ataque químico, es necesario remover todas las áreas defectuosas y protegerlas con inhibidores apropiados.
- (3) Una vez que toda la mampostería deteriorada ha sido removida, y se han tomado las medidas convenientes para prevenir más deterioro del sustrato existente así como otros fenómenos que causan la degradación de la mampostería (*por ejemplo*, filtraciones de agua, vegetación), la restauración de la mampostería usando materiales compatibles con dicha mampostería será realizada. La rugosidad de la mampostería entre 10 y 20 mm será nivelada con pasta epóxica compatible; y se usará material específico de llenado para asperezas mayores de 20 mm. Los anchos de fisuras mayores de 0.5 mm serán cerradas con métodos de inyección epóxica antes de que el reforzamiento con FRP se lleve cabo.

### **5.8.1.3 Preparación del sustrato**

- (1) Para mejorar el pegado entre el soporte de la mampostería y el FRP, se debe realizar un afinado con chorro de arena (sandblasting) de la porción de la superficie de mampostería a ser reforzada. El afinado con chorro de arena dará una rugosidad en un grado de por lo menos 0.3 mm y dicho nivel puede ser medido por instrumentos adecuados, tales como un perfilómetro laser o un dispositivo óptico para medir el perfil.
- (2) Las superficies de mampostería de pobre calidad no requieren trabajar de remediación previo a la aplicación de FRP, deberían ser tratadas con un agente reforzante previo a la primera instalación.
- (3) La limpieza de la superficie a ser reforzada debe remover cualquier polvo, aceite, lubricantes superficiales, partículas extrañas o cualquier otro material que inhiba el pegado.

## **5.8.2 Recomendaciones para instalación**

- (1) El reforzamiento FRP de las estructuras de mampostería es altamente dependiente de la temperatura del ambiente y de la humedad así como de las características del sustrato.

### **5.8.2.1 Condiciones de humedad y temperatura en el medioambiente y el sustrato**

- (1) Se sugiere no instalar material FRP cuando el medioambiente está muy húmedo. Un alto grado de humedad puede retrasar el curado de la resina y afectar todo el trabajo del sistema FRP especialmente para aplicaciones de preimpregnado *in situ*.
- (2) Los sistemas FRP serán instalados en condiciones apropiadas de humedad y temperatura como lo define la hoja técnica de datos de materiales.
- (3) Si el curado del refuerzo FRP tiene lugar bajo condiciones de lluvia, asoleamiento fuerte, grandes variaciones térmicas, o en presencia de polvo, se deben emplear medidas de protección para asegurar el curado apropiado.

### 5.8.2.2 Detalles de construcción

- (1) Una longitud de anclaje de por lo menos 150 mm será provista para la porción extrema de los sistemas FRP usados para elementos de hormigón reforzado. Alternativamente, se pueden usar conectores mecánicos.
- (2) Previo a la aplicación de FRP, los bordes de la sección transversal será redondeado para evitar concentraciones de tensión que pudieran causar una falla prematura del sistema. El radio de la esquina será igual a por lo menos 20 mm.
- (3) El alineamiento propio de las fibras será provisto por una aplicación *in-situ* de preimpregnado, y se evitará un ondeamiento del refuerzo FRP durante la instalación.
- (4) Cuando se realizan pruebas semi-destructivas, se sugiere proveer reforzamiento de áreas adicionales (“áreas testigo”) en partes seleccionadas de la estructura que tienen dimensiones de por lo menos 500×300 mm<sup>2</sup>, con una extensión mínima de 0.15 m<sup>2</sup> pero no menos del 0.5 % del área total a ser reforzada. Las áreas testigo serán determinadas al mismo tiempo que la instalación principal de FRP, usando los mismos materiales y procedimientos en áreas donde la remoción del sistema de reforzamiento FRP no implica la alteración de los mecanismos de falla. Adicionalmente, las áreas testigo serán expuestas a las mismas condiciones medioambientales como el principal sistema FRP y serán uniformemente distribuidas sobre la estructura reforzada.

### 5.8.2.3 Protección de sistemas FRP

- (1) Para aplicaciones de FRP en ambiente externo es recomendado proteger el sistema FRP de la luz directa del sol, la cual puede producir alteraciones físico-químicas en la matriz epóxica. Esto puede lograrse usando pintura acrílica protectora si es que la superficie del compuesto es limpiada con una esponja enjabonada.
- (2) Alternativamente, se puede lograr una mejor protección, aplicando yeso o una capa de mortero (preferentemente de cemento) al sistema de reforzamiento instalado. El yeso, cuyo espesor es recomendado por el fabricante o el proveedor de FRP, será aplicado al sistema de reforzamiento después de tratar la superficie por medio de aplicaciones de resina epóxica con subsecuente polvo de cuarzo espolvoreado en fresco. La capa final es particularmente adecuada para recibir cualquier clase de empaste.
- (3) Para protección contra fuego, se adoptarán dos diferentes soluciones: uso de paneles entumescientes, o aplicación de empastes protectores. En ambos casos, el fabricante o proveedor indicará el grado de protección contra el fuego como una función del espesor del panel o del empaste. Los paneles, generalmente basados en silicatos de calcio, son aplicados directamente al sistema de reforzamiento FRP, si las fibras no son cortadas durante la instalación. Los empastes protectores representan la más ampliamente adoptada solución para protección contra el fuego, y será aplicada al sistema FRP como se indicó anteriormente.

## 5.9 EJEMPLOS NUMERICOS

Algunos ejemplos numéricos concernientes al reforzamiento FRP de la mampostería son reportados en el Apéndice H.

## 6 CONTROL Y MONITOREO

- (1)P La aceptación y el control de calidad serán realizados en los sistemas FRP.
- (2)P Después de la instalación FRP, la inspección y el monitoreo serán realizados usando pruebas no-destructivas y semi-destructivas. Las pruebas se realizarán como se indica en la Sección 6.3.
- (3) En las mismas aplicaciones, tales como una configuración completamente envuelta y/uso de dispositivos de anclaje, las pruebas en el sustrato pueden ser omitidas.

### 6.1 CONTROL DE CALIDAD EN EL SITIO DE CONSTRUCCION

- (1)P La aceptación de las características físicas y mecánicas de FRP serán evaluadas en el sitio de construcción, al mismo tiempo que la adherencia a los requerimientos del diseñador.
- (2) El control de calidad en el sitio de construcción será realizado usando pruebas de evaluación destructiva en los especímenes. El número y tipo de pruebas estarán de acuerdo con las *Guías para calificación y criterio de aceptación de compuestos FRP para aplicaciones de reforzamiento de estructuras existentes*.

### 6.2 CONTROL DE CALIDAD DURANTE LA INSTALACIÓN

- (1) El control de calidad semi-destructivo durante la instalación de FRP es fundamental para la caracterización mecánica de la instalación en sí. La uniformidad de la instalación y los defectos de la misma pueden ser investigados a través de pruebas no-destructivas.
- (2)P El número y tipo de pruebas serán evaluados basados en la importancia de la instalación y la relación con el área reforzada versus la estructura total. En particular, se dará mayor atención a una edificación con funciones públicas o estratégicas, como lo indica la Agencia de Seguridad Pública en el evento de un desastre natural.

#### 6.2.1 Pruebas semi-destructivas

- (1) Tanto las pruebas de jalar (pull-off) y las pruebas de corte pueden ser realizadas. Se realizarán pruebas semi-destructivas sobre las áreas testigo (Secciones 4.8 y 5.8) y, donde sea posible, en áreas reforzadas no-críticas en el rango de una prueba por cada  $30 \text{ m}^2$  para aplicación de estructuras de concreto reforzado, o  $50 \text{ m}^2$  para aplicación de estructuras de mampostería. En cualquier caso, no menos de 3 por cada tipo de pruebas serán realizadas.

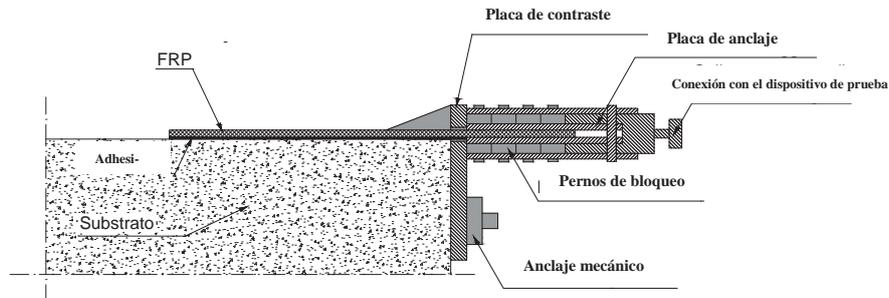
- (2) Prueba de jalar (pull-off).

Estas pruebas se usan para conocer las propiedades del sustrato de concreto restaurado, donde cada prueba se realiza usando una placa de acero circular de 20 mm de espesor con un diámetro no menor de 50 mm. Después de que la placa de acero es firmemente ajustada a la FRP, será aislada de la FRP circundante con un seguro usando una broca no mayor de 3mm. Se tendrá particular cuidado para evitar el calentamiento del sistema FRP mientras se logra una incisión de 1-2 mm en el sustrato de concreto.

Dispositivos, tales como un rulmán o terminales esféricas de rodamiento, serán usados para asegurar la aplicación de la fuerza de jalado perpendicular al FRP.

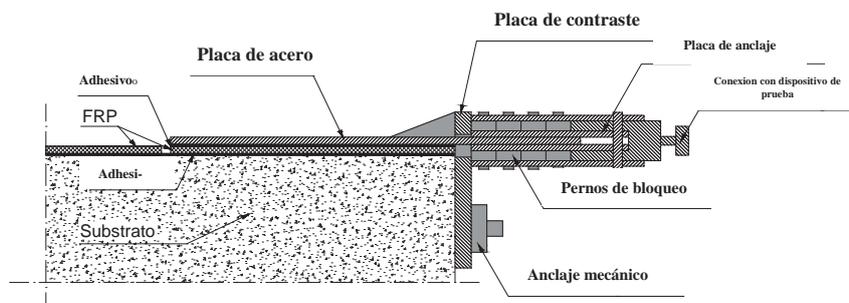
La aplicación de FRP puede ser considerada aceptable si por lo menos el 80 % de las pruebas (ambas pruebas en caso de sólo dos pruebas) dan una tensión de jalado no menor que 1.2 MPa para elementos de concreto reforzado o 10% de la fuerza de compresión del sustrato para mampostería, si la falla ocurre en el sustrato de concreto. Si la falla ocurre en la interfaz del sustrato de concreto, el gerente de construcción evaluará la aceptación de la prueba.

(3) Test de rompimiento por corte. Esta prueba es particularmente significativa para revisar la calidad del pegado entre el FRP y el substrato de concreto. La Figura 6-1 muestra una posible configuración del test. La preparación requiere que el FRP sea localizado junto a un borde y junto al substrato de concreto, pero en continuidad con el material de pegado. La fuerza es aplicada sobre el mismo plano de la porción libre FRP a través de un mecanismo de enganche usando el borde como un dispositivo de contraste.



**Figura 6-1** –Prueba directa de rompimiento por corte.

La Figura 6-2 muestra la misma prueba cuando una porción libre de FRP no está disponible. Este procedimiento puede ser identificado como indirecto. El área de prueba está localizada junto a un borde donde una placa de acero está pegada a la superficie. Parte de la placa de acero se proyectará desde el filo para asegurar el perfecto agarre del dispositivo examinado o probado. La placa de acero tiene 45 mm de ancho y 6 mm de grueso. El área de la placa de acero en contacto con el FRP puede ser tratado para mejorar el pegado.



**Figura 6-2** –Prueba “indirecta” de rompimiento por corte.

Tanto en la Figura 6-1 como en la Figura 6-2, la longitud de pegado de la porción FRP no será menor de 200 mm o 150 mm para concreto reforzado o estructuras de mampostería, respectivamente. En cualquier caso, la porción pegada no será menor que 1.1 veces la longitud óptima de pegado de FRP (Secciones 4.1.2 y 5.3.2).

Cuando se usan pruebas indirectas de corte, la porción de la placa de acero permanecerá perfectamente pegada al FRP. La aplicación FRP puede ser considerada aceptable si al menos 80% de las pruebas (en el caso de dos pruebas) regresan a un pico de fuerza de rompimiento no menor del 85% de la fuerza de diseño calculada por la Ecuación (10.2), en la cual  $k_b$  es igual a 1.

## 6.2.2 Pruebas no destructivas

- (1) El criterio de aceptación requiere que los defectos de pegado no sean mayores que las imperfecciones cilíndricas con una altura y diámetro de 0.5 y 25 mm, respectivamente.
- (2) Las pruebas no-destructivas pueden ser usadas para caracterizar la uniformidad de la aplicación de FRP empezando desde una encuesta de dos dimensiones de la superficie reforzada con resolución espacial diferente como una función del área de reforzamiento (Tabla 6-1).

**Tabla 6-1** – Resolución mínima por defectos de espesor a ser identificados con pruebas no-destructivas.

Tensión de corte transferida a la interfase	Tipo de aplicación	Prueba no-destructiva	Superficie con apariencia de criba (mm)	Resolución mínima por defectos de espesor (mm)
ausente	envolturas, con excepción del área de traslape en una aplicación de capa simple	Opcional	250	3
débil	área central de reforzamiento plano muy extenso	Opcional	250	3
moderado	área central de reforzamiento flexional longitudinal	Sugerido	100	0.5
crítico	área de anclaje, áreas de superposición entre capas, rebosamiento por reforzamiento para corte, áreas de interfase con conectores, áreas con grandes rugosidades o rajaduras en el sustrato	Requerido	50	0.1

- (3) Prueba estimulada de acústica. Similar a las pruebas de eco-impacto, tales pruebas se apoyan en los diferentes comportamientos de la capa de compuesto que depende del pegado entre las capas FRP y el sustrato de concreto. En su más básica versión, esta prueba puede ser llevada a cabo por un técnico que martille la superficie de compuesto y escuche el sonido de impacto. Más resultados objetivos pueden ser obtenidos con sistemas automatizados.
- (4) Prueba de ultrasónico de alta frecuencia. Deberían ser llevadas a cabo usando los métodos de reflexión con frecuencias no menores a 1.5 MHz y probetas con un diámetro no mayor de 25 mm, adoptando una técnica basada en la primera variación pico de la amplitud de localización de defectos.
- (5) Pruebas de termografía. Son efectivas solamente para sistemas FRP con baja conductividad térmica y no pueden ser aplicados a sistemas de reforzamiento FRP metálicos o de carbón a menos que se tomen precauciones específicas. El calor alcanzado durante la prueba será menor que la temperatura de transición vítrea del sistema FRP.
- (6) Prueba de emisión acústica. La técnica está basada en el método de emisión acústica (AE) y permite que la afectación del daño dentro de un elemento estructural sujeto a carga, sea escuchado y grabado en su sonido generado ya sea por la formación de fisuras como por el fenómeno de delaminación que se propaga como ondas elásticas.

## 6.3 CALIFICACION DEL PERSONAL

- (1) El personal a cargo de las pruebas tendrá uno de los tres niveles de calificación especificados en la Tabla 6.2 de acuerdo a UNI EN 473 y UNI EN 45013.

**Tabla 6-2** –Calificación de los niveles para desarrollar pruebas semi destructivas y no destructivas.

Nivel 1	Conocimiento apropiado del equipo de prueba; grabación y calificación de resultados de acuerdo a criterio escrito; escritura de un reporte sobre los resultados de la prueba.
Nivel 2	Escogiendo la forma de llevar a cabo la prueba; definiendo los límites de aplicación de la prueba para lo cual el técnico del nivel 2 está certificado, entendiendo las especificaciones de la prueba y traduciéndolas a instrucciones prácticas de prueba convenientes para las condiciones de trabajo en el sitio; ajustando y calibrando el equipo de prueba; desarrollando y controlando la prueba; interpretando y evaluando los resultados de la prueba de acuerdo a las especificaciones que están de acuerdo con dicha prueba; preparar instrucciones escritas de la prueba para el personal del nivel 1; desarrollando y supervisando todas las funciones del nivel 1; entrenando al personal del nivel 1; organizando resultados de la prueba y escribir el reporte final.
Nivel 3	Estar a cargo de una parte del laboratorio; establecer y validar los procedimientos y técnicas de pruebas; interpretar especificaciones y procedimientos; tener habilidades para evaluar y entender los resultados de las pruebas de acuerdo a especificaciones existentes; tener un conocimiento práctico suficiente de materiales, métodos de producción y tecnología de instalación del sistema a ser probado para ser capaz de escoger los métodos apropiados, establecer técnicas y colaborar en la definición del criterio de aceptación cuando ellos no están pre-establecidos; tener conocimientos en diferentes campos de aplicación; ser capaz de liderar personal del nivel 1 y 2.

## 6.4 MONITOREO DEL SISTEMA DE REFORZAMIENTO

(1) Debido a la pobre disponibilidad de datos que reconocen el comportamiento a largo plazo de los sistemas FRP usados para reforzamiento de estructuras RC, es recomendado monitorear acertadamente el sistema instalado FRP por medio de pruebas semi y no-destructivas periódicamente conducidas sobre la estructura reforzada. El propósito de tal proceso de monitoreo es mantener los siguientes parámetros bajo control:

- temperatura del sistema FRP instalado;
- humedad del medioambiente;
- medida de los desplazamientos y deformaciones de la estructura reforzada;
- daño potencial de las fibras;
- extensiones de defectos y despegamiento en el sistema FRP instalado.

(2) El tipo y número de prueba a ser realizado será incluido en el manual de mantenimiento.

## 7 APENDICE A (COMPONENTES CONSTITUYENTES DE FRP Y SUS CARACTERISTICAS FISICO-MECANICAS)

### 7.1 GENERALIDADES

Los materiales compuestos exhiben las siguientes características:

- están comprendidos de dos o más materiales (componentes) diferentes en naturaleza y macroscópicamente distinguibles;
- por lo menos dos componentes tienen propiedades físicas y mecánicas muy diferentes una de la otra, para dotar al material FRP con diferentes propiedades de aquellas de sus constituyentes.

Los compuestos de fibras reforzadas con matriz polimérica satisfacen ambas características citadas previamente. En efecto, ellos consisten en poliméricos orgánicos y fibras reforzantes, cuyas principales características son resumidas en la Tabla 7-1.

**Tabla 7-1** –Comparación entre las propiedades de la fibra, matriz y acero (valores típicos).

	Módulo de Elasticidad normal $E$	Resistencia a tracción $\sigma_r$	Deformación unitaria a rotura $\epsilon_r$	Coefficiente de expansión térmica $\alpha$	Densidad $\rho$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Vidrio-E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Vidrio-S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Carbón (alto módulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Carbón (alta resistencia)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Arámida	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matriz polimérica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acero	206	250 – 400 (cedencia) 350 – 600 (falla)	20 – 30	10.4	7.8

Como puede verse, las fibras de carbón pueden exhibir valores del módulo de Elasticidad normal mucho mayor que los típicos materiales de construcción. Además, son considerados más efectivos desde el punto de vista estructural. Los diseñadores y expertos evaluarán cuidadosamente los problemas potenciales con otros materiales usados como soporte.

La matriz es considerada un material isotrópico, mientras el componente de refuerzo (con la excepción de la fibra de vidrio) es un material anisotrópico (de propiedades diferentes en diferentes direcciones). Las características definitorias de los materiales FRP son como sigue:

- geometría: forma y dimensiones;
- orientación: la orientación con respecto a los ejes de simetría del material; cuando al azar, las características del compuesto son similares a un material isotrópico (“casi isotrópicos”).

- En todos los otros casos el compuesto es considerado un material anisotrópico;
- concentración de fibra: volumen, fracción, distribución (dispersión).

Además, los compuestos en la mayoría de los casos son un material no homogéneo y anisotrópico. Para resumir las propiedades FRP, es conveniente clasificar los compuestos de fibra reforzada en dos categorías, sin considerar su tecnología de producción:

- capa única (lámina);
- multicapas (láminas).

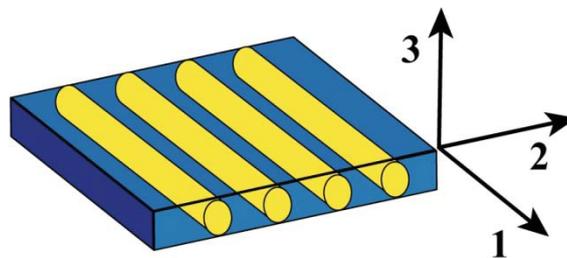
Las láminas son materiales compuestos de capas aplicadas cuyo espesor es usualmente de algunas décimas de milímetros. En el caso más simple, las fibras están entrelazadas sólo en el plano de la lámina (no hay fibras arregladas ortogonalmente a ese plano). El tamaño de las láminas es intermedio entre aquellas de las fibras y aquellas de estructura (Tabla 7-2). Hay además una clase especial de compuestos multicapas, llamadas láminas híbridas, donde cada lamina simple está conformada de dos fibras diferentes (*por ejemplo*, compuestos de matriz epóxica con carbón y fibras arámidas para mantener un compuesto rígido y tenaz) y diferentes materiales (*por ejemplo*, compuestos con capas alternas de resina epóxica con fibras arámidas y aluminio).

La ventaja primaria de las láminas es representada por la mayor libertad de arreglo de la fibra.

**Tabla 7-2**–Tamaño de los compuestos de fibras con matriz polímera.

	Dimensiones representativas					
	pm	nm	µm	mm	m	km
Átomo	*	*				
Moléculas de polímero		*	*			
Polímeros biológicos		*	*			
Cristalitos			*	*		
Esferoides			*	*		
Díametro de fibras			*	*		
Espesor de hojas FRP			*	*	*	
Espesor de láminas FRP				*	*	
Longitud de láminas					*	*
Estructuras						*

Debido a las características anisotrópicas de material FRP, las propiedades mecánicas dependen de la elección del sistema de referencia. Los principales ejes son usualmente escogidos para ser coincidentes con los ejes simétricos del material (ejes naturales). Un material FRP unidireccional es ilustrado en la Figura 7-1.



**Figura 7-1** –Elección de ejes para un material FRP unidireccional.

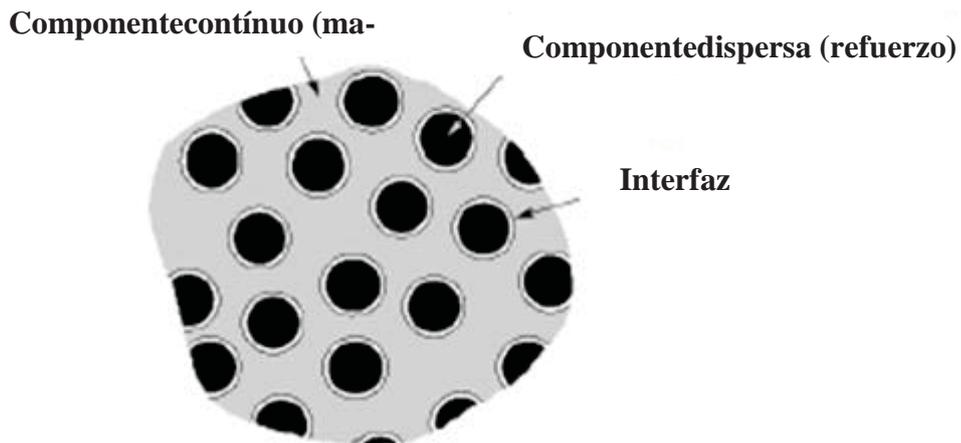
La relación entre valores de las propiedades de materiales de compuesto en diferentes direcciones es llamado grado anisotrópico. Algunos valores del grado anisotrópico relacionado a las características principales de interés en láminas unidireccionales ( $E_i$ : Módulo de Elasticidad normal;  $G_{ij}$ : Módulo

de corte;  $\sigma_{fi}$ : tensión de falla;  $\alpha_i$ : coeficiente de expansión termal) son mostrados en laTabla 7-3.

**Tabla7-3** –Grados anisotrópicos de láminas de fibras-reforzadas unidireccionalmente).

	$E_1/E_2$	$E_1/G_{12}$	$\sigma_{r1}/\sigma_{r2}$	$\alpha_1/\alpha_2$
Silicón carbono/cerámica	1.09	2.35	17.8	0.93
Boro/aluminio	1.71	5.01	11.6	0.30
Silicón carbono/aluminio	1.73	5.02	17.0	0.52
S-vidrio/epoxico	2.44	5.06	28.0	0.23
E-vidrio/epoxico	4.42	8.76	17.7	0.13
Boro/epoxico	9.27	37.40	24.6	0.20
Carbón/epoxico	13.60	19.10	41.4	-0.07
Aramídico/epoxico	15.30	27.80	26.0	-0.07

Los materiales compuestos pueden ser más resistentes y más rígidos (carbón FRP) que los materiales de construcción tradicionales. Como resultado los compuestos pueden llegar a ser muy atractivos cuando el peso de la estructura se hace importante. La resistencia específica (resistencia/densidad) del compuesto puede ser hasta cuatro veces la de los materiales tradicionales, el propio módulo de elasticidad normal específico (modulo/densidad) puede ser hasta dos veces. Además, una estructura de material compuesto puede pesar casi la mitad de una estructura de material de construcción tradicional con igual rigidez. La naturaleza de los componentes del compuesto determina las propiedades finales de los materiales FRP. Para obtener un compuesto con alta resistencia mecánica, no es suficiente usar fibras fuertes. Una buena adhesión entre la matriz y las fibras usadas como un componente de carga portante es también necesario. La adhesión es usualmente obtenida con un tercer componente aplicado en una muy delgada capa a la superficie de la fibra que provee compatibilidad con la matriz orgánica. Este tratamiento de la superficie requiere la presencia de una fase intermedia entre la matriz y las fibras, llamada interfaz. (Figura 7-2). La interfazes típicamente hecha de una capa muy fina (a menudo de un solo átomo) colocada directamente sobre la fibra y que es requerida para determinar las propiedades finales del material.



**Figura7-2**– Representación de componentes en compuesto FRP.

Las fallas estructurales de los compuestos FRP son a menudo debidas a la pérdida de pegado entre la matriz y las fibras. Además, el fabricante del material FRP debería tomar especial cuidado en seleccionar el componente más apropiado para promover el pegado.

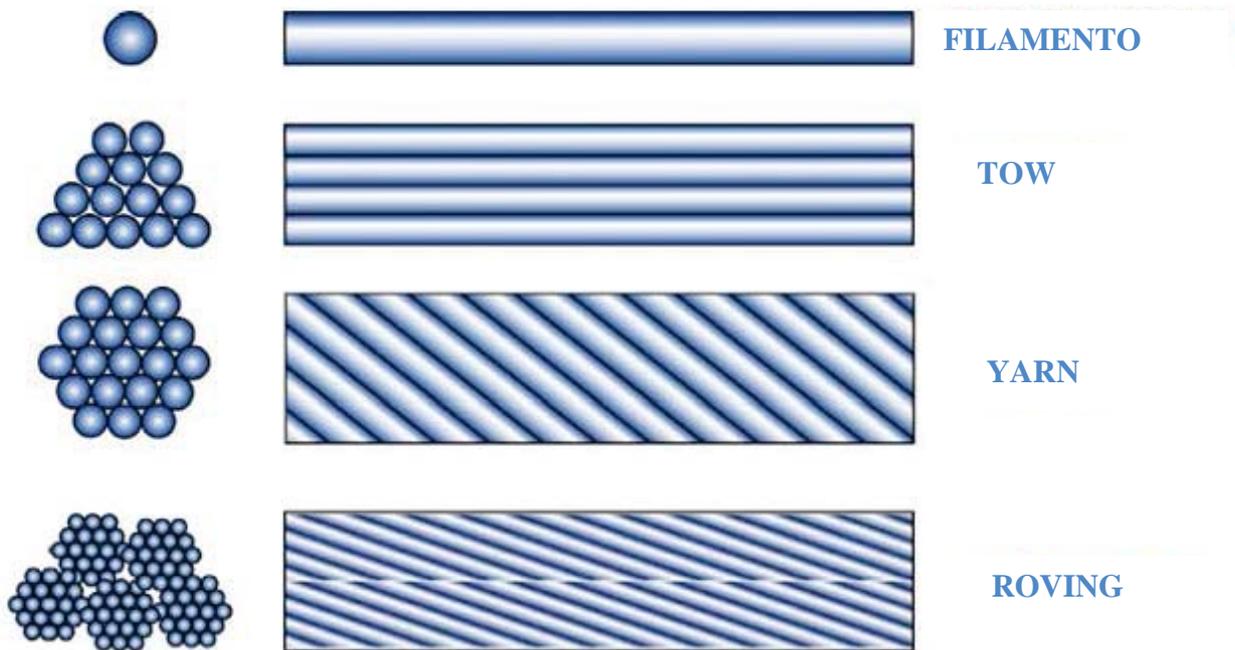
## 7.2 FIBRAS USADAS EN COMPUESTOS

Las fibras más comunes usadas en compuestos son vidrio, carbón y arámida. Su singular geometría monodimensional, sumada a ser particularmente conveniente para la producción de compuestos, provee láminas FRP con rigidez y resistencia mayor que aquellas de formas tridimensionales de FRP. Esto es debido al menor número de defectos de configuraciones monodimensionales opuesto a elementos tridimensionales.

### 7.2.1 Tipos de fibras disponibles en el mercado y su clasificación

Las fibras están hechas de filamentos continuos muy finos, y por tanto, son muy difíciles de ser individualmente manipulados. Por esta razón, están comercialmente disponibles en diferentes formas (Figura 7-3). Una breve descripción de los más comúnmente usados se resume a continuación:

- filamento (monofilament): filamento básico con un diámetro de casi 10  $\mu\text{m}$ ;
- estopa (tow): manojó de filamentos continuos no entrelazados;
- hilado (spun yarn): acoplamiento de filamentos entrelazados y fibras formadas dentro de una longitud continua que es conveniente para el uso en materiales textiles tejidos;
- hilo mechado (roving): un número de hilados o estopas agrupados en un paquete paralelo con poco o ningún entrelazamiento.



**Figura 7-3** –Tipos de fibras.

Combinando un número de estopas o hilados, se obtiene una cinta, donde las estopas y los hilados pueden ser simplemente arreglados lado por lado, o cosidos o ajustados sobre un soporte. La clasificación de fibras es directamente tomada de un método tradicional usado para fibras textiles. Los filamentos usados para producir hilados se caracterizan por su composición química o masa por unidad de longitud. La unidad de masa lineal o conteo (masa por unidad de longitud) de acuerdo a ISO 2974:2000(E) es la TEX, equivalente a 1 g y por km de fibra. Otra unidad de masa lineal ahora obsoleta, es el denier, equivalente a 0.111 TEX.

El nombre técnico de la fibra de vidrio sigue la regla de ISO 1139:1973(E) y ISO 2078:1993(E) e incluye los siguientes elementos:

- una letra que identifica el tipo de vidrio usado;
- una segunda letra que identifica el tipo de fibra usada:
  - C (“Contínua”, por filamentos);
  - D (“Discontínuos”, para fibras discontinúas).
- un primer número que identifica el diámetro nominal (en  $\mu\text{m}$ ) del filamento;
- un segundo número que indica la masa lineal de la fibra en TEX;
- la dirección y valor de torsión (Figura 7-4), expresado en rpm (opcional);
- el número de cables usados para producir el elemento entrelazado (opcional);
- una etiqueta del fabricante conteniendo toda información codificada necesaria para la caracterización del producto (opcional).



Torsión negativa (S).



Torsión positiva (Z).

**Figura 7-4** –Definición de dos posibles direcciones de torsión.

Ejemplos de etiquetado se dan en una lista a continuación:

- EC10 40: filamento contínuo de E-vidrio, con un diámetro de 10  $\mu\text{m}$  y una masa lineal de 40 TEX.
- EC9 34 Z 40: filamento contínuo de E-vidrio, con un diámetro de 9  $\mu\text{m}$  y una masa lineal de 34 TEX, entrelazada a 40 rpm. La letra Z representa torsión positiva de acuerdo a ISO 1139:1973(E) (la torsión negativa se indica con la letra S).
- EC9 34 Z 160 x 4 S 150: la letra “x” muestra que el material es un cable que contiene un número de filamentos idénticos. El código que precede la “x” identifica las características de los filamentos, mientras el siguiente número (4) representa el número de filamentos y la letra S representa una torsión negativa, acoplada a 150 rpm.
- EC9 x 4 S 150: etiquetado simplificado del filamento precedente.

Los hilos torcidos comúnmente usados para compuestos estructurales son referidos como EC5 10 x 2 o SC5 4 x 2, dependiendo si el material es E-vidrio o S-vidrio, respectivamente. Para fibras de carbón, los hilos torcidos son usualmente clasificados por el símbolo “k,” que significa “miles” [por ejemplo, 1k de hilo torcido está hecho de 1000 filamentos (66.6 Tex), un hilo torcido de 3k (200 Tex) tienen 3000 filamentos, y así sucesivamente]. Los valores típicos son 0.5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, y 48k.

Sumado a los hilados o a los hilos torcidos, las fibras también están comercialmente disponibles como telas. En este caso, la disposición de las fibras puede proveer cualidades cuasi-isotrópicas del tejido. En tales materiales, la principal dirección se llama alma o armazón y la dirección ortogonal se llama trama.

### 7.2.1.1 Fibras de vidrio

Estas fibras son comúnmente usadas en los campos naval e industrial para producir compuestos de desarrollo medio-alto. Su característica peculiar es su alto grado de resistencia. El vidrio es principalmente hecho de silicón( $\text{SiO}_2$ ) con una estructura tetrahédrica ( $\text{SiO}_4$ ). Algunos óxidos de aluminio y otros iones metálicos son entonces añadidos en varias proporciones (Tabla 7-4) ya sea para facilitar las operaciones de trabajo o modificar las propiedades (*por ejemplo*, las fibras de S-vidrio exhiben una mayor resistencia a tracción que el vidrio-E).

**Tabla 7-4** – Composición típica de la fibra de vidrio (% en peso).

	E-vidrio	S-vidrio
Oxido de silicón	54.3	64.20
Oxido de aluminio	15.2	24.80
Oxido de hierro	-	0.21
Oxido de calcio	17.2	0.01
Oxido de magnesio	4.7	10.27
Oxido de sodio	0.6	0.27
Oxido de boro	8.0	0.01
Oxido de bario	-	0.20
Varios	-	0.03

La producción de fibra de vidrio está esencialmente basada en batir un lote de arena, alúmina y caliza. Los constituyentes son mezclados en seco y derretidos (a casi  $1260\text{ }^\circ\text{C}$ ) en un tanque. El vidrio derretido es llevado directamente sobre boquillas de platino y por gravedad pasa por unos orificios localizados en el fondo. Los filamentos son después agrupados para formar una franja normalmente formada por 204 filamentos. Un solo filamento tiene un diámetro promedio de  $10\text{ }\mu\text{m}$  y está generalmente cubierto con una cola. Los hilados son luego agrupados, en muchos casos sin entrelazados, en un hilado mechado (*roving*). El valor común de la masa lineal para hilo torcido (*roving* a ser usado en aplicaciones de ingeniería civil es mayor que 2000 TEX).

Las fibras de vidrio están también disponibles como hojas delgadas, llamadas *mat*. Un *mat* puede estar hecho tanto de fibras largas continuas como cortas (*por ejemplo*, fibras discontinuas con una longitud típica entre 25 y 50 mm), arregladas al azar (Figura 7-5) y están unidas por un pegamento químico. El ancho de tales *mats* varía entre 5 cm y 2 m, con una densidad aproximada de  $0.5\text{ kg/m}^2$ .

Las fibras de vidrio generalmente tienen un Módulo de Elasticidad normal (70 GPa para vidrio-E) menor que las fibras de carbono y arámda y su resistencia a la abrasión es relativamente pobre; además, se requiere cautela durante la manipulación. Sumado a eso, son propensos a decaer y tener baja resistencia de fatiga. Para mejorar el pegado entre las fibras y la matriz, así como para proteger las fibras contra los agentes alcalinos y la humedad, las fibras se someten a tratamientos de pegado que actúan como agentes acoplantes. Tales tratamientos son útiles para mejorar la durabilidad y el desarrollo de la fatiga (estática y dinámica) del material compuesto. Los compuestos FRP basados en fibras de vidrio son generalmente donotadas como GFRP.



Fibras discontinuas.



Mat con fibras discontinuas.

**Figura7-5** –Matde fibra de vidrio.

### 7.2.1.2 Fibras de carbón

Las fibras de carbono son usadas por su alto desempeño y son caracterizadas por el alto Módulo de Elasticidad normal, así como un alto nivel de resistencia. Ellas tienen una falla de fragilidad intrínseca con una relativamente baja energía de absorción. Aunque, la fuerza de falla es grande comparada con las fibras de vidrio y arámida. Las fibras de carbón son menos sensitivas a caer en la ruptura y en la fatiga y muestran una ligera reducción en la resistencia a tensión a largo plazo. La estructura cristalina de grafito es hexagonal, con átomos de carbono arreglados en una estructura planar, mantenida juntas por interacción de las fuerzas transversales Van der Waals, mucho más débiles que aquellas que actúan sobre átomos de carbono en el plano (pegamentos covalentes). Por esta razón, su módulo de Elasticidad normal y la resistencia son extremadamente altos en las direcciones de la fibra, y mucho más bajo en la dirección transversal (comportamiento anisotrópico). La estructura de las fibras de carbón no es tan completamente cristalina como la del grafito. El término “fibras de grafito” es sin embargo usado en el lenguaje común para representar fibras cuyo contenido de carbón es mayor que 99 %. El término “fibras de carbón” denota fibras cuyo contenido de carbón está entre 80 y 95 %. El número de filamentos contenido en laestopapuede variar desde 400 hasta 160,000.

La tecnología de producción moderna de fibras de carbón está esencialmente basada en pirolisis (*por ejemplo*, la descomposición térmica en la ausencia de oxígeno de sustancias orgánicas), llamadas precursores, entre los cuales los más frecuentes son las fibras poliacrilimitrilos (PAN), y las fibras de rayón. Las fibras PAN son primero estabilizadas con tratamientos térmicos a 200-240 °C por 24 hrs, entonces su estructura molecular se orienta en dirección de la carga aplicada. Como segundo paso, los tratamientos de carbonización son desarrollados a 1500 °C en una atmósfera inerte para remover los componentes químicos así como el carbón. Las fibras carbonizadas pueden entonces estar bajo un tratamiento de grafitización en atmósfera inerte a 3000 °C, para desarrollar una estructura completamente cristalina similar a la del grafito. Los compuestos FRP basadas en carbón son usualmente denotadas como CFRP.

### 7.2.1.3 Fibras arámidas

Las fibras arámidas son fibras orgánicas, hechas de polyamidas aromáticas en una forma extremadamente orientada. Introducida por primera vez en 1971, se caracterizan por su alta tenacidad. El módulo de Elasticidad normal y la resistencia tensional están intermedias entre el vidrio y las fibras de carbón (Figura 7-6 y laFigura7-7). La resistencia a compresión está generalmente alrededor de 1/8 de la resistencia tensional. Debido a la anisotropía de la estructura de la fibra, las cargas de compresión promueven un aflojamiento localizado de las fibras que dan como resultado una inestabilidad de las fibras y formación de nudos. Las fibras arámidas pueden degradarse por la exposición extensa a la luz solar, perdiendo hasta el 50 % de su resistencia tensional. A eso se suma, que pueden hacerse sensibles a la humedad. Su comportamiento de flujo plástico (creep) es similar a la de las fibras de vidrio, aunque su resistencia a la falla y comportamiento a la fatiga es más alto que GFRP.

La tecnología de producción de fibras arámidas está basada en alta temperatura y en alta velocidad de extrusión del polímero en una solución seguida por enfriamiento rápido (quenching) y secado. Las fibras producidas de esta forma pueden estar bajo un tratamiento caliente de orientación a través de ventilación o rápida rotación de rollos (post-giratorio) para mejorar características mecánicas. Las fibras arámidas están comercialmente disponibles como *yarns*, *roving*, o *telas*. Los compuestos FRP basados en fibras arámidas están usualmente denotados como AFRP.

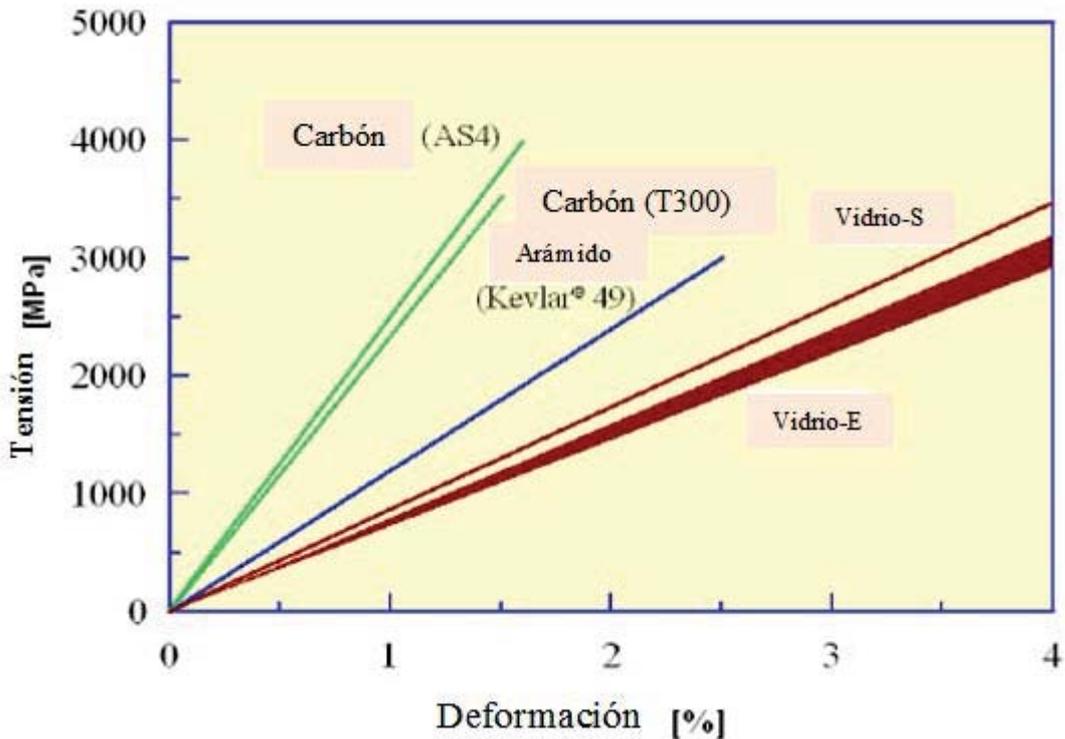


Figura7-6 –Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para diferentes fibras de refuerzo.

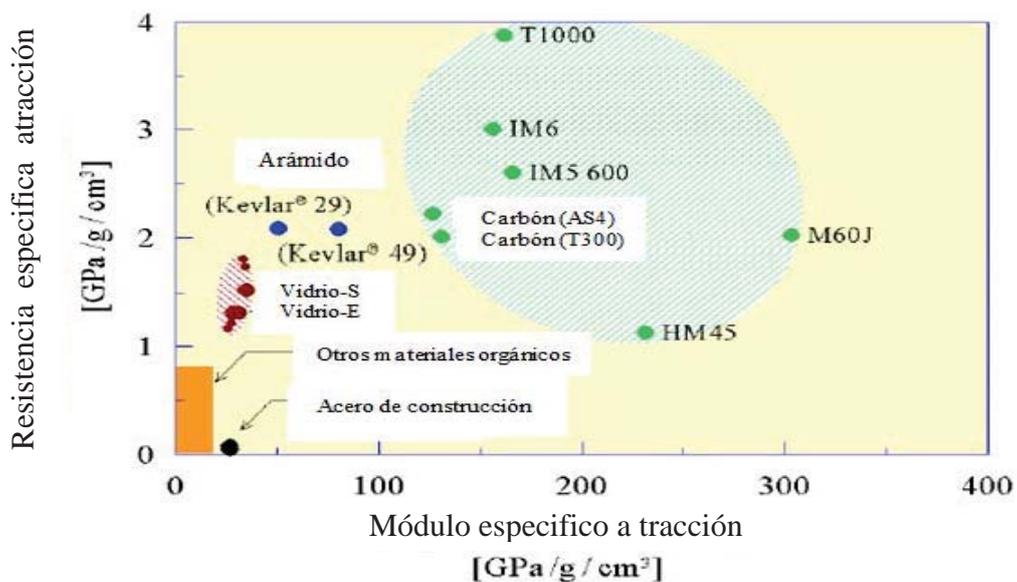


Figura7-7 –Comparación entre las FRP y el acero.

### 7.2.1.4 Características técnicas del hilado (Yarn)

Los hilados (Yarns) no están comercialmente disponibles como materiales de reforzamiento, pero en vez de eso son usados como material en crudo para la producción de telas. De aquí en adelante la estructura de una hoja típica de datos técnicos para un yarn (hilado) es propuesta. La referencia estándar internacional es ISO 2113:1996(E).

La ISO 1889:2009(E) puede ser usada para determinar la demanda de Yarn (hilado). Se debería dar una muestra de la longitud tomada de la tela y debería ser pesada. El valor de la demanda es dado por la siguiente relación:

$$T_x = \frac{P \cdot 1000}{L}, (7.1)$$

donde  $T_x$  es el número de yarn, expresada en TEX [g/km];  $P$  es el peso de la muestra, expresada en gramos; y  $L$  es la longitud de la muestra, expresada en metros.

El área  $A$ , en  $\text{mm}^2$ , de la sección transversal de un filamento o paquete (*yarn, tow, roving*), puede ser determinado usando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{T_x}{\rho \cdot 1000}, (7.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad de yarn, expresada en  $\text{g/cm}^3$ .  $T_x$  es la demanda expresada en TEX. La evaluación de tales parámetros puede ser útil para producción de control de calidad.

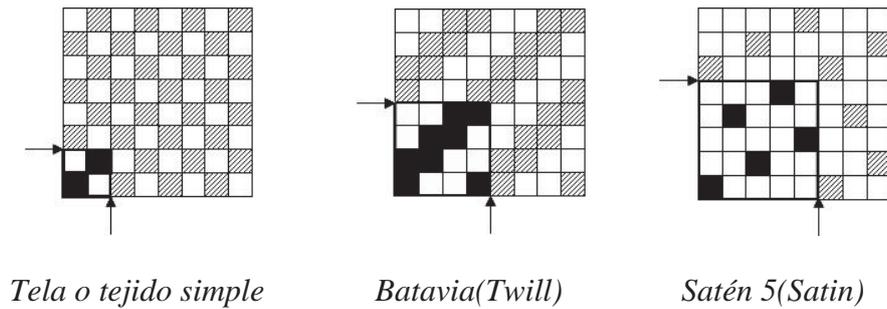
### 7.2.2 Tejidos no impregnados

Un tejido que no está impregnado con resina se la llama “*seco*”. El tejido más simple es obtenido empezando desde un roving y es llamado “*roving de tejido*”. Ya que el roving no muestra ninguna torcedura, el hilo tiende a comprimirse donde se cruzan la trama y la urdimbre. El tejido resultante es adaptable para alcanzar productos grandes en talla y espesor. Los tejidos obtenidos directamente del tejido de los hilados (yarns), siendo más ligeras y más compactas, pueden ser usadas para aplicaciones más específicas que requieren una optimización del peso estructural. Un compuesto laminado obtenido de estos tejidos tienen una fracción volumétrica más baja en fibras que una lámina hecha de una fibra unidireccional debido al ondeado o rizado asociado con el tejido.

Los tejidos más usados se llaman, la tela, el batavia (twill) y el satinado. Las telas muestran una estructura más rígida y estable. Las principales desventajas son la dificultad de la impregnación de la resina así como el rizado o tejido de la trama y de la urdimbre. Esta última característica implica una menor eficiencia en el plano de la lámina. La ondulación de este tipo de tejido es casi el 10%. El batavia y las fibras satinadas son más flexibles pero probables de ser dañadas durante la manipulación. La tela satinada es intrínsecamente más rígida en el plano de laminación, ya que presenta menos ondulaciones de las fibras en ambas direcciones.

La Figura 7-8 muestra las geometrías de las tejidos más usadas en actuales aplicaciones. La representación está de acuerdo con las siguientes asunciones:

- Caja negra o trayada = hilo de la trama en la parte alta del tejido de la hilada;
- Caja blanca = hilo de trama (yarn) en la parte baja del tejido de hilado.



**Figura7-8** – Ejemplos de telas.

Hay además, telas multiaxiales, donde las fibras están orientadas en más de dos direcciones. Pueden ser hechas de hiladas tejidas o principalmente hiladas cosidas. Finalmente, las telas tridimensionales están también disponibles, donde la presencia de una segunda trama en dirección ortogonal al plano provee el producto con más alta resistencia y propiedades especiales (por ejemplo, la capacidad de inflar cuando están impregnadas con resina).

### 7.2.2.1 Características técnicas de telas no impregnadas

Las telas para reforzamiento estructural están comúnmente distribuidas como un producto seco a ser impregnado con resinas especiales en el sitio de trabajo. Ellas pueden ser unidireccionales, donde las fibras están todas orientadas en la dirección de la longitud y mantenidas juntas por una malla ligera no estructural, bidireccionales, hechas de un tejido de malla ortogonal, usualmente balanceado (la misma relación de fibras en las dos direcciones) y multi-axial, donde las fibras están orientadas en diferentes direcciones. Los fabricantes de fibras secas son requeridos de proveer hojas de datos del material. La estructura de hoja de datos de material es reportada de aquí en adelante para tejidos monodireccional y bidireccional. La hoja de datos de las telas comercialmente disponibles pueden también incluir otra información o parte de aquellos indicadores. La estructura sugerida es exhaustiva y reconoce el tipo y cantidad de información provista.

La referencia general estandar es ISO 8099:1980. Para telas multiaxiales, sumada a la información general concerniente al tipo de hilada y otras características de la tela como la orientación de cada capa de fibras deberán también ser reportada. Ejemplos concernientes a la determinación de algunos parámetros característicos de las telas usadas para reforzamiento estructural son ilustrados.

En casos donde solamente la demanda de hilada y la geometría son provistas, la masa de las fibras por unidad de área en una dirección dada puede ser determinada con la siguiente ecuación:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10}, \quad (7.3)$$

donde  $p_x$  es la masa de la tela en la dirección principal [ $\text{g}/\text{m}^2$ ],  $T_x$  es la densidad de la hilada en la dirección principal, expresada en TEX [ $\text{g}/\text{km}$ ], y  $N_f$  es el número de hiladas por unidad de ancho en la dirección principal [ $\text{n}^\circ/\text{cm}$ ].

Por ejemplo, dada una tela unidireccional caracterizada por 3.8 yarns/cm y por una densidad yarn de 800 Tex, la masa resultante por unidad de área es:

$$p_x = \frac{800 [\text{Tex}] \cdot 3.8 [\text{hilos/cm}]}{10} = 304 \text{ g} / \text{m}^2.$$

Si es necesario evaluar el número de yarns acomodados en una dirección dada por unidad de longitud en la dirección ortogonal, ISO 4602:1997(E) puede ser aplicada y los yarns acomodados en

la dirección ortogonal de una franja de tela dada (*por ejemplo*, 10 cm de ancho)son contados. El número resultante es variado proporcionalmente a la unidad de longitud escogida.

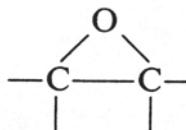
### 7.3 MATRICES DE LOS COMPUESTOS FRP

Las resinas termotradas son las matrices más comúnmente usadas para la producción de materiales FRP. Están usualmente disponibles en un estado parcialmente polimerizado con consistencia fluida o pastosa a la temperatura ambiente. Cuando se mezcla con reagente apropiado, ellos polimerizan para convertirse en un material sólido y vitroso. La reacción puede ser acelerada por ajuste de temperatura. La resina termotrada tiene varias ventajas, incluyendo baja viscosidad que permite una impregnación de la fibra con relativa facilidad, buenas propiedades adhesivas, características de polimerización a la temperatura ambiente, buena resistencia a los agentes químicos, ausencia de temperatura de derretirse, etc. Las desventajas son limitadas a un rango de temperatura de transición del vidrio, pobre tenacidad respecto a la fractura (comportamiento “quebradizo”), y sensibilidad a la humedad durante las aplicaciones de campo. Las resinas termotradas más comunes en ingeniería civil son las resinas epóxicas. Resinas de poliéster o vinilester son también usadas. Considerando el material que es mezclado en el sitio de la construcción y se obtiene sus características estructurales finales a través de una reacción química, que debería siempre ser manipulada por personal especializado.

Los materiales de compuesto de fibra reforzada con matrices poliméricas termoplásticas son también disponibles pero requieren técnicas de instalación diferentes de las resinas termotradas. Las varillas de compuesto con una matriz termoplástica que puede ser curvada en cualquier momento por medio de tratamiento térmico están siendo actualmente investigadas.

#### 7.3.1 Resinas epóxicas

Las resinas epóxicas están caracterizadas por una buena resistencia a la humedad, agentes químicos, y tienen excelentes propiedades adhesivas. Son convenientes para la producción de material compuesto en el campo de la ingeniería civil. La máxima temperatura de operación depende tanto de la formulación como de la temperatura de reticulación. Para temperaturas de operaciones mayores que 60 °C, la resina debería ser convenientemente seleccionada tomando en cuenta las variaciones de sus propiedades mecánicas. Usualmente no hay restricciones significantes para la temperatura mínima de operación. El principal reagente está compuesto de fluidos orgánicos con una bajo peso molecular, conteniendo grupos epóxicos, anillos compuestos por un átomo de oxígeno y dos átomos de carbono:



**Figura7-9** –Grupo epóxico.

Tales materiales pueden ser producidos por la reacción de epoclorohidrina con compuestos amino o un compuesto ácido de bisfenol A.

El pre-polímero epóxicoes usualmente un fluido viscoso, con una viscosidad que depende del grado de polimerización. Un agente reticulante(típicamente un amino alifático) debe ser añadido a esta mezcla en una cantidad exacta para obtener la estructura correcta y las propiedades de la resina cruzada. La reacción es exotérmica y no produce productos secundarios. Puede ser ejecutada tanto al ambiente como a altas temperaturas, de acuerdo a los requerimientos tecnológicos y a las propiedades finales a las que se quieren llegar. la estructura química de la resina puede cambiar basada en la composición química del prepolímero epóxico. La resina epóxico más comúnmente usada en materiales de compuesto para aplicaciones civiles es el diglycidylether de bisfenol A

(DGEBA).

### 7.3.2 Resinas de poliéster

Las resinas de polyester tienen una viscosidad más baja con un alto peso molecular, conteniendo el doble C=C cadenas capaces de producir una reacción química. El grado de polimerización, y de aquí la longitud de molécula puede ser cambiada. A temperatura ambiente, la resina es siempre una sustancia sólida. Para ser usada, la resina poliéster tiene que ser disuelta en un solvente, generalmente un reactivo monómero, el cual reduce la viscosidad de la resina y además asiste con el proceso de impregnación de la fibra. El monómero (generalmente estireno) contendrá doble cadena C=C, permitiendo el cruzamiento de puentes entre las moléculas de poliéster a ser creadas. La reacción es exotérmica y no se generan productos secundarios. Es generalmente realizada a la temperatura ambiente, de acuerdo a requerimientos tecnológicos y a las propiedades finales que se quieren alcanzar. La estructura química de las resinas de poliéster puede ser adaptada ya sea cambiando el ácido y el glicol usado en la síntesis del polímero o por emplear un monómero reactivo diferente.

La familia de resinas de poliéster para materiales de compuesto está típicamente compuesta de isoftálico, ortoftálico, y resinas bisfenólicas. Tanto para aplicaciones a altas temperaturas como para ambientes químicamente agresivos, las resinas vinilester son a menudo usadas. Ellas representan un balance entre el rendimiento de las resinas de poliéster tradicionales y el de las resinas epóxicas.

### 7.3.3 Otros tipos de resina

Las limitaciones intrínsecas de las resinas termotratadas, particularmente su pobre dureza, relativamente bajas temperaturas de operación, y tendencia a absorber humedad del ambiente, han llevado recientemente al desarrollo de compuestos con una matriz termoplástica. Tales resinas tienen la capacidad de fluir después de ser calentadas a una temperatura suficientemente alta, específicamente más alta que  $T_g$  (temperatura de transición del vidrio) para materiales amorfos y más altos que  $T_m$  (temperatura de derretido) para materiales semicristalinos. La forma de cada componente puede ser modificada mediante el calentamiento del material a una temperatura conveniente (formación de calor). Su uso en el campo de la ingeniería civil es más bien limitado, sin embargo, las aplicaciones de relevancia potencialmente remarcables están siendo desarrolladas actualmente (por ejemplo, reforzamiento de varillas para concreto). En general, las resinas termoplásticas son más duras que las resinas termotratadas y en algunas instancias tienen más altas temperaturas de operación. A eso se suma que tienen mejor resistencia a los factores del medio ambiente. La principal limitación para su uso es su alta viscosidad, lo cual hace difícil la impregnación de la fibra y requiere equipo de trabajo más complejo y costoso.

A más de eso, el uso de matrices inorgánicas (basadas en cemento, metálica, cerámica, etc.) para la fabricación de compuestos fibro-reforzadas para construcción, está creciendo rápidamente. Aunque no está discutido en este documento, su uso es considerado posible cuando está acompañado por documentación técnica conveniente y validación experimental para probar su efectividad.

## 7.4 ADHESIVOS

La implementación de reforzamiento estructural basado en FRP (por ejemplo, lámina pultrutada) requiere el uso de adhesivos. Elegir el adhesivo más conveniente así como el tipo de tratamiento de superficie a ser llevado a cabo previo a la aplicación de FRP será hecha en base al sustrato disponible y a las propiedades del sistema FRP seleccionado. Las hojas de datos técnicos para los materiales FRP usualmente reportan las indicaciones del adhesivo a ser usado como una función de la estructura a ser reforzada. Incluso, la aplicación de las telas secas impregnadas en sitio puede ser considerada como una operación de acoplamiento usando adhesivos. El tipo de tratamiento de superficie llevado a cabo previo a la aplicación de FRP es importante para el correcto uso de adhesivos. Por esta razón se representa la razón para una conveniente preparación del sustrato que

describe los mecanismos físicos, químicos y mecánicos de adhesión. Para un estudio más comprensivo, el lector es referenciado a una literatura específica sobre el tema.

Un adhesivo es un material de naturaleza polimérica capaz de crear una conexión entre, por lo menos, dos superficies y capaz de compartir cargas. Hay muchos tipos de adhesivos naturales y sintéticos (elastoméricos, termoplásticos y mono o bicomponentes de resinas termotratadas); los adhesivos más convenientes para materiales de compuesto están basados en resinas epóxicas. Los adhesivos epóxicos usualmente son una mezcla de bicomponentes viscosos. Una vez endurecidos, a través de una reacción química cruzada, se vuelven convenientes para aplicaciones estructurales.

Hay varias ventajas en el uso de pegamento adhesivo comparado con el anclaje mecánico. Incluyen la posibilidad de conectar diferentes materiales, proveyendo mayor rigidez, distribución uniforme de cargas y evitando huecos peligrosos por concentraciones de esfuerzos.

## 8 APENDICE B (TECNICAS DE FABRICACION)

### 8.1 GENERALIDADES

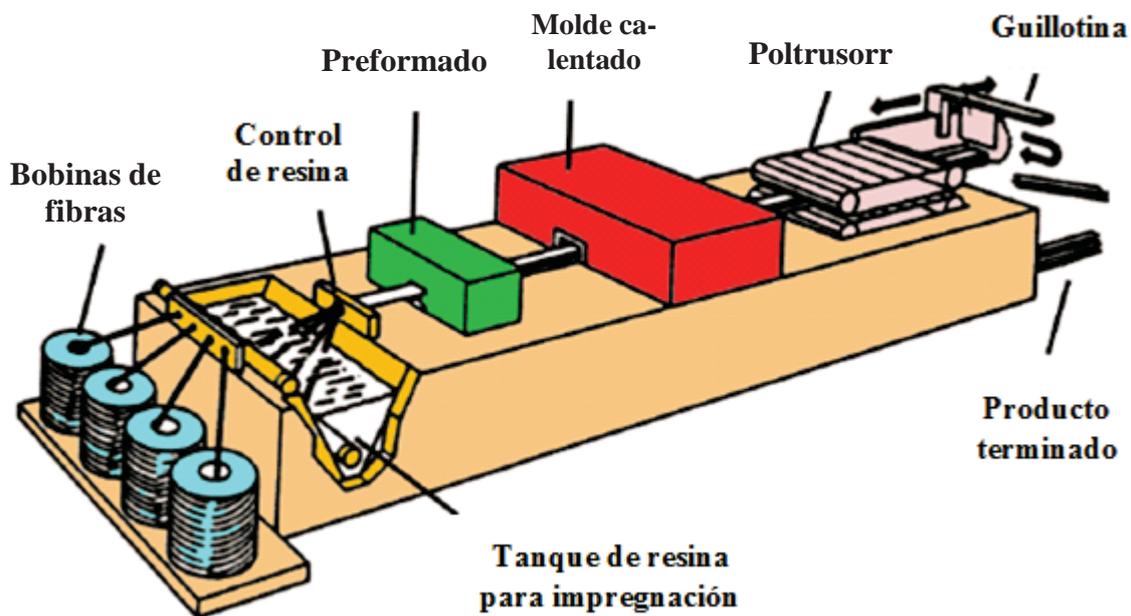
Las técnicas de fabricación de los sistemas FRP para aplicación en Ingeniería Civil son presentadas en este apéndice.

#### 8.1.1 Pultrusión

Pultrusión es una tecnología principalmente usada para la producción de láminas de fibras reforzadas. Tales productos son ampliamente usados en el campo de la ingeniería civil. Esta tecnología está basada en un proceso continuo de fabricación, consistente en tres etapas principales:

- formación;
- impregnación;
- endurecimiento.

En la versión más común diseñada para resina termotratada, los componentes (resina y fibras) son separadamente introducidos en una máquina que atrapa y jala las fibras durante las diferentes etapas de producción. Una versión más ampliamente difundida del proceso incluye la impregnación con un baño de resina como se muestra en la Figura 8-1.



**Figura 8-1**– Proceso de pultrusión con impregnación de baño de resina.

Las fibras son tomadas directamente desde los rovings y llevados a un baño de resina donde ocurre la impregnación. Paquetes de fibras impregnadas entran al dado de calentamiento donde el material es formado y cruzado-conectado bajo alta presión. Durante esta etapa, se eliminan espacios entre fibras para asegurar una continuidad apropiada en la dirección transversal.

El calentamiento es generalmente provisto por resistencias eléctricas y la temperatura es controlada por medio de termopares. La duración del estado de calor es regulada por velocidad de producción. Bajo la acción del dado, la matriz es curada y el compuesto es jalado a una velocidad constante. Al final del proceso, el material es cortado a la longitud apropiada. Capas de tejido pueden ser

agregadas para asegurar la fuerza de FRP en otras direcciones aparte de la longitudinal. Tejido, bobinado, y torcido pueden ser llevados a cabo directamente en la línea de producción con equipo especial.

El material FRP pultrado es ligero, resistente a la corrosión, con una sección transversal constante y espesor arriba de unos cuantos centímetros. Generalmente los productos pultrados incluyen láminas, barras, formas estructurales (C, doble T, etc.), paneles y placas. Son usados para reforzamiento interno y externo para estructuras nuevas y existentes, componentes estructurales para transportación soportes para iluminación y vallas publicitarias, elevadores para la industria del petróleo, etc.

### 8.1.2 Laminación

La laminación es usada exclusivamente para producir compuestos innovativos y de alto desarrollo que produce láminas de máximo espesor, arriba de unos cuantos centímetros por medio del control total de la orientación de las fibras y la complejidad de la estructura. Comparada con la pultrusión, la laminación permite completa libertad a la orientación de la fibra y a la curvatura del material producido. La principal limitación es velocidad de producción la cual llega difícilmente a 0.5 kg/h para componentes simples.

Las siguientes etapas fundamentales se pueden identificar en el proceso de laminación:

- a) preparación del material;
- b) laminación (cortado de material, empaçado en pilas y compactación);
- c) preparación de saco de vacío;
- d) curado de material (a temperatura ambiental, horno o autoclave);
- e) inspección (visual, por ultrasonido y rayos X);
- f) terminado (cortado de bordes con cortadores o chisguete de agua de alta presión).

La laminación puede ocurrir si fibras secas son impregnadas durante la instalación de campo, o pre-impregnado de fibras que ocurren ya sea en una o en múltiples direcciones.

La siguiente etapa en el proceso de laminación requiere la preparación de un saco de vacío (fase C) como se muestra en la Figura 8-2. El vaciado permite una rápida remoción de solventes y aire atrapado en las láminas previo a completar el curado de la resina.

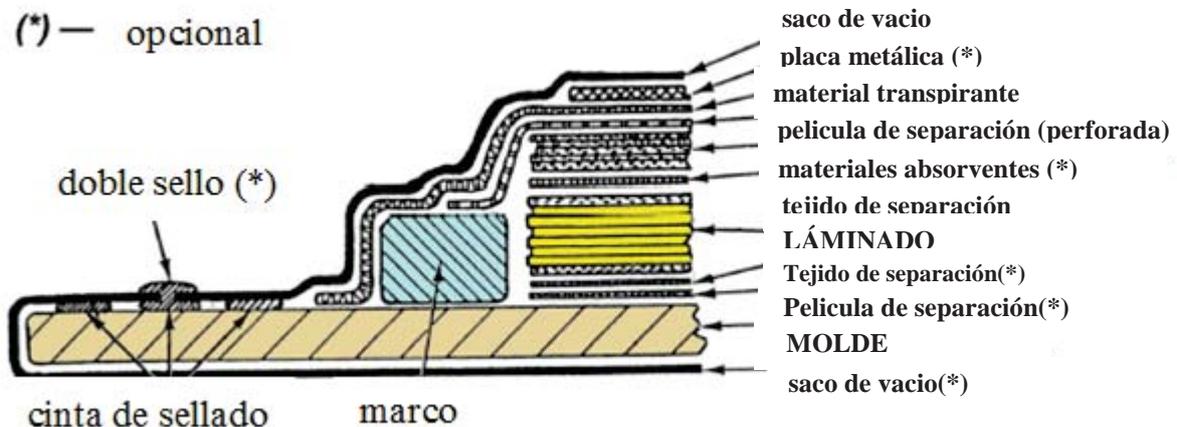


Figura 8-2– Sistema de laminación.

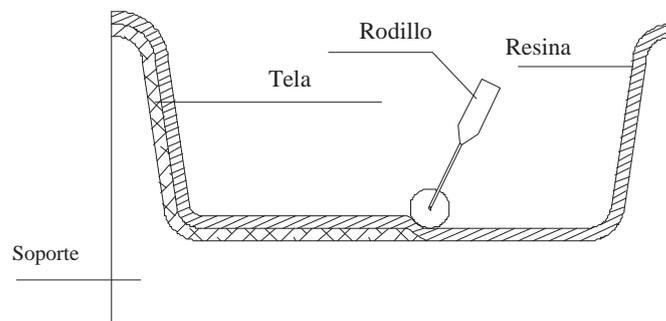
La ventaja primaria de esta tecnología es versatilidad extrema que permite la producción de

componentes complejos usando moldes que no sean caros. Aplicaciones específicas se refieren a los campos aeronáuticos y aeroespacial, carreras de carros, navegación y transportación. El reforzamiento FRP de columnas o vigas RC por medio de fibras secas o pre-impregnadas representa un campo de aplicación donde la laminación puede efectivamente ser usada en el campo de la construcción.

### 8.1.3 Preimpregnado *in situ*

El *preimpregnado in situ* es uno de los más simples y tradicionales métodos usados para preparación FRP en sitio, formado de dos fases: primero una capa y segundo una polimerización. El detalle, la primera fase consiste en un arreglo manual, sobre un apoyo específico, una capa de tela. Esta capa es inmediatamente impregnada con una resina (Figura 8-3).

La impregnación se logra manualmente a través del uso de rollos de cepillo. Compactación del material y eliminación de burbujas dentro de las capas lo cual se logra pasando el rodillo sobre la superficie. El mismo procedimiento se repite para cualquier otra capa de tela que se ponga arriba de la primera hasta lograr el espesor deseado.



**Figura8-3**– Sistema de preimpregnado *in situ*

La polimerización sigue al proceso de colocación de capas en una temperatura de medioambiente en un tiempo relativamente corto sin calentar la superficie de compuesto.

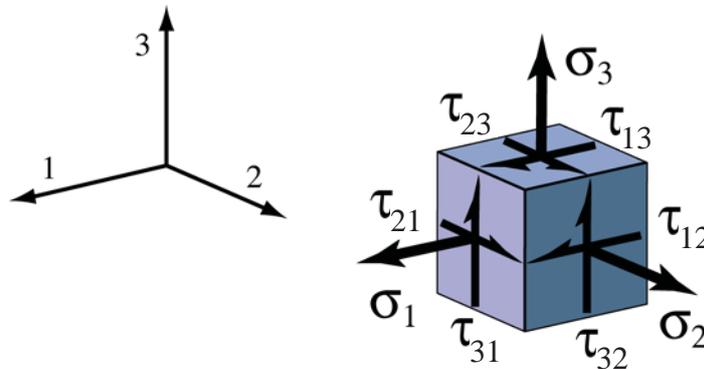
## 9 APENDICEC (RELACION ESFUERZO-DEFORMACION UNITARIA DE FRP)

### 9.1 COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS COMPUESTOS

Los compuestos de fibra reforzada son heterogéneos (*por ejemplo*, hechos de diferentes materiales) y materiales anisotrópicos (*por ejemplo*, exhiben diferentes propiedades cuando son probados en diferentes direcciones). Porque la aplicación relacionada a compuestos de fibras reforzada para ingeniería civil es mucho más grande que el material de microestructura (ver Tabla 7-2), la heterogeneidad puede ser despreciada, y el material actual puede ser considerado de comportamiento homogéneo. Si la tensión y el esfuerzo en una locación genérica de el compuesto de fibra reforzada es representada por los componentes del tensor de tensión  $\underline{\sigma}$  (Figura 9-1) y esfuerzo  $\underline{\varepsilon}$ , el comportamiento mecánico de un sólido homogéneo, elástico y anisotrópico puede ser definido por 21 constantes elásticas independientes como sigue:

$$\underline{\sigma} = [C] \underline{\varepsilon} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}, \quad (9.1)$$

donde  $[C]$  es la matriz de rigidez.



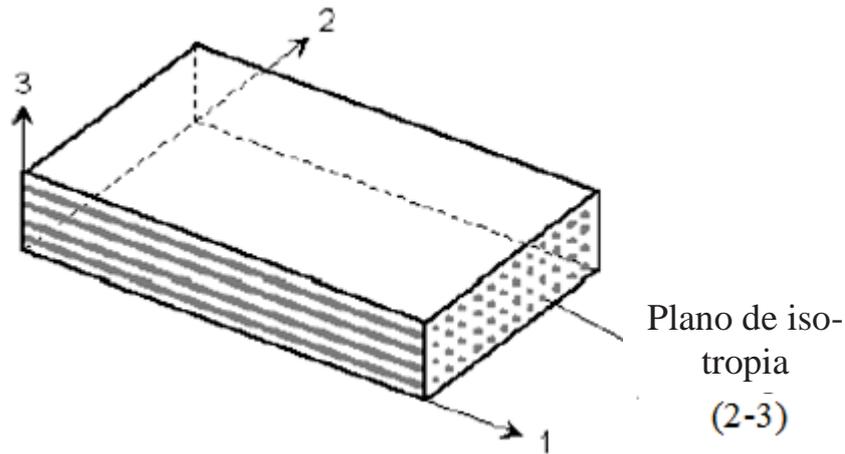
**Figura 9-1** – Representación de tensiones para un elemento infinitesimal.

La caracterización completa de la matriz de rigidez requeriría la evaluación de las 21 constantes por medio de la tensión combinada y las pruebas de corte. El número de pruebas a ser desarrolladas puede ser significativamente reducido si el material tiene algún grado de simetría, el cual es una circunstancia que ocurre en una mayoría de materiales de fibro-compuestos que tienen aplicaciones en ingeniería.

Muchos compuestos unidireccionales pueden ser consideradas transversalmente isotrópicos, como se muestra en la Figura 9-2, donde los planos 2-3 perpendiculares, a las fibras es el plano isotrópico. En este caso, las constantes elásticas independientes son reducidas desde 21 hasta 5 y la matriz de rigidez se convierte en:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

En la práctica, es conveniente referirse a las constantes de ingeniería:  $E$  (Módulo de Elasticidad normal),  $\nu$  (coeficiente dePoisson), y  $G$  (módulo de corte) para lo cual existen procedimientos bien establecidos para su evaluación experimental. Estas constantes tienen generalmente diferentes valores en diferentes direcciones. El módulo de Elasticidad normal en dirección de la fibra,  $E_1$ , se espera que sea más grande que en la dirección transversal,  $E_2$ , lo cual en cambio puede ser diferente de aquella en tercera dirección,  $E_3$ . La misma consideración es aplicada a los módulos  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$  (direcciones 1, 2, y 3 se definen de acuerdo a laFigura 9-2).



**Figura 9-2** – Compuesto unidireccional con un plano isótropo transversal.

La matriz de deformabilidad,  $[S]$ , definida como la matriz inversa de la matriz de rigidez  $[C]$  (Eq. (9.2)), puede ser expresada como una función de las constantes de ingeniería como sigue:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2 \cdot (1 + \nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}. \quad (9.3)$$

Las constantes independientes de ingeniería como sigue:

$$E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}.$$

## 9.2 ESTADO PLANO DE TENSIONES

Para una lámina delgada unidireccional sujeta a un estado plano de tensiones, la matriz de deformabilidad se convierte en:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (9.4)$$

El comportamiento mecánico de las láminas unidireccionales puede además ser caracterizado por cuatro constantes elásticas independientes. Para su determinación, generalmente se aplican pruebas de tensión uniaxiales con fibras inclinadas con un ángulo,  $\theta$ , relativo a la dirección de la carga aplicada. Colocando  $\theta = 0^\circ$ , (por ejemplo, fibras paralelas a la dirección de la carga),  $E_1$  y  $\nu_{12}$  mientras que, cuando  $\theta = 90^\circ$  (fibras perpendiculares a la dirección de carga),  $E_2$  pueden ser determinadas.  $G_{12}$  pueden ser determinadas y son dependientes del ángulo  $\theta$  que es una función de la geometría de reforzamiento seleccionada.

Es posible estimar con una buena aproximación algunos valores de las constantes elásticas mencionadas usando simples modelos “micro-mecánicos” basados en las propiedades de cada uno de los componentes (fibras y matriz) y su fracción volumétrica. Para la lámina unidireccional, las propiedades longitudinales pueden ser evaluadas usando una relación conocida como la “la regla de las mezclas”. Está derivado de la aplicación de un simple modelo micro-mecánico donde las fibras y la matriz trabajan en paralelo. El modelo provee buenos resultados para el valor  $E_1$  del módulo de Elasticidad normal en dirección de las fibras y el coeficiente de Poisson  $\nu_{12}$ .

$$\begin{aligned} E_1 &= V_{\text{fib}} \cdot E_{\text{fib}} + (1 - V_{\text{fib}}) \cdot E_{\text{mat}}, \\ \nu_{12} &= V_{\text{fib}} \cdot \nu_{\text{fib}} + (1 - V_{\text{fib}}) \cdot \nu_{\text{mat}}, \end{aligned} \quad (9-5)$$

donde  $V_{\text{fib}}$  es la fracción volumétrica de la fibra (relación entre el volumen de fibras y el volumen total del compuesto),  $E_{\text{fib}}$  y  $E_{\text{mat}}$  son los módulos de Elasticidad normal de las fibras y de la matriz, respectivamente, y  $\nu_{\text{fib}}$  y  $\nu_{\text{mat}}$  son los coeficientes de Poisson correspondientes.

En lugar de la fracción volumétrica, la fracción de peso de las fibras y de la matriz,  $P_{\text{fib}}$  y  $P_{\text{mat}}$ , respectivamente, son generalmente conocidos. Si  $\rho_{\text{fib}}$  y  $\rho_{\text{mat}}$  representan la densidad de las fibras y la matriz, respectivamente, se aplican las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} V_{\text{fib}} &= \frac{P_{\text{fib}} / \rho_{\text{fib}}}{P_{\text{fib}} / \rho_{\text{fib}} + P_{\text{mat}} / \rho_{\text{mat}}}, \\ P_{\text{fib}} + P_{\text{mat}} &= 1. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Se presenta, como un ejemplo, el cálculo de la fracción volumétrica de las fibras en un compuestoreforzado de fibra de vidrio que tiene una fracción de peso igual al 60%. Las características de cada uno de los componentes son reportadas en la Tabla 9-1.

**Tabla9-1**

	Fracción de peso	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
Fibra	0.60	2.5
Matriz	0.40	1.2

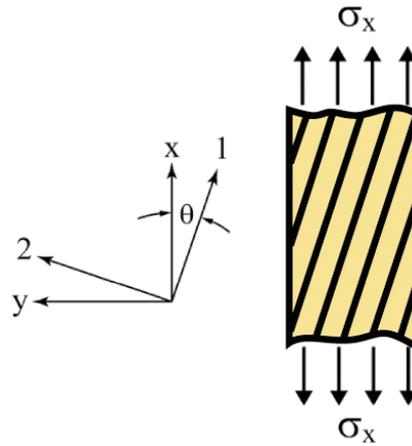
Aplicando la Ecuación (9.6), una fracción volumétrica de fibras de vidrio igual al 42% es obtenida. Considerando los valores de ambas fibras ( $E_{\text{fib}} = 80$  GPa,  $\nu_{\text{fib}} = 0.3$ ) y ( $E_{\text{mat}} = 3$  GPa,  $\nu_{\text{mat}} = 0.34$ ) las propiedades mecánicas de la matriz, se pueden obtener los siguientes valores de las constantes elásticas:

$$\begin{aligned} E_1 &= 35.2 \text{ GPa}, \\ \nu_{12} &= 0.32. \end{aligned}$$

Para más detalles sobre los modos micro-mecánicos, el lector debe consultar literatura especializada.

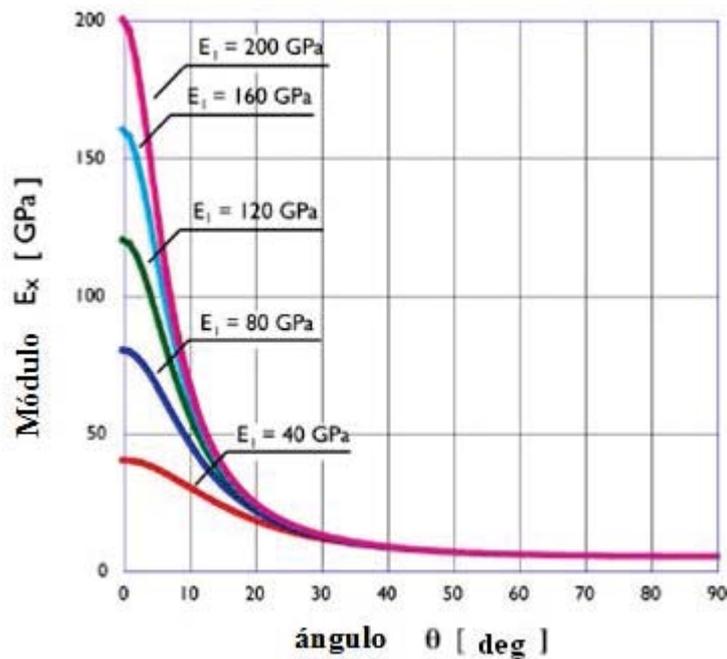
### 9.2.1 Efecto de acción de la carga en direcciones diferentes a la simetría del material

Una vez que las constantes elásticas del material son conocidas, el comportamiento del material de fibras reforzadas es completamente determinado por cargas en cualquier dirección independiente de los ejes de simetría del material. Por ejemplo, la Figura 9-3 se refiere a una lámina de fibras continuas unidireccionales, donde las constantes elásticas equivalentes  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  y  $\nu_{xy}$ , con respecto a los ejes referenciales  $x$  y  $y$  del sistema de cargas pueden ser determinadas como una función del ángulo  $\theta$  y las constantes elásticas del material  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{12}$ .

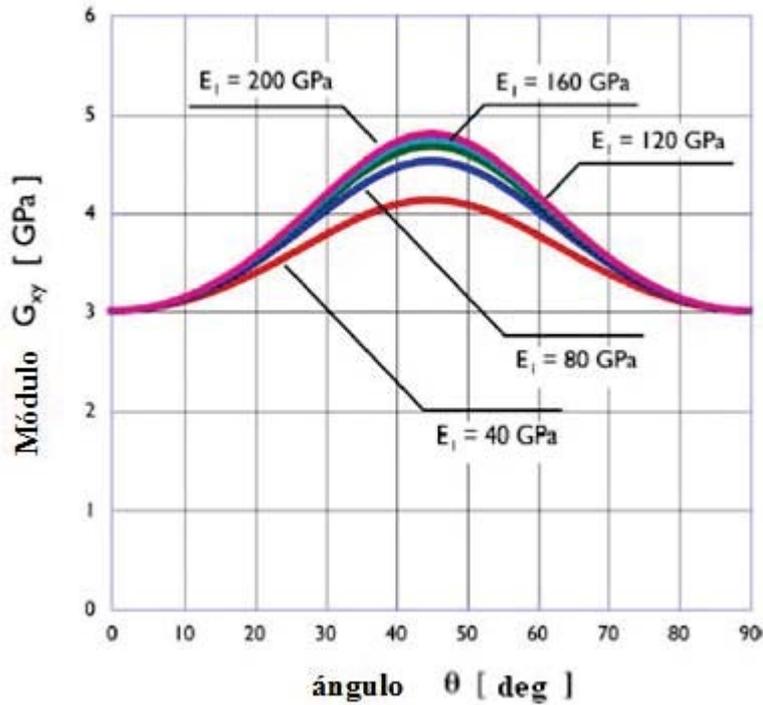


**Figura9-3**– Definición de los sistemas referenciales  $x, y$  y  $1, 2$ .

En la Figura 9-4 y en la Figure 9-5, los valores de ambos Módulos de Elasticidad normal,  $E_x$ , y el módulo de corte,  $G_{xy}$ , son planteados como una función del ángulo,  $\theta$ , entre las fibras y la carga aplicada para valores diferentes del módulo  $E_1$ .

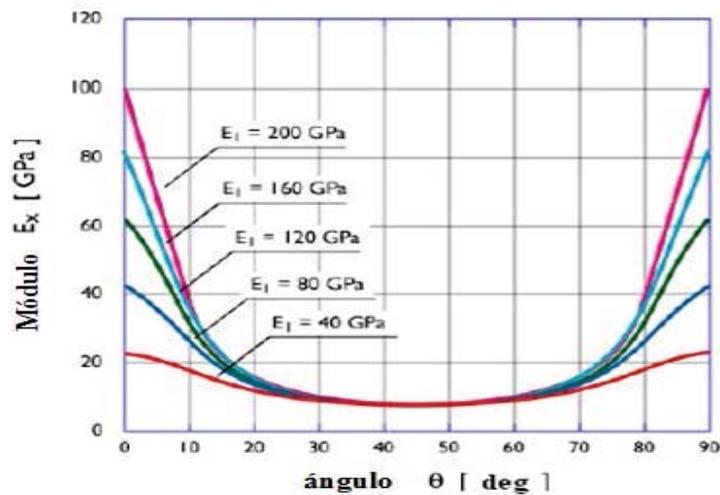


**Figura9-4** – Módulo de Elasticidad normal  $E_x$  como una función de  $\theta$  para compuestos de fibras reforzadas para varios valores del Módulo de Elasticidad normal  $E_1$  ( $E_2 = 5$  GPa;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ ).



**Figure9-5**– Módulo de corte  $G_{xy}$  como una función de  $\theta$  para compuestos de fibras reforzada para algunos valores del Módulo de Elasticidad normal  $E_1$  ( $E_2 = 5$  GPa;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ ).

Variaciones significantes de los módulos  $E_x$  y  $G_{xy}$  con el ángulo  $\theta$  son aparentes. En el caso de las telas, las fibras son distribuidas a lo largo de dos o más direcciones (telas multi-axiales). Si uno fuera a obviar el trenzado en el tejido de las fibras y asumiendo que la tela se compone de dos capas separadas unidireccionales de fibras que corren en dirección  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , el módulo de Elasticidad,  $E_x$ , puede ser evaluado con métodos simplificados obviando el deslizamiento entre capas. Para este caso particular de telas que tienen el mismo porcentaje de fibras en las dos direcciones consideradas (tela balanceada), la Figura 9-6 muestra la relación entre  $E_x$  y  $\theta$ .



**Figura9-6**– Módulo de Elasticidad,  $E_x$ , como una función de  $\theta$ , para telas balanceadas que dependen del módulo de Elasticidad,  $E_1$  ( $E_2 = E_1$ ;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ )

### 9.3 CRITERIOS DE FALLA

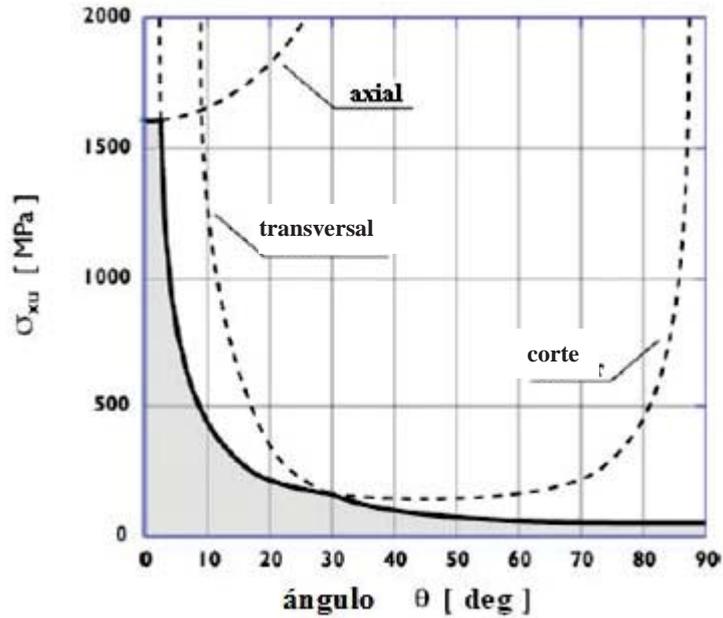
El mecanismo de colapso micromecánico de materiales de fibra reforzada es un fenómeno complejo que depende de una multitud de parámetros que incluyen: tipo de carga, fibra y tipo de resina. Por esta razón, los criterios de falla para compuestos, usualmente se refieren al nivel macromecánico, asumiendo que el compuesto en sí mismo puede ser considerado un material homogéneo que tiene un comportamiento lineal elástico hacia el colapso. Para láminas sujetas a esfuerzos en el plano, uno de los criterios de falla más simple es el de máximo esfuerzo. Si  $\sigma_{1u,t}(\sigma_{1u,c})$  y  $\sigma_{2u,t}(\sigma_{2u,c})$ , representa el esfuerzo de falla a tensión (compresión) en las direcciones simétricas, y  $\tau_{12u}$  es el correspondiente esfuerzo de falla al corte, este criterio puede ser representado como sigue:

$$\begin{aligned} \sigma_1 & \begin{cases} \leq \sigma_{1u,t} & \text{por } \sigma_1 > 0, \\ \geq \sigma_{1u,c} & \text{por } \sigma_1 < 0, \end{cases} \\ \sigma_2 & \begin{cases} \leq \sigma_{2u,t} & \text{por } \sigma_2 > 0, \\ \geq \sigma_{2u,c} & \text{por } \sigma_2 < 0, \end{cases} \quad (9-7) \\ |\tau_{12}| & \leq \tau_{12u}. \end{aligned}$$

El criterio no depende del signo del esfuerzo de corte ni considera la interacción entre diferentes modelos de falla. Diferentes modos de falla pueden ocurrir independientemente el uno del otro. El máximo esfuerzo que la lámina puede soportar está dada por el menor entre los siguientes valores (Figura 9-3):

$$\begin{aligned} \sigma_{xu} & < \frac{\sigma_{1u}}{\cos^2 \theta}, \\ \sigma_{xu} & < \frac{\sigma_{2u}}{\sin^2 \theta}, \\ \sigma_{xu} & < \frac{\tau_{12u}}{\sin \theta \cdot \cos \theta}. \end{aligned} \quad (9.8)$$

La Figura 9-7 muestra la variación de  $\sigma_{xu}$  como una función de  $\theta$ .



**Figura9-7** – Criterio de maximo esfuerzo: esfuerzo de falla tensional como una función de  $\theta$  para láminas unidireccionales ( $\sigma_{1u} = 1600$  MPa;  $\sigma_{2u} = 40$  MPa;  $\tau_{12u} = 70$  MPa).

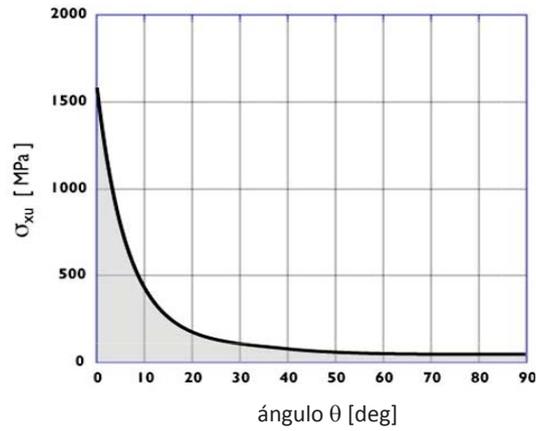
El criterio de maximo esfuerzo esta usualmente en buen acuerdo con los datos experimentales de sólo la prueba tensional con un ángulo  $\theta$  menor de  $15^\circ$  y mayor de  $45^\circ$ . Por otro lado, los valores medidos para la compresión son mayores. Otro criterio ampliamente usado para estimar la falla de una lámina es Tsai-Hill, el cual puede ser expresada como sigue:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_{1u}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2 \leq 1. \quad (9.9)$$

La esfuerzode falla como función de  $\theta$  puede ser escrito como sigue (Figura 9-3):

$$\sigma_{xu} = \left[ \frac{\cos^4 \theta}{\sigma_{1u}^2} + \left( \frac{1}{\tau_{12u}^2} - \frac{1}{\sigma_{1u}^2} \right) \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{\sigma_{2u}^2} \right]^{-1/2} \quad (9.10)$$

y es graficado en la Figura 9-8.



**Figura9-8**– El criterio Tsai-Hill: esfuerzo de falla de tensión como una función de  $\theta$  para láminas unidireccionales.

$$(\sigma_{1u} = 1600 \text{ MPa}; \sigma_{2u} = 40 \text{ MPa}; \tau_{12u} = 70 \text{ MPa}).$$

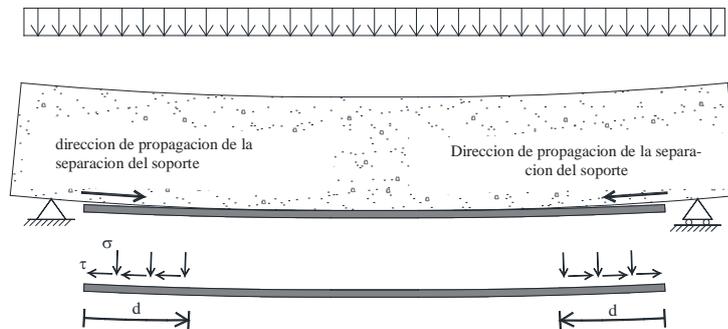
Como se mostró previamente, la variabilidad del esfuerzo y las propiedades elásticas de los materiales de fibra reforzada depende de la dirección de las fibras comparadas a la dirección de la carga aplicada.

## 10 APENDICE (DESPEGAMIENTO)

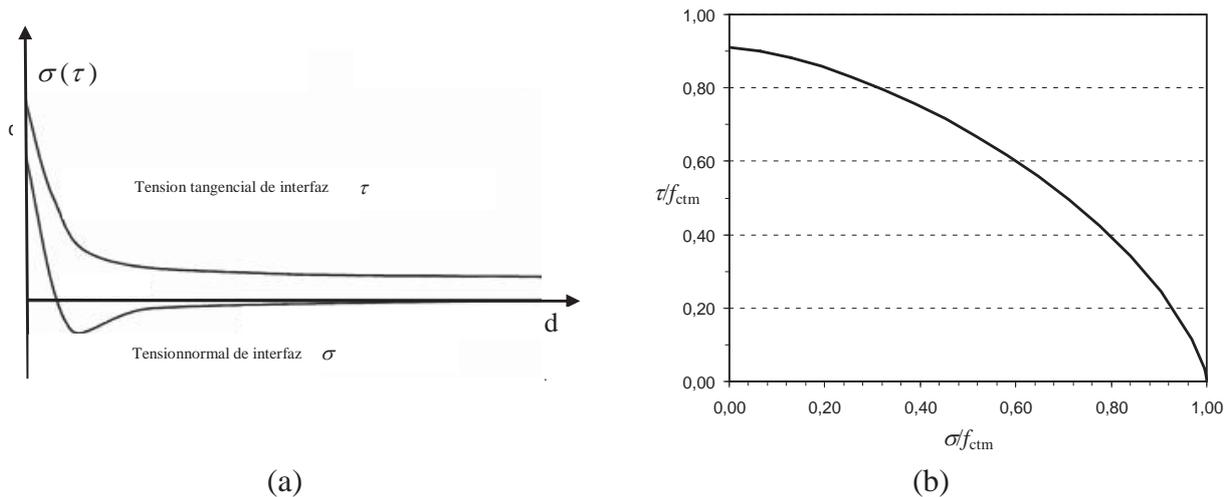
### 10.1 FALLA DEBIDO A DESPEGAMIENTO

Los modos de falla primaria de los elementos estructurales reforzados FRP debido a despegamiento son resumidos a continuación:

- Modo 1 (despegamiento del borde de placa)**(Figura 10-1). Las porciones extremas del sistema FRP están sujetas a altos esfuerzos de corte en el área de contacto por una longitud de aproximadamente 100-200 mm. En el caso particular del refuerzo con láminas, la rigidez flexional poseída por la lámina puede inducir también esfuerzos de tracción significativos en la dirección normal a la interfaz (esfuerzo de *peeling*) (Figura 10-2(a)). Dichos esfuerzos pueden penalizar sensiblemente el valor máximo de la concomitante tensión tangencial respecto a aquel del modo II de falla, como se puede evidenciar del dominio de resistencia reportado en la Figura 10-2(b). El modo de falla por despegamiento en los extremos está caracterizado por un comportamiento frágil.



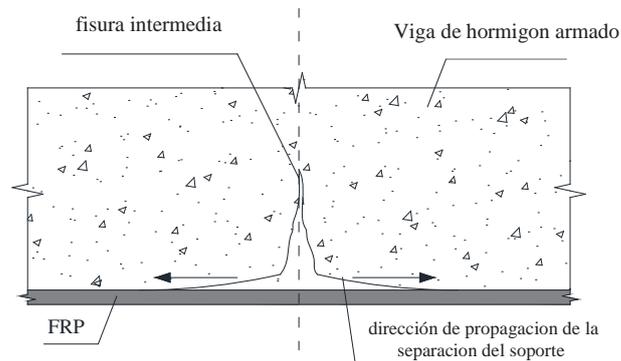
**Figura 10-1 – Despegamiento del borde**



**Figura 10-2** –(a) Corte en el área de contacto y esfuerzos normales a lo largo de la longitud de una lámina FRP pegada (análisis lineal-elástico); (b) Dominio de la resistencia representado por un corte en el área de contacto y esfuerzos normales.

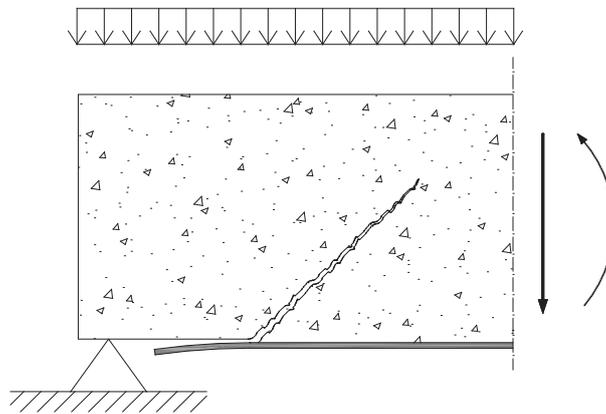
- Modo 2 (Despegamiento por fisuras debidas a la flexión en la viga)** (Figura 10-3). La fisuración flexional genera discontinuidad dentro del soporte que incrementa el esfuerzo de corte en el área de contacto causado por el despegamiento de FRP. Las fisuras pueden estar

orientadas perpendicularmente; inclinadas cuando hay una combinación de flexión y corte.



**Figura10-3** –Inicio del despegamiento a partir de las fisuras verticales en el concreto.

- Modo 3 (Despegamiento por fisuras diagonal de corte) (Figura 10-4). Para elementos donde los esfuerzos de corte son predominantes sobre los esfuerzos por flexión, se observa un desplazamiento relativo entre los bordes de la fisura. Tal desplazamiento incrementa el esfuerzo normal perpendicular a la lámina FRP responsable del despegamiento de FRP. Dicho mecanismo de despegamiento está activo a pesar de la presencia de fisuras. El colapso debido al despegamiento desde las fisuras diagonales de corte es peculiar en las pruebas a flexión de laboratorio de cuatro puntos, y no es común para la aplicación en campo donde la carga aplicada es distribuida encima de la longitud de la viga. Para vigas pesadamente reforzadas con bajo reforzamiento transversal, el desplazamiento en forma de cáscara generalmente ocurre en el borde de la placa.

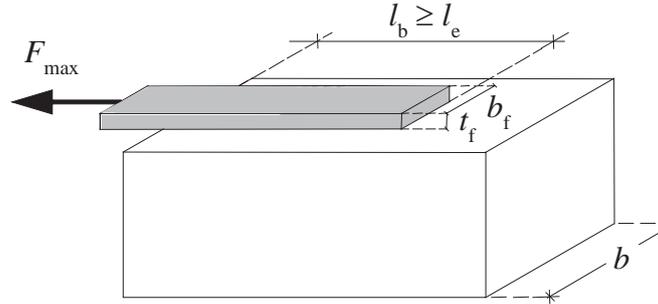


**Figura10-4** –Despegamiento por fisura diagonal de corte

- Modo 4 (Despegamiento por irregularidades y rugosidad de la superficie del concreto). El despegamiento localizado debido a irregularidades de la superficie del sustrato del concreto puede propagarse y causar total despegamiento del sistema FRP. Este modo de falla puede ser evitado si la superficie del concreto es tratada de tal forma que evite la excesiva rugosidad.

## 10.2 PEGADO ENTRE FRP Y EL CONCRETO

En la siguiente sección, las recomendaciones adicionales relativas al pegado entre FRP y el apoyo del concreto serán mencionadas. Se hace referencia a esto en la Figura 10-5.



**Figura10-5** –Máxima fuerza transmisible para reforzamiento FRP.

### 10.2.1 Energía específica de fractura

La fuerza máxima,  $F_{\max}$ , permitida en el reforzamiento FRP, considerada de longitud infinita, puede ser calculada así:

$$F_{\max} = b_f \int_0^{\infty} \tau_b(x) dx, \quad (10.1)$$

donde  $b_f$  es el ancho de FRP y  $\tau_b$  es el fuerza de corte en la interfaz adhesivo-concreto.

Cuando la rigidez de los elementos de concreto es mayor que FRP, la Ecuación (10.2) puede ser considerada:

$$F_{\max} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_F}, \quad (10.2)$$

donde  $t_f$ ,  $b_f$ ,  $E_f$ ,  $\Gamma_F$  representa el espesor de FRP, ancho, el módulo de Elasticidad normal en la dirección de la fuerza aplicada, y la energía de fractura específica, respectivamente.

En este documento, la Ecuación (10.3) es usada para calcular la energía específica de fractura:

$$\Gamma_F = k_b \cdot k_G \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}, \quad (10.3)$$

donde los símbolos son definidos en el capítulo 4.

En particular:

- $k_b$  es un factor correctivo geométrico igual a:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f / b}{1 + b_f / b}} \geq 1 \text{ por } b_f / b \geq 0.25, \quad (10.4)$$

donde  $b$  es el ancho del elemento reforzado (para  $b_f / b < 0.25$ ,  $k_b$  es tomado como función de  $b_f / b = 0.25$ ).

- $k_G$  es un factor experimental correctivo expresado en términos de longitud.

El coeficiente  $k_G$  fue calibrado basado en una gran cantidad de resultados experimentales disponibles en la literatura científica nacional e internacional. Parte de los datos experimentales reúne pruebas de pegado de concreto y FRP desarrollados por la Actividad 8.2 del Proyecto ReLUIS-DPC 2005-2008. La calibración del valor medio y valores característicos fueron desarrollados de acuerdo con

el EN1990 – Anexo D (Diseño asistido por pruebas), que asume datos inciertos en la característica mecánica de los materiales.

El procedimiento de calibración fue desarrollado separadamente para FRP precurado (Sección 2.3.2) y para preimpregnado *in situ* de FRP (Sección 2.3.3). Se obtuvo lo siguiente:

- para FRP precurado, el valor medio de 0.063 mm y fractil al 5% de 0.023 mm. ;
- para impregnado *in situ* FRP, el valor medio de 0.077 mm y fractil al 5% de 0.037 mm

Utilizando los valores medios, 0.063 y 0.077, la Ecuación (10.3) es usada para calcular el valor medio de la energía específica de fractura,  $\Gamma_{Fm}$ .

De ahí en adelante, usando el fractil al 5%, 0.023 mm y 0.037 mm, el valor característicos de la energía es calculado. El análisis desarrollado considera las incertidumbres relacionadas con la fuerza del concreto. Además, en esta guía,  $\Gamma_{Fk}$  no estaba reducida con el factor parcial  $\gamma_c = 1.5$ .

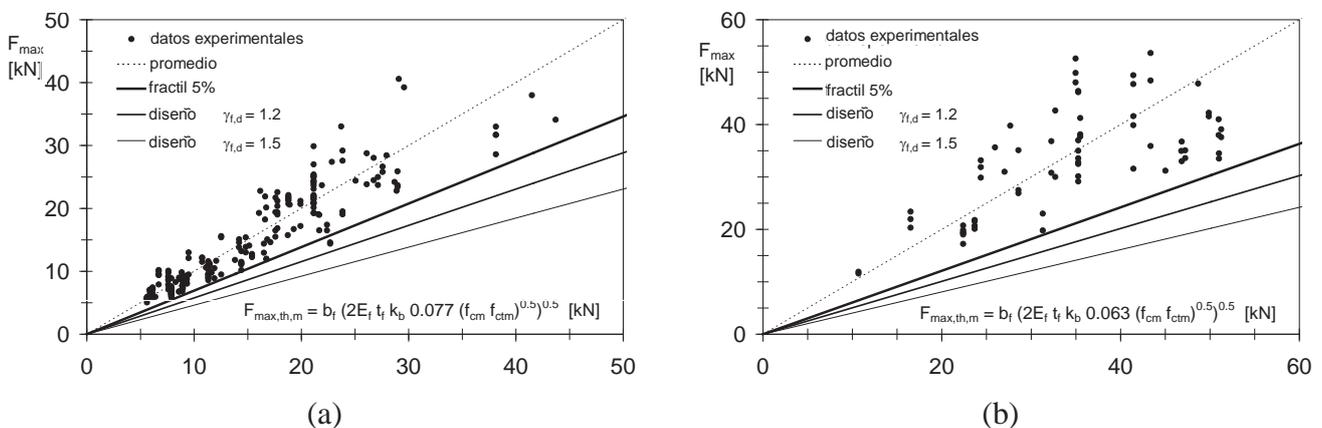
La resistencia de diseño de despegamiento de FRP,  $f_{idd}$ , puede ser obtenida usando la Ecuación (10.2):

$$f_{idd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}, \quad (10.5)$$

donde,  $\Gamma_{Fd} = \Gamma_{Fk}/FC$  y  $\gamma_{f,d}$  es el factor parcial como se indica en la Sección 3.4.1.

La Figura 10-6 muestra los valores experimentales de las pruebas de pegado extraídos de los datos usados por la calibración  $k_G$ . Los valores son divididos para un FRP precurado y un FRP de impregnado *in situ*.

Los datos experimentales son comparados con el diseño, valores medios y fraccionales de la fuerza de despegamiento obtenidos de la Ecuación (10.5).



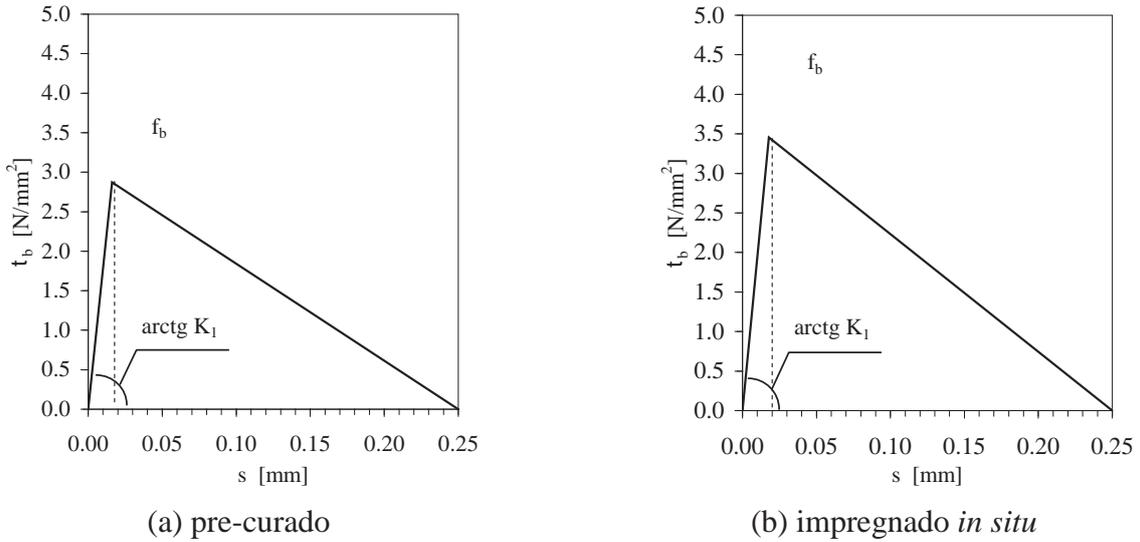
**Figura 10-6** –Calibración experimental: (a) impregnado *in situ* de FRP, (b) pre-curado FRP.

### 10.2.2 Ley de adherencia

El pegado entre FRP y el concreto es típicamente expresado con una relación entre el esfuerzo interfasal de corte y el correspondiente deslizamiento (relación “ $\tau_b - s$ ”). Tanto FRP y las características mecánicas del concreto así como la geometría del sistema FRP y el apoyo de concreto serán considerados en el análisis.

La relación  $\tau_b - s$  es generalmente no lineal con una naturaleza descendente. Para propósito de diseño, puede ser tratada como una relación bi-lineal como se muestra en la Figura 10-7. La primera rama ascendente está definida considerando la deformabilidad de la capa adhesivo y el soporte de concreto, para una adecuada profundidad. A menos que se desarrolle un análisis más detallado, los

parámetros mecánicos promedio que definen la relación  $\tau_b - s$  puede ser evaluados como sigue.



**Figura10-7** –Ejemplos de leyes bi-lineales “ $\tau_b - s$ ” ( $f_{cm} = 20$  MPa,  $k_b=1$ ).

La interfaz de deslizamiento corresponde al total despegamiento y se asume así:

$$s_u = 0.25 \text{ mm} . \quad (10.6)$$

Los valores promedio del esfuerzo de corte a ser usados en la relación  $\tau_b - s$  pueden ser calculados usando el valor promedio de la energía específica de fractura,  $\Gamma_{Fm}$ , como sigue:

$$f_b = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fm}}{s_u} . \quad (10.7)$$

$K_1$  es igual:

$$K_1 = \frac{c_1}{t_a/G_a + t_c/G_c} , \quad (10.8)$$

donde,  $G_a$  y  $G_c$  representan los módulos de corte del adhesivo y del concreto respectivamente,  $t_a$  es el espesor nominal del adhesivo;  $t_c$  es la profundidad efectiva del concreto (valores sugeridos para  $t_c$  y  $c_1$  son  $20 \div 30$  mm y  $0.5 \div 0.7$ , respectivamente). Para SLS  $K_1$  es dado por la Ecuación (10.8) con  $c_1 = 1$ .

### 10.2.3 Longitud óptima de anclaje

En esta guía, la longitud de diseño óptima de anclaje se obtiene mediante el uso de una ley constitutiva rigidez-ablandamiento ( $K_1 \rightarrow \infty$ ) donde la construcción de la rama rígida puede ser obviada comparada a la rama que demuestra la blandura (asunción válida en ELU):

$$l_{cd} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}} , \quad (10.9)$$

donde:

- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$  es la resistencia de diseño de pegado entre el reforzamiento FRP y el concreto.
- $s_u = 0.25$  mm.
- $\gamma_{Rd} = 1.25$  es un factor correctivo.

### 10.2.4 Despegamiento debido a fisuras por flexión

En caso de despegamiento debido a fisuras por flexión (modo 2)  $\varepsilon_{fdd}$ , puede ser calculado como sigue:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}}{E_f \cdot t_f}} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0. \quad (10.10)$$

La relación es similar a la que se propuso para la esfuermáxima o elongamiento en el reforzamiento FRP cuando el modelo 1 controla el despegamiento FRP.

La calibración de los valores medios y característicos de  $k_{G,2}$  en Ecuación (10.10) es desarrollada usando una gran cantidad de resultados experimentales disponibles en la literatura nacional e internacional para las vigas reforzadas FRP y las losas que presentan fallas debido al despegamiento por flexión (modo 2). La calibración de los valores medios y característicos fue desarrollada de acuerdo con la metodología de EN1990 – Anexo D (Diseño asistido por pruebas), que asumen incertidumbres en la característica mecánica de los materiales. El procedimiento estadístico provee valores medios y fractiles al 5% de  $k_{G,2}$  igual a 0.32 y 0.10 mm, respectivamente e independientemente del tipo de soporte.

La introducción de  $k_q$  es justificada basada en los resultados analíticos y experimentales, además es usado para cargas distribuidas y concentradas (1.25 and 1.0, respectivamente). Sin embargo, la asunción de  $k_q = 1.25$  representa un valor de precaución que considera la pequeña cantidad de datos disponibles sobre pruebas con carga distribuida.

### 10.3 PEGADO ENTRE FRP Y LA MAMPOSTERIA

En lo que sigue, se dan recomendaciones adicionales relacionadas con pegado entre FRP y el apoyo de concreto. La referencia está hecha en la Figura 10-8.

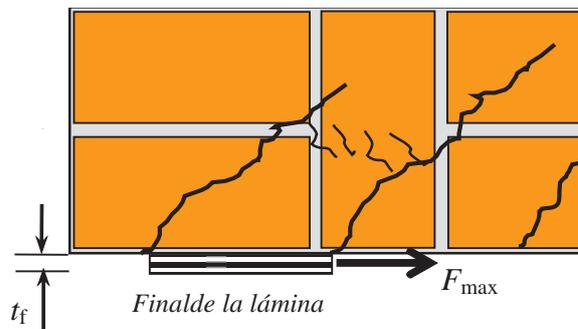


Figura10-8 –Modelo de falla.

### 10.3.1 Energía específica de fractura

La máxima fuerza,  $F_{\max}$ , transmisible en el reforzamiento FRP considerado de longitud infinita es dada por la Ecuación (10.1), la cual se convierte en la Ecuación (10.2) cuando la rigidez de los elementos de mampostería es mayor que la de FRP. La energía de fractura específica se convierte en:

$$\Gamma_F = k_b \cdot k_G \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}, \quad (10.11)$$

donde los símbolos se refieren al Capítulo 5. En particular:

- $k_b$  es un factor correctivo geométrico igual a:

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}, \quad (10.12)$$

donde  $b$  es el ancho del elemento reforzado, a ser calculado como reportado en la Sección 5.3.2.

- $k_G$  es un factor correctivo experimental expresado en términos de longitud.

El coeficiente  $k_G$  fue calibrado basado en una gran cantidad de resultados experimentales disponibles en la literatura nacional e internacional. Los datos experimentales reúnen pruebas de pegado FRP-concreto desarrollados por Rilem MSC 223 y por Task 8.2 del proyecto ReLUIS-DPC 2005-2008. La calibración de los valores medios y característicos son desarrollados de acuerdo con la metodología EN1990 – Anexo D (Diseño asistido por pruebas) asumen incertidumbres en las características mecánicas de los materiales.

El procedimiento de calibración fue desarrollado separadamente para FRP impregnado *in situ* (Sección 2.2.3) la sobre la mampostería hecha de ladrillos naturales y perforados, con las siguientes características:

- para ladrillos perforados 7.0-42.0 MPa;
- para ladrillos pomez 2.7-5.0 MPa;
- para ladrillos Lecce o calcarenta 2.0-24.0 MPa.

Los resultados de la calibración son:

- para ladrillos perforados, el valor promedio de 0.093 mm y un fractil al 5% de 0.031 mm.
- para ladrillos porosos, el valor promedio de 0.157 mm y un fractil al 5% de 0.048 mm.
- para piedras Lecce o calcárea, el valor promedio de 0.022 mm y un fractil al 5% de 0.012 mm.

Usando los valores característicos y promedios de  $k_G$  en la Ecuación (10.11), los valores característicos y promedio de la energía específica de fracturas,  $\Gamma_{Fm}$  y  $\Gamma_{Fk}$ , pueden ser obtenidos. La resistencia de diseño de despegamiento de FRP,  $f_{idd}$ , puede ser obtenida usando la Ecuación (10.2):

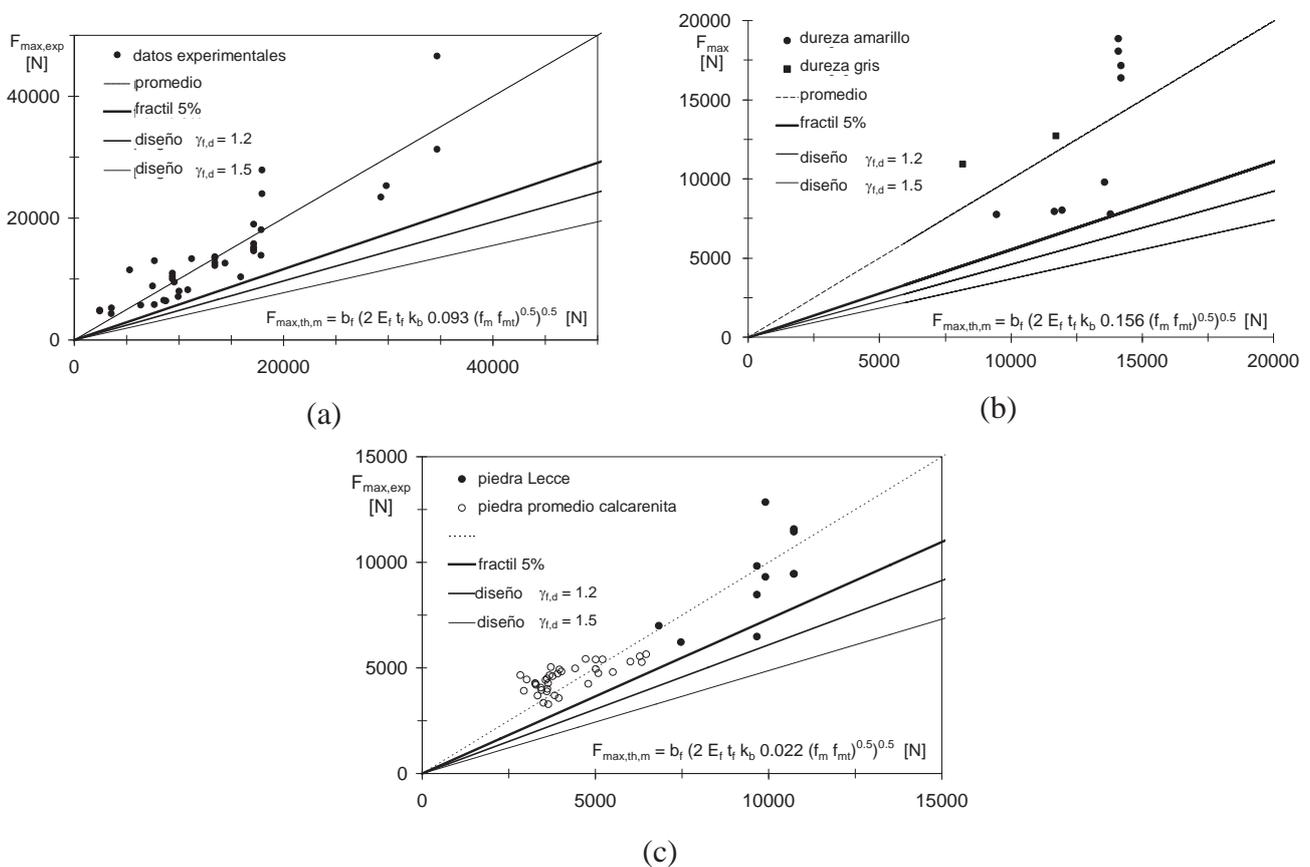
$$f_{idd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}, \quad (10.13)$$

donde,  $\Gamma_{Fd} = \Gamma_{Fk}/FC$  y  $\gamma_{f,d}$  el factor parcial mostrado en la Sección 3.4.1.

Consecuentemente, el valor de la resistencia de diseño de despegamiento puede ser calculado como sigue:

$$F_{\max,d} = \frac{b_f}{\gamma_{f,d}} \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}} \quad (10.14)$$

La Figura 10-9 muestra como los valores experimentales de las pruebas de pegado extraídos de los datos base usados para la calibración  $k_G$ . Los valores son divididos basados en tipos de mampostería. Los datos experimentales son comparados con los valores de diseño de la fuerza de despegamiento, obtenida de la Ecuación (10.14) asumiendo  $FC=1$  y  $\gamma_{f,d}$  igual a 1,2 o 1,5, y con los valores promedio y con un fractil al 5% de dicha fuerza, determinados de a Ecuación (10.14), considerando un valor unitario del coeficiente  $\gamma_{f,d}=1$ , y sustituyendo a  $\Gamma_{Fd}$ , respectivamente  $\Gamma_{Fm}$  y  $\Gamma_{Fk}$ .



**Figura 10-9** –Calibración experimental: (a) ladrillos premoldeados, (b) ladrillos porosos, (c) piedras Lecce y calcárea.

Cuando se consideran los números limitados de pruebas experimentales disponibles en literatura sobre mampostería reforzada con FRP, los valores  $k_G$  usados para FRP precurado pueden ser obtenidos mediante la reducción del 35% de los valores de los sistemas de impregnado *in situ* de FRP.

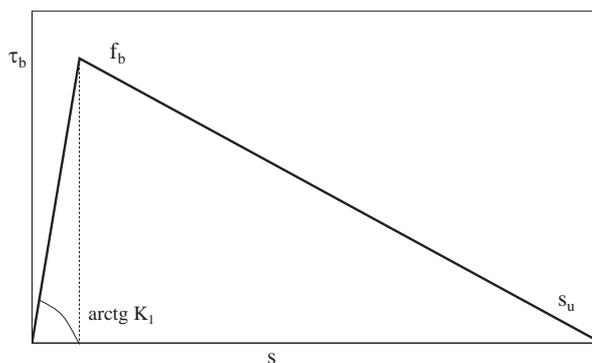
### 10.3.2 Ley de adherencia

El pegado entre FRP y el concreto es generalmente expresado con una relación entre el esfuerzo de

corte en el área de contacto y el correspondiente deslizamiento (relación “ $\tau_b - s$ ”).

La relación  $\tau_b - s$  generalmente no lineal con una rama descendente, esta puede ser tratada como una relación bi-lineal como se muestra en la Figura 10-10.

La primera rama ascendente es definida considerando la deformabilidad de la capa adhesiva y el soporte de mampostería para una apropiada profundidad. A menos que se desarrolle un análisis más detallado, los parámetros mecánicos promedio que definen la relación  $\tau_b - s$  pueden ser evaluadas como sigue.



**Figura10-10**–Ejemplos de leyes bilineares “ $\tau_b - s$ ”.

El deslizamiento de la interfase que corresponde a un total despegamiento es asumido:

$$\begin{aligned} s_u &= 0.3 \text{ mm} \quad \text{mampostería calcarenitas y de piedra de Lecce;} \\ s_u &= 0.4 \text{ mm} \quad \text{mampostería deladrillo poroso y preformado.} \end{aligned} \quad (10.15)$$

Los valores promedio del esfuerzo de corte a ser usados en la relación  $\tau_b - s$  pueden ser calculados usando el valor promedio de la energía específica de fractura,  $\Gamma_{Fm}$ , como sigue:

$$f_b = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fm}}{s_u} \quad (10.16)$$

$K_1$  es igual a:

$$K_1 = \frac{c_1}{t_a/G_a + t_m/G_m} \quad (10.17)$$

donde,  $G_a$  y  $G_m$  representan módulos de corte del adhesivo y de la mampostería, respectivamente.  $t_a$  es el espesor nominal del adhesivo y  $t_m$  es la profundidad efectiva de la mampostería (valor sugeridos para  $t_c$  y  $c_1$  son  $20 \div 30$  mm y  $0.5 \div 0.7$ , respectivamente). Para ELS,  $K_1$  está dada por la Ecuación (10.17) con  $c_1 = 1$ .

### 10.3.3 Longitud óptima de pegado

En esta guía, la longitud óptima de diseño de pegado es obtenida usando una ley constitutiva “ $\tau_b - s$ ” de tipo rígido-ablandamiento, ( $K_1 \rightarrow \infty$ ) donde la contribución de la rama de rigidez puede ser obviada, comparada a la rama de ablandamiento (asunción válida en ELU):

$$l_{ed} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}} \geq 150 \text{ mm} , \quad (10.18)$$

donde:

- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$  es resistencia de diseño de pegado entre el refuerzo FRP y la mampostería, con  $\Gamma_{Fd} = \Gamma_{Fk}/FC$ ;
- $s_u = 0.3 \text{ mm}$  para piedras calcáreas o piedras Lecce usadas en mampostería y  $s_u = 0.40 \text{ mm}$  para mampostería de ladrillo poroso;
- $\gamma_{Rd}$  es un factor correctivo iguala 1.5 para mampostería de ladrillos poroso y 1.25 para mampostería de piedras Lecce o calcáreas.

### 10.3.4 Despegamiento debido a fisuras por tensión

En caso de despegamiento debido a las fisuras por flexión (modo 2)  $\varepsilon_{fdd}$ , puede ser calculado como sigue:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} = \frac{\alpha \cdot f_{fdd}}{E_f} \quad (1.0 \leq \alpha \leq 1.5) . \quad (10.19)$$

Considerando la pequeña cantidad de datos disponibles,  $\alpha$  es extrapolado desde las experimentación del concreto.

## 11 APENDICEE (REFORZAMIENTO A FLEJO-COMPRESION DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO)

### 11.1 RESISTENCIA DE DISEÑO A FLEJO-COMPRESION DE ELEMENTOS REFORZADOS FRP

Los elementos reforzados con FRP sujetos a flexo-compresión serán diseñados como sigue:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}(N_{Sd}), \quad (11.1)$$

donde  $M_{Sd}$  es el momento de diseño aplicado y  $M_{Rd}$  representa la resistencia de flexión del elemento reforzado considerando la fuerza de diseño axial  $N_{Sd}$ .

Un procedimiento posible de diseño es descrito más adelante. La relación mecánica  $\mu_s$  y  $\mu_f$  relacionado a el esfuerzo del refuerzo de acero y del sistema FRP, respectivamente, pueden ser calculadas como sigue:

$$\mu_s = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{f_{ccd} \cdot b \cdot d}, \quad (11.2)$$

$$\mu_f = \frac{b_f \cdot t_f \cdot f_{fd}}{f_{ccd} \cdot b \cdot d}, \quad (11.3)$$

donde  $A_{s1}$  y  $f_{yd}$  representa el área y la fuerza de diseño de cedencia del refuerzo existente de acero, respectivamente.  $f_{ccd}$  es igual a la fuerza de diseño del concreto confinado,  $b$  y  $d$  son el ancho y la profundidad efectiva del elemento FRP reforzado, respectivamente,  $b_f$  y  $t_f$  son el ancho de FRP y el espesor, respectivamente;  $f_{fd}$  es resistencia última (máxima) de diseño de FRP calculada de acuerdo a la Sección 4.2.2.4, ítem (2)P. La resistencia de diseño del material para aplicaciones no-sísmicas estará en concordancia con la Sección 3.3.3, ítem (7). Para aplicaciones sísmicas tales valores serán obtenidos por medio de pruebas experimentales *in-situ*. A menos que un análisis más detallado reconociendo detalles estructurales y propiedades de los materiales existentes serán divididas para un coeficiente apropiado mayor que 1.

Las siguientes son ecuaciones no-dimensionales que reflejan cargas aplicadas:

$$n_{Sd} = \frac{N_{Sd}}{f_{ccd} \cdot b \cdot d}, \quad (11.4)$$

$$m_{Sd} = \frac{M_{Sd}}{f_{ccd} \cdot b \cdot d^2}. \quad (11.5)$$

Cuando el ancho de FRP y las propiedades mecánicas son conocidas, un intento y un procedimiento de prueba y error puede ser desarrollado para evaluar el espesor del reforzamiento FRP como sigue:

Paso 1

$\eta$  es calculado como sigue:

$$\eta = n_{sd} + \mu_s \cdot (1-u) + \mu_f \cdot \quad (11.6)$$

Paso 2

Los parámetros  $\eta_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ), son definidos:

$$\eta_0 = -\mu_s \cdot u, \quad \eta_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{r+1}, \quad \eta_2 = 0.8 \cdot \frac{1.75 \cdot r}{1.75 \cdot r + 1}, \quad \eta_3 = 0.51 + \mu_f \cdot (1-r), \quad (11.7)$$

donde:

- $u$  es la relación entre área del acero en compresión,  $A_{s2}$ , y tensión,  $A_{s1}$ .
- $r = 2/1000 \varepsilon_{fd}$ .

Paso 3

De la Tabla 11-1, el modo de falla (Figure 4-5, 4.2.3) y el correspondiente valor del parámetro  $W_{(mr)}(\eta)$  puede ser determinado como una función de  $\eta$  cuando es comparado con los límites presentados en el Paso 2.

**Tabla 11-1**

Modo de falla	$\eta$	$W_{(mr)}(\eta)$
1a	$\eta_0 \leq \eta \leq \eta_1$	$W_{(1a)}(\eta) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \eta_0 + \frac{\eta_1 \cdot (1-\eta_1) - \eta_0 \cdot (\eta - \eta_0)}{\eta_1 - \eta_0} \right\}$
1b	$\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2$	$W_{(1b)}(\eta) = \frac{1}{2} \cdot \{ \eta_1 \cdot \eta_2 + [1 - (\eta_1 + \eta_2)] \cdot \eta \}$
2	$\eta_2 \leq \eta \leq \eta_3$	$W_{(2)}(\eta) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \eta_2 \cdot (1-\eta_2) + \frac{(0.75 - \eta_3) - \eta_2 \cdot (1-\eta_2)}{\eta_3 - \eta_2} \cdot (\eta - \eta_2) \right\}$

Paso 4

La resistencia flexional no-dimensional,  $m_{Rd}(n_{Sd})$ , del miembro reforzado es evaluada como sigue:

$$m_{Rd}(n_{Sd}) = W_{(mr)}(\eta) + \frac{1}{2} \cdot [\mu_s \cdot (1+u) + \mu_f] \quad (11.8)$$

Paso 5

Se verifica que la fórmula sea respetada:

$$m_{Rd}(n_{Sd}) \geq m_{Sd} \quad (11.9)$$

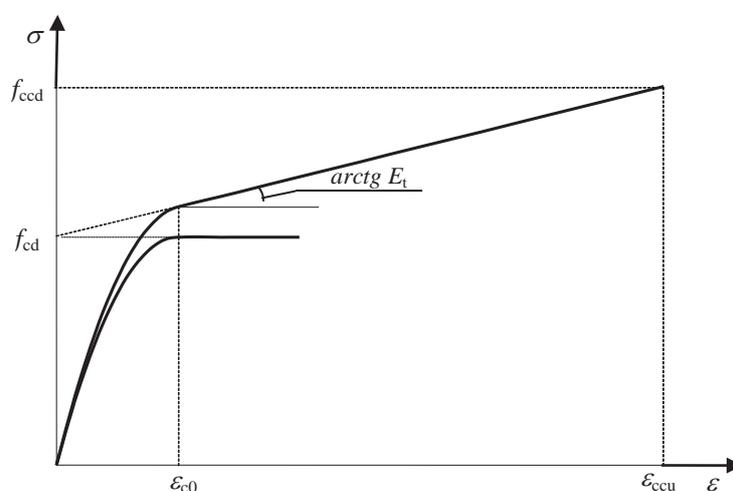
Si este no es el caso, el espesor,  $t_f$ , del sistema de reforzamiento se incrementa así como su relación mecánica,  $\mu_f$ , y el procedimiento interactivo se repite del Paso 1.

## 12 APENDICE F (CONCRETO CONFINADO)

### 12.1 LEY CONSTITUTIVA DEL CONCRETO CONFINADO

Modelado el comportamiento mecánico de los elementos de concreto confinado con FRP llama a la definición preliminar de una ley constitutiva conveniente  $\sigma(\varepsilon)$  relacionada al comportamiento mecánico de los elementos sujetos a compresión uni-axial ( $\sigma$  y  $\varepsilon$  son considerados positivos en compresión).

En este contexto, como un método alternativo al modelo parabólico-rectangular propuesto en la Sección 4.5.3, una relación no-lineal puede ser adoptada similar a la que se muestra en la Figura 12-1, donde una rama parabólica es seguida por una rama lineal ascendente. En el punto de intersección entre las dos ramas, el primer derivativo de la función  $\sigma(\varepsilon)$  será asumido como continuo.



**Figura 12-1** – Modelo de esfuerzo-deformación unitaria de concreto confinado FRP.

La expresión matemática de dicha relación puede ser escrita así:

$$- \text{ (rama parabólica) } \quad \frac{f_c}{f_{cd}} = a \cdot \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^2 \text{ por } 0 \leq \bar{\varepsilon} \leq 1, \quad (12.1)$$

$$- \text{ (rama lineal) } \quad \frac{f_c}{f_{cd}} = 1 + b \cdot \bar{\varepsilon} \text{ por } 1 \leq \bar{\varepsilon} \leq \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{c0}}, \quad (12.2)$$

donde:

- $\bar{\varepsilon}$  es un coeficiente no-dimensional definido de:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}}; \quad (12.3)$$

- $f_{cd}$  y  $\varepsilon_{c0}$  son la resistencia de diseño del concreto no confinado y la deformación unitaria del concreto (generalmente se asume que es igual al 0.2%);

- $\varepsilon_{ccu}$  es la deformación unitaria última (máxima) del concreto confinado correspondiente a la resistencia de diseño  $f_{ccd}$  (Capítulo 4).
- los coeficientes  $a$  y  $b$  son tomados como sigue:

$$a = 1 + \gamma, \quad b = \gamma - 1, \quad (12.4)$$

donde (ver Figura 12-1):

$$\gamma = \frac{f_{cd} + E_t \cdot \varepsilon_{c0}}{f_{cd}}, \quad (12.5)$$

$$E_t = \frac{f_{ccd} - f_{cd}}{\varepsilon_{ccu}}. \quad (12.6)$$

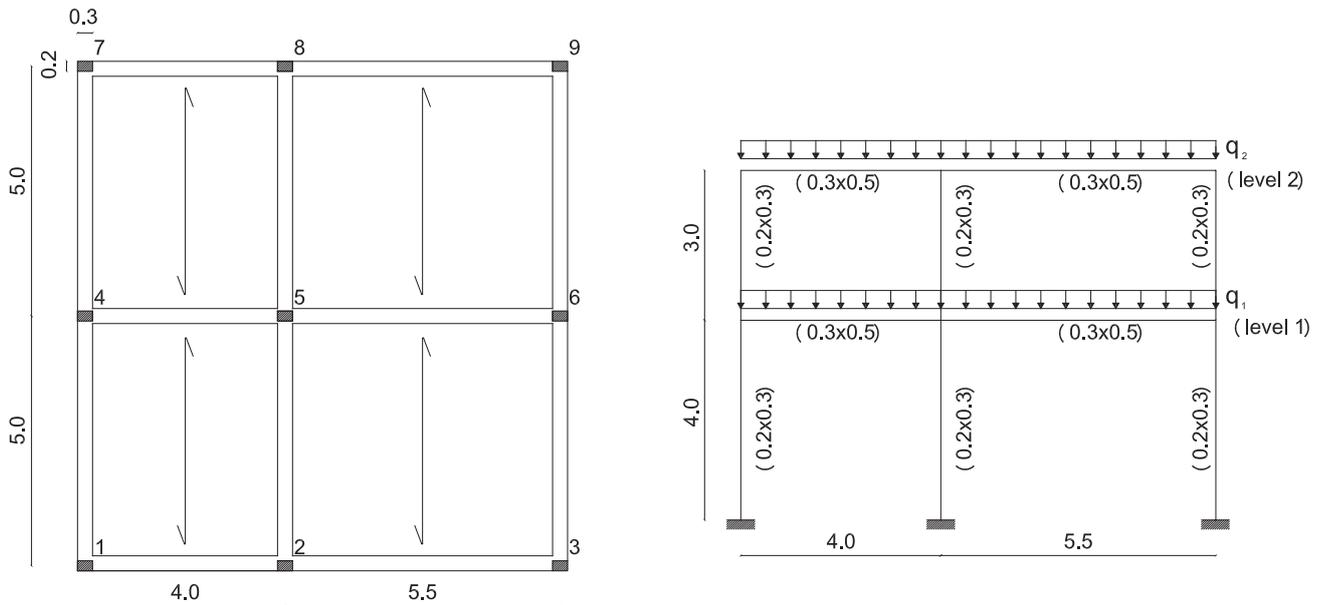
## 13 APÉNDICE G (EJEMPLOS DE REFORZAMIENTO FRP)

En este Apéndice, los ejemplos numéricos de reforzamiento FRP no-sísmico de elementos de hormigón armado son provistos. Se asume que el reforzamiento FRP es necesario debido al incremento de cargas aplicadas. El diseño es sólo desarrollado en el Estado Límite Ultimo. El diseño del Estado Límite de Servicio no está desarrollado.

### 13.1 DATOS GEOMETRICOS, MECANICOS Y DE CARGA

El edificio considerado para diseño es mostrado en la Figura 13 – 1, los elementos estructurales son definidos como sigue:

- vigas rectangulares primarias con sección transversal de 30 cm x 50 cm (recubrimiento de concreto  $d_1=d_2=3$  cm);
- vigas rectangulares secundarias con sección transversal de 30 cm x 40 cm (recubrimiento de concreto  $d_1=d_2=3$  cm);
- columnas rectangulares con sección transversal de 20 cm x 30 cm (recubrimiento de concreto  $d_1=d_2=3$  cm).



**Figura 13-1 – Geometría del edificio (dimensiones en metros).**

Las propiedades mecánicas del material son como sigue:

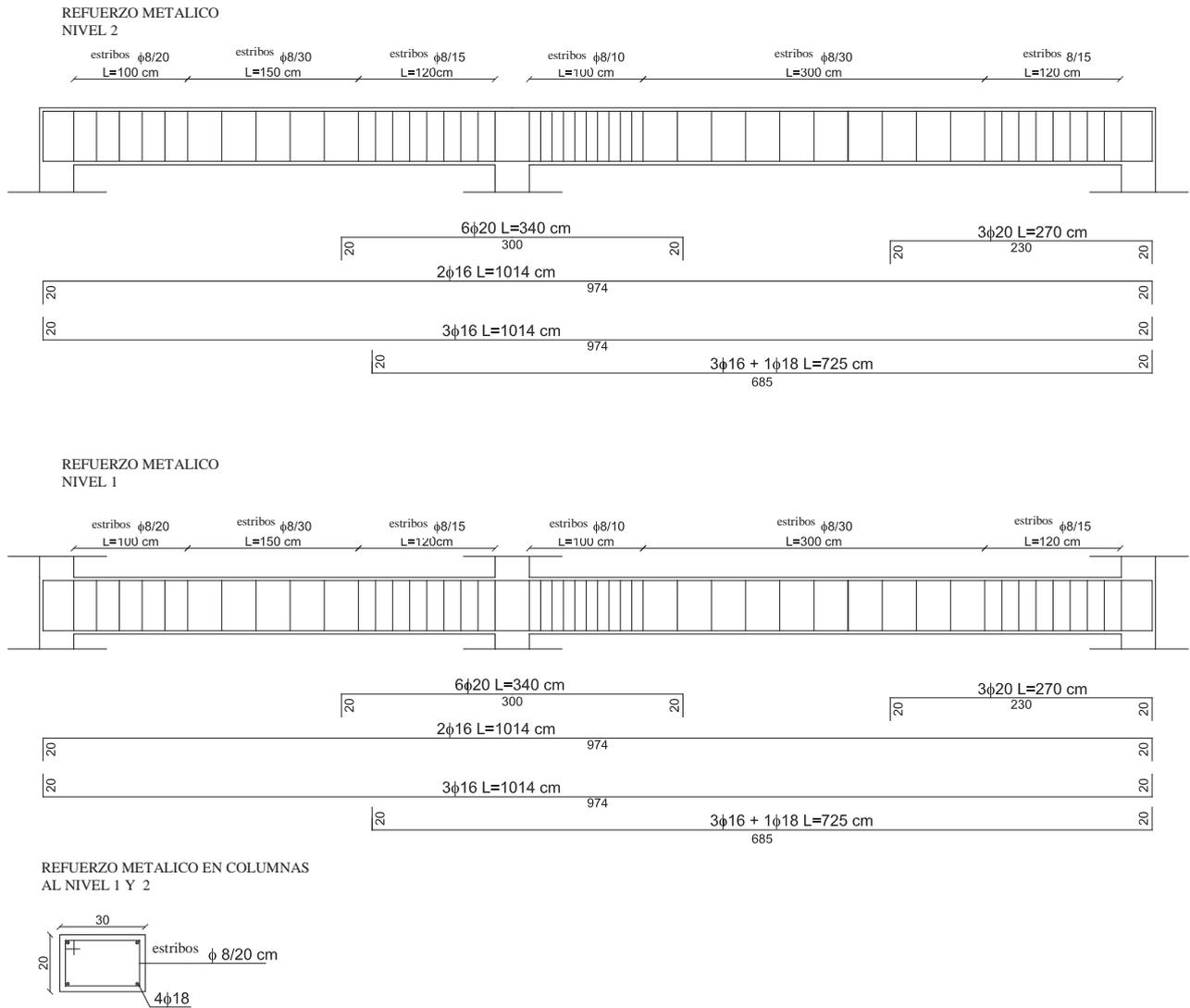
- Concreto:  $R_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$ .
- Acero: FeB38k ( $f_{yk}=31.5 \text{ N/mm}^2$ ).

Las condiciones de carga son definidas como sigue:

- carga viva en el nivel 1:  $a_1 = 2.00 \text{ kN/m}^2$ ;
- carga viva en el nivel 2:  $a_2 = 0.50 \text{ kN/m}^2$ ;
- nieve (zona III, altura  $a_s < 200 \text{ m}$ ):  $b = 0.75 \text{ kN/m}^2$ ;
- carga muerta debida al piso (para cada nivel):  $g = 6.00 \text{ kN/m}^2$ .

Las cargas de diseño en el ELU en el pórtico central son:

- nivel 1:  $q_1 = 62.25 \text{ kN/m}$ ;
- nivel 2:  $q_2 = 55.00 \text{ kN/m}$ .



**Figura13-2** –Localización de las varillas de acero para vigas y columnas.

### 13.2 HIPOTESIS DE VARIACIONES DE DESTINO DE USO

Nuevas cargas:

- Nivel 1:  $a_1 = 6.00 \text{ kN/m}^2$ .
- Nivel 2:  $a_2 = 4.00 \text{ kN/m}^2$ .

Nuevas cargas de diseño en eELU:

- Nivel 1:  $q_1 = 92.25 \text{ kN/m}$ .
- Nivel 2:  $q_2 = 81.20 \text{ kN/m}$ .

### 13.3 DISEÑO DE REFUERZO POR FLEXION

Los valores de las propiedades del material son así:

- Concreto ( $f_{cm} = 20.00 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_c = 1$ ,  $FC = 1.35$ ,  $f_{cd} = 14.81 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{ck} = 12.00 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{ctm} = 1.57 \text{ N/mm}^2$ );
- Acero ( $f_{ym} = 380.00 \text{ N/mm}^2$ ,  $\gamma_s = 1$ ,  $FC = 1.35$ ,  $f_{yd} = 281.48 \text{ N/mm}^2$ ).

La siguiente relación:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (13.1)$$

no resulta verificada en correspondencia de la viga de luz 5,5, como se indica en la Tabla 13-1, la Ecuación (10.7), (Tabla 13-1)

**Tabla 13-1**

Nivel	Distancia [m]	Sección	$M_{Sd}$ [kN m]	$A_{s1}$ [cm <sup>2</sup> ]	$A_{s2}$ [cm <sup>2</sup> ]	$M_{Rd}$ [kN m]	$M_{Sd} \leq M_{Rd}$
1	4.0	apoyo izquierdo	-49	4.02	6.03	-51.7	SI
	4.0	distancia media	69	6.03	4.02	76.6	SI
	4.0	apoyo derecho	-195	22.90	14.60	-284.3	SI
	5.5	apoyo izquierdo	-242	22.90	14.00	-283.9	SI
	5.5	distancia media	182	14.60	4.02	179.5	NO
	5.5	apoyo derecho	-99	13.40	14.60	-167.9	SI
2	4.0	apoyo izquierdo	-35	4.02	6.03	-51.7	SI
	4.0	distancia media	65	6.03	4.02	76.6	SI
	4.0	apoyo derecho	-175	22.90	14.60	-284.3	SI
	5.5	apoyo izquierdo	-207	22.90	14.00	-283.9	SI
	5.5	distancia media	173	14.60	4.02	179.5	SI
	5.5	apoyo medio	-67	13.40	14.60	-167.9	SI

El reforzamiento FRP flexional se desarrolla por la instalación de un refuerzo de fibra de carbón que usa el método de impregado *in situ* con las siguientes características geométricas y mecánicas:

- espesor de CFRP :  $t_{f,1} = 0.167 \text{ mm.}$ ;
- ancho de CFRP :  $b_f = 240.0 \text{ mm.}$ ;
- módulo de Elasticidad normal de CFRP en dirección de las fibras (eje de viga):  $E_f = 270000 \text{ N/mm}^2$ ;
- resistencia característica de CFRP :  $f_{fk} = 2700 \text{ N/mm}^2$ .

Los factores parciales  $\gamma_f$  y  $\gamma_{f,d}$  se supone son 1.10 y 1.20, respectivamente (Sección 3.4.1).

El factor de conversión medioambiental,  $\eta_a$ , es igual a 0.85 (Tabla 3-2, Sección 3.5.1).

Se usa un procedimiento de prueba y error para la determinación del número de capas de CFRP,  $n_f$ , requiere satisfacer la Ecuación (10.7). Además, asumiendo que  $n_f = 1$ , la máxima deformación unitaria de diseño CFRP,  $\varepsilon_{fd}$ , puede ser calculada como sigue (Ecuación 4,14):

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} = \varepsilon_{fdd} = 0.0045, \quad (13.2)$$

donde:

$$\varepsilon_{fk} = \frac{f_{fk}}{E_f} = 0.01, \quad (13.3)$$

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0 = 0.0045 \geq 0.0014 - 0.0007 = 0.0007. \quad (13.4)$$

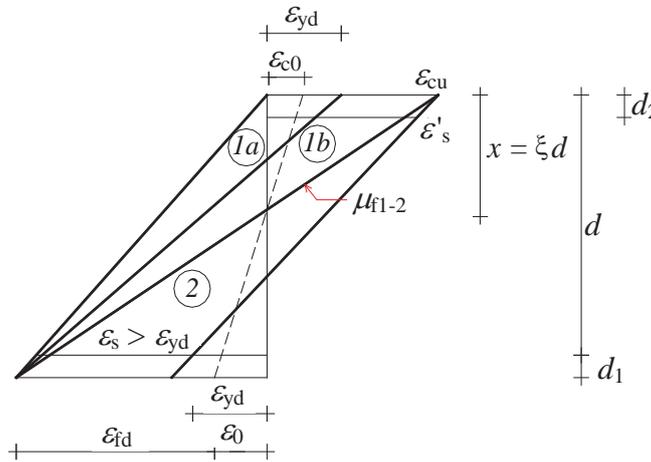
La resistencia de diseño CFRP,  $f_{fdd,2}$ , cuando el modo de falla 2 (despegamiento) controla y cuando  $k_G$ ,  $k_{G,2}$  y  $k_q$  son iguales a 0.037 mm, 0.10 mm y 1.25, respectivamente, pueden ser calculados como sigue:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f / b}{1 + b_f / b}} \geq 1, \quad (13.5)$$

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} = 0.154 \text{ N/mm}, \quad (13.6)$$

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot \frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}} = 1207.3 \text{ N/mm}^2. \quad (13.7)$$

El mecanismo CFRP de falla flexional puede ser de dos tipos, dependiendo si la deformación unitaria de tensión de CFRP,  $\varepsilon_{fd}$ , o deformación unitaria máxima de compresión del concreto,  $\varepsilon_{cu}$ , es alcanzada (Figura 13-3).



**Figura 13-3** –Regiones de falla de los elementos de concreto armado reforzados con FRP.

Para identificar el modo de falla para este caso particular, la relación mecánica de FRP,  $\mu_f$ , es calculada con la fórmula:

$$\mu_f = \frac{b_f \cdot (n_f \cdot t_{f,1}) \cdot f_{fdd,2}}{f_{cd} \cdot b \cdot d}, \quad (13.8)$$

y comparada con la relación mecánica balanceada,  $\mu_{f1-2}$ , definida como sigue:

$$\mu_{f1-2} = \frac{0.8 \cdot \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h}{d}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd} + \varepsilon_0} - \mu_s \cdot (1 - u). \quad (13.9)$$

donde:

- $\mu_s$  puede definirse como sigue:

$$\mu_s = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{f_{cd} \cdot b \cdot d}; \quad (13.10)$$

- $u$  representa la relación entre la compresión de acero,  $A_{s2}$ , y la tensión,  $A_{s1}$ , área;
- $\varepsilon_0$  es la deformación unitaria inicial de la tensión lateral del concreto, evaluada como:

$$\varepsilon_0 = \frac{M_{gk}}{0.9 \cdot d \cdot E_s \cdot A_{s2}}; \quad (13.11)$$

- $M_{gk}$  es el momento debido a las cargas muertas en ELS.

Si  $\mu_f \leq \mu_{f1-2}$ , la falla ocurre en la región 1; si  $\mu_f > \mu_{f1-2}$ , la falla ocurre en la región 2 (Figura 13-3). Una vez que el modo de falla es conocido, la posición,  $x$ , del eje neutro puede ser identificada de la Ecuación 4.15. La resistencia flexional,  $M_{Rd}$ , puede ser calculada de la Ecuación 4.16, asumiendo que el factor parcial,  $\gamma_{Rd}$ , es igual a 1.00 (Tabla 3-1, Sección 3.4.2). La resistencia flexional calculada,  $M_{Rd}$ , para una sola capa de refuerzo CFRP (Tabla 13-2) es mayor que el momento aplicado,  $M_{Sd}$ .

**Tabla 13-2**

Nivel	Distancia [m]	Sección	$M_{Sd}$ [kN m]	$n_f$	$\varepsilon_{fd}$	$\mu_{f,1}$	$\mu_{f,1-2}$	Región	$x$ [m]	$M_{Rd}$ [kN m]	$l_e$ [m]
1	5.5	distancia media	182	1	0.0045	0.027	0.18	1	0.11	214	0.12

Si la Ecuación 13.1 no es satisfecha, el número,  $n_f$ , de capas CFRP será progresivamente incrementado, en la interacción del procedimiento de diseño. El reforzamiento CFRP será instalado a lo largo del eje de la viga hasta que la Ecuación (13.1) no sea satisfecha. La longitud propia del anclaje será provista para el refuerzo CFRP de acuerdo a la Sección 4.2.2.5. La Tabla 13-2 también resume el valor de la longitud de pegado óptimo,  $l_{ed}$ , calculado de acuerdo a la Ecuación (4.1):

$$l_{ed} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot n_f \cdot t_{f,1} \cdot \Gamma_{Fd}}{2}} = 120 \text{ mm}, \quad (13.12)$$

donde:

- $\gamma_{Rd} = 1.25$ ;
- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u} = 1.23 \text{ MPa}$ , with  $s_u = 0.25 \text{ mm}$ .

La resistencia de despegado es verificada con  $M_{Sd} = 179.5 \text{ kNm}$  y  $\sigma_f = 411 \text{ MPa}$ , y  $f_{fdd}$  igual a:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} = 587.0 \text{ MPa.} \quad (13.13)$$

### 13.4 DISEÑO DE REFUERZO PARA CORTE

La siguiente relación debe ser verificada:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}. \quad (13.14)$$

donde  $V_{Sd}$  es la fuerza de corte aplicada de diseño, y  $V_{Rd}$  representa la capacidad portante de diseño para corte que debe ser calculada como sigue:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s}, V_{Rd,c} \}, \quad (13.15)$$

donde  $V_{Rd,s}$  y  $V_{Rd,c}$  son las contribuciones del acero y del concreto a la resistencia de corte, respectivamente. En este ejemplo solo se consideran las inclinaciones de varillas. De acuerdo al código de construcción, las cantidades arriba indicadas pueden ser expresadas como sigue:

$$V_{Rd,c} = 0.9 \cdot d \cdot b \cdot \alpha_c \cdot 0.5 \cdot f_{cd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta), \quad (13.16)$$

$$V_{Rd,s} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha, \quad (13.17)$$

donde:

- $A_{sw}$  y  $s$  son el área y el espaciamiento de las varillas de acero, respectivamente.
- $f_{cd}$  y  $f_{ywd}$  son la resistencia de diseño de concreto igual a  $9.88 \text{ MPa}$  y la resistencia de diseño de las varillas de acero igual a  $244.77 \text{ MPa}$ , respectivamente, con factores de seguridad del material igual a  $\gamma_c = 1.5$  y  $\gamma_s = 1.15$ .

La Tabla 13-3 resume la capacidad portante para corte construida (as-built). Como se ve, todos los elementos requieren ser reforzados para corte.

**Tabla13-3**

Nivel	Distancia [m]	Sección	$V_{Sd}$ [kN]	$A_{sw}$ [cm <sup>2</sup> ]	$s$ [cm]	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]	Satisfecho
1	4.0	apoyo izquierdo	148	1.00	20	51.8	313.3	51.8	NO
	4.0	apoyo derecho	221	1.00	15	69.0	313.3	69.0	NO
	5.5	apoyo izquierdo	280	1.00	10	103.5	313.3	103.5	NO
	5.5	apoyo derecho	228	1.00	15	69.0	313.3	69.0	NO
2	4.0	apoyo izquierdo	127	1.00	20	51.8	313.3	51.8	NO
	4.0	apoyo derecho	198	1.00	15	69.0	313.3	69.0	NO
	5.5	apoyo izquierdo	248	1.00	10	103.5	313.3	103.5	NO
	5.5	apoyo derecho	197	1.00	15	69.0	313.3	69.0	NO

El reforzamiento de corte FRP es desarrollado por medio de la instalación de un refuerzo de carbón de fibra de forma envoltura en U con las siguientes características geométricas y mecánicas:

- espesor de CFRP (equivalente):  $t_{f,1} = 0.167$  mm;
- ancho de CFRP:  $b_f = 150.0$  mm;
- módulo de Elasticidad normal de CFRP:  $E_f = 270000$  N/mm<sup>2</sup>;
- resistencia característica CFRP:  $f_{fk} = 2700$  N/mm<sup>2</sup>.

Los factores parciales  $\gamma_f$  y  $\gamma_{f,d}$  son 1.10 y 1.20, respectivamente (Sección 3.4.1). Las orientaciones de la fibra con respecto al eje de la viga son consideradas tanto para el primero como para el segundo nivel igual  $\beta = 45^\circ$ .

La resistencia de diseño para corte del elemento reforzado puede ser evaluada desde la Ecuación (4.18):

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \}, \quad (13.18)$$

donde:

- $V_{Rd,s}$  es la contribución del acero a la capacidad portante de corte ( $\alpha = 90^\circ$ ).
- $V_{Rd,c}$  es la contribución del concreto a la capacidad portante de corte ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ ).
- $V_{Rd,f}$  es la contribución de la envoltura en U de CFRP a la capacidad portante de corte calculada de acuerdo a la Ecuación (4.19):

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{p_f}, \quad (13.19)$$

donde  $\gamma_{Rd}$  es igual 1.2 (Tabla 3-1, Sección 3.4.2) y  $\theta$  es igual a  $45^\circ$ .

Para refuerzo CFRP con envoltura en U, la resistencia eficaz de diseño,  $f_{fed}$ , puede ser evaluada desde la Ecuación (13.19) como sigue:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min \{ 0.9 \cdot d, h_w \}} \right]. \quad (13.20)$$

donde:

- $h_w$  es la profundidad de la viga;
- $l_{ed}$  es la longitud eficaz de pegado en base a la Ecuación (13.12);
- $f_{fdd}$  es la resistencia de pegado para el modelo 1 en base a la Ecuación (13.13).

Asumiendo que el ancho de la banda CFRP,  $b_f$ , es igual a 150mm, tanto de espacio centro a centro,  $p_f$ , como el número de capas CFRP,  $n_f$ , pueden ser determinados con un procedimiento de prueba y error hasta que la Ecuación(13.14) sea satisfecha.

La Tabla 13-4 y Tabla 13-5 así como la Tabla 13-6 y Tabla 13-7 resume el diseño paracorte de un elemento reforzado CFRP de envoltura en U tanto para el nivel 1 como para el 2, respectivamente.

**Tabla 13-4**

Distancia [m]	Sección	$n_f$	$p_f$ [mm]	$k_b$	$\Gamma_{Fk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{fd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$l_{ed}$ [mm]	$f_{fed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_{Rd,f}$ [kN]
4.0	apoyo izquierdo	1	150	1.0	0.154	587	120	548	129
4.0	apoyo derecho	2	150	1.0	0.154	415	170	376	177
5.5	apoyo izquierdo	3	150	1.0	0.154	339	208	300	212
5.5	apoyo derecho	2	150	1.0	0.154	415	170	376	177

**Tabla 13-5**

Distancia [m]	Sección	$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,f}$ [kN]	$V_{Sd}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
4.0	apoyo izquierdo	627	52	129	148	181
4.0	apoyo derecho	627	69	177	221	246
5.5	apoyo izquierdo	627	104	212	280	316
5.5	apoyo derecho	627	69	177	228	246

**Tabla 13-6**

Distancia [m]	Sección	$n_f$	$p_f$ [mm]	$\Gamma_{Fk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{fd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$l_{ed}$ [mm]	$f_{fed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_{Rd,f}$ [kN]
4.0	apoyo izquierdo	1	200	0.154	587	120	548	97
4.0	apoyo derecho	2	200	0.154	415	170	376	133
5.5	apoyo izquierdo	2	150	0.154	415	170	376	177
5.5	apoyo derecho	2	150	0.154	415	170	376	177

**Tabla 13-7**

Distancia [m]	Sección	$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,f}$ [kN]	$V_{Sd}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
4.0	apoyo izquierdo	627	52	97	127	149
4.0	apoyo derecho	627	69	133	198	202
5.5	apoyo izquierdo	627	104	177	248	281
5.5	apoyo derecho	627	69	177	197	246

### 13.5 DISEÑO DE REFUERZO DE COLUMNAS

Comenzando desde los valores del momento factorado y la fuerza axial, se requiere diseño de refuerzo para columnas sujetas a una fuerza axial ligeramente excéntrica, si la siguiente ecuación no es verificada:

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} \tag{13.21}$$

Cuando las columnas están sujetas a flexo-compresión, el refuerzo es requerido si el punto ( $N_{Sd}$ ;  $M_{Sd}$ ) yace fuera del dominio de N-M basado en las propiedades mecánicas especificadas del material (Tabla 13-8).

**Tabla13-8**

Nivel	Columna	Sección	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kN m]	Excentricidad [cm]	Semi diámetro del punto central de inercia [cm]
1	lado izquierdo	fondo	-290	-10	3.4	6.5
	lado izquierdo	tope	-282	16	-5.7	6.5
	central	fondo	-962	-9	0.9	6.5
	central	tope	-954	15	-1.6	6.5
	lado derecho	fondo	-441	16	-3.6	6.5
	lado derecho	tope	-432	-34	7.9	6.5
2	lado izquierdo	fondo	-134	-34	25.4	6.5
	lado izquierdo	tope	-128	35	-27.3	6.5
	central	fondo	-453	-32	7.1	6.5
	central	tope	-447	33	-7.4	6.5
	lado derecho	fondo	-204	66	-32.4	6.5
	lado derecho	tope	-198	-67	-33.8	6.5

Como se resume en laTabla 13-9 y laTabla 13-10, hay dos casos para cada nivel donde las columnas requieren refuerzo.

**Tabla13-9**

Nivel	Columna	Sección	$N_{Sd}$ [kN]	$N_{Rd}$ [kN]	$N_{Rd} > N_{Sd}$
1	lado izquierdo	fondo	-290	-953	SI
	lado izquierdo	tope	-282	-953	SI
	Central	fondo	-962	-953	NO
	Central	tope	-954	-953	NO
	lado derecho	fondo	-441	-953	SI
	lado derecho	tope	-432	-953	SI

**Tabla13-10**

Nivel	Columna	Sección	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kN m]	Reforza- miento re- querido
1	lado derecho	tope	-432	-34	SI
	lado izquierdo	fondo	-134	-34	SI
	lado izquierdo	tope	-128	35	SI
2	central	fondo	-453	-32	SI
	central	tope	-447	33	SI
	lado derecho	fondo	-204	66	NO
	lado derecho	tope	-198	-67	NO

### 13.5.1 Confinamiento de columnas sujetas a fuerza axial ligeramente excéntrica

Debido a que la columna central del nivel 1 está sujeta a una fuerza ligeramente excéntrica, el confinamiento FRP es desarrollado para asegurar que la siguiente ecuación se cumpla:

$$N_{Sd} \leq N_{Rcc,d} \tag{13.22}$$

Una envoltura continua CFRP de la columna es usada asumiendo los siguientes parámetros:

- el espesor de CFRP (equivalente):  $t_{f,1} = 0.167$  mm.
- módulo de Elasticidad normal de CFRP:  $E_f = 270000$  N/mm<sup>2</sup>.
- resistencia característica de CFRP:  $f_{fk} = 2700$  N/mm<sup>2</sup>.

Los factores parciales  $\gamma_f$  y  $\gamma_{f,d}$  son igualados a 1.10 y 1.20 (Sección 3.4.1). El factor de conversión medio-ambiental,  $\eta_a$ , es igualado a 0.85 (Tabla 3-2, Sección 3.5.1).

Un procedimiento de prueba y error es indicado para la determinación del número de capas de CFRP,  $n_f$ , necesita satisfacer la Ecuación (13.22). Además, asumiendo  $n_f=1$ , la resistencia de diseño axial,  $N_{Rcc,d}$  puede ser escrita como sigue (Ecuación (4.30)):

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}, \quad (13.23)$$

donde:

- $\gamma_{Rd}$  es el factor parcial para el modelo de resistencia, igual a 1.10 (Sección 3.4.2);
- $A_c$  es la sección transversal del concreto;
- $f_{ccd}$  es la resistencia de diseño del concreto confinado;
- $A_s$  es el área del refuerzo del acero existente;
- $f_{yd}$  es la resistencia de diseño del refuerzo existente del acero, calculado de acuerdo con el código de construcción.

La resistencia de diseño,  $f_{ccd}$ , para concreto confinado puede ser evaluada de acuerdo a la Ecuación (4.31):

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left( \frac{f_{1,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}, \quad (13.24)$$

donde  $f_{cd}$  es la resistencia de diseño del concreto confinado de acuerdo al código de construcción, y  $f_{1,eff}$  es la presión efectiva de confinamiento, dependiente de la sección transversal del elemento y el tipo de aplicación de FRP. Esta última está dada por la Ecuación (4.32) como sigue:

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_{eff} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} \right), \quad (13.25)$$

donde:

- $k_{eff} (\leq 1)$  es el coeficiente de eficacia definido por la Ecuación (4.34)

$$k_{eff} = k_H \cdot k_v \cdot k_\alpha; \quad (13.26)$$

- $\rho_f$  es la relación geométrica de CFRP. Una sección transversal confinada con refuerzo continuo FRP puede ser definida como sigue:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b+h)}{b \cdot h}, \quad (13.27)$$

- $b$  y  $h$  son dimensiones de la sección transversal de la columna;
- $E_f$  representa el módulo de Elasticidad normal para CFRP en la dirección de la fibra.
- $\varepsilon_{f,d,rid}$  es la deformación unitaria de diseño de CFRP, tomado de la Ecuación(4.37):

$$\varepsilon_{f,d,rid} = \min\{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f; 0.004\} = 0.004. \quad (13.28)$$

El coeficiente de eficacia vertical,  $k_V$ , así como el coeficiente  $k_\alpha$  pueden ser equiparados a 1 cuando la envoltura continúa con fibras que corren perpendicularmente al eje del elemento. El coeficiente de eficacia horizontal,  $k_H$ , para secciones transversales rectangulares puede ser escrita como sigue (Ecuación(4.40)):

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g}, \quad (13.29)$$

donde  $b'$  y  $h'$  es la dimensión mostrada en la Figura 4-13 de la Sección 4.5.2.1.2 y  $A_g$  es el área de la sección transversal del elemento.

Antes de la aplicación del sistema CFRP, es necesario proceder a redondear las esquinas de las secciones, garantizando un valor de radio de curvatura de 20 mm, de acuerdo a la Sección 4.8.2.2 (2). Por tanto se asume  $b'=260$  mm y  $h'=110$  mm.

El esfuerzo normal resistente calculado,  $N_{Rcc,d}$ , de la columna confinada CFRP está resumido en la (Tabla 13-11).

**Tabla 13-11**

Sección	$n_f$	$k_H$	$k_{eff}$	$\rho_f$	$f_{l,eff}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ccd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{Rcc,d}$ [kN]
arriba	1	0.41	0.41	0.0033	0.74	20.03	1106
base	1	0.41	0.41	0.0033	0.74	20.03	1106

### 13.5.2 Confinamiento y reforzamiento de columnas sujetas a flexo-compresión con gran excentricidad

En este párrafo se desarrolla el diseño del reforzamiento CFRP para el nivel 2 del lado derecho de la columna sujeto a deformación combinada y fuerza axial (Tabla 13-10). El refuerzo flexional CFRP es llevado a cabo, dados los siguientes parámetros geométricos y mecánicos:

- espesor de CFRP (equivalente):  $t_{f,1} = 0.167$  mm;
- ancho de CFRP:  $b_{f,1} = 160$  mm;
- módulo de Elasticidad normal para CFRP:  $E_f = 270000$  N/mm<sup>2</sup>;
- resistencia característica de CFRP:  $f_{fk} = 2700$  N/mm<sup>2</sup>.

En las regiones de la columna cerca de las vigas, el mismo material CFRP es aplicado como envoltura de columna.

Los factores parciales  $\gamma_f$  son igualados a 1.10.

El factor de conversión medio-ambiental,  $\eta_a$ , es igualado a 0.85 (Tabla 3-2, Sección ).

Debido al confinamiento, la resistencia de diseño de compresión del concreto puede ser escrita como sigue (Sección 13.5):

$$f_{ccd} = f_{cd} \cdot \left[ 1 + 2.6 \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3} \right] = 15.10 \text{ N/mm}^2. \quad (13.30)$$

Un procedimiento de prueba y error es iniciado de acuerdo al Apéndice E por medio del cálculo de coeficientes no dimensionales.

El diseño se cumple cuando el número,  $n_f$ , de las capas de CFRP es igual a 2 (Tabla 13-12 y Tabla 13-13).

**Tabla13-12**

Sección	$n_{Sd}$	$m_{Sd}$	$\mu_s$	$u$	$n_f$	$\mu_f$
fondo	0.251	0.301	0.18	1	2	0.13
tope	0.244	0.306	0.18	1	2	0.13

**Tabla13-13**

Sección	$\eta_0$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta$	Modo de falla	$\bar{W}_{(2)}(\eta)$	$m_{Rd}(n_{Sd})$	$m_{Rd} > m_{Sd}$
fondo	-0.177	0.137	0.249	0.606	0.380	2	0.0857	0.3267	SI
tope	-0.177	0.137	0.249	0.606	0.373	2	0.0861	0.3272	SI

## 14 APENDICE H (EJEMPLOS REFORZAMIENTO FRP EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA)

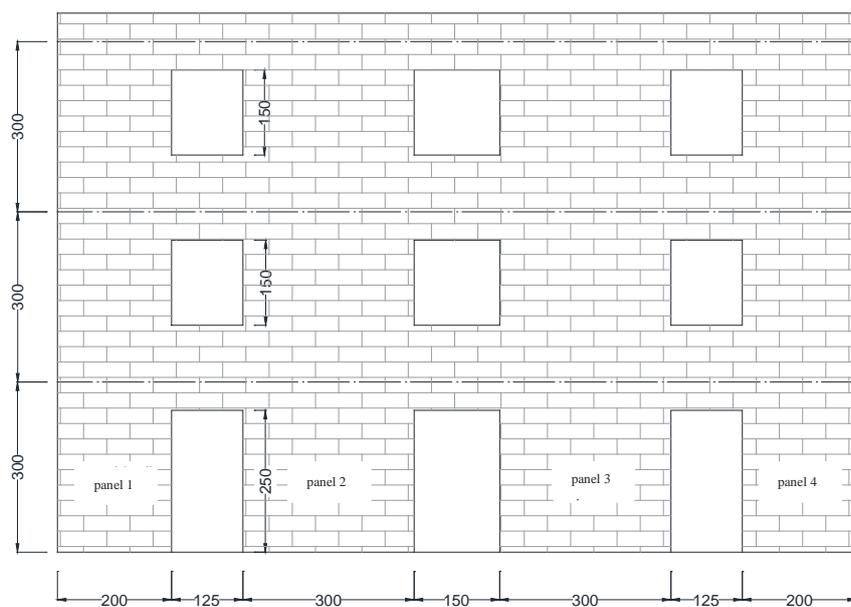
Este apéndice reporta el diseño de sistema de reforzamiento FRP de panel de mampostería localizada en el perímetro de la pared de un edificio de 3 pisos.

El ejemplo discute los siguientes ítems:

- información geométrica, mecánica y de carga;
- capacidad de los paneles de mampostería preexistentes para cargas combinadas axiales y flexionales;
- diseño de FRP para cargas combinadas axiales y cargas flexionales;
- resistencia de corte de paneles de mampostería preexistentes;
- diseño de corte para FRP.

### 14.1 DATOS GEOMETRICOS, MECANICOS Y DE CARGA

La mampostería tomada para prueba está comprendida por cuatro paneles de 2.0 m o 3.0 m de ancho como en la Figura 14-1. El espesor de los paneles decrece con la altura y es igual a 500 mm, 375 mm y 250 mm para el primero, segundo y tercer piso, respectivamente. La altura es la misma para cada panel e igual a 9.0 m (3.0 m por piso).



**Figura 14-1** – Geometría (las dimensiones son reportadas en cm).

La Tabla 14-1 muestra los datos de la propiedad mecánica de los ladrillos y valores de factores de seguridad. La ley constitutiva asumida de la mampostería como se indica en la Sección 5.2.3 (8) con  $\bar{\epsilon}_m = 2\%$  y  $\epsilon_{mu} = 3.5\%$ .

**Tabla14-1**–Información de mampostería.

Módulo Elasticidad normal	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4000
Módulo de corte	$G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1000
Peso específico	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18.0
Factor de confianza	$FC$	1.0
Factor parcial	$\gamma_M$	2
Resistenciaa compresión de mampostería dirección horizontal		
Resistencia característica	$f_{mk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8.0
Resistencia de diseño	$f_{md}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4.0
Resistencia de corte		
Resistencia característica sin carga axial	$f_{vk0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.8
Resistencia del bloque de mampostería		
Valor medio de la resistenciaa compresión	$f_{bm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	38
Valor medio dela resistencia a tracción	$f_{btm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3.8

Se usa el CFRPimpregnado *in situ* con fibras mono direccionales. Se reportan características geométricas y mecánicas en laTabla 14-2. En laTabla 14-3 se muestran factores parciales y valores de diseño de la FRP.

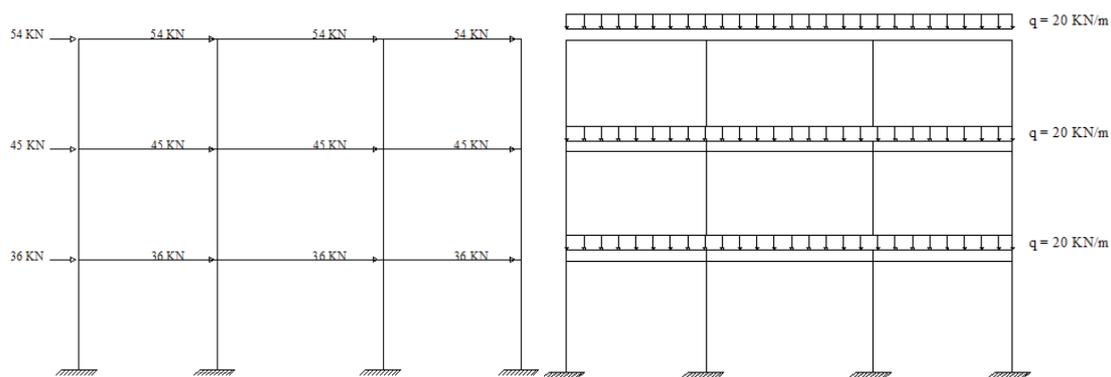
**Tabla14-2**–Propiedades mecánicas y geométricas de FRP.

Espesor	$t_f$ [mm]	0.165
Ancho	$b_f$ [mm]	100
Módulo de Elasticidad normal en dirección de la fibra	$E_f$ [GPa]	230
Deformación unitaria última (maxima)	$\varepsilon_{fk}$	0.0175
Espaciamiento	$p_f$ [mm]	500

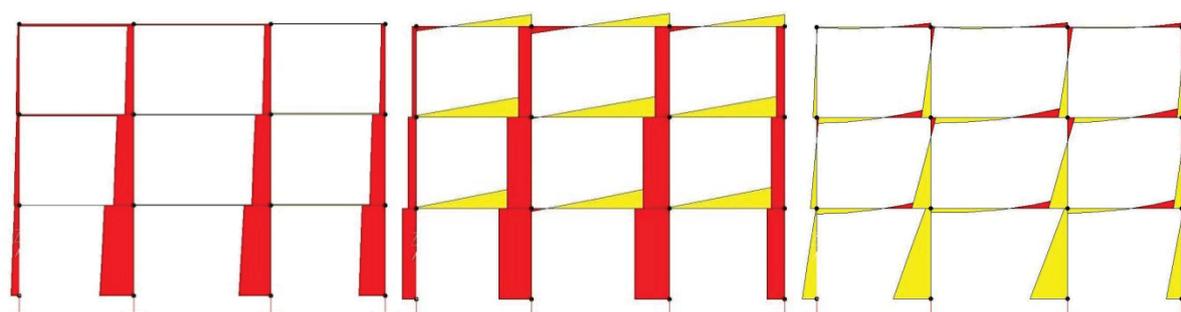
**Tabla 14-3**–Factores parciales y diseño de valores de la FRP.

Factor parcial para despegamiento	$\gamma_{f,d}$ (Sección 3.4.1)	1.2
Factor parcial para ULS	$\gamma_f$ (Sección 3.4.1)	1.1
Factor de conversión para medioambiente	$\eta_a$ (Sección 3.5.1)	0.95
Esfuerzo tensional último (máximo)	$\eta_a \cdot \varepsilon_{fk} / \gamma_f$ (Sección 5.2.3)	0.0151
Ancho del área de la distribución de la fuerza de pegado	$b_d$ [mm] (Sección 5.3.2)	250
Factor correctivo geométrico	$k_b$ (Sección 5.3.2)	1.363
Deslizamiento interfasal en todo el despegamiento	$s_u$ [mm] (Sección 5.3.2)	0.4
Factor correctivo	$k_G$ [mm] (Sección5.3.2)	0.031
Energía específica de fractura	$\Gamma_{Fd}$ [N/mm] (Sección 5.3.2)	0.5077
Longitud óptima de pegado	$l_{ed}$ [mm] (Sección 5.3.2))	150
Diseño de fuerza de despegamiento de FRP (modo 1)	$f_{fda}$ [N/mm2] (Sección 5.3.2)	991
Diseño de fuerza de despegamiento de FRP (modo 2)	$f_{fda,2}=2.0 \cdot f_{fda}$ [N/mm2] (5.3.3)	1982
Diseño de fuerza de pegado entre FRP y mampostería	$f_{bd}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Sección 5.3.2)	2.5
Esfuerzo máximo de FRP antes del despegamiento	$\varepsilon_{fdd}$ (5.3.3)	0.0086
Esfuerzo de diseño de FRP	$\varepsilon_{fd}$ (Sección 5.3.3)	0.0086
Factor parcial para deformación combinada y carga axial	$\gamma_{Rd}$ (Sección 3.4.2)	1.00
Factor parcial para corte	$\gamma_{Rd}$ (Sección 3.4.2)	1.20

Las cargas horizontales y verticales de las paredes de mamposterías son representadas en laFigura 14-2. Los diagramas de fuerza axial, corte y momento flector son calculados asumiendo un comportamiento elástico lineal de los elementos estructurales (verFigura 14-3; Tabla 14-4,Tabla 14-5,Tabla 14-6yTabla 14-7).



**Figura14-2** –Modelo de portico y cargas.



**Figura14-3** –Diagramas de fuerza axial, corte y momento de diseño

**Tabla14-4**– Solicitaciones de diseño: panel 1.

Nivel	Longitud	Espesor	Carga axial de diseño	Momento de diseño	Corte de diseño
[m]	$L$ [m]	$t$ [m]	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kNm]	$V_{Sd}$ [kN]
0	2	0.5	133.38	240.98	76.58
1	2	0.5	115.73	164.4	76.58
2	2	0.5	98.07	87.82	76.58
3	2	0.5	80.41	11.23	76.58
3	2	0.375	84.04	103.39	46.48
4	2	0.375	70.8	56.92	46.48
5	2	0.375	57.56	10.44	46.48
6	2	0.375	44.31	36.04	46.48
6	2	0.25	52.72	55.5	21.85
7	2	0.25	43.89	33.65	21.85
8	2	0.25	35.06	11.81	21.85
9	2	0.25	26.23	10.04	21.85

**Tabla14-5** –Solicitaciones de diseño: panel 4.

Nivel	Longitud	Espesor	Carga axial de diseño	Momento de diseño	Corte de diseño
[m]	$L$ [m]	$t$ [m]	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kNm]	$V_{Sd}$ [kN]
0	2	0.5	434.71	250.51	95.43
1	2	0.5	417.05	155.08	95.43
2	2	0.5	399.39	59.65	95.43
3	2	0.5	381.74	35.78	95.43
3	2	0.375	252.33	131.73	72.51
4	2	0.375	239.09	59.21	72.51
5	2	0.375	225.84	13.3	72.51
6	2	0.375	212.6	85.81	72.51
6	2	0.25	90.5	72.98	45.1
7	2	0.25	81.67	27.89	45.1
8	2	0.25	72.84	17.21	45.1
9	2	0.25	64.01	62.3	45.1

**Tabla14-6** –Solicitaciones de diseño: panel 2.

Nivel	Longitud	Espesor	Carga axial de diseño	Momento de diseño	Corte de diseño
[m]	$L$ [m]	$t$ [m]	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kNm]	$V_{Sd}$ [kN]
0	3	0.5	557.52	619.07	178.52
1	3	0.5	531.03	440.55	178.52
2	3	0.5	504.55	262.04	178.52
3	3	0.5	478.06	83.52	178.52
3	3	0.375	331.42	311.06	131.92
4	3	0.375	311.55	179.14	131.92
5	3	0.375	291.69	47.22	131.92
6	3	0.375	271.82	84.7	131.92
6	3	0.25	143.71	152.28	70.56
7	3	0.25	130.47	81.72	70.56
8	3	0.25	117.22	11.16	70.56
9	3	0.25	103.98	59.4	70.56

**Tabla14-7** –Solicitaciones de diseño: panel 3.

Nivel	Longitud	Espesor	Carga axial de diseño	Momento de diseño	Corte de diseño
[m]	$L$ [m]	$t$ [m]	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kNm]	$V_{Sd}$ [kN]
0	3	0.5	521.43	618.68	189.47
1	3	0.5	494.94	429.21	189.47
2	3	0.5	468.46	239.74	189.47
3	3	0.5	441.97	50.27	189.47
3	3	0.375	315.46	316.02	145.09
4	3	0.375	295.59	170.93	145.09
5	3	0.375	275.73	25.83	145.09
6	3	0.375	255.86	119.26	145.09
6	3	0.25	138.48	152.36	78.5
7	3	0.25	125.24	73.86	78.5
8	3	0.25	111.99	4.64	78.5
9	3	0.25	98.75	83.13	78.5

## 14.2 VERIFICACIONA FLEXO-COMPRESION DE LOS PANELES

La verificación a flexo-compresión de los paneles de mampostería no reforzados está calculada asumiendo una ley constitutiva de acuerdo a la Sección 14.1. La resistencia de momento de cálculo,  $M_{Rd}(N_{Sd})$  está valorado para la carga axial de diseño  $N_{Sd}$  de acuerdo a prescripciones de las

estructuras de concreto reportadas en la Sección 4.2.2.4. Los equilibrios traslacionales y rotacionales son usados asumiendo la linealidad de la distribución de la deformación unitaria. Los resultados de los análisis se muestran en la Tabla 14-8, Tabla 14-9, Tabla 14-10 y Tabla 14-11. Figura 14-4 muestra una comparación entre el momento factorizado y la capacidad de flexión. La ecuación  $M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$  no es satisfecha en algunas secciones de los paneles 1 y 4. Para estos paneles, FRP es escogido como sistema de reforzamiento y aplicado sobre toda altura del panel con una distancia de 10 cm desde el borde del panel.

**Tabla 14-8** – Diseño para flexo-compresión: panel 1.

Altura de la sección [m]	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	128.93	<b>no satisfecho</b>
1	112.38	<b>no satisfecho</b>
2	95.67	satisfecho
3	78.79	satisfecho
3	81.69	<b>no satisfecho</b>
4	69.13	satisfecho
5	56.46	satisfecho
6	43.66	satisfecho
6	51.33	<b>no satisfecho</b>
7	42.93	satisfecho
8	34.45	satisfecho
9	25.89	satisfecho

**Tabla 14-9** – Diseño para flexo-compresión: panel 4.

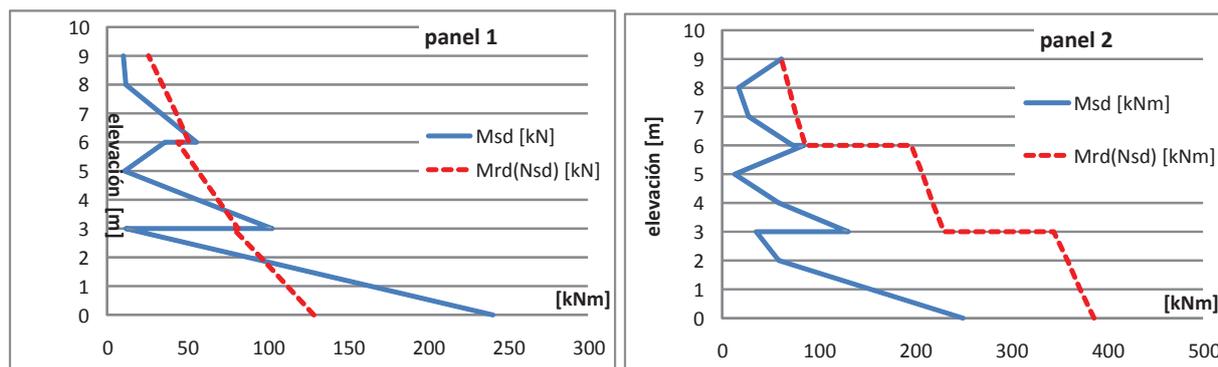
Altura de la sección [m]	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	387.47	satisfecha
1	373.57	satisfecha
2	359.51	satisfecha
3	345.31	satisfecha
3	231.11	satisfecha
4	220.04	satisfecha
5	208.84	satisfecha
6	197.53	satisfecha
6	86.40	satisfecha
7	78.34	satisfecha
8	70.19	satisfecha
9	61.96	<b>no satisfecha</b>

**Tabla14-10** – Diseño paraflexo-compresión: panel 3

Altura de la sección [m]	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	758.57	satisfecha
1	726.05	satisfecha
2	693.18	satisfecha
3	659.95	satisfecha
3	460.52	satisfecha
4	434.97	satisfecha
5	409.17	satisfecha
6	383.10	satisfecha
6	205.24	satisfecha
7	187.19	satisfecha
8	168.96	satisfecha
9	150.56	satisfecha

**Tabla14-11** –Diseño paraflexo-compresión: panel 4.

Altura de la sección [m]	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	714.17	satisfecha
1	681.17	satisfecha
2	647.83	satisfecha
3	614.12	satisfecha
3	440.02	satisfecha
4	414.26	satisfecha
5	388.25	satisfecha
6	361.97	satisfecha
6	198.13	satisfecha
7	180.02	satisfecha
8	161.71	satisfecha
9	143.25	satisfecha



**Figura 14 4**– Diagrama del momento flector y capacidad portante de diseño de los paneles 1-2.

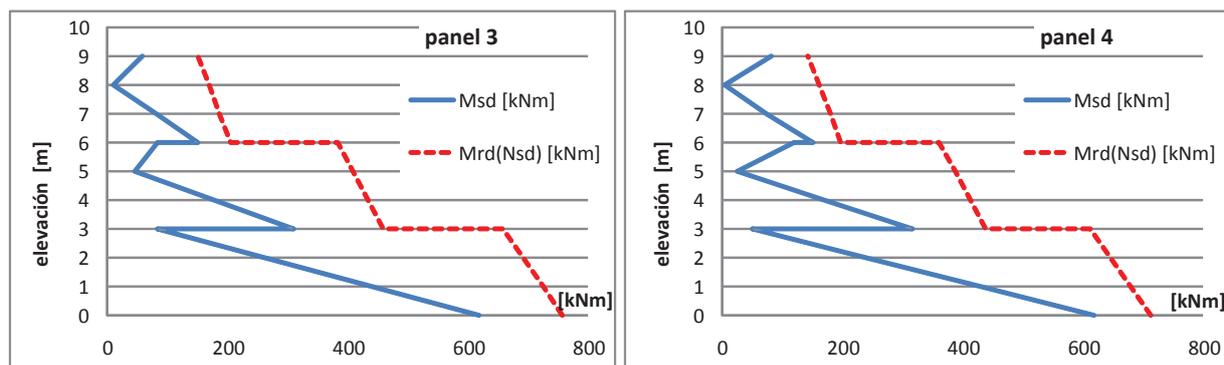


Figura14-4– Diagrama del momento flector y capacidad portante de diseño de los paneles 3-4.

### 14.3 DISEÑO DE FRP PARA FLEXO-COMPRESION

Las propiedades de FRP son reportadas en la Sección 14.1y FRP es instalado en forma continua desde el nivel 0.0 m hasta el nivel 9.0 m tanto en el lado interno como externo de los paneles.

Los dispositivos de anclaje mecánico son usados en los niveles más bajos.

La distribución de la tensión ULS es simplificada con una distribución *detensión-bloque* y profundidad igual a  $0.8 \cdot x$  (donde  $x$  es la distancia de la compresión extrema de la fibra a los ejes neutros).

Los resultados de los paneles reforzados con FRP1 y2son reportados en la Tabla 14-12y laTabla 14-13, respectivamente.

Tabla14-12 – Resistencia a flexo-compresión del panel 1 reforzado con FRP.

Nivel [m]	Falla FRP	$\epsilon_{fd}$	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	falla FRP	0.0151	335.8	verificado
1	despegamiento intermedio	0.0086	231.6	verificado
2	despegamiento intermedio	0.0086	215.4	verificado
3	despegamiento intermedio	0.0086	199.1	verificado
3	despegamiento intermedio	0.0086	200.6	verificado
4	despegamiento intermedio	0.0086	188.6	verificado
5	despegamiento intermedio	0.0086	176.6	verificado
6	despegamiento intermedio	0.0086	164.3	verificado
6	despegamiento intermedio	0.0086	169.8	verificado
7	despegamiento intermedio	0.0086	162.0	verificado
8	despegamiento intermedio	0.0086	154.0	verificado
9	despegamiento final	0.0043	86.5	verificado

Tabla14-13 – Resistencia a flexo-compresión del panel 2 reforzado con FRP.

Nivel [m]	falla FRP	$\epsilon_{fd}$	$M_{Rd}(N_{Sd})$ [kN m]	$M_{Rd}(N_{Sd}) \geq M_{Sd}$
0	falla FRP	0.0151	577.0	verificado
1	despegamiento intermedio	0.0086	482.9	verificado
2	despegamiento intermedio	0.0086	469.4	verificado
3	despegamiento intermedio	0.0086	455.8	verificado
3	despegamiento intermedio	0.0086	342.7	verificado
4	despegamiento intermedio	0.0086	332.2	verificado
5	despegamiento intermedio	0.0086	321.6	verificado
6	despegamiento intermedio	0.0086	310.9	verificado
6	despegamiento intermedio	0.0086	202.4	verificado
7	despegamiento intermedio	0.0086	194.9	verificado
8	despegamiento intermedio	0.0086	187.3	verificado
9	despegamiento final	0.0043	121.3	verificado

### 14.4 CAPACIDAD PARA CORTE

La capacidad para corte de los paneles 3 y 4 no reforzados es reportado en laTabla 14-14 yTabla 14-15, respectivamente.LaFigura 14-5muestra una comparación entre el corte factorado y la capacidad de corte. En estos paneles la ecuación  $V_{Rd} \geq V_{Sd}$  se cumple siempre. Además los paneles no requieren ninguna instalación de sistemas de reforzamiento para corte.

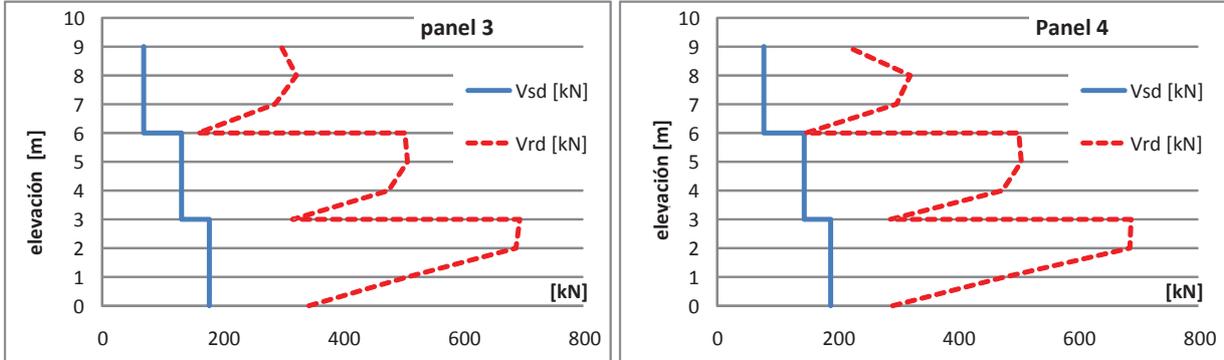


Figura14-5 –Diagrama de fuerza cortante factorada y capacidad portante de diseño de los paneles 3 y4.

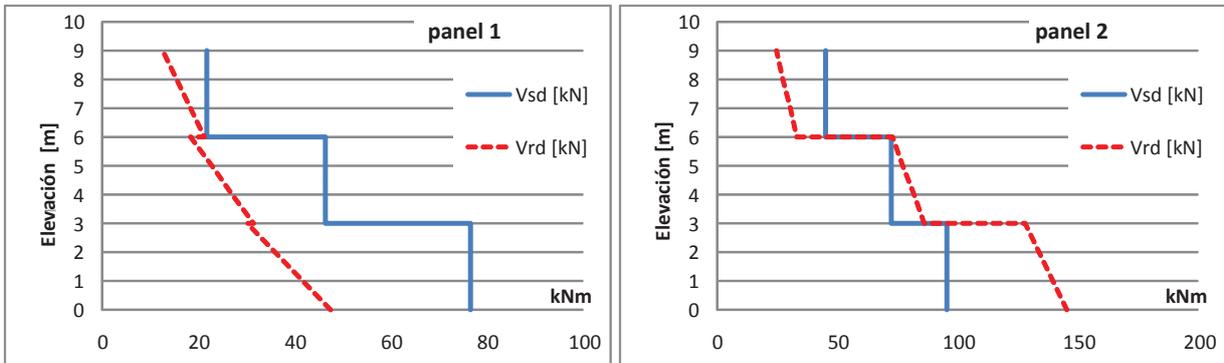


Figura14-6 –Diagrama de fuerza cortante factorada y capacidad portante de diseño de los paneles 1 y2.

Tabla14-14 –Resistenciaa corte del panel 3.

Nivel	Corte factorado	Excentricidad	Longitud óptima	Resistencia de corte característica	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$e$ [m]	$l_c$ [m]	$f_{vk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$V_{Rd}$ [kN]	
0	178.52	1.11	1.17	1181.60	345.26	satisfecha
1	178.52	0.83	2.01	1011.2	508.4	satisfecha
2	178.52	0.52	2.94	937.2	689.3	satisfecha
3	178.52	0.17	3.00	927.5	695.6	satisfecha
3	131.92	0.94	1.68	1009.9	318.9	satisfecha
4	131.92	0.57	2.78	919.8	478.6	satisfecha
5	131.92	0.16	3.00	903.7	508.3	satisfecha
6	131.92	0.31	3.00	896.6	504.4	satisfecha
6	70.56	1.06	1.32	974.0	160.9	satisfecha
7	70.56	0.63	2.62	879.6	288.2	satisfecha
8	70.56	0.10	3.00	862.5	323.4	satisfecha
9	70.56	0.57	2.79	859.7	299.4	satisfecha

**Tabla14-15** –Resistenciaa corte del panel 4.

Nivel	Corte factorado	Excentricidad	Longitud óptima	Resistencia de corte característica	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$e$ [m]	$l_c$ [m]	$f_{vk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$V_{Rd}$ [kN]	
0	189.47	1.19	0.94	1243.54	292.38	satisfecha
1	189.47	0.87	1.90	1008.6	478.7	satisfecha
2	189.47	0.51	2.96	926.4	686.6	satisfecha
3	189.47	0.11	3.00	917.9	688.4	satisfecha
3	145.09	1.00	1.49	1025.1	287.3	satisfecha
4	145.09	0.58	2.77	914.0	473.9	satisfecha
5	145.09	0.09	3.00	898.0	505.1	satisfecha
6	145.09	0.47	3.00	891.0	501.2	satisfecha
6	78.5	1.10	1.20	984.7	147.6	satisfecha
7	78.5	0.59	2.73	873.4	298.1	satisfecha
8	78.5	0.04	3.00	859.7	322.4	no satisfecha
9	78.5	0.84	1.97	880.0	217.2	satisfecha

La Tabla 14-16 y laTabla 14-17muestran el resultado del análisis de corte de los paneles 1 y 4, respectivamente.

**Tabla14-16** –Resistenciaa corte del panel 1.

Nivel	Corte factorado	Eje neutral	Resistencia característica de corte	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$x$ [m]	$f_{vk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$V_{Rd}$ [kN]	
0	76.58	0.15	1488.4	57.7	<b>no satisfecha</b>
1	76.58	0.11	1618.4	45.8	<b>no satisfecha</b>
2	76.58	0.10	1568.5	40.0	<b>no satisfecha</b>
3	76.58	0.09	1506.5	34.3	<b>no satisfecha</b>
3	46.48	0.12	1520.4	35.5	<b>no satisfecha</b>
4	46.48	0.11	1466.0	31.2	<b>no satisfecha</b>
5	46.48	0.10	1399.8	26.9	<b>no satisfecha</b>
6	46.48	0.09	1317.6	22.6	<b>no satisfecha</b>
6	21.85	0.15	1371.9	25.3	satisfecha
7	21.85	0.14	1314.6	22.4	satisfecha
8	21.85	0.13	1247.3	19.6	<b>no satisfecha</b>
9	21.85	0.07	1370.3	12.6	<b>no satisfecha</b>

**Tabla14-17** –Resistenciaa corte del panel 4.

Nivel	Corte factorado	Eje neutral	Resistencia característica de corte	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$x$ [m]	$f_{vk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$V_{Rd}$ [kN]	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$
0	95.43	0.34	1812.9	155.6	satisfecha
1	95.43	0.30	1906.8	143.7	satisfecha
2	95.43	0.29	1900.2	138.0	satisfecha
3	95.43	0.28	1893.1	132.2	satisfecha
3	72.51	0.26	1816.9	90.2	satisfecha
4	72.51	0.25	1805.5	85.9	satisfecha
5	72.51	0.24	1793.0	81.6	satisfecha
6	72.51	0.23	1779.3	77.3	satisfecha
6	45.1	0.19	1543.6	37.6	<b>no satisfecha</b>
7	45.1	0.18	1511.4	34.7	<b>no satisfecha</b>
8	45.1	0.17	1475.1	31.8	<b>no satisfecha</b>
9	45.1	0.12	1647.8	24.9	<b>no satisfecha</b>

### 14.5 DISEÑO DE FRP PARA CORTE

FRP (Sección 14.1) es usado a lo largo de la altura total de los paneles asumiendo una distancia entre franjas,  $p_f$ , igual a 50 cm. El análisis es desarrollado de acuerdo a la Sección 5.4.1.2.2. Los resultados se muestran en la Tabla 14-18 y Tabla 14-19 para el panel 1 y 2, respectivamente, en el cual el  $p_f$  escogido satisface los requerimientos.

**Tabla14-18**– Resistencia a corte del panel 1.

Nivel	Corte factorado	Contribución de la mampostería	Contribución de FRP	$V_{Rd,max}$ [kN]	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$	Falla
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$V_{Rd,m}$ [kN]	$V_{Rd,f}$ [kN]		$V_{Rd}$ [kN]		
0	76.58	57.7	124.02	1140	181.7	satisfecho	falla de FRP
1	76.58	45.8	124.02	1140	169.8	satisfecho	falla de FRP
2	76.58	40.0	124.02	1140	164.1	satisfecho	falla de FRP
3	76.58	34.3	124.02	1140	158.3	satisfecho	falla de FRP
3	46.48	35.5	124.02	855	159.5	satisfecho	falla de FRP
4	46.48	31.2	124.02	855	155.2	satisfecho	falla de FRP
5	46.48	26.9	124.02	855	150.9	satisfecho	falla de FRP
6	46.48	22.6	124.02	855	146.6	satisfecho	falla de FRP
6	21.85	25.3	124.02	570	149.3	satisfecho	falla de FRP
7	21.85	22.4	124.02	570	146.4	satisfecho	falla de FRP
8	21.85	19.6	124.02	570	143.6	satisfecho	falla de FRP
9	21.85	12.6	124.02	570	136.6	satisfecho	falla de FRP

**Tabla14-19** –Resistencia a corte del panel 2.

Nivel	Corte factorado	Contribución de la mampostería	Contribución de FRP	$V_{Rd,max}$ [kN]	Resistencia de corte	$V_{Rd} \geq V_{Sd}$	Falla
[m]	$V_{Sd}$ [kN]	$V_{Rd,m}$ [kN]	$V_{Rd,f}$ [kN]		$V_{Rd}$ [kN]		
0	95.43	155.61	124.02	1140.0	279.6	satisfecho	falla de FRP
1	95.43	143.70	124.02	1140.0	267.7	satisfecho	falla de FRP
2	95.43	137.96	124.02	1140.0	262.0	satisfecho	falla de FRP
3	95.43	132.22	124.02	1140.0	256.2	satisfecho	falla de FRP
3	72.51	90.17	124.02	855.0	214.2	satisfecho	falla de FRP
4	72.51	85.86	124.02	855.0	209.9	satisfecho	falla de FRP
5	72.51	81.56	124.02	855.0	205.6	satisfecho	falla de FRP
6	72.51	77.25	124.02	855.0	201.3	satisfecho	falla de FRP
6	45.1	37.57	124.02	570.0	161.6	satisfecho	falla de FRP
7	45.1	34.70	124.02	570.0	158.7	satisfecho	falla de FRP
8	45.1	31.83	124.02	570.0	155.9	satisfecho	falla de FRP
9	45.1	24.88	124.02	570.0	148.9	satisfecho	falla de FRP

La Figura 14-7 muestran los detalles de instalación FRP de los paneles 1 y 4 tanto para corte, combinado axial y momento flector.

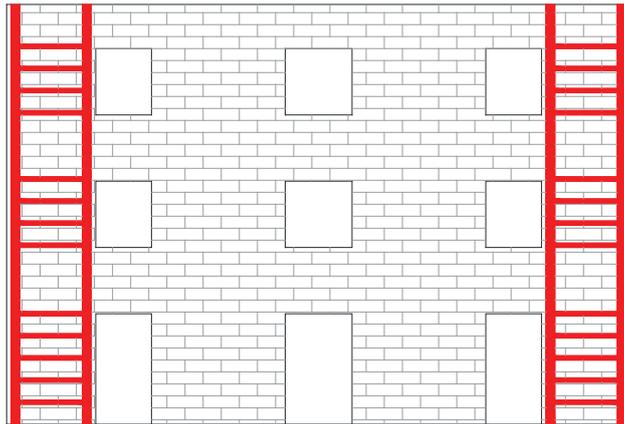


Figura14-7 –Gráfico de la instalación de FRP.

### 14.6 DISEÑO POR VOLCAMIENTO SIMPLE

Siguiendo la asunción reportada en la Sección 5.4.1.1, Figura 14-8 muestra el sistema de fuerzas para considerar al diseñar los paneles de mampostería para simple volcamiento. FRP con características mostradas en la Sección 14.1 es usado para envolver todo el perímetro del edificio en cada piso (Figura 14-9). El refuerzo FRP en el tercer piso comprende 2 capas con un espesor igual a 0.33 mm. El ancho de FRP es igual a 350 mm en el tercero y segundo piso, y 200 mm en el primer piso.

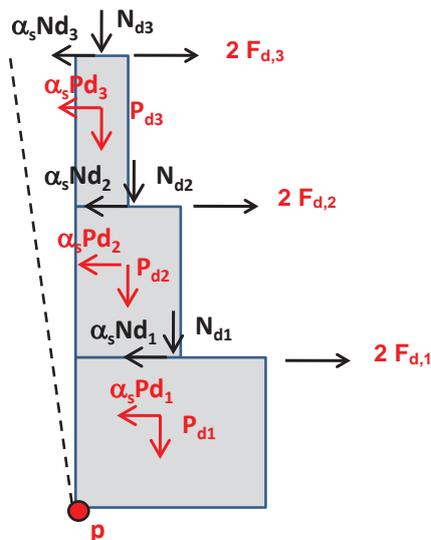
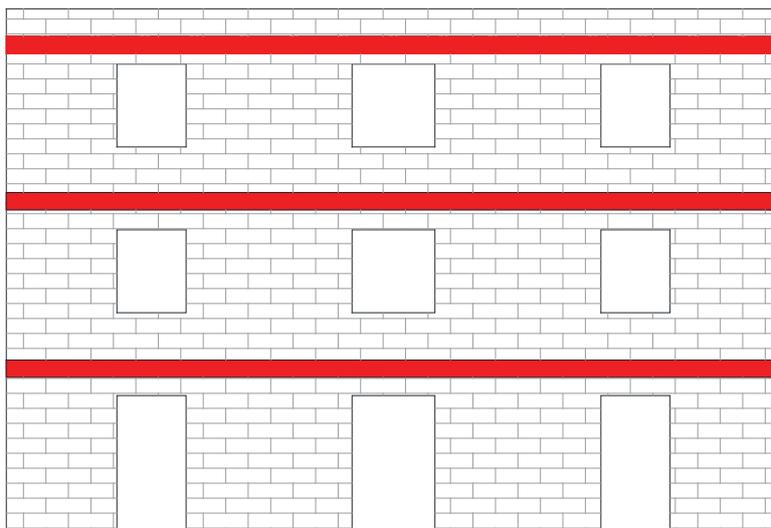


Figura14-8 –Esquema de simple volcamiento.



**Figura14-9** –Instalación de FRP para simple volcamiento.

Asumiendo que los símbolos reportados en la Figura 14-8 son iguales como sigue:

- $P_{d1}=288$  kN,  $P_{d2}=243$  kN,  $P_{d3}=162$  kN.
- $N_{d1}=155$  kN,  $N_{d2}=155$  kN,  $N_{d3}=155$  kN.
- $\alpha_s= 1.5$ .

Lo siguiente puede ser computado:

- $2 \cdot F_{d,1}=188$  kN,
- $2 \cdot F_{d,2}=377$  kN,
- $2 \cdot F_{d,3}=566$  kN,

donde  $F_{d,k}$  representa la fuerza resistida por el sistema FRP al nivel  $k$  (con  $k=1, 2, 3$ ), y:

$$F_{d,1} \leq (230000 \cdot 200 \cdot 0.165 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 115 \text{ kN.}$$

$$F_{d,2} \leq (230000 \cdot 350 \cdot 0.165 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 201 \text{ kN.}$$

$$F_{d,3} \leq (230000 \cdot 350 \cdot 0.330 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0151) \text{ kN} = 401 \text{ kN.}$$

Las últimas 3 ecuaciones satisfacen el requerimiento por simple volcamiento.

Estedocumento técnico ha sido elaborado por un Grupo de Trabajo, cuyos miembros son:

AIELLO Prof. Maria Antonietta	- Università di Lecce
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II” di Napoli
BASTIANINI Ing. Filippo	- Università di Bologna
BATTISTA dott. Umberto	- SACEN S.r.l. Restauri – Napoli
BENEDETTI Prof. Andrea	- Università di Bologna
BERARDI Ing. Valentino Paolo	- Università di Salerno
BILOTTA Ing. Antonio	- Università “Federico II” di Napoli
BORRI Prof. Antonio	- Università di Perugia
BRICCOLI BATTI Prof. Silvia	- Università di Firenze
CASADEI Ing. Paolo	- Kerakoll S.p.a. - Sassuolo (MO)
CERONI Ing. Francesca	- Università del Sannio - Benevento
CERSOSIMO Ing. Giuseppe	- Interbau S.r.l. - Milano
COSENZA Prof. Edoardo	- Università “Federico II” di Napoli
CREDALI Prof. Lino	- Ardea S.r.l. - Casalecchio (BO)
DE LORENZIS Prof. Laura	- Università di Lecce
FAELLA Prof. Ciro	- Università di Salerno
FAVA Ing. Giulia	- Politecnico di Milano
FEO Prof. Luciano	- Università di Salerno
FERRACUTI Ing. Barbara	- Università di Bologna
FORABOSCHI Prof. Paolo	- IUAV – Venezia, Italy
FRASSINE Prof. Roberto	- Politecnico di Milano
GIACOMIN Ing. Giorgio	- G&P Intech S.r.l. - Altavilla Vicentina (VI)
IMBIMBO Prof. Maura	- Università di Cassino
LA TEGOLA Prof. Antonio	- Università di Lecce
LAGOMARSINO Prof. Sergio	- Università di Genova
LUCIANO Prof. Raimondo	- Università di Cassino
MACERI Prof. Franco	- Università “Tor Vergata” di Roma
MAGENES Prof. Guido	- Università di Pavia
MANFREDI Prof. Gaetano	- Università “Federico II” di Napoli
MANTEGAZZA Dott. Giovanni	- Ruredil S.p.a. – Milano
MARRA Ing. Gianfranco	- Università di Salerno
MARTINELLI Ing. Enzo	- Università di Salerno
MODENA Prof. Claudio	- Università di Padova
MONTALBANO Ing. Antonino	- Sika Italia S.p.a. – Milano, Italia
MONTI Prof. Giorgio	- Università “La Sapienza” di Roma
MORANDINI Ing. Giulio	- Mapei S.p.a. – Milano
NANNI Prof. Antonio	- Università “Federico II” di Napoli
NIGRO Prof. Emidio	- Università “Federico II” di Napoli
OLIVITO Prof. Renato Sante	- Università della Calabria - Cosenza
PARRETTI Ing. Renato	- Fibrwrap Italia S.r.l. - Sesto Fiorentino (FI)
PASCALE Prof. Giovanni	- Università di Bologna
PECCE Prof. Maria Rosaria	- Università del Sannio - Benevento
PISANI Prof. Marco Andrea	- Politecnico di Milano
POGGI Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
PROTA Prof. Andrea	- Università “Federico II” di Napoli
REALFONZO Prof. Roberto	- Università di Salerno
ROSATI Prof. Luciano	- Università “Federico II” di Napoli
SACCO Prof. Elio	- Università di Cassino

SAVOIA Prof. Marco - Università di Bologna  
SPACONE Prof. Enrico - Università di Chieti  
ZAMPA Ing. Andrea - Fibre Net S.r.l. – Udine

Coordinadores:

- El capítulo sobre "Materiales": FRASSINE Prof. Roberto, POGGI Prof. Carlo;
- El capítulo sobre "Fundamentos del diseño de reforzamiento y aspectos especiales": MONTI Prof. Giorgio, NANNI Prof. Antonio;
- El capítulo sobre "Estructuras de concreto reforzado y pretensado": ASCIONE Prof. Luigi, MANFREDI Prof. Gaetano, MONTI Prof. Giorgio;
- El capítulo sobre "estructuras de mampostería": BENEDETTI Prof. Andrea, SACCO Prof. Elio;
- El capítulo sobre "Control y seguimiento de la intervención": OLIVITO Prof. Renato Sante, PASCALE Prof. Giovanni, PROTA Prof. Andrea.

Coordinador General:

ASCIONE Prof. Luigi

Official Técnico:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Este documento técnico ha sido aprobado por el *Comité Asesor de Recomendaciones Técnicas para la Construcción* do Consejo Nacional Italiano de Investigación, cuyos miembros son:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università "Federico II" di Napoli
COSENZA Prof. Edoardo	- Università "Federico II" di Napoli
JAPPELLI prof. Ruggiero	- Università "Tor Vergata" di Roma
MACERI Prof. Franco (Presidente)	- Università "Tor Vergata" di Roma
MANCINI Prof. Giuseppe	- Politecnico di Torino
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università "Federico II" di Napoli
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università "La Sapienza" di Roma
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
VINCI Arch. Roberto	- CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia)
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento