

Refuerzo Estructural con Sistemas CFRP



Milan Cerić

Ingeniero Civil - Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Gerente Unidad de Negocios Contractors

Sika Argentina S.A.I.C. - Sika S.A. Chile

Introducción

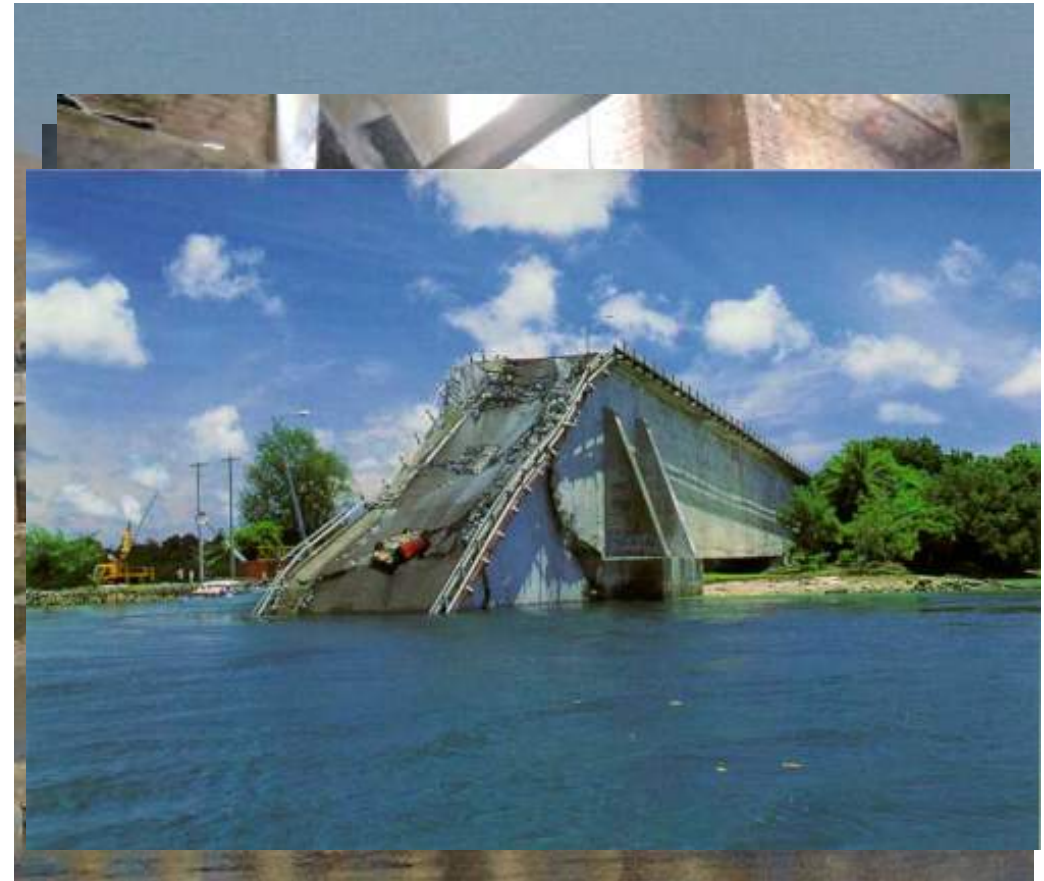
- Experiencia relevante en últimos terremotos para sistemas estructurales tradicionales y no tradicionales (L'Aquila - Italia, 2009, Concepción - Chile 2010, Christchurch – Nueva Zelanda 2010, Sendai - Japón 2011).
- Necesidad de mayor conocimiento y generación de normativa específica para sistemas de recuperación estructural.
- Proceso de recuperación estructural debe ser considerado en forma sistémica, considerando guías de diseño establecidas, altos estándares para construcción y tecnologías complementarias.
- Sistemas de Refuerzo Estructural FRP poseen más de 15 años de experiencia en Latinoamérica. Existiendo gran avance en los últimos 5 años.

A tener en cuenta:



Principales Motivos para Reparación y Refuerzo

- **Incremento de Cargas**
- **Recuperación de Miembros Dañados o Débiles**
- **Modificación del Sistema Estructural**
- **Incremento de la Capacidad de la Estructura**
- **Errores en Diseño y/o Construcción**



Principales Motivos para Reparación y Refuerzo



Exposición a Solicitaciones no Previstas en Diseño Original:

- Incendios
- Exposición Química Severa (Ácido Sulfúrico u otros)
- Impactos

Recuperación Estructural: Situación Latinoamericana

- En general, para América Latina se tiene normas asociadas a diseño original, con referencias escuetas para reparación, refuerzo y protección estructural.
- Desarrollo de guías de reparación, refuerzo y protección estructural cada vez más intensivo en EE.UU, Europa y Asia. (ACI 440, Fib 14, Fib 35, EN 1504, etc.)
- Necesidad de Investigación y Desarrollo Integral en tecnologías especializadas de reparación, refuerzo y protección estructural.
- **Desafío:** Diferenciación clara entre sistema y productos, para cumplir con alcances buscados en el diseño.

Alcances Relevantes en Procesos de Recuperación Estructural

- Diagnóstico de la estructura a recuperar es fundamental para el proceso.
- La reparación y/o refuerzo deben ser realizadas en forma óptima, con los materiales, normas, diseños, procedimientos y tecnologías de aplicación adecuadas.
- Ingeniería, Construcción, Contratistas, ITO's y Proveedores deben estar completamente involucrados para realizar proyectos de reparación y refuerzo estructural.
- Se deben considerar aspectos complementarios para el servicio de la estructura recuperada (protección contra fuego, medio ambiente, impacto, etc.).

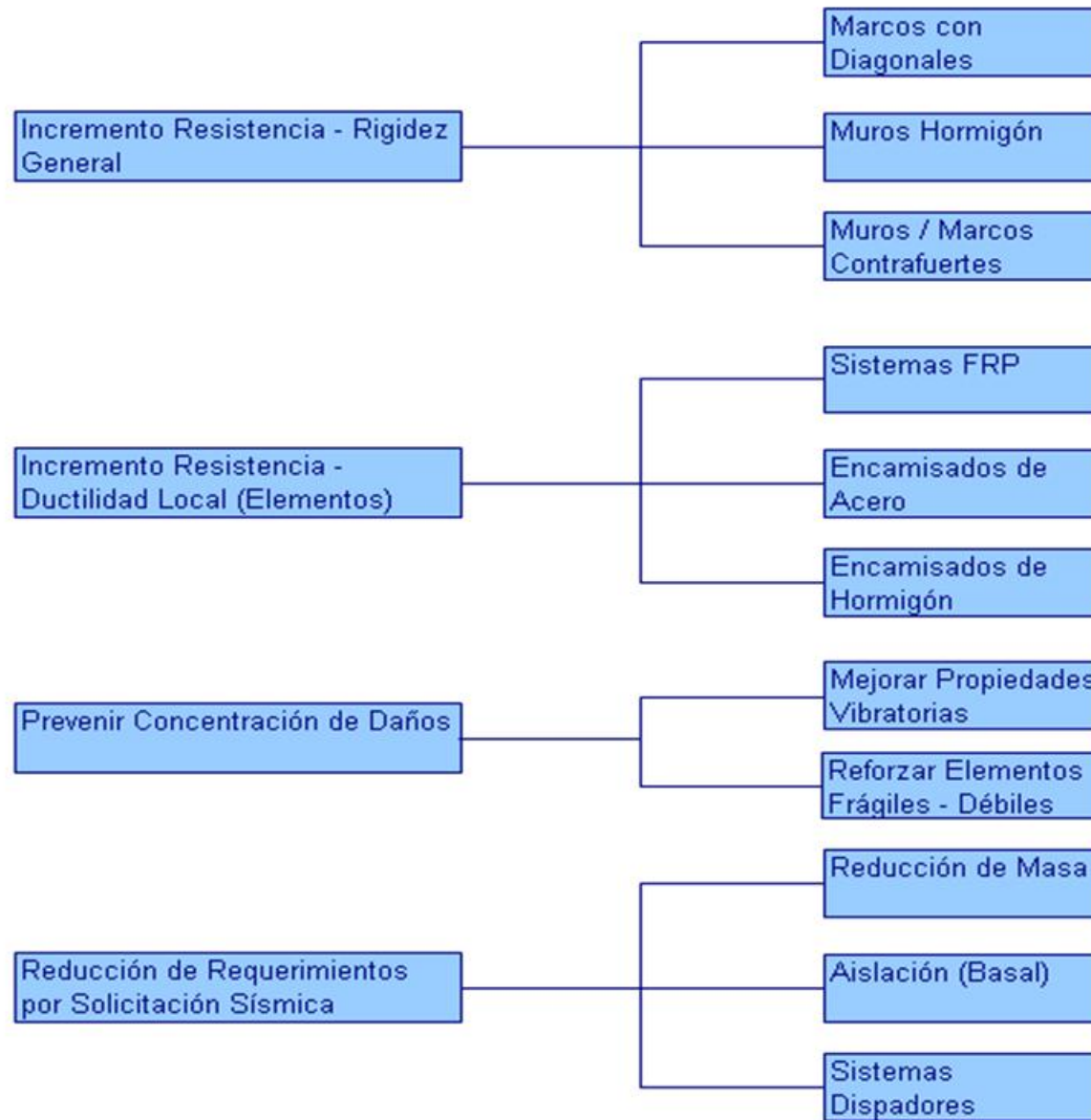
Recuperación Estructural

- **Reparación:** Restituir propiedades fundamentales de una estructura dañada (i.e. resistencia, rigidez, masa).
- **Refuerzo:** Modificar características de una estructura dañada o sin daño de modo de alcanzar un nivel de seguridad predeterminado mayor que el original.

Recuperación Estructural - Proceso



Recuperación Estructural – Selección de Sistema



Diagnóstico - Evaluación para Recuperación Estructural:
Información para estudio y análisis del desempeño
estructural del sistema en su estado actual.

**Propiedades
Mecánicas del
Hormigón**



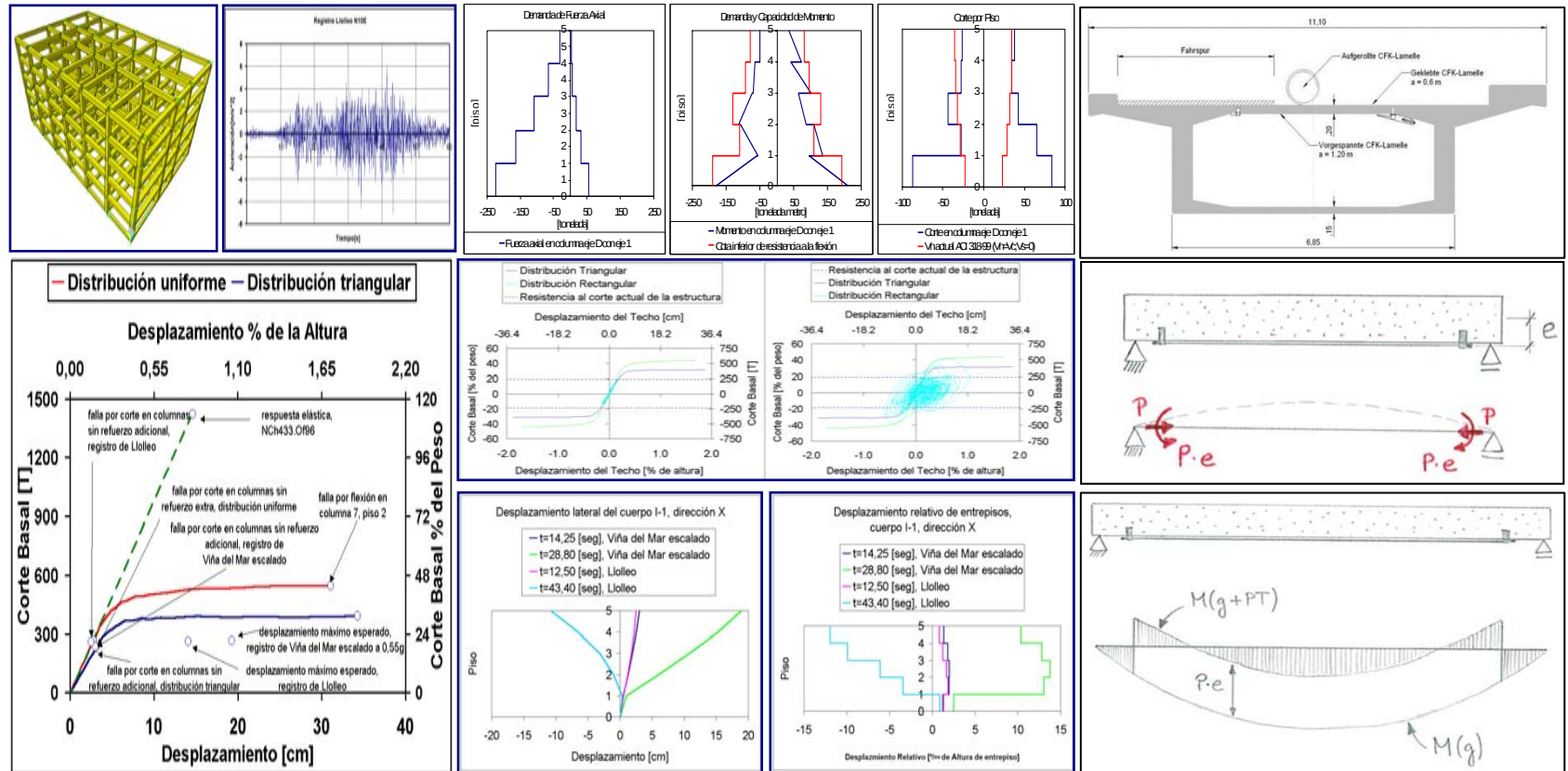
**Geometría y
Cuantía del Acero
de Refuerzo**



**Propiedades
Mecánicas del
Acero de Refuerzo**



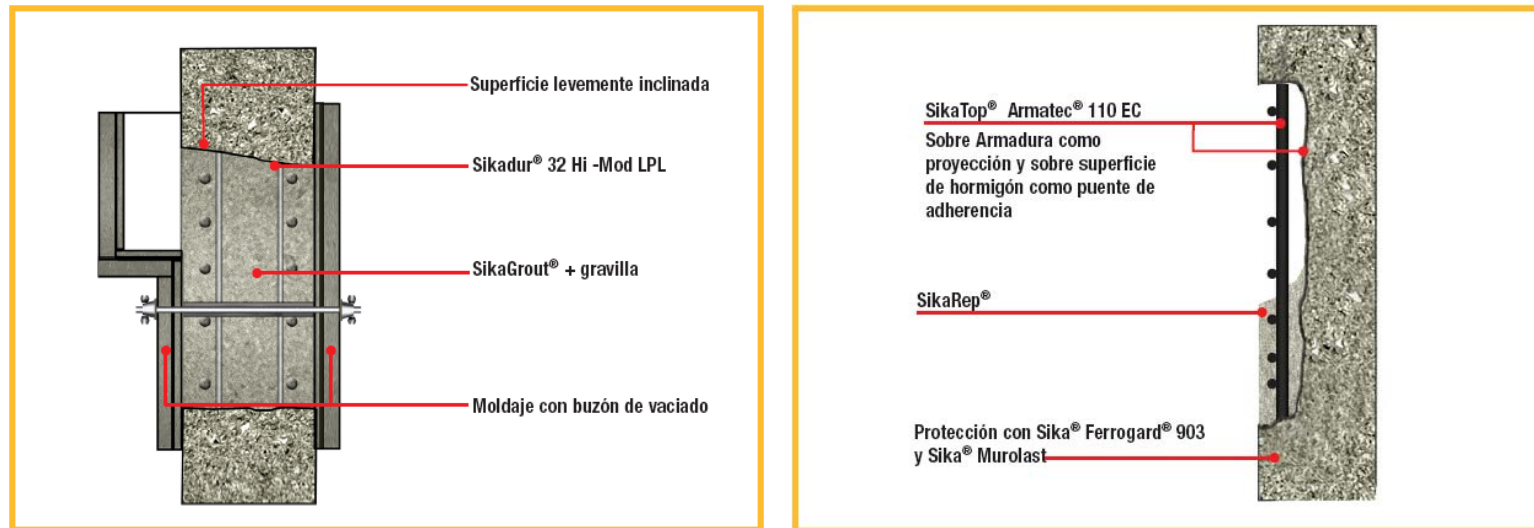
Diagnóstico - Evaluación para Recuperación Estructural: Análisis Estructural Situación Actual.



Reparación Estructural

- Correcta selección de materiales en base a resistencia, compatibilidad y aplicabilidad es fundamental.
- Tecnologías de aplicación asociadas a evitar errores por intrusión humana.
- Selección de especialistas con importante experiencia en el área.
- Selección de sistemas más que materiales aislados!!!

Reparación Estructural – Restituir Volúmenes

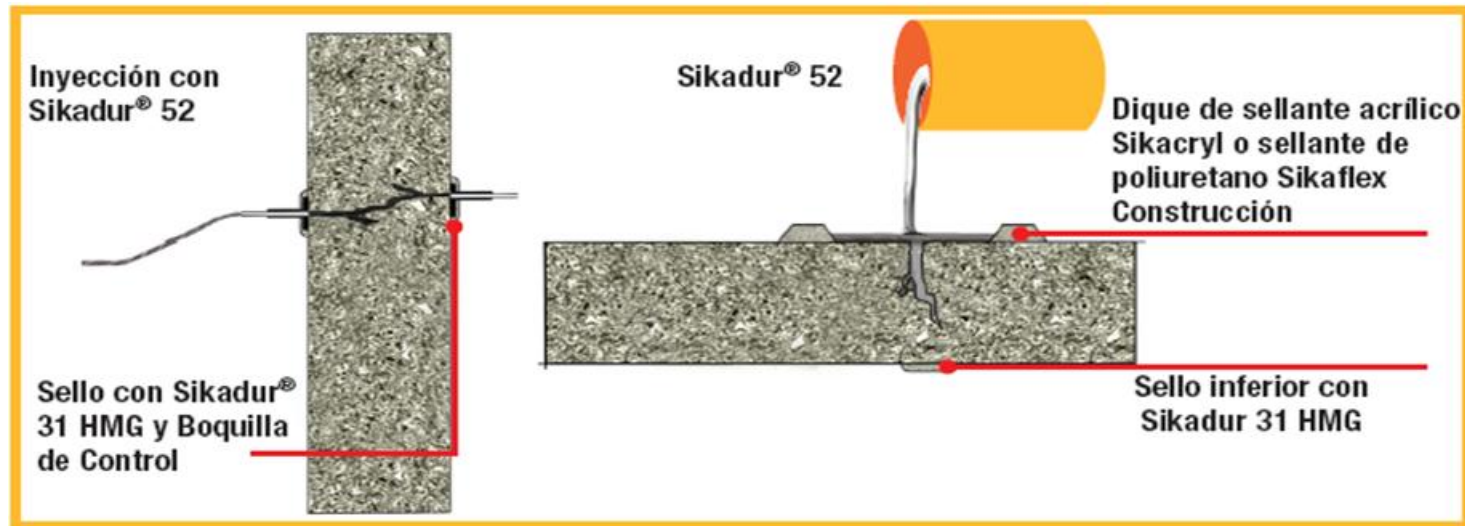


- Morteros Compatibles y de Trabajabilidad Adecuada.
- Puentes de Adherencia de Estándares Superiores a los de Juntas de Construcción (ASTM C881, Tipo II vs Tipo V).
- Anclajes químicos e inhibidores de corrosión en algunos casos particulares.

Reparación Estructural – Restituir Volúmenes



Reparación Estructural – Inyectar fisuras



- Resinas de Inyección de viscosidad adecuada para penetrar (espesores desde 0,05 mm a 5 mm).
- En caso de mayores espesores se puede considerar puentes de adherencia (5 mm a 25 mm) o lechadas cementecias.
- El tratamiento (limpieza) de la fisura y sello es fundamental, así como el procedimiento de aplicación.

Reparación Estructural – Inyectar fisuras



Refuerzo Estructural

Sistema reparado con propiedades restituidas para ser reforzado. i.e. casi siempre proyecto de refuerzo considera etapa de reparación **“Solución debe ser Integral”**



Alcances Relevantes en Procesos de Recuperación Estructural

- Diagnóstico de la estructura a recuperar es fundamental para el proceso.
- La reparación y/o refuerzo deben ser realizadas en forma óptima, con los materiales, normas, diseños, procedimientos y tecnologías de aplicación adecuadas.
- Ingeniería, Construcción, Contratistas, ITO's y Proveedores deben estar completamente involucrados para realizar proyectos de reparación y refuerzo estructural.
- Se deben considerar aspectos complementarios para el servicio de la estructura recuperada (protección contra fuego, medio ambiente, impacto, etc.).

Refuerzo Estructural – Ventajas Sistemas FRP

Diseño y Aplicación

- Considerablemente más resistente y liviano que el acero
- Disponible con distintos módulos de elasticidad, en grandes longitudes y en distintos tipos de sección
- Disponibilidad de guías de diseño y programas especializados para diseño y especificación

Funcionalidad y Costos

- Fácil instalación y rápida puesta en servicio
- Solución poco invasiva (bajos espesores manteniendo servicio)
- Bajos Costos del Sistema comparado con Soluciones Convencionales

Durabilidad

- Mejor comportamiento expuesto a intemperie que el acero

Refuerzo Estructural – Tecnologías FRP

Pletinas Convencionales + Adhesivos (Incluye Pletinas NSM)

Módulo de Elasticidad	160.000 a 300.000 [N/mm ²] (3 tipos)
Resistencia	1.300 a 2.800 [N/mm ²] (5 tipos)
Ancho	15 a 150 [mm]
Espesor	1,2 / 1,4 / 2,5 [mm]



Pletinas para Detalles + Adhesivos

Módulo de Elasticidad	120.000 [N/mm ²]
Resistencia	2.250 [N/mm ²]
Ancho	40 [mm]
Espesor	1,4 [mm]
Longitud (B/H)	200/500, 300/700, 500/1000 [mm]



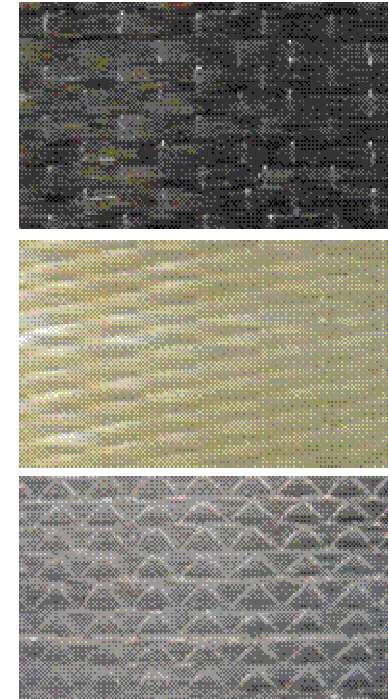
Sistemas preesforzados (Énfasis en Anclaje)



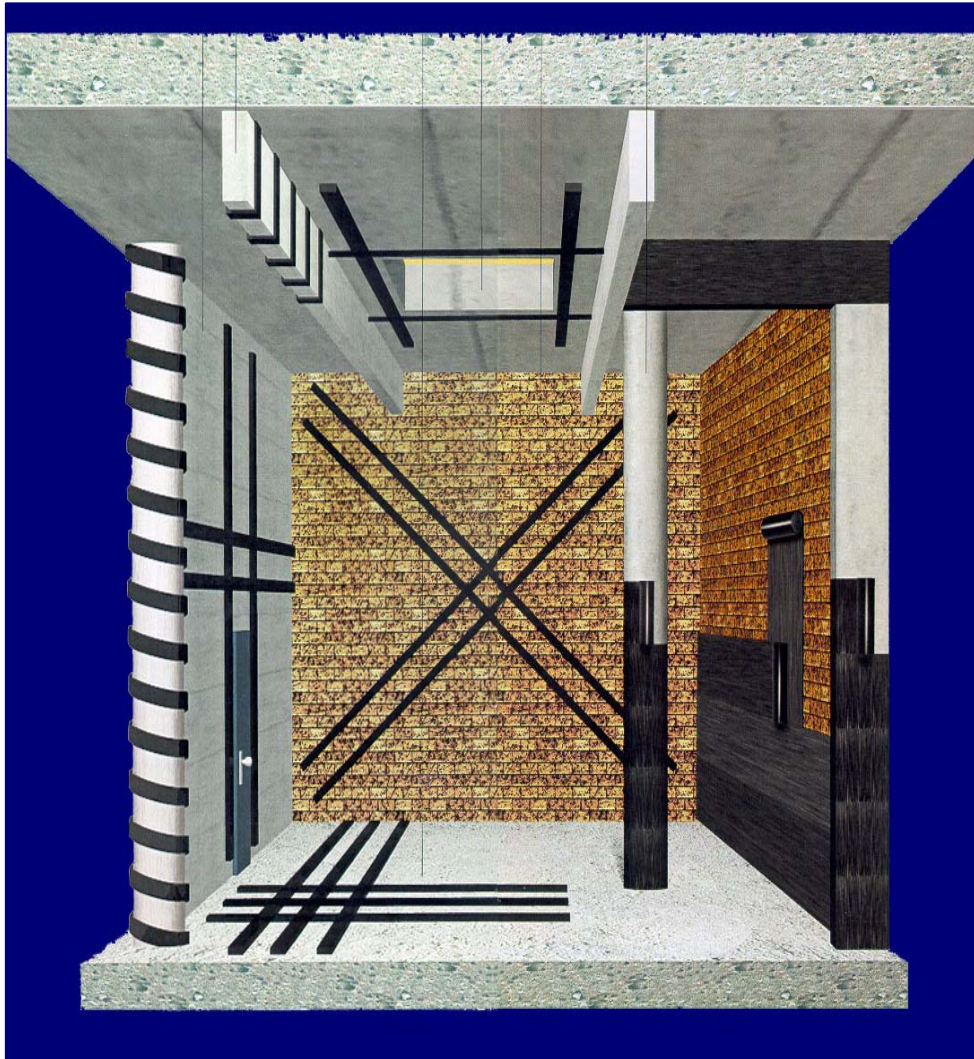
Refuerzo Estructural – Tecnologías FRP

Tejidos de Fibra de Carbono, Vidrio y Aramida + Adhesivos para impregnación, saturación y revestimientos de protección.

Módulo de Elasticidad (según tipo de fibra)	76.000 a 640.000 [N/mm ²]
Resistencia (según tipo de fibra)	2.300 a 4.900 [N/mm ²]
Longitud / Ancho (por rollo de tejido)	50 [m] / 300 o 600 [mm]
Peso por unidad de área	150 a 950 [g/m ²]
Espesor (según peso por unidad de área)	0,08 a 0,36 [mm]

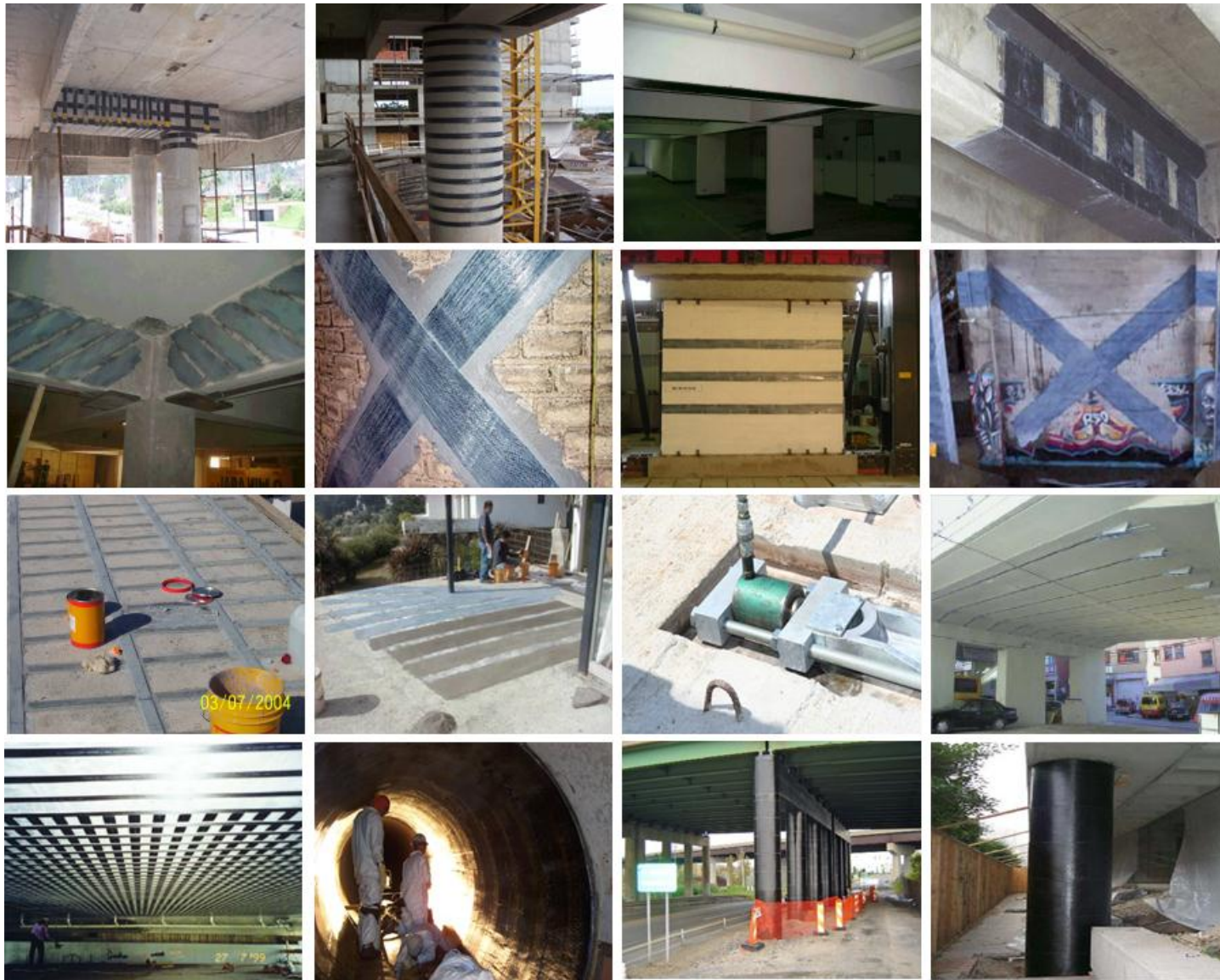


Refuerzo Estructural – Aplicaciones FRP

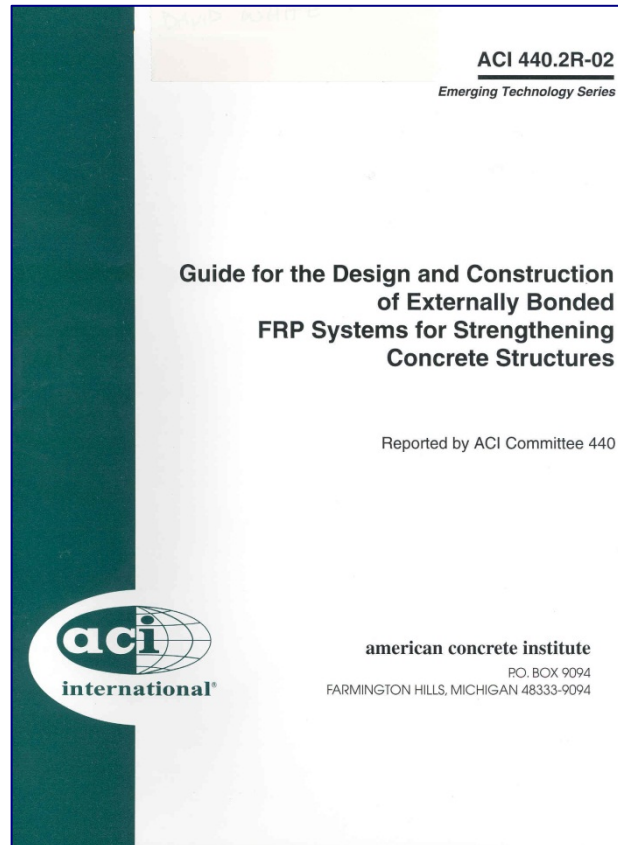


- Confinamiento y refuerzo a flexión, corte y torsión de vigas y columnas de hormigón armado.
- Refuerzo a flexión de vigas de acero
- Refuerzo al corte de muros de albañilería y hormigón armado
- Refuerzo a flexión de losas.
- Pletinas pueden ser aplicadas pre-esforzadas, para mayores requerimientos de refuerzo y control de deformaciones.

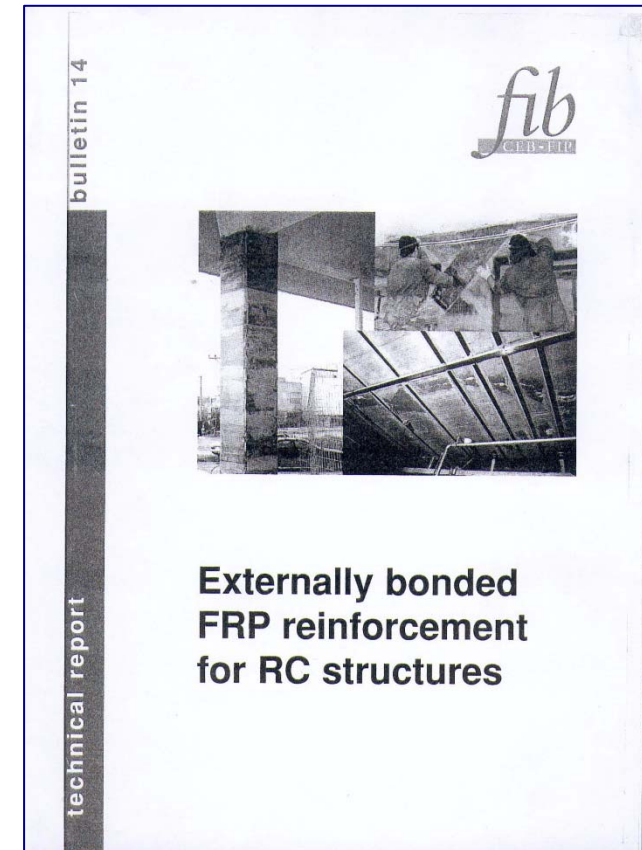
Refuerzo Estructural – Aplicaciones FRP



Refuerzo Estructural – Diseño Hormigón Armado



ACI 440.2R-2008



Fib-Bulletin 14-2001

Refuerzo Estructural – Materiales

440.2R-12

ACI COMMITTEE REPORT

Cap 4. ACI 440 2R - 08:

Los materiales descritos en este capítulo (para Sistemas de Refuerzo FRP) son genéricos y no aplican a todos los productos disponibles comercialmente.

Normas para métodos de ensaye están siendo desarrolladas por diversas organizaciones como ASTM, ACI and CSA para caracterizar ciertos productos FRP.

PART 2—MATERIALS

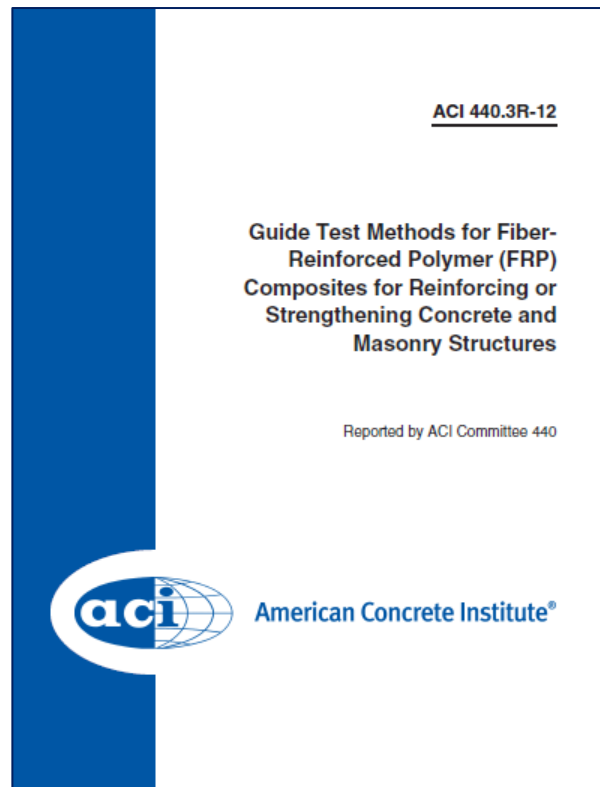
CHAPTER 4—CONSTITUENT MATERIALS AND PROPERTIES

The physical and mechanical properties of FRP materials presented in this chapter explain the behavior and properties affecting their use in concrete structures. The effects of factors such as loading history and duration, temperature, and moisture on the properties of FRP are discussed.

FRP strengthening systems come in a variety of forms (wet layup, prepreg, and precured). Factors such as fiber volume, type of fiber, type of resin, fiber orientation, dimensional effects, and quality control during manufacturing all play a role in establishing the characteristics of an FRP material. The material characteristics described in this chapter are generic and do not apply to all commercially available products. Standard test methods are being developed by several organizations, including ASTM, ACI, and CSA, to characterize certain FRP products. In the interim, however, the licensed design professional is encouraged to consult with the FRP system manufacturer to obtain the relevant characteristics for a specific product and the applicability of those characteristics.

FRP para Refuerzo de Estructuras de Hormigón Armado y Albañilería – Métodos de Ensaye de sistemas FRP

440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures



ACI 440.3R-2012

Refuerzo Estructural – Diseño ACI 440 2R

440.27-52

ACI COMMITTEE REPORT

15.5—Flexural strengthening of an interior prestressed concrete beam with FRP laminates
A number of continuous reinforced concrete beams with four 1/2 in. (12.7 mm) diameter bonded steel

A number of continuous prestressed concrete beams with five 1/2-in. (12.7 mm) diameter bonded strands (Fig. 15-3) are located in a parking garage that is being converted to an office space. All prestressing strands are Grade 270 with (3860 N/mm²) low relaxation seven-wire strands. The beams are required to increase in their live-load-carrying capacity from 50 kN/m (424 lb/ft) to 75 kN/m (566 lb/ft). The beams are also required to support an additional dead load of 15 kN/m. Analysis indicates that each existing beam must be strengthened with 10 additional strands. The design of the beams is based on the assumption that the beams will behave as a single span and is shown at the right. The beams must be designed to meet the following design requirements:

- 1. The beams must be designed to resist the dead load and the live load.
- 2. The beams must be designed to resist the dead load and the live load.
- 3. The beams must be designed to resist the dead load and the live load.

The cast-in-place beams support a 4.1 m (13 ft) span. Reinforcing in midspan, beams should be controlled at Section 1. Summarized in Table 15-5 are the existing and new loads and associated midspan moments for the beams. FRP system properties are shown in Table 15-6, shown again on this page for convenience.

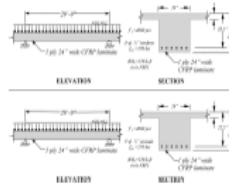


Fig. 15.3—Schematic of the idealized continuous prestressed beam with FRP external reinforcement

Table 15.6—Loadings and corresponding moments

Load/condition	Biting loads		Anchorage loads	
Disturbance w_{dist}	2.77 kN	404 N/mm	3.09 kN	451 N/mm
Live loads w_{LL}	1.60 kN	253.5 N/mm	2.4 kN	35 N/mm
Combined loads $(w_{dist} + w_{LL})$	4.37 kN	658 N/mm	5.49 kN	802 N/mm
Thermal-shrinkage load $(1.2w_{LL} + 0.5w_{dist})$	N/A	N/A	5.5 kN	750 N/mm
Thermal-shrinkage $(1.2w_{LL} + 0.5w_{dist})$	N/A	859 N/mm	7.5 kN	1100 N/mm
Dead loads w_{DL}	147.3 kN	2184 N/mm	162 kN	2362 N/mm
Service loads w_{SL}	147.3 kN	2184 N/mm	126 kN	1711 N/mm
Service-load moment M_{SL}	222 kN	714 kN/m	281 kN	361.7 kN/m
Thermal-shrinkage load $(1.2w_{LL} + 0.5w_{dist})$	N/A	N/A	271 kN	371 N/mm
Factored moment M_{fact}	312 kN	423 kN/m	397 kN	557 kN/m

By inspection, the level of strengthening is reasonable in that it does meet the strengthening limit criteria put forth in Eq. (10-1). That is, the existing flexural strength without FRP, $\phi M_n(\text{existing}) = 336 \text{ k-ft (455 kN-m)}$, is greater than the unstrengthened moment limit, $(1.1M_{cr} + 0.75M_{cr, \text{new}}) = 273 \text{ k-ft (370 kN-m)}$. The design calculations used to verify this configuration follow. The beam is to be strengthened using the FRP system described in Table 15.4. A one-ply, 24 in. (610 mm) wide strip of FRP is considered for this evaluation.

Table 15.4—Manufacturer's reported FRP system properties

Thickness per ply t_f	0.040 (in.)	1.02 (mm)
Ultimate tensile strength f_{tu}^a	90 ksi	621 N/mm ²
Elongation at break ϵ_{tu}^a	0.015 (in./in.)	0.015 (mm/mm)
Modulus of elasticity of FRP laminate E_f	5360 ksi	37,000 N/mm ²

Length of the beam l	30 ft	9.14 m
Web width b_w	30 ft	9.14 m
Depth of beam h	24 in.	610 mm
d_p	22.5 in.	571 mm
A_s	23 in.	635 mm
Effective flange width b_f	67 in.	1710 mm
Flange thickness t_f	4 in.	102 mm
f_c'	4000 psi	27.6 N/mm ²
Starch diameter	1/2 in.	12.7 mm
f_m	160 ksi	1130 N/mm ²
f_{m1}	230 ksi	1586 N/mm ²
f_{m2}	290 ksi	1997 N/mm ²
f_{m3}	28,900 ksi	1.96×10^6 N/mm ²
ϕM_n , when FRP	26.56 k-ft	435 kN-m

DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNALLY BONDED FRP SYSTEMS

Procedure	Calculation and intermediate	Calculation in 32 numeric units
Step 1—Calculate the PEP-system design angular separation. The fraction located in maximum space and a-CTEP are calculated by the model. Therefore, per Table 1, 1) an environmental reduction factor of 0.05 is suggested.	$f_{\text{in}} = 0.05 \times 0.001 \text{ km} = 0.05 \text{ km}$ $r_{\text{in}} = 0.05 \times 0.011 \text{ km/s} = 0.00142 \text{ km/s}$	$f_{\text{in}} = (0.05 \times 621.37) \text{ km} = 31.0685 \text{ km}$ $r_{\text{in}} = (0.05 \times 0.011) \text{ km/s} = 0.00142 \text{ km/s}$
Step 2—Estimate the calculations: Proportion of the orbital	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{out}}}$ $\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{0.00142}{0.003} = 0.03$ $R_1 = 37,803,24000 \text{ km} = 3,805,000 \text{ km}$	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{out}}} = 0.03$ $R_1 = 4300 \cdot (27.6 \text{ Nmi})^2 = 24,703,000 \text{ km}^2$
Proportion of the existing preexisting orbit	$A_{\text{in}} = 50.143 \text{ km}^2 = 0.765 \text{ km}^2$	$A_{\text{in}} = 5699 \text{ (km)}^2 = 435 \text{ km}^2$
Area of PEP reduction:	$A_{\text{in}} = \pi R_{\text{in}}^2$	$A_{\text{in}} = 1 \text{ pi} (1 \text{ km})^2 = 3.14159 \text{ km}^2 = 4.0 \text{ km}^2$
Cross-sectional area:	$A_{\text{in}} = 1 \text{ pi} (0.0401 \text{ km})^2 = 0.005 \text{ km}^2$	$A_{\text{in}} = 1 \text{ pi} (1 \text{ km})^2 = 3.14159 \text{ km}^2 = 4.0 \text{ km}^2$
Distance between ship-like to the action control:	$A_{\text{in}} = 107 \text{ km} (44 \text{ in}) + 24 \text{ km} (9 \text{ in}) = 132 \text{ km}$	$A_{\text{in}} = 2230 \text{ nmi} (892 \text{ nmi}) + 660 \text{ nmi} (260 \text{ nmi} - 312 \text{ nmi}) = 5.5 \times 10^3 \text{ nmi}^2$
$\bar{N} = \frac{R_1^2}{2} - R_1^2 - R_1^2 \left(\frac{R_1 - R_0}{2} \right)$	$\bar{N} = \frac{0^2}{2} - 34^2 - 34^2 \left(\frac{0 - 14.5}{2} \right) = 0.39 \text{ km}$	$\bar{N} = \frac{2230^2}{2} - 1020^2 - 1020^2 \left(\frac{2230 - 573}{2} \right) = 2.5 \times 10^7$
Geometric area of (area):	$A_1 = \frac{37,803,240}{12} - 37,803,240 \left(\frac{0 - 14.5}{2} \right) + 24,703,000 \left(\frac{0 - 14.5}{2} \right) = 51,194 \text{ km}^2$	$A_1 = \frac{2230 \text{ nmi} \cdot 1020 \text{ nmi}}{12} - 2230 \text{ nmi} \cdot 1020 \text{ nmi} \left(\frac{2230 - 573}{2} \right) + \frac{62 \text{ nmi} \cdot 62 \text{ nmi}}{12} - 62 \text{ nmi} \cdot 573 \text{ nmi} \left(\frac{2230 - 573}{2} \right) = 2.11 \times 10^7$
Radius of gravity:	$r = \frac{A_1}{4\pi R_1} = \frac{51,194}{4\pi} = 7.715 \text{ km}$	$r = \frac{2.11 \times 10^7 \text{ nmi}^2}{4\pi \cdot 187 \text{ nmi}} = 187 \text{ nmi}$
Effective preexisting status:	$\alpha_{\text{in}} = \frac{20}{20,500} = 0.00099$	$\alpha_{\text{in}} = \frac{1100}{1,06 \times 10^7} = 0.00019$
Effective preexisting force:	$F_{\text{in}} = A_{\text{in}} \alpha_{\text{in}} = 0.765 \times 165 = 126.24 \text{ kg}$	$F_{\text{in}} = 435 \times 1134 = 561,310 \text{ N}$
Extensibility of preexisting force:	$e = e_0 - \gamma_1$ $e = 22.5 - 9.39 = 13.11 \text{ km}$	$e = 771 - 231 = 539 \text{ km}$
Step 3—Examine the existing status of orbits on the orbit. The existing status is to be calculated, assuming the forces is calculated and the body, located on the orbit, has the force of the PEP calculation is calculated. Distance from center bodies that to the action control:	$\gamma_1 = 22.5 - 9.39 = 13.11 \text{ km}$	$\gamma_1 = 655 - 231 = 397 \text{ km}$
Initial status in the force orbit:	$\alpha_{\text{in}} = \frac{-126.2}{3665 \times 132} \left(\frac{1}{1} + \frac{17.15}{7.59} + \frac{147}{12 \times 15.6} \right) = 3065 \times 14,300$	$\alpha_{\text{in}} = \frac{-561,310}{24,700 \times 15.1 \times 10^3} \left(\frac{1}{1} + \frac{330 \times 20}{147} + \frac{132 \times 10^3}{24,700 \times 211} \right) = 4.5 \times 10^6$

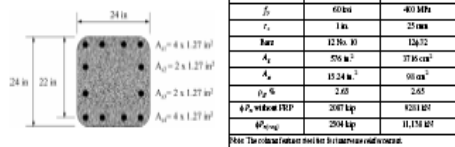
440.275-00

ACI COMMITTEE REPORT

15.8—Strengthening of a noncircular concrete column for axial load increase

A 24 x 24 in. (610 x 610 mm) square column requires an additional 20% of axial load-carrying capacity. Concrete and steel reinforcement material properties as well as details of the cross section of the column are shown in Table 15.10. The column is located in an interior environment, and a CFRP material will be used. A method of strengthening the column is sought.

Table 15.10—Column cross section details and material properties



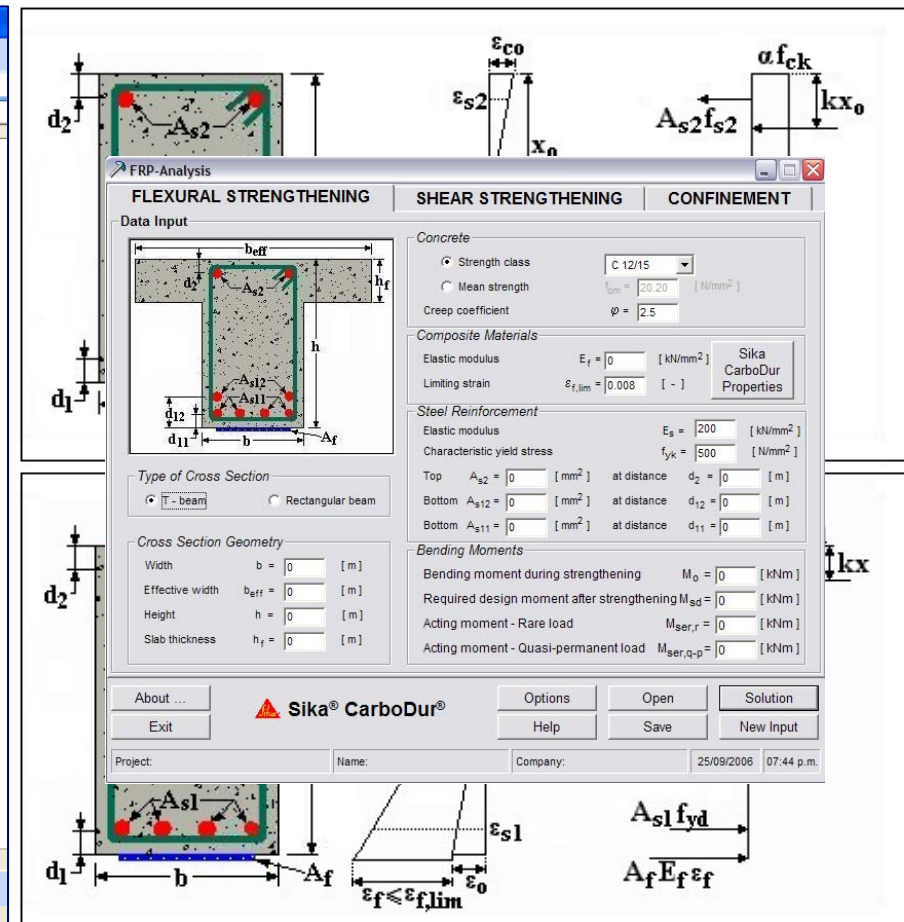
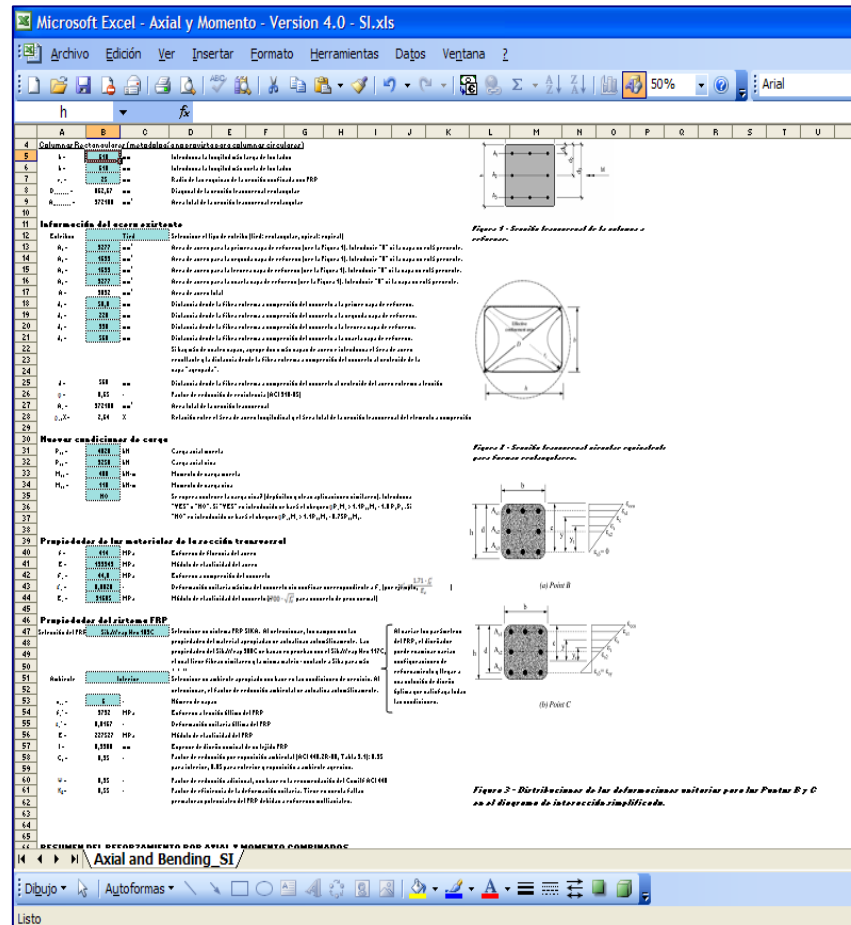
A carbon-based FRP complete wrap is selected to retrofit the column. The properties of the FRP system, as reported by the manufacturer, are shown in Table 15.11. The design calculations to arrive at the number of required complete wraps follow.

Table 15.11—Manufacturer's reported FRP system properties

Thickness per ply t_p	0.013 in.	0.35 mm
Ultimate tensile strength f_{tB}^*	550 ksi	3792 MPa
Exposure strain ϵ_B^*	0.0067 in./in.	0.0067 mm/mm
Modulus of elasticity E_f	33,000 ksi	227,527 MPa

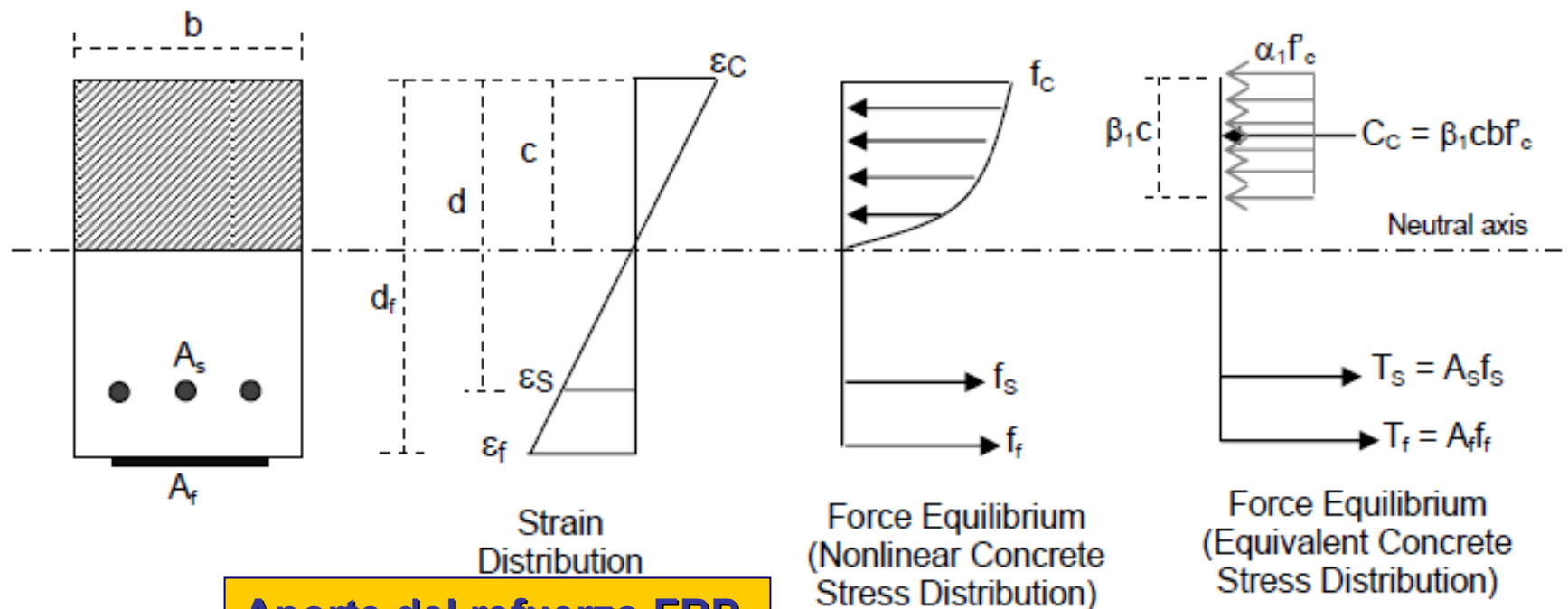
Procedure	Calculation in dry-potential state	Calculation in 55 percent state
Step 1—Compute the design FEP sustained rupture force. The design sustained rupture force is the sum of sustained and CRFP sustained wall to wall. Therefore, per Table 1, the sustained rupture force for CRFP is ignored.	$f_{su} = C_u f_{cu}$ $f_{su} = 0.05(5550) \text{ ksi} = 522.5 \text{ ksi}$ $e_{su} = 0.05(0.0047) = 0.00235 \text{ in/in.}$	$f_{su} = 0.05(5525 \text{ MPa}) = 560 \text{ MPa}$ $e_{su} = 0.05(0.0047) = 0.00235 \text{ mm/mm}$
Step 2—Evaluate the required maximum compressive strength of confined concrete, f_{cu}, due to obliquity crushing (eqs. 12-15).	$\frac{f_{su}}{f_{cu}} = \frac{1}{0.85(A_1 - A_2)} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \left(\frac{P_u}{A_1} \right) \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$ $\frac{522.5}{f_{cu}} = \frac{1}{0.85(176.64 - 15.24 \text{ in}^2)} \left(\frac{204.4 \text{ in}^2}{0.80 \times 0.85} \right) \left(\frac{604 \text{ kips}}{0.80 \times 0.85} \right) \left(\frac{15.24 \text{ in}^2}{204.4 \text{ in}^2} \right)$ $f_{cu} = 8.33 \text{ ksi}$	$\frac{f_{su}}{f_{cu}} = \frac{1}{0.85(173.612 \text{ mm}^2 - 9832 \text{ mm}^2)} \left(\frac{1111 \text{ mm}^2}{0.80 \times 0.85} \right) \left(\frac{440 \text{ kN}}{0.80 \times 0.85} \right) \left(\frac{9832 \text{ mm}^2}{1111 \text{ mm}^2} \right)$ $f_{cu} = 56.4 \text{ MPa}$

Refuerzo Estructural – Softwares



Software Específicos para Diseño en base Fib-Bulletin 14 y ACI 440 2R, entre otros.

FRP – Resistencia a Flexión

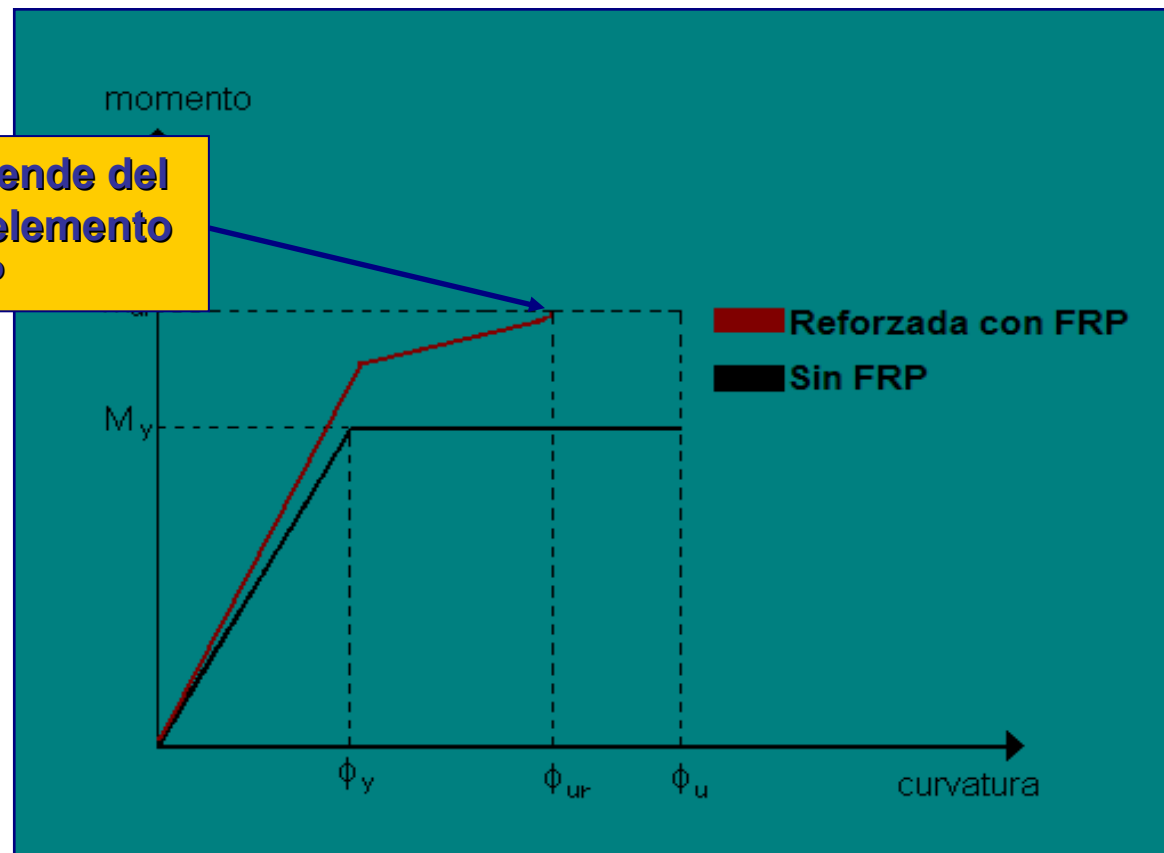


Aporte del refuerzo FRP a la resistencia a flexión

$$\phi M_n = \phi \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right]$$

FRP – Resistencia a Flexión

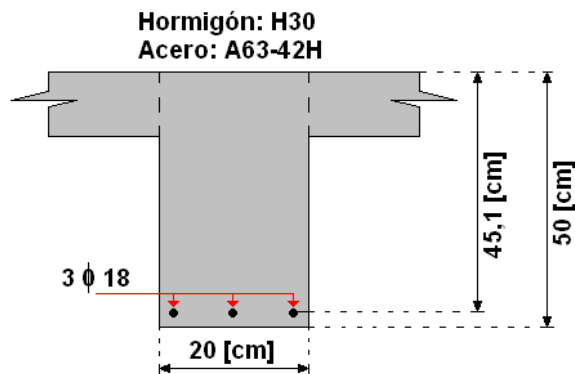
Estado último depende del tipo de falla en el elemento reforzado con FRP



El elemento de hormigón armado puede mantener su naturaleza dúctil, pasando de un estado elasto-plástico a un estado bilineal

FRP – Diseño a Flexión

Solicitaciones Originales de Diseño [Ton-m]			Solicitaciones Previstas para Refuerzo [Ton-m]				
PP	SC	1,4·PP+1,7·SC	PP	SC	PP+SC	1,2·PP+0,8·SC	1,4·PP+1,7·SC
4,50	3,25	11,83	4,50	6,00	10,50	10,20	16,50

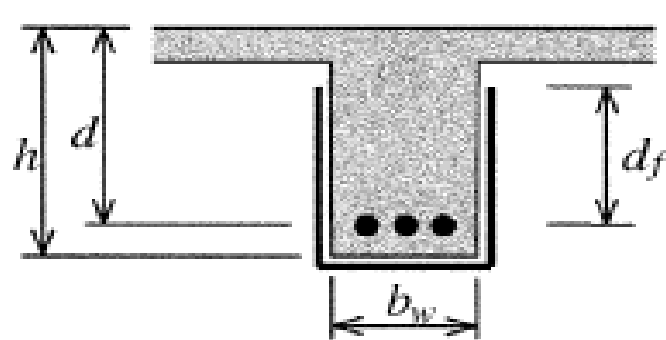


Parámetro	Valor	Refuerzo
$\Phi \cdot M_n$ (Resistencia nominal reducida a flexión sin reforzar)	11,92 [Ton-m]	-
$\Psi \cdot M_n$ (Resistencia nominal reducida a flexión con refuerzo CFRP)	16,52 [Ton-m]	3 capas de 0,17 [m] de ancho de tejido de fibra de carbono
$f_{s,s}$ (Esfuerzo en estado de servicio del acero existente)	310 [N/mm ²]	
$\Psi \cdot M_n$ (Resistencia nominal reducida a flexión con refuerzo CFRP)	16,51 [Ton-m]	2 Pletinas de fibra de carbono
$f_{s,s}$ (Esfuerzo en estado de servicio del acero existente)	310 [N/mm ²]	

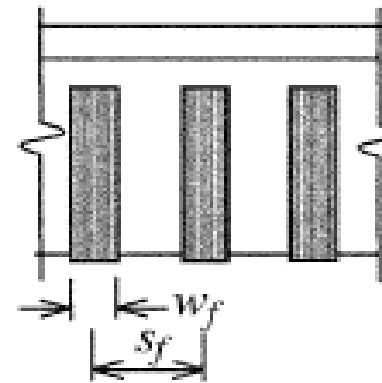
Tipo	Ancho [cm]	Espesor [mm]	Módulo Elasticidad [N/mm ²]	Resistencia Tracción [N/mm ²]	Elongación Rotura %
Tejido	Variable	0,166	230.000	3.900	1,50%
Pletina	5	1,200	165.000	2.800	1,70%

Este tipo de refuerzo puede tener costos menores al 30% de los asociados a faena de picado y reemplazo de armadura

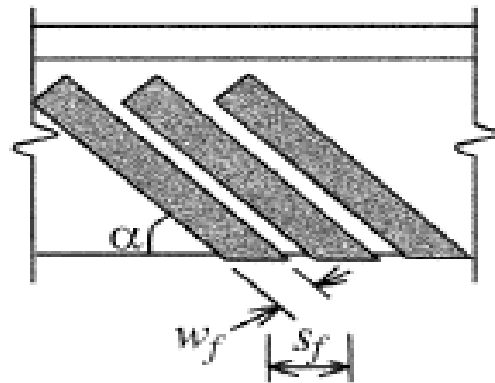
FRP – Resistencia al Corte



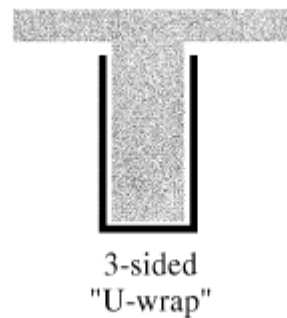
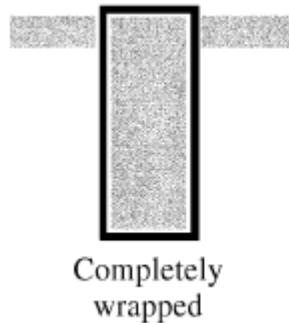
(a)



(b)



(c)



Aporte del refuerzo FRP a la resistencia al corte

2 sides

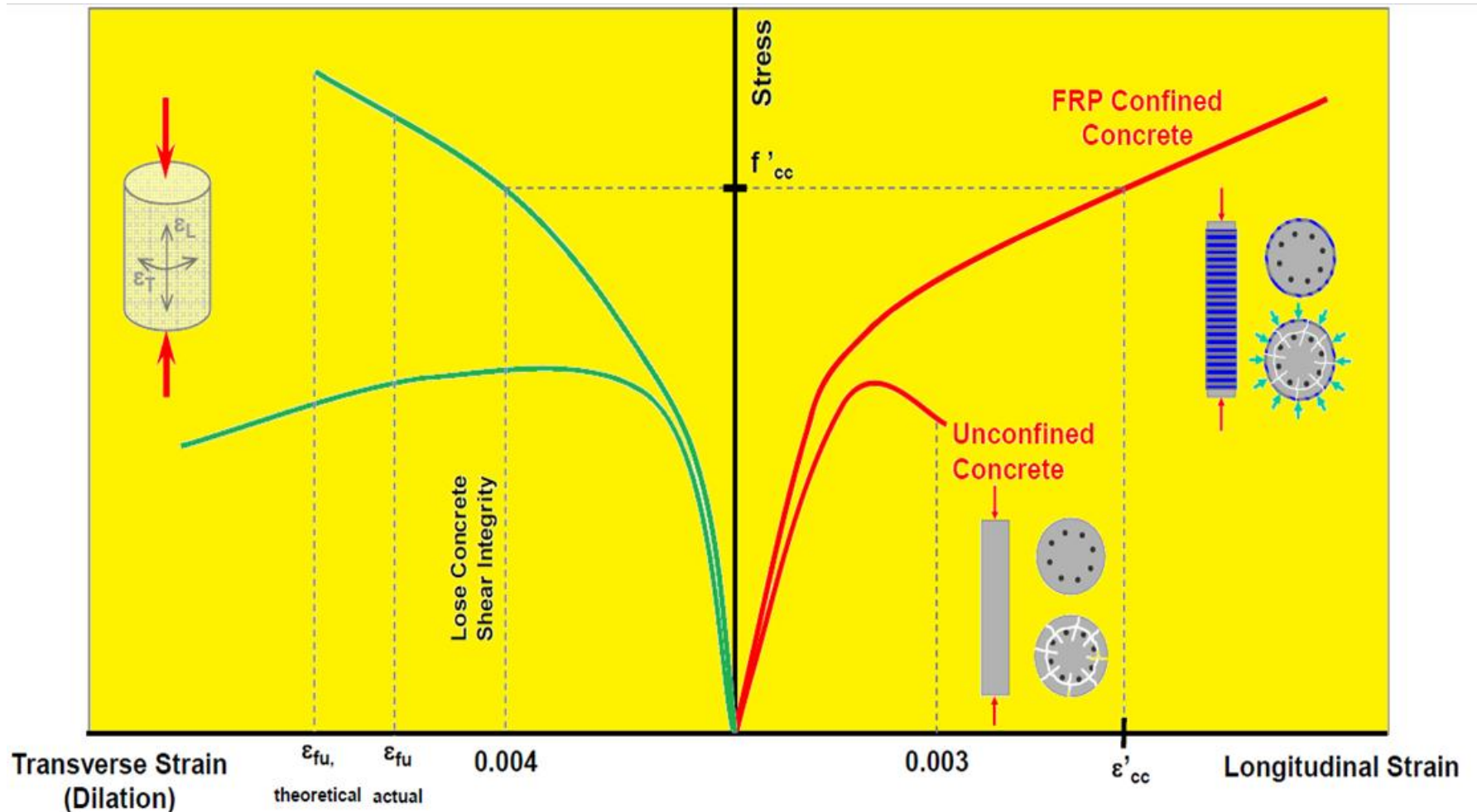
$$\frac{A_c f_c (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f}$$

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$$

Fibra de carbono complementa resistencia al corte aportada por el hormigón y el acero

FRP – Confinamiento

Es posible incrementar (capacidad) resistencia a compresión pura y flexo compresión en columnas así como ductilidad en vigas al confinar



FRP – Confinamiento

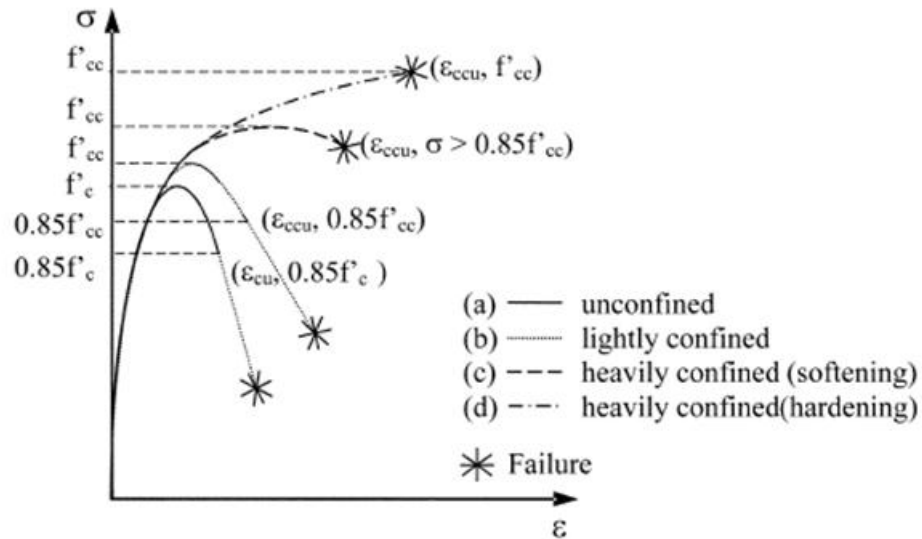
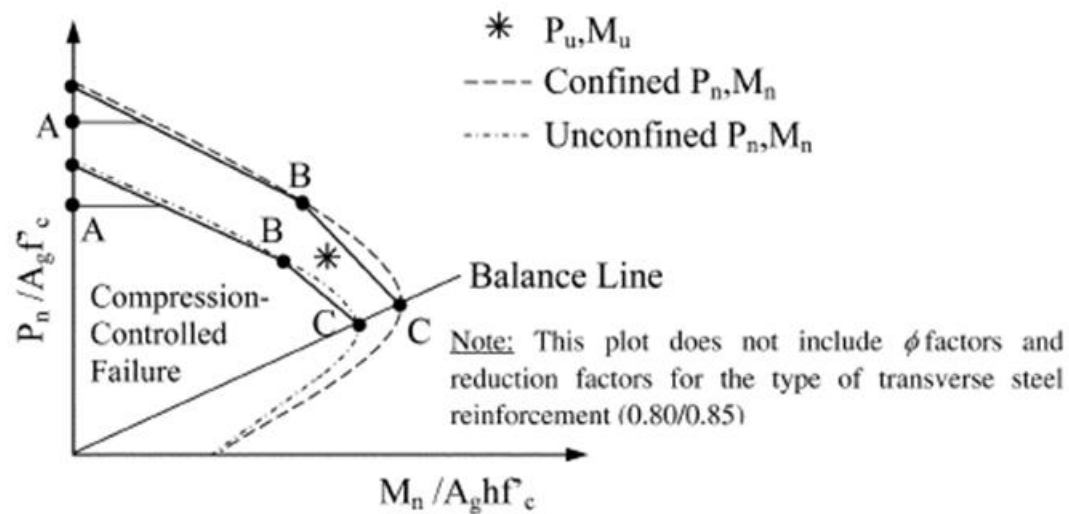
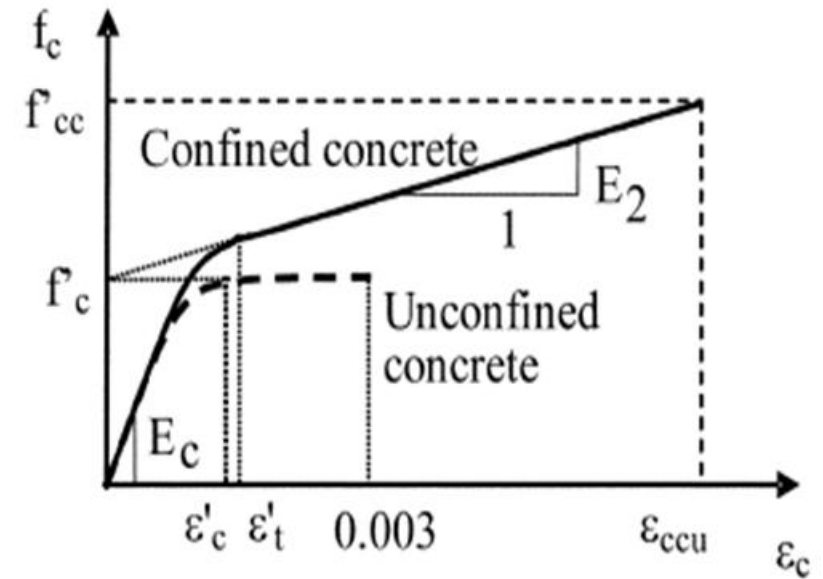


Fig. 12.1—Schematic stress-strain behavior of unconfined concrete



FRP – Longitud Desarrollo: ACI 440 2R 13.1.3

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad \text{in SI units}$$

Longitud de Desarrollo FRP

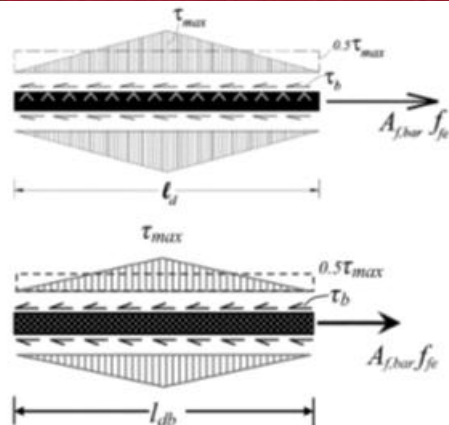


Fig. 13.5—Transfer of force in NSM FRP bars.

$$l_{db} = \frac{a_b b_b}{2(a_b + b_b)(\tau_b)} f_{fd} \quad \text{for rectangular bars} \quad (13-4)$$

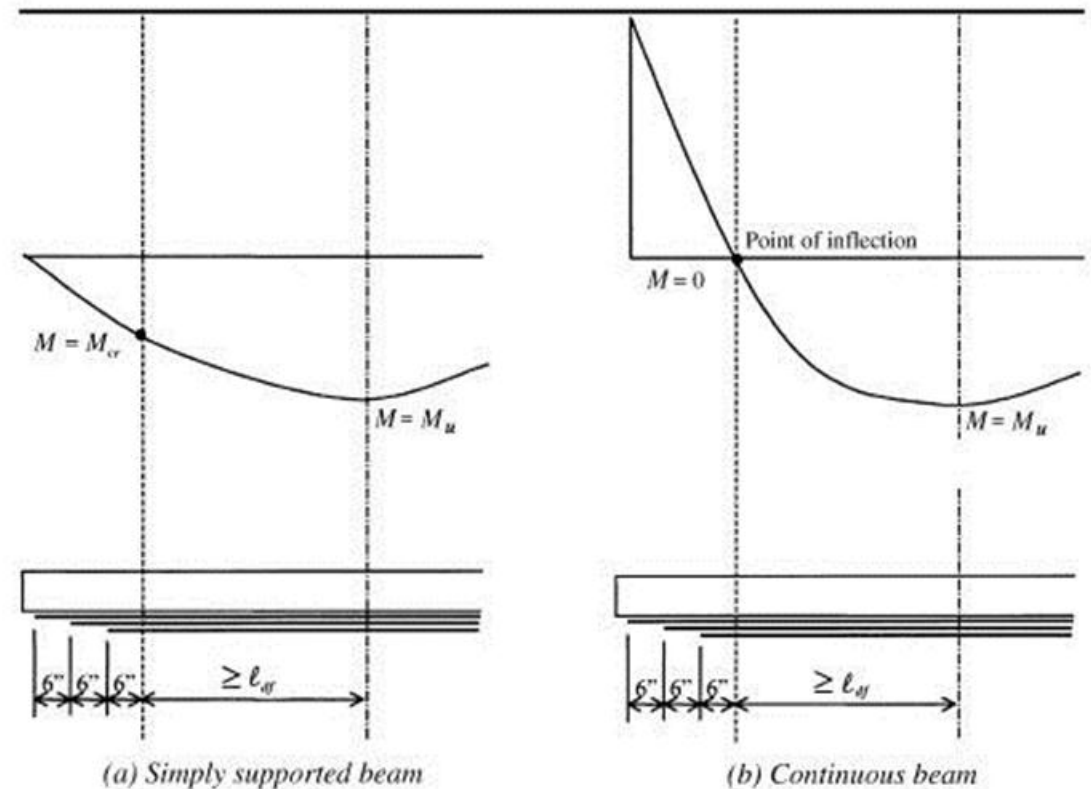


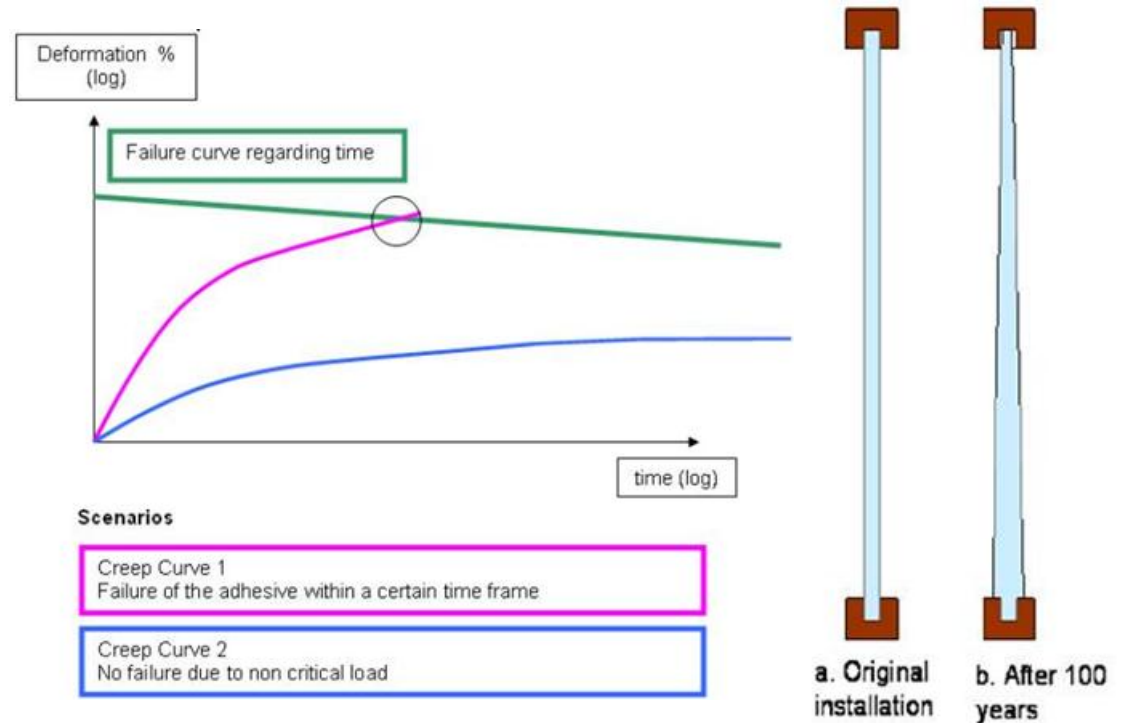
Fig. 13.3—Graphical representation of the guidelines for allowable termination points of a three-ply FRP laminate.

FRP – Creep: ACI 440 2R 10.2.9

10.2.9 Creep-rupture and fatigue stress limits—To avoid creep-rupture of the FRP reinforcement under sustained stresses or failure due to cyclic stresses and fatigue of the FRP reinforcement, the stress levels in the FRP reinforcement under these stress conditions should be checked. Because these stress levels will be within the elastic response range of the member, the stresses can be computed by elastic analysis.

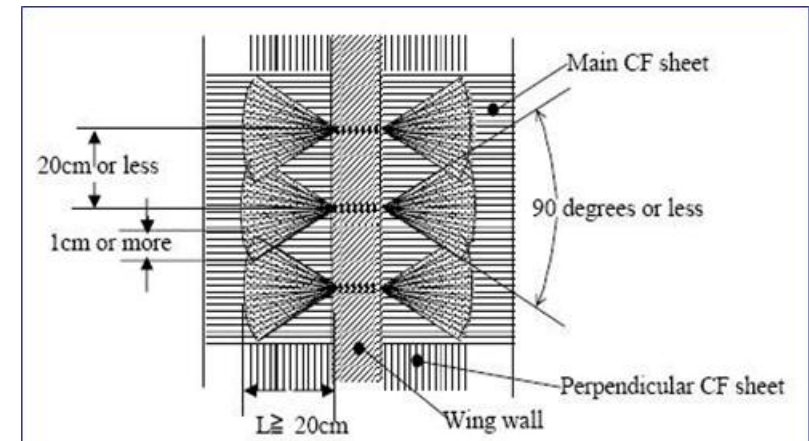
Table 10.1—Sustained plus cyclic service load stress limits in FRP reinforcement

Stress type	Fiber type		
	GFRP	AFRP	CFRP
Sustained plus cyclic stress limit	$0.20f_{fu}$	$0.30f_{fu}$	$0.55f_{fu}$



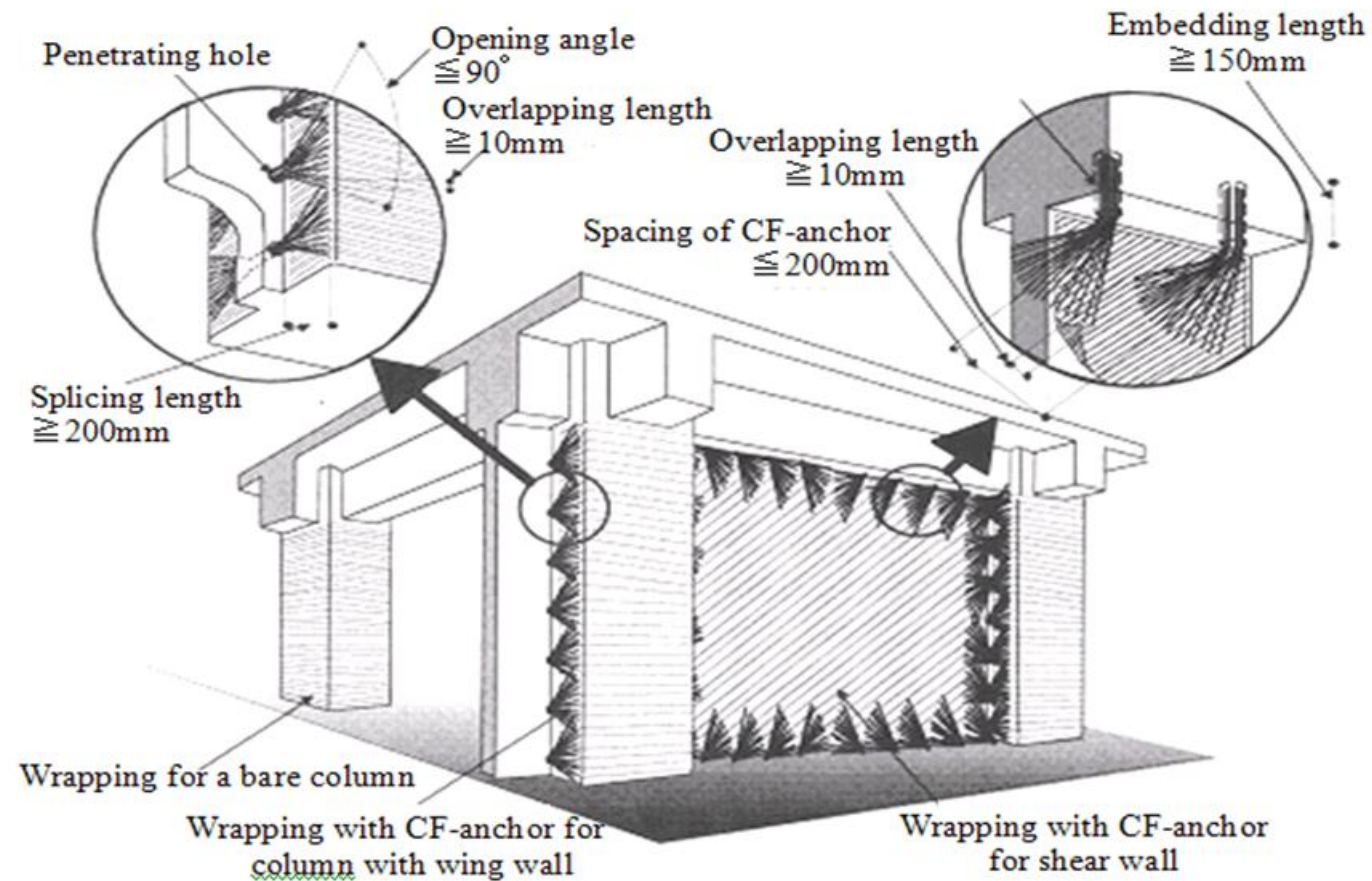
En el diseño se revisa el nivel de esfuerzo en el refuerzo exterior para controlar Creep

Refuerzo Estructural – Detallamiento



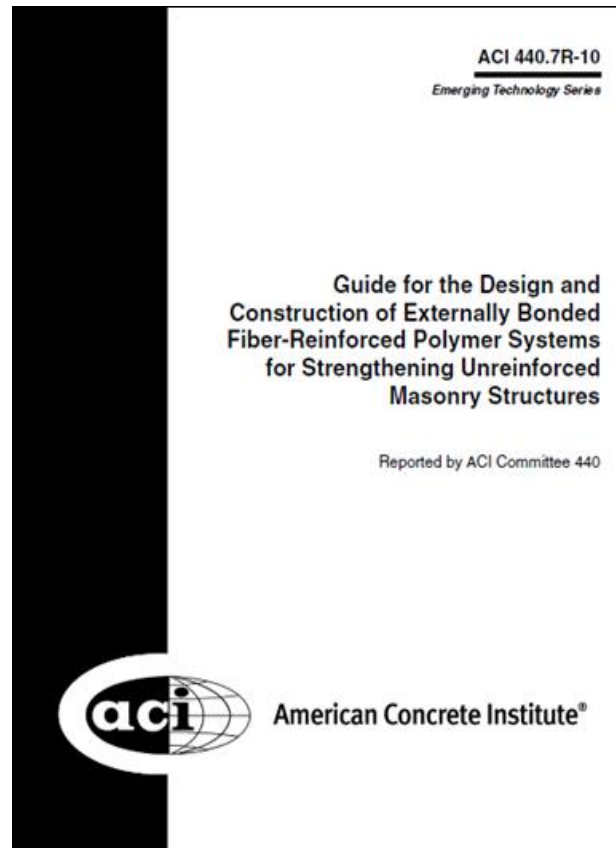
Se pueden tener casos especiales que requieren de detalles razonables y aplicables

Refuerzo Estructural – Detallamiento

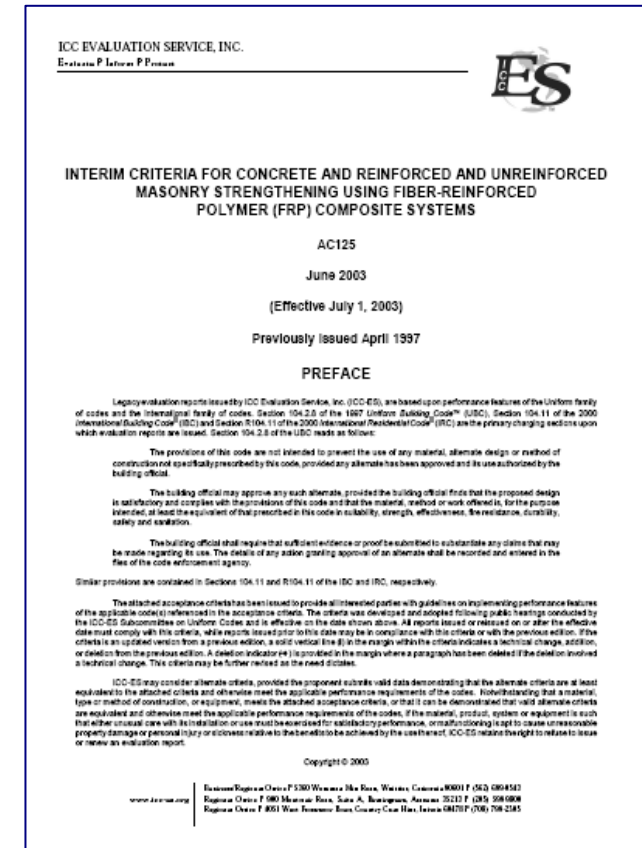


Variety of Structural Elements and applications of CF-anchor

Refuerzo Estructural – Diseño Albañilería



ACI 440.7R-2010



AC 125-2012

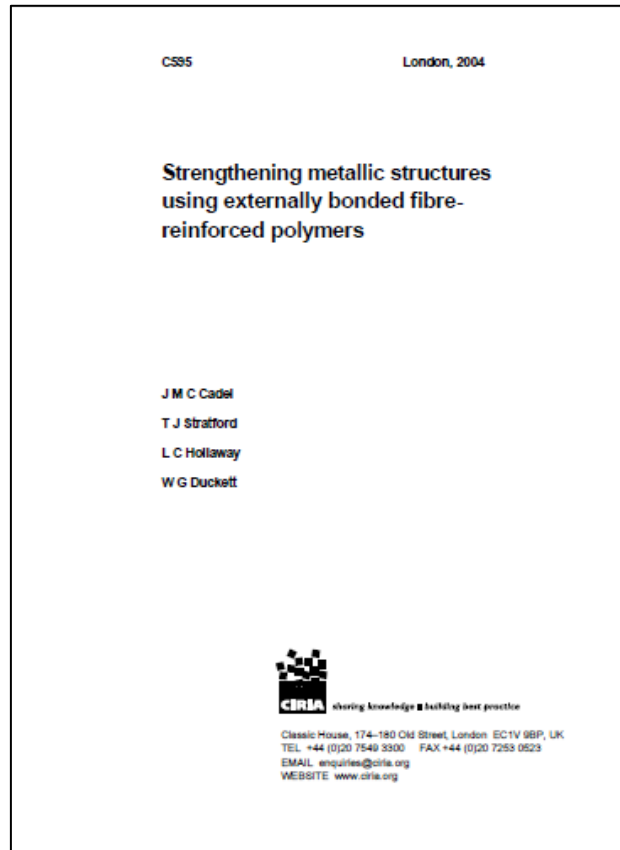
Refuerzo Estructural – Diseño Albañilería

Torre de Albañilería del Castillo de Vercilli, Italia

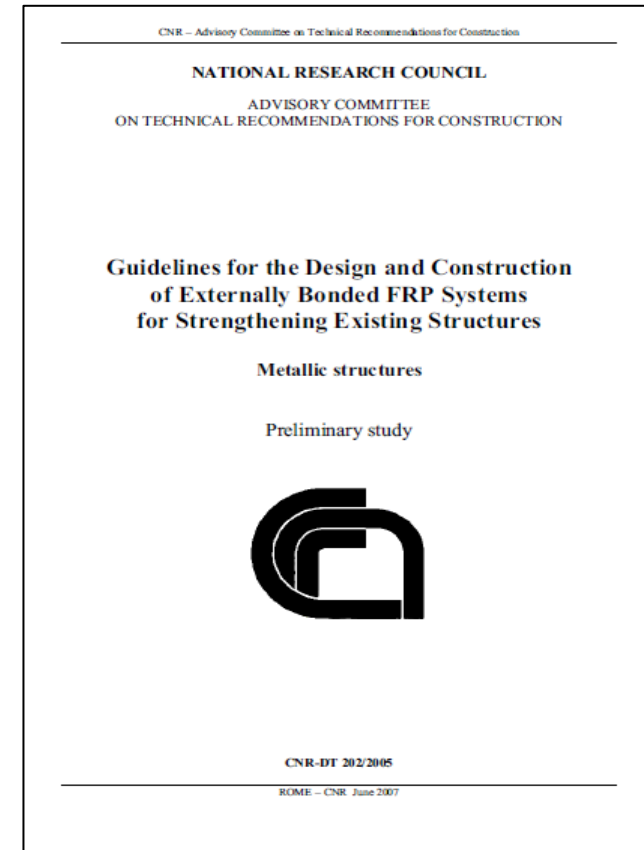


- Fisuras verticales en torre de albañilería.
- Refuerzo con barra CFRP de 5mm diámetro y resina epóxica.

Refuerzo Estructural – Diseño Acero



CIRIA C595-2004



CNR DT 202 / 2012

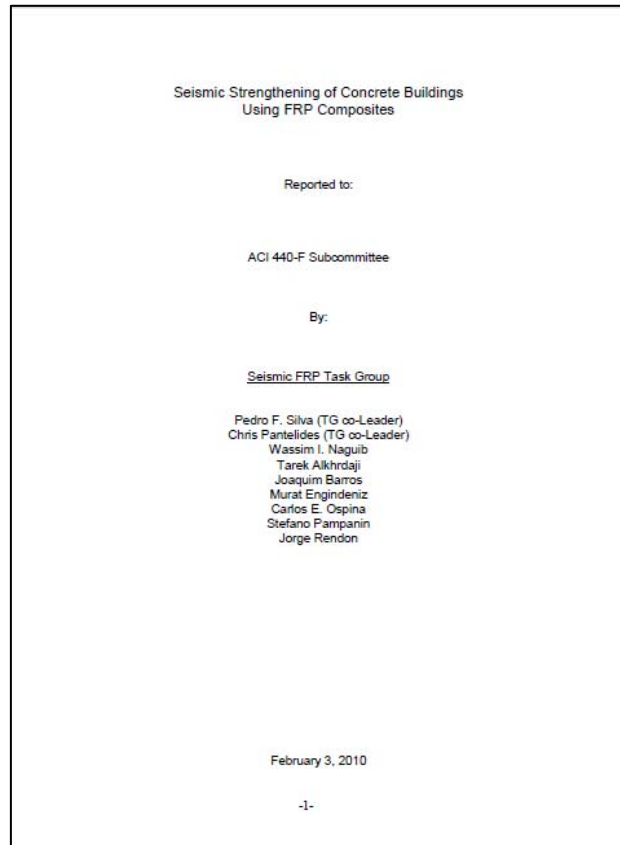
Refuerzo Estructural – Diseño Acero

Refuerzo de Viga Curva, Boots Building, Nottingham, Inglaterra

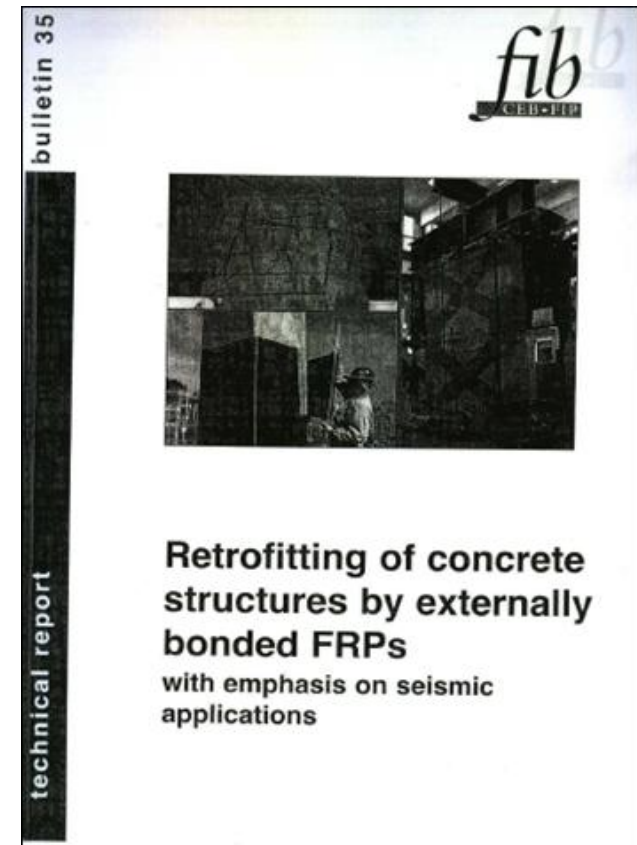


- Recuperación a flexión y torsión de principal viga curva de acero.
- Refuerzo con tejido FRP.

Refuerzo Estructural – Diseño Sísmico

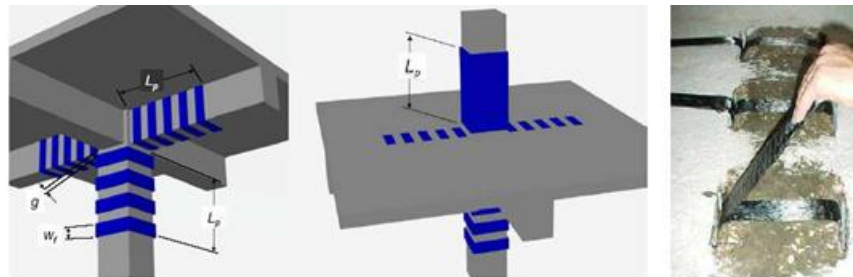


ACI 440.F
(aún no disponible)



Fib-Bulletin 35-2006

Refuerzo Estructural – Diseño Sísmico



(a) Discontinuous Wrapping (b) Continuous Wrapping (c) Field Implementation

Figure 3-3: FRP Wrapping for Confinement and shear strengthening

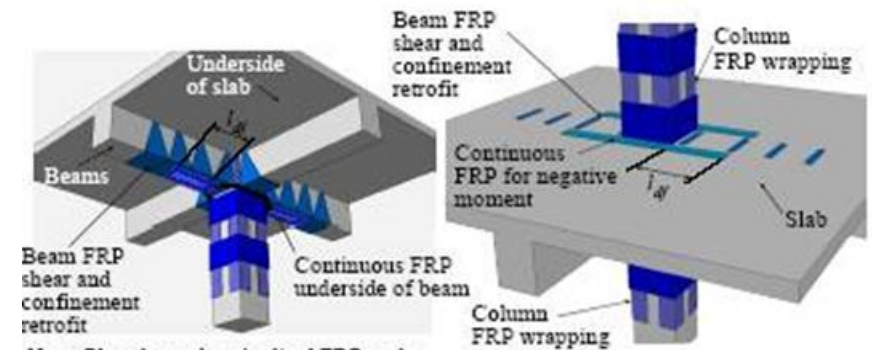


Figure 3-5: Beam Retrofit Scheme



Figure 3-6: Column Retrofit Scheme

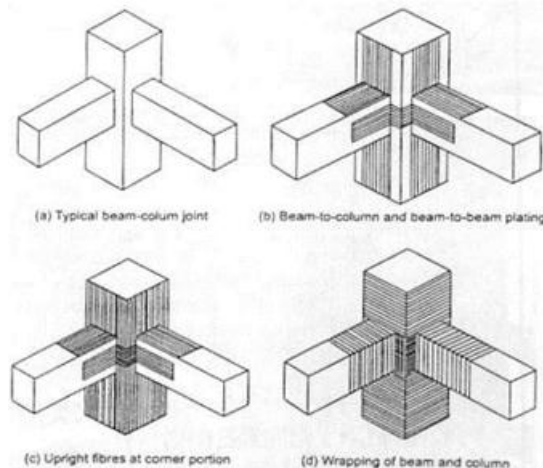
(b) Laboratory Retrofitted Unit (Akuzel and Pampanin 2007)

(a) Observed Damage in an Exterior Beam-Column Joint Subassembly Subjected to Laboratory Simulated Seismic Loading (Pampanin et al. 2002)

En línea con filosofía de diseño por capacidad, en búsqueda de maximizar la disipación de energía en la estructura y maximizar la respuesta histerética de elementos y zonas críticas

Refuerzo Estructural – Diseño Sísmico

Edificio Habitacional, Barranquilla, Colombia.



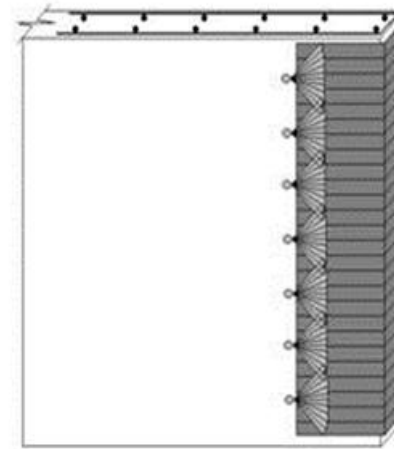
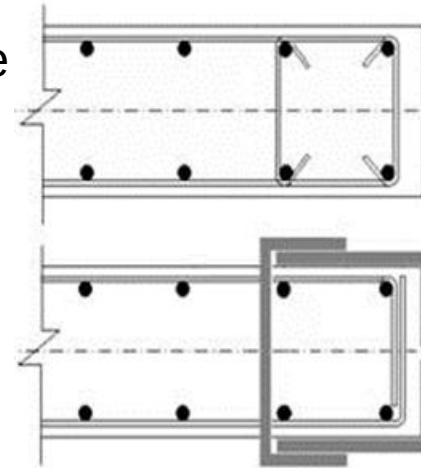
Refuerzo de Nudos con Tejido CFRP

Diseño: Fib Bulletin 35

Refuerzo Estructural – Diseño Sísmico

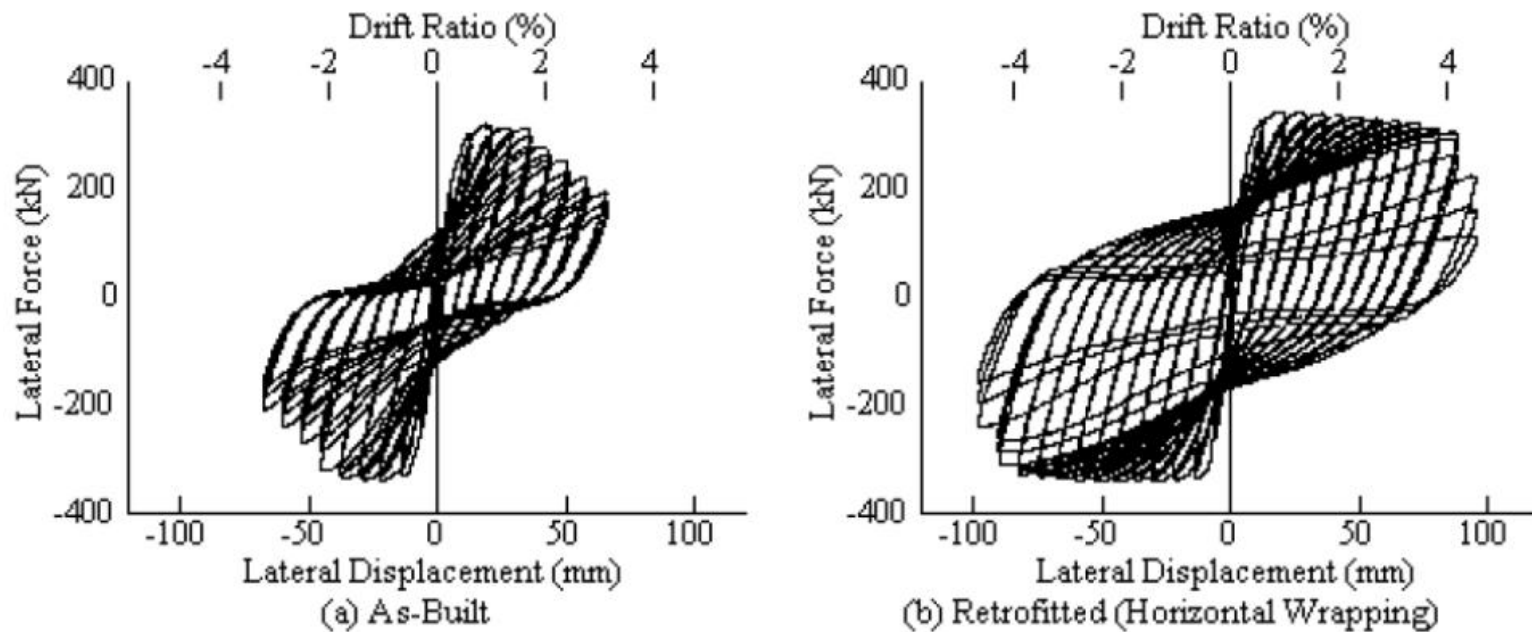
Edificio Habitacional, Santiago, Chile.

Confinamiento de Borde de Muros de Hormigón Armado (recientemente construidos) con tejido de fibra de carbono detallado especialmente.



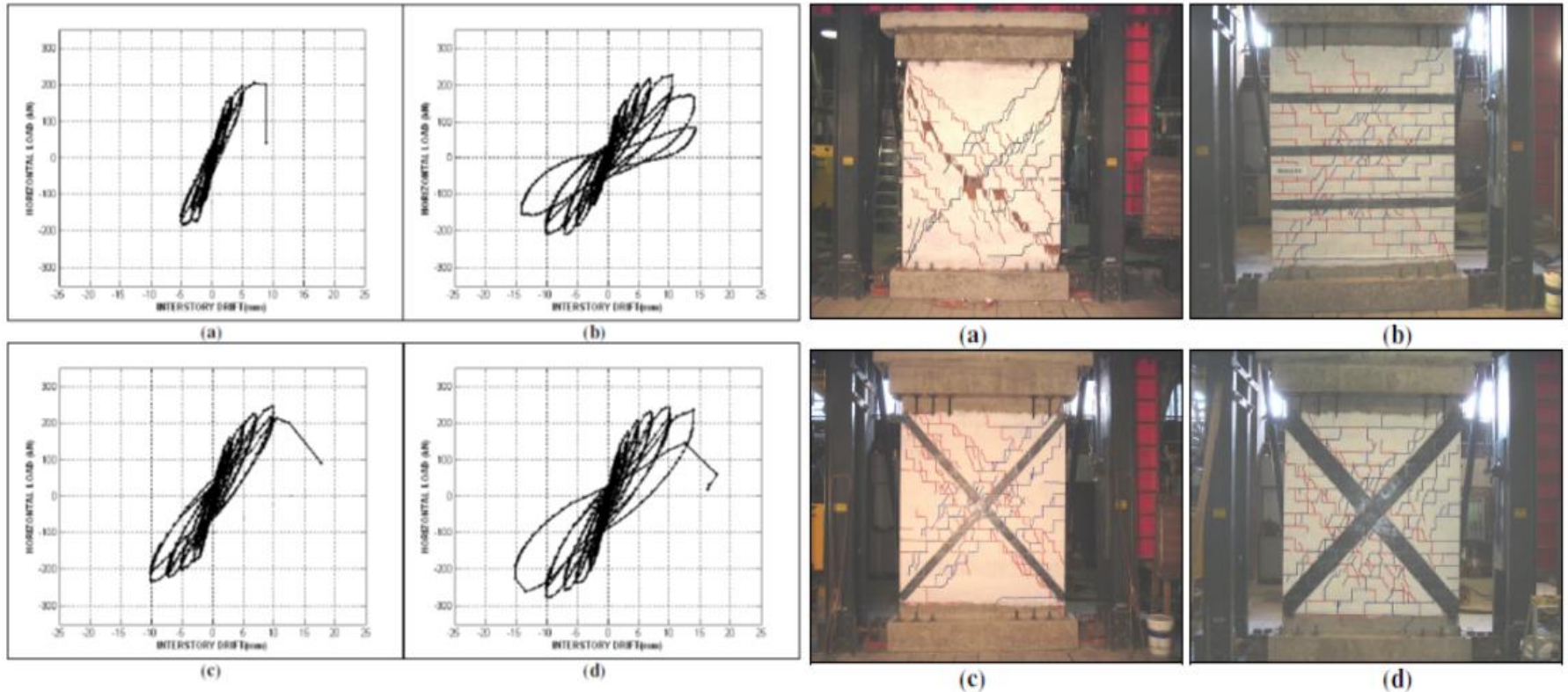
Investigación – Respuesta Histerética

Importante investigación desarrollada muestra mejoras relevantes en respuesta histerética de elementos estructurados reforzados con sistemas FRP



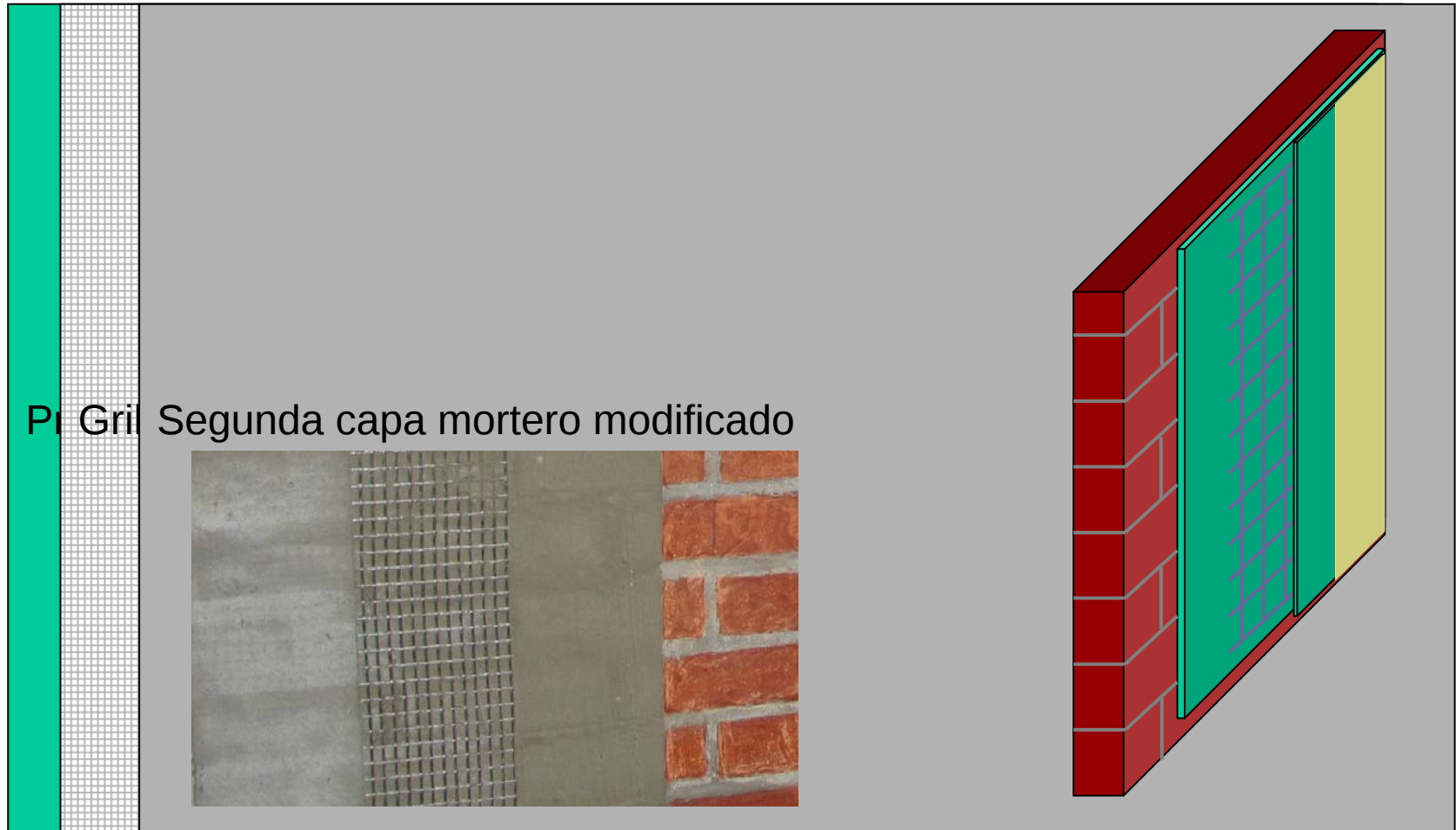
Comparación de Pilas de Puentes sin y con confinamiento CFRP

Investigación – Respuesta Histerética

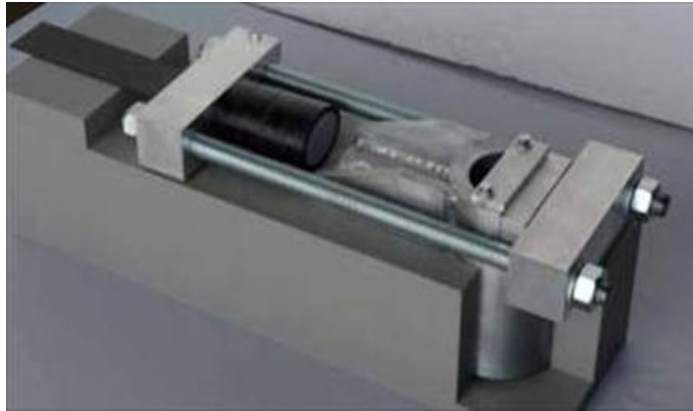


Comparación de Muros de Albañilería sin y con tres configuraciones de CFRP

Desarrollos de Interés – Refuerzo Muros Albañilería



Desarrollos de Interés – Sistemas Pre-esforzados CFRP (ejemplo)



Diseño a la medida, consistente en:

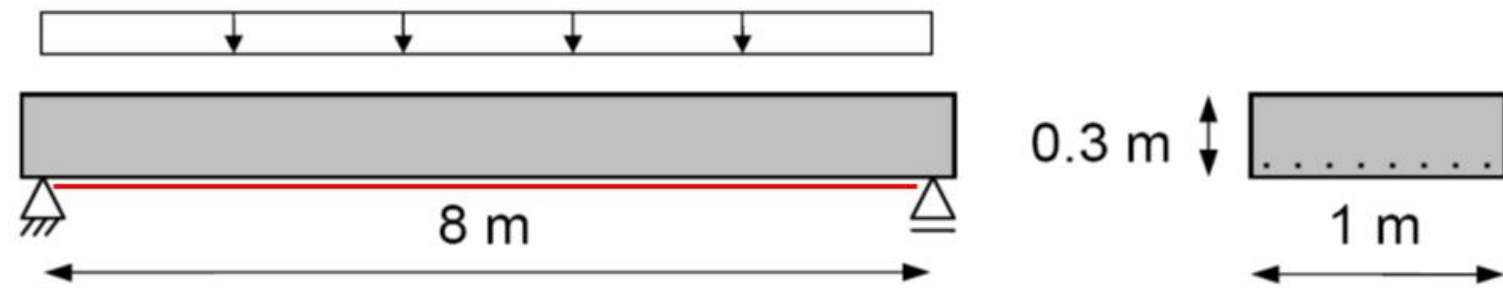
- Pletina de fibra de carbono S626 plate (60mm x 2.6mm = 156 mm²)
- CFRP Block Head (L=100mm D=80mm)

Tensión Asociada a Cargas de Diseño

Fuerza: $P_{0,max} = 220 \text{ kN}$

Esfuerzo: $\sigma_{P0,max} = 1410 \text{ MPa}$

Elongación: $\varepsilon_{P0} = 0.85\%$



Alternativas:

- A) CFRP convencional (2 x pletina S1014, $A_{\text{CFRP}} = 280 \text{ mm}^2$)
- B) Sistema Pre-esforzado (2 x tendon, $A_{\text{CFRP}} = 288 \text{ mm}^2$)

	Original member	Passive CFRP	CarboStress
Flexural Resistance	100 %	168 %	196 %
Deflection (at mid-span) [mm]	44	40	10
Steel stress (cracks, fatigue) (at mid-span) [MPa]	350	325	20

Aplicación Sistema Pre-esforzado

Aplicación de Anclaje
Móvil
Aplicación de Adhesivo en
pletina CFRP



Anclaje del Desviador



Borde Fijo
Desviador
Borde Libre



Sistemas FRP – Aspectos Complementarios

Sistema reforzado debe estar protegido ante solicitaciones eventuales que pueden ser esperables durante su servicio.

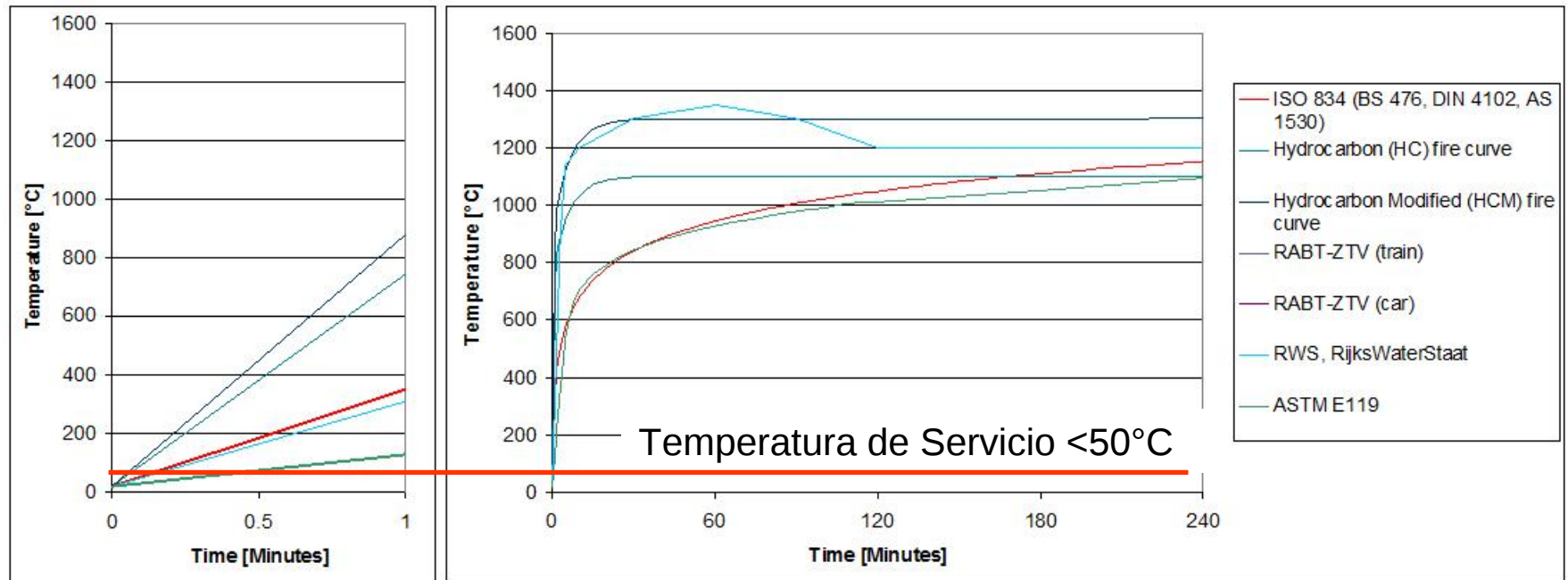
(La función del refuerzo debe ser sólo reforzar)

- **Incendios**

- **Ataque Químico**

- **Requerimientos Mecánicos (Impactos, Abrasión)**

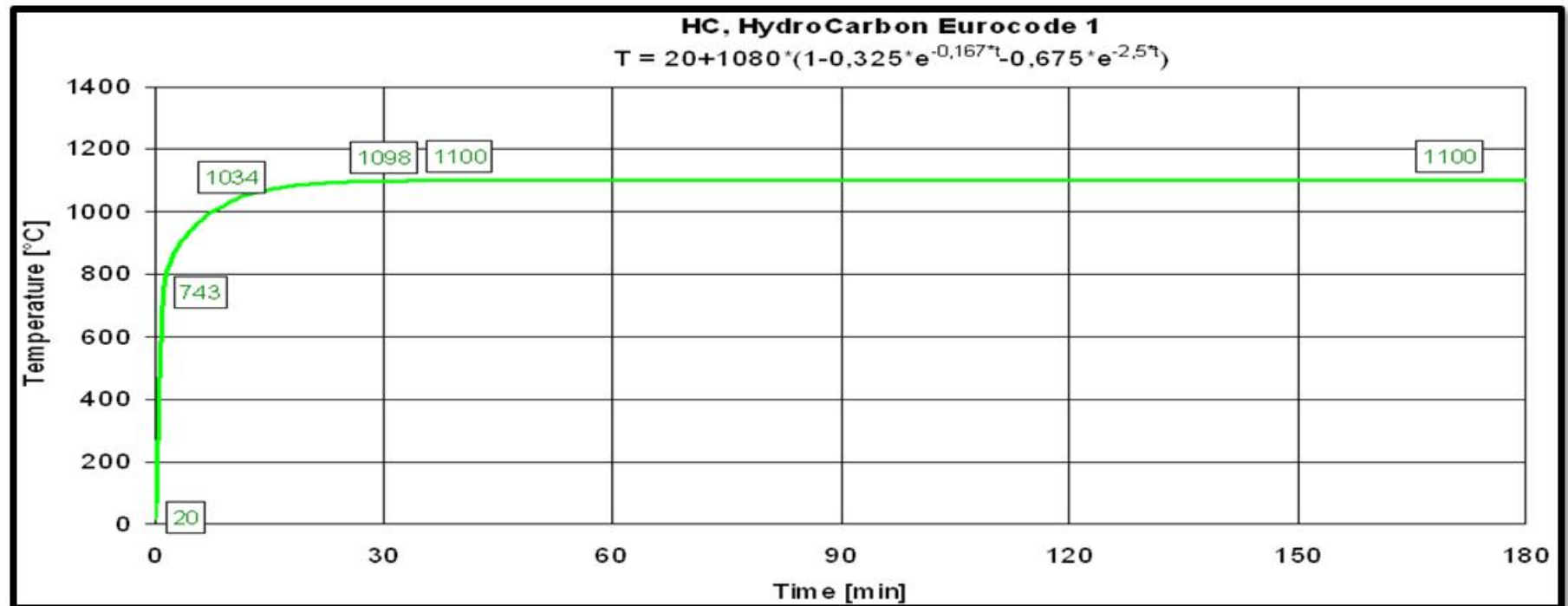
Protección Contra Fuego de Sistemas de Refuerzo FRP



- Temperaturas de servicio en el largo plazo para resina epóxica curada a temperatura ambiente $\sim 50^{\circ}\text{C}$
- Si hay exposición directa contra fuego, la resina epóxica pierde su resistencia (y estabilidad) en el conrto plazo

Protección Contra Fuego de Sistemas de Refuerzo FRP

Incendio Hidrocarburo: Foco de diseño de Morteros Ignífugos



El fuego de tipo Hidrocarburo
alcanza temperaturas por encima de
1000 °C ! En los primeros 15 minutos

Sistemas FRP – Protección contra Incendio

Diseño para protección contra fuego



Protección Contra Fuego

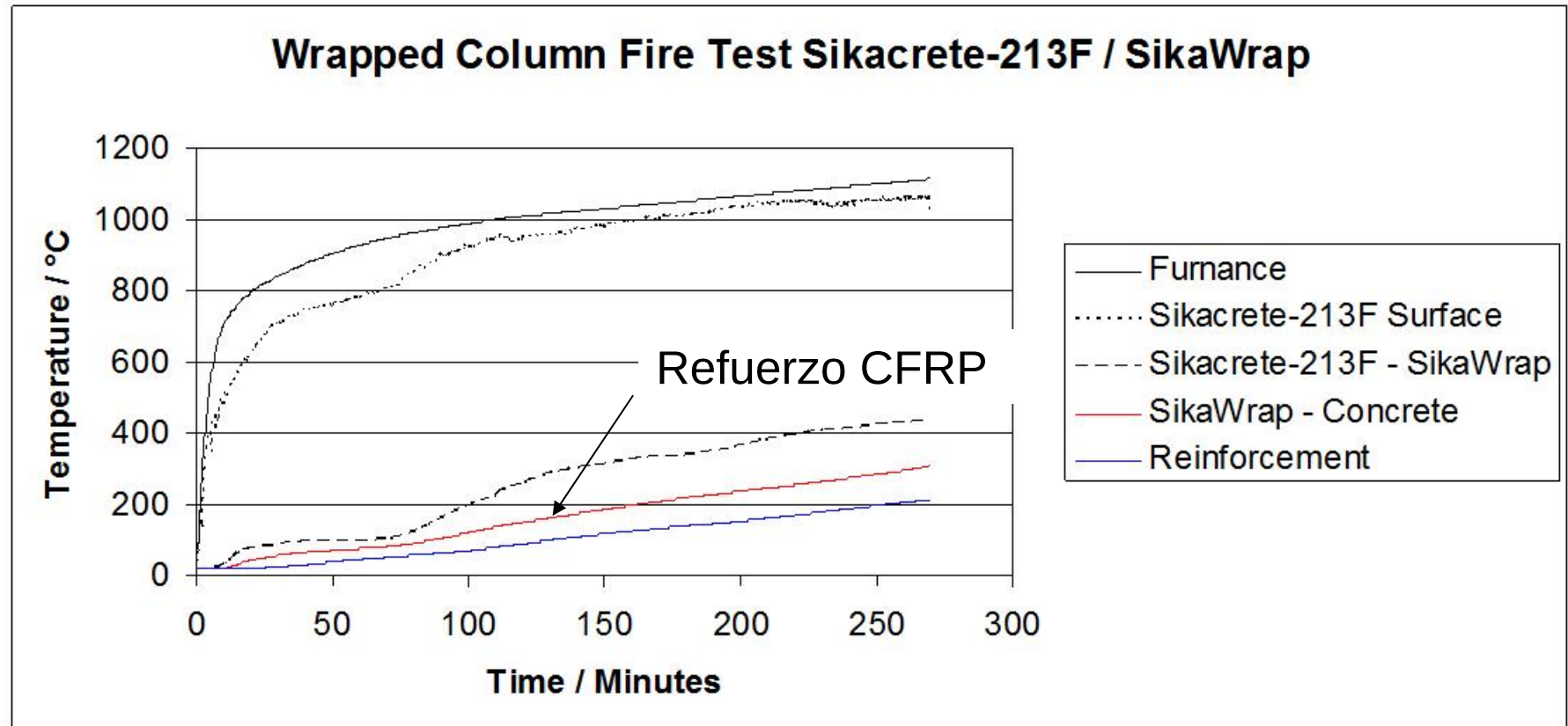
Canada Ensayos Finales (Viga y Columna Tamaño Real)

- Pruebas finalizadas y aprobadas 18 Junio 2010
- **Certificados según ASTM / ACI standards / ULC-Listing**
- **Sistemas incluidos para vigas T (flexión y corte)**
 - Tejidos de Fibra de Carbono
 - Tejidos de Fibra de Vidrio
 - Resinas para Tejidos
 - Pletinas de Fibra de Carbono
- **Sistemas incluidos para columna rectangular**
 - Tejidos de Fibra de Carbono
 - Resinas para Tejidos
- **Protección contra fuego (Mortero Ignífugo)**



Protección Contra Fuego con Mortero Ignífugo

Resultados Ensayo en Columna



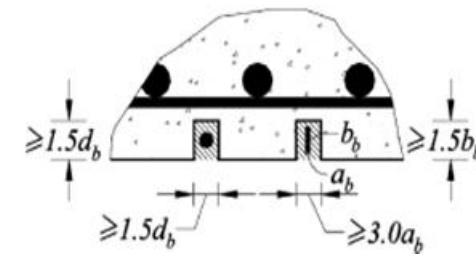
40mm de mortero ignífugo como protección

Protección Contra Ataque Químico



- Resistencia química acorde con condiciones de servicio, se debe tener presente también la temperaturas y tipo de exposición.
- Se debe considerar revestimientos asociados al punto anterior, (Epóxicos, Epoxi Novolac, Poliurea, entre otros)

Protección Contra Impactos



- Se debe añadir sistemas complementarios de protección en caso de impacto (placas de acero, morteros).
- En caso de abrasión se puede proteger, pero también limitar (ejemplo pletinas NSM, que quedan embebidas en el hormigón).



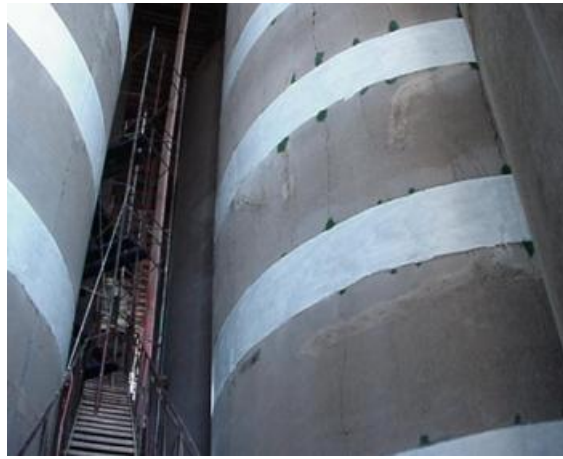
Referencias

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Puente Cocorná</u>
País	: Colombia
Elemento Intervenido	: Vigas de hormigón armado (corte)
Refuerzo Aplicado	: 150 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S512
Año	: 1996 (primera aplicación en América Latina)

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Silos Industria Alimenticia (Santiago)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Muros de hormigón armado (Confinamiento)
Refuerzo Aplicado	: 350 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,12 mm)
Año	: 2000

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>A3 Escher Canal Bridge, Glarus</u>
País	: Suiza
Elemento Intervenido	: Losas de hormigón armado (control de nivel de deformaciones por incremento en sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: Sistema de pletinas de fibra de carbono pre-esforzadas y anclajes
Año	: 2002

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Sung San Bridge</u>
País	: Korea
Elemento Intervenido	: Losas de hormigón armado (control de nivel de deformaciones por incremento en sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: 750 [m] con sistema de pletinas de fibra de carbono pre-esforzadas y anclajes
Año	: 2002

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Puente Rodrigo de Bastidas (Villarrica)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Pilas y muros de hormigón armado (confinamiento y corte)
Refuerzo Aplicado	: 200 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,12 mm) y 25 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S512
Año	: 2004

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Hunan Railway Bridge</u>
País	: China
Elemento Intervenido	: Vigas de hormigón armado (control de nivel de deformaciones por incremento en sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: sistema de pletinas de fibra de carbono pre-esforzadas y anclajes
Año	: 2007

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Hospital (Talcahuano)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Losas de hormigón armado (refuerzo a flexión por incremento de sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: 750 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,17 mm)
Año	: 2007

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Comercial (Estación Central)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Columnas, losas post-tensadas y muros de hormigón armado (confinamiento y refuerzo a flexión por incremento de sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: 1.650 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,12 mm)
Año	: 2008

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Planta Industria Cementera (Córdoba)</u>
País	: Argentina
Elemento Intervenido	: Refuerzo Muros Torre Precalentamiento (incremento Capacidad Sísmica)
Refuerzo Aplicado	: 820 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S512 y 600 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S1012
Año	: 2009

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Educacional (Concepción)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Losas y vigas de hormigón armado (refuerzo a flexión por incremento de sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: 2.500 [m] de pletina de fibra de carbono tipo S512
Año	: 2010

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Público (Santiago)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Columnas y vigas de hormigón armado (Confinamiento, refuerzo a flexión y corte)
Refuerzo Aplicado	: 9.000 [m] de pletina de fibra de carbono tipo S512 y 1.000 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,33 mm)
Año	: 2010

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Puente Aranda</u>
País	: Colombia
Elemento Intervenido	: Pilas, Vigas y Ménsulas de hormigón armado
Refuerzo Aplicado	: 470 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,17 mm)
Año	: 2010

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Educativo (Montevideo)</u>
País	: Uruguay
Elemento Intervenido	: Vigas (refuerzo a flexión por incremento de sobrecarga)
Refuerzo Aplicado	: 60 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S512 y 110 [m] de pletinas de fibra de carbono en ángulo para detalles (corte)
Año	: 2010

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Puente Cutzmala</u>
País	: México
Elemento Intervenido	: Vigas de hormigón armado
Refuerzo Aplicado	: 940 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,29 mm) 5.800 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S1012 y 500 [m] de tipo S512
Año	: 2010 - 2011

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Estadio Metropolitano Roberto Meléndez</u>
País	: Colombia
Elemento Intervenido	: Rehabilitación Integral
Refuerzo Aplicado	: 470 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,29 mm) y 50 [m] de pletinas de fibra de carbono tipo S1012
Año	: 2011

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Habitacional (Viña del Mar)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Losas y muros de hormigón armado (Refuerzo a refuerzo a flexión y corte)
Refuerzo Aplicado	: 6.000 [m] de pletina de fibra de carbono S512
Año	: 2011

Refuerzo Estructural – Referencias

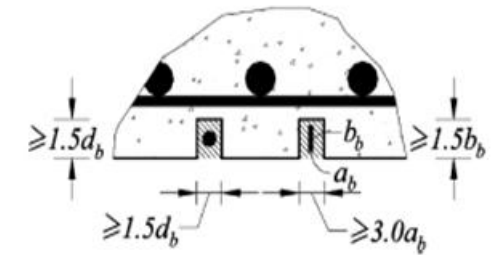


Fig. 13.4—Minimum dimensions of grooves.

Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Institucional TI (Santiago)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Losas de estacionamiento (refuerzo superior a flexión)
Refuerzo Aplicado	: 2.500 [m] de pletina de fibra de carbono tipo S214 (NSM FRP)
Año	: 2011

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Educacional (Concepción)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Muros de hormigón armado (refuerzo al corte)
Refuerzo Aplicado	: 2.500 [m] de pletina de fibra de carbono tipo S1512
Año	: 2012

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Puente Departamental (Santiago)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Vigas Prefabricadas (refuerzo inferior a flexión y corte)
Refuerzo Aplicado	: 350 [m] de pletina de fibra de carbono tipo M914 y 100 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,33 mm)
Año	: 2012

Refuerzo Estructural – Referencias



Proyecto	: <u>Refuerzo Edificio Comercial (Santiago)</u>
País	: Chile
Elemento Intervenido	: Columnas y vigas de hormigón armado
Refuerzo Aplicado	: 2.000 [m ²] de tejido de fibra de carbono (e: 0,33 mm) y 1.000 [m] de pletina de fibra de carbono tipo S512
Año	: 2012



Gracias