
**ESTUDIO DE REPARACIÓN Y REFUERZO ESTRUCTURAL
DE LOS FORJADOS DE LOS DEPÓSITOS DE COMPENSACIÓN
DE LAS PISCINAS MUNICIPALES
DEL POLIDEPORTIVO DE LLUCMAJOR**

AJUNTAMENT DE LLUCMAJOR

Diciembre 2024

JOSÉ FERMOSELLE PATERNA, Ingeniero Industrial Superior Colegiado nº 183 por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Baleares con DNI 42966145-Y y domicilio profesional en c/ Antoni Frontera, nº4 07004 Palma.

He sido requerido por el Ajuntament de Llucmajor para emitir un estudio de saneamiento, reparación y, en caso necesario, de refuerzo estructural de los forjados de los depósitos de compensación de las piscinas municipales del polideportivo de Llucmajor.

1.- OBJETO

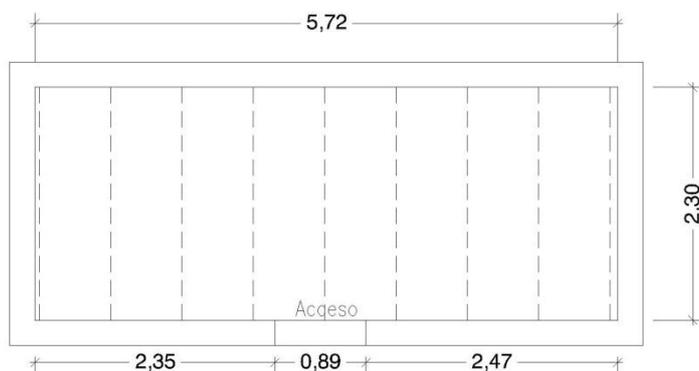
El objeto del estudio es el de establecer los sistemas de saneamiento, las reparaciones y los refuerzos necesarios, en los forjados de los depósitos de compensación de las piscinas municipales del polideportivo de Llucmajor, afectados por las patologías observadas.

3.- DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA Y ESTRUCTURAL

Se trata de dos depósitos de compensación de las siguientes dimensiones:

Los forjados están resueltos mediante viguetas de hormigón a separaciones aproximadas de 70cm entre ejes y apoyados sobre muros de hormigón armado.

Depósito de compensación 1



Depósito de compensación 2



4.- PATOLOGÍAS OBSERVADAS

En Junio del 2024 se realizó una inspección ocular a los depósitos afectados. En dicha visita se observaron Patologías en los forjados de hormigón de ambos depósitos.

Las viguetas presentan fisuración por corrosión de barras y en algunos casos, una pérdida total del hormigón de recubrimiento.



5.- CAUSAS DE LAS PATOLOGÍAS

Al tratarse de un forjado de cubierta de depósitos de compensación de agua de las piscinas, los iones cloruro (contenidos en la cámara de aire entre la superficie del agua y el forjado) penetran a través de los poros y fisuras del hormigón, afectando a la armadura, produciendo la corrosión del acero.

6.- ACTUACIONES NECESARIAS

Será necesario el saneamiento, reparación y refuerzo de las viguetas de los forjados.

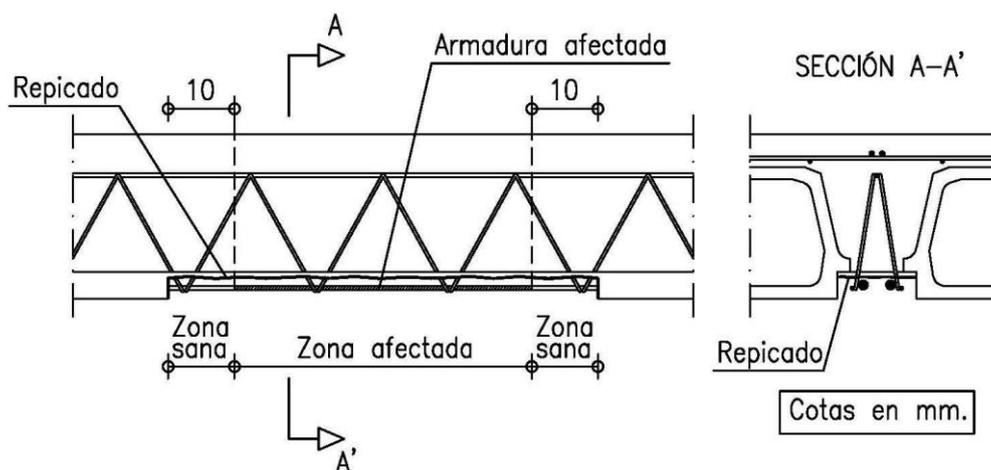
6.1.- SANEAMIENTO Y REPARACIÓN DEL FORJADO

Los trabajos son los siguientes:

1.- Preparación de las armaduras afectadas por corrosión, donde se descubrirá toda la zona hasta llegar al hormigón sano, repicando por detrás de la armadura como mínimo 1 cm y dejándola al aire, sin contacto con el hormigón de alrededor. Se deberá descubrir la armadura un mínimo de 10 cm más allá de la zona afectada.

La preparación de las armaduras se realizará mecánicamente (chorro de arena, granallado, cepillos rotativos, etc.) hasta eliminar toda la herrumbre.

Se recomienda la limpieza de las armaduras mediante chorro de arena Sa 2 ½, según Norma SIS 05 5900, o grado St3, cuando la limpieza se realiza manualmente, mediante cepillo de púas metálicas.



2.- Pasivación de armaduras mediante la aplicación de revestimiento anticorrosión (dos capas) de las siguientes características:

- Mortero monocomponente, a base de conglomerantes cementosos, polímeros en polvo e inhibidores de corrosión.

La aplicación del producto se realizará sobre la armadura limpia y decapada de óxido, con una mano de 0.5-1mm de espesor aproximado, utilizando una brocha de pelo duro, rodillo o pistola.

Se dejará secar durante, al menos 2-3 horas (a una temperatura aproximada de 20 °C), antes de proceder a la aplicación de la segunda capa de producto, de igual espesor que la primera, dejando transcurrir seguidamente un tiempo de otras 2-3 horas antes de proceder a la aplicación del mortero de reparación.

3.- Regeneración de las superficies mediante mortero tixotrópico monocomponente de las siguientes características:

- Con bajísima emisión de sustancias orgánicas volátiles, constituido por ligantes hidráulicos especiales, áridos seleccionados de granulometría fina, fibras sintéticas de poliacrilonitrilo, polímeros sintéticos y aditivos especiales.

Las superficies de hormigón deberán estar sanas, limpias, libres de agua estancada o hielo, grasa, aceite, polvo, pinturas antiguas, partes sueltas o mal adheridas. Se debe eliminar la lechada de cemento y conseguir una superficie texturada con el poro abierto.

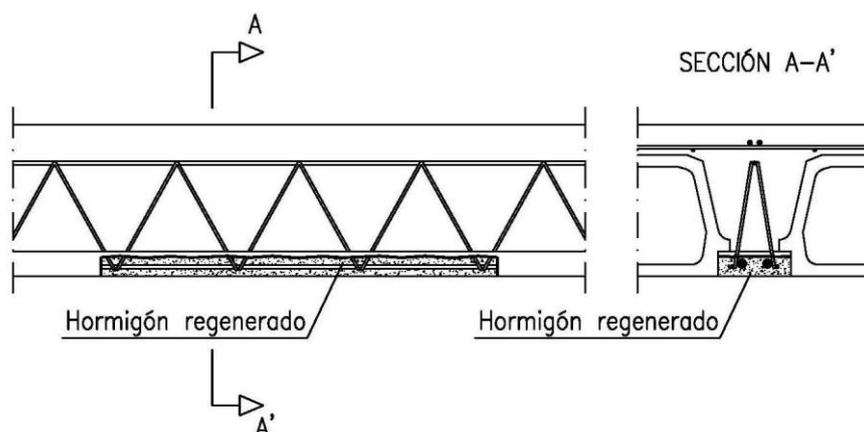
Las armaduras deberán estar sanas, limpias, libres de aceite, grasas, óxido y de cualquier otra sustancia que puedan perjudicar la adherencia.

Previamente a la aplicación del mortero de reparación se aplicará una capa de mortero cementoso anticorrosivo monocomponente, como puente de unión

La aplicación del mortero de reparación se realizará siguiendo los métodos tradicionales (mediante llana, paleta o maletín), mientras el soporte este todavía húmedo.

Una vez endurecido el conjunto formado por el mortero y el adhesivo, se comprobará la adherencia del mismo al soporte base golpeando con un martillo.

Se deberá conseguir un acabado con una planeidad superficial con diferencias de nivel, bajo regla de 2 metros, siempre inferiores a 4mm.



4.-Tratamiento de curado: Con objeto de conseguir una buena durabilidad de la reparación, es importante prevenir de la desecación excesivamente rápida de la superficie del mortero de reparación, para lo cual se mantendrá ésta protegida con láminas de polietileno, arpilleras mojadas o, en caso de condiciones climatológicas extremas, aplicando sobre la superficie el producto de curado de las siguientes características:

- Emulsión acuosa de resinas especiales, de color blanco, capaz de formar una película uniforme sobre el hormigón, ligeramente elástica, impermeable al agua y al aire.

6.2.- REFUERZO DEL FORJADO

Una vez finalizados los trabajos de saneamiento y reparación de los forjados se procederá al refuerzo del mismo.

La intervención de refuerzo de las viguetas se realizará mediante la colocación a lo largo del desarrollo longitudinal de las mismas, de **láminas de fibra de carbono de 50mm de ancho y 1,4 mm de espesor** aplicadas con un ciclo epoxídico.

Las características de la lámina de fibra de carbono son las siguientes:

Densidad (g/cm ³)	1,61
Contenido de fibras (%)	65
Espesor (mm)	1,4
Anchura (mm)	50
Sección resistente (mm ²)	70
Peso (g/m)	113

Resistencia a tracción (MPa)	2.500
Módulo elástico (GPa)	250
Alargamiento de rotura (%)	0,9
Resistencia a cortante (MPa)	79
Coefficiente de dilatación térmica (m/m/°C)	0,4x10 ⁻⁶

Se adjunta cálculo del refuerzo de los forjados en el Anexo II

Se procederá tal y como se indica a continuación:

1. Aplicar sobre superficie a reforzar el **imprimador epoxídico bicomponente** de las siguientes características:
 - Resina epoxi, de baja viscosidad, tolerante a la humedad, utilizada como recubrimiento de sellado para consolidar e imprimir sustratos de hormigón.
2. Aplicar con una llana, sobre el imprimador fresco, una capa uniforme de 1.0 o 1.5mm. de **estuco epoxídico bicomponente** de las siguientes características:
 - Producto bicomponente compuesto por resinas epoxídicas, áridos seleccionados de granulometría fina y aditivos específicos.
3. Cortar con una **amoladora** a la longitud deseada y retirar la película protectora (peel-ply) del lado de la lámina que se vaya a encolar.
4. Aplicar con una llana **estuco epoxídico, bicomponente**, con tiempo de fraguado normal, de consistencia tixotrópica, el lado de la lámina desprotegido.
5. Colocar la **lámina de fibra de carbono** y presionar con ayuda de un rodillo de goma rígida o de metal a fin de eliminar eventuales burbujas de aire.
6. Aplicar sobre la lámina de fibra de carbono, con una llana lisa, una capa sucesiva de **adhesivo epoxídico bicomponente y tixotrópico**.
7. - Espolvorear la resina todavía fresca con arena de cuarzo seca.

7.- MEMORIA DE CÁLCULO

7.1.- HIPOTESIS DE CARGA

- Peso propio forjado: 3,35 kN/m²
- Cargas permanentes: 2,00 kN/m²
- Sobrecargas: 4,00 kN/m²

7.2.- COEFICIENTES DE PONDERACIÓN

Mayoración Cargas

- Cargas permanentes: 1,35
- Sobrecargas: 1,50

Minoración Materiales

- Hormigón: 1,50
- Acero: 1,15

7.3.- CARACTERÍSTICAS FORJADO EXISTENTE

- Viguetas a separación aproximada entre ejes de 70 cm.
- Canto Forjado: 30 cm (25+5).
- Armado remanente estimado:

Longitud	Arm. Sup.	Arm. Inf.
6,19	1Ø12	2Ø12
2,30	1Ø6	2Ø16

7.4.- SOLICITACIONES A FLEXIÓN

- Carga Mayorada: $(3.35+2.00) \times 1.35 + 1.5 \times 4.00 = 13.22 \text{ kN/m}^2$
- Momento Solicitante máximo (mayorado)

Longitud	Momento (kN.m)
6,19	44,46
2,30	6,12

7.5.- CAPACIDAD A FLEXIÓN DE LA SECCIÓN REFORZADA

TIPO DE REFUERZO: Lámina FRP (MAPEI) Tipo CARBOPLATE E250 de 50x1.4 mm.

Viguetas Longitud	Nº de Refuerzos	Momento Resist.Total	Cumple
6.19	2	44,58	Si
2,30	1	8,13	Si

8.- CONCLUSIONES

1. Dado que las patologías observadas han producido pérdida de sección de los armados de los elementos resistentes (viguetas del forjado) y, por lo tanto, una disminución de la seguridad estructural, se hace necesario intervenir para conferir la resistencia adecuada a los forjados y restituir los niveles de seguridad adecuados.
2. Se ha proyectado un saneado, reparación y refuerzo de las secciones dañadas.
3. Durante la ejecución de la obra el Ingeniero firmante realizará el seguimiento de los trabajos.
4. Una vez finalizadas las actuaciones indicadas en los apartados anteriores, el técnico certificará la correcta realización de los trabajos.
5. Como medida preventiva se recomienda la instalación de un sistema de ventilación forzada que evite la generación de un ambiente agresivo para la estructura de hormigón.

Palma de Mallorca, Diciembre de 2024

El Ingeniero Industrial,

Fdo.: JOSE FERMOSELLE PATERNA

ANEXO I

MEDICIONES Y PRESUPUESTO

MEDICIONES Y PRESUPUESTO

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
1.1	m2 Saneado de superficie de hormigón y armaduras. Pasivación (Ver descripción en el punto 6.1 de la memoria) Saneado de superficie de hormigón mediante equipo de chorro de arena, incluso limpieza posterior del soporte, Saneado de armaduras con chorro de arena, incluso limpieza previa con disolución de tricloroetileno para eliminar grasas y aceites. Pasivación mediante la aplicación de revestimiento anti-corrosión (2 capas).Incluso tratamiento de curado. (Espesor estimado 20mm)							
	Depósito 1	9	2,30	0,12			2,48	
	Depósito 2	6	6,19	0,12			4,46	
						6,94	208,22	1.445,05
1.2	m2 Regeneración de superficies en estructuras de hormigón armado (Ver descripción en el punto 6.1 de la memoria) Restitución de volumen en estructuras de hormigón armado, con mortero fixotrópico monocomponente. Incluso capa de de mortero cementoso anticorrosivo monocomponente como puente de unión previamente a la aplicación del mortero de reparación. (Espesor estimado 20mm)							
	Depósito 1	9	2,30	0,12			2,48	
	Depósito 2	6	6,19	0,12			4,46	
						6,94	262,97	1.825,01
1.3	m Refuerzo de forjados (Ver descripción en el punto 6.2 de la memoria) Refuerzo de estructura con lámina de fibras de carbono de 50 mm de ancho y 1,4mm de espesor, adheridas con adhesivo epoxi de dos componentes, incluso imprimador epoxídico bicomponente, capa de estuco epoxídico bicomponente, corte del laminado en las longitudes desead y limpieza del polvo y suciedad de los mismos con disolvente, para su correcta puesta en obra.							
	Depósito 1	9	2,30				20,70	
	Depósito 2	12	6,19				74,28	
						94,98	80,25	7.622,15
1.4	Ud Torre de trabajo móvil Torre de trabajo móvil, con plataforma de trabajo de 3x1 m ² , situada a una altura de 3 m, formada por estructura tubular de acero galvanizado en caliente de 48,3 mm y 3,2 mm de espesor, preparada para soportar una carga de 2,0 kN/m ² uniformemente distribuida sobre la plataforma y una carga puntual de 1,5 kN, clase 3 según UNE-EN 1004 .Incluye: Alquiler durante 10 días naturales, Revisión periódica para garantizar su estabilidad y condiciones de seguridad, montaje y desmontaje							
		2					2,00	
						2,00	825,00	1.650,00
1.5	Ud Desescombro por medios manuales de residuos Desescombro por medios manuales de residuos de construcción o demolición ubicados en un plano horizontal, incluso regado, limpieza del lugar de trabajo, la retirada de escombros a contenedor o acopio intermedio. Carga de RCDs compuestos por hormigón (LER 17 01 01) de una densidad aproximada de 1.5 t/m ³ en contenedor realizada mediante medios manuales .Incluso Tasa Mac Insular y Transporte de residuos en camión realizado por transportista autorizado a instalación de valorización y/o eliminación							
		1					1,00	
						1,00	750,00	750,00
1.6	Ud Seguridad e higiene Conjunto de sistemas de protección colectiva e individual y elementos de balizamiento y señalización provisional de obras necesarios para el cumplimiento de la normativa vigente en materia de Seguridad y Salud en el trabajo. Incluso mantenimiento en condiciones seguras durante todo el periodo de tiempo que se requiera, reparación o reposición.							
		1					1,00	
						1,00	1.100,00	1.100,00
TOTAL								14.392,21

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Capítulo	Resumen	Euros
1.1	SANEADO DE SUPERFICIES DE HORMIGÓN.....	1.445,05
1.2	REGENERACIÓN DE SUPERFICIES EN ESTRUCTURAS DE H.A	1.825,01
1.3	REFUERZO DE FORJADOS	7.622,15
1.4	TORRE DE TRABAJO MÓVIL	1.650,00
1.5	DESESCOMBRO	750,00
1.6	SEGURIDAD E HIGIENE	1.100,00
	TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	14.392,21
	13,00% Gastos generales.....	1.870,99
	6,00 % Beneficio industrial.....	863,53
	SUMA DE G.G. y B.I.....	2.734,52
	21,00% I.V.A.....	<u>3.596,61</u>
	TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA	<u>20.723,34</u>
	TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	20.723,34

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de **VEINTE MIL SETECIENTOS VEINTITRES EUROS con TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS.**

Palma de Mallorca, Diciembre de 2024

El Ingeniero Industrial,

Fdo.: JOSE FERMOSELLE PATERNA

ANEXO II

CÁLCULO DEL REFUERZO

Refuerzo Forjado Depósito de compensación 1

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE REFUERZO

La intervención consiste en el refuerzo a flexión de un forjado de hormigón armado utilizando láminas de fibra de carbono.

NORMATIVA DE DISEÑO

El diseño se realiza de acuerdo con:

- *Normativa italiana NTC 2018 para la construcción y la Circular n.7 de 2019*
- *EC2 – Norma Europea EN 1992, Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación.*
- CNR DT 200 R1/2013 Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras existentes.

GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN EXISTENTE

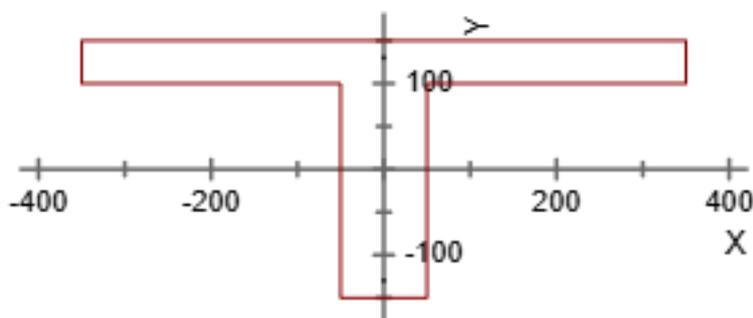
El elemento de hormigón armado a reforzar tiene una sección con ancho de 10.0 cm y una altura de 30.0 cm con un recubrimiento de hormigón de 2.0 cm. La sección tiene un armado longitudinal formado por 1.0 barras $\varnothing 6.0$ en la parte inferior y con 1.0 barras $\varnothing 6.0$ en la parte superior de la sección.

La viga a reforzar tiene una sección en T con las siguientes dimensiones:

Ancho del ala superior	70.0 cm
Altura del ala superior	5.0 cm
Ancho del alma	10.0 cm
Altura total	30.0 cm

La sección tiene una armadura longitudinal de 1.0 barras $\varnothing 6.0$ en la parte inferior y de 1.0 barras $\varnothing 6.0$ en la parte superior de la sección.

MATERIALES EXISTENTES



Las propiedades mecánicas del hormigón existente son:

- Resistencia media a la compresión f_{cm} 20.0 MPa
- Módulo elástico medio en compresión E_m 27085.0 MPa

Las propiedades mecánicas del acero existente son:

- Resistencia a la tracción media f_{ym} 500.0 MPa
- Módulo elástico medio en tracción E_s 210000.0 MPa
- Alargamiento en el límite elástico ε_{sy} 0.24%

NIVEL DE CONOCIMIENTO

A partir de la campaña de investigación realizada previamente a la etapa de diseño se ha determinado el nivel de conocimiento LC3 de los parámetros implicados en el modelo de diseño y se ha definido el correspondiente Factor de Confianza FC = 1.0 que se utilizará para la comprobación de diseño.

VALORES DE DISEÑO DE MATERIALES EXISTENTES

Las resistencias mecánicas de diseño para el hormigón existente son:

- Resistencia a la compresión del diseño (elemento/fallo dúctil) f_{cd} 20.0 MPa
- Resistencia a la compresión del diseño (elemento/fallo frágil) f_{cd} 13.33 MPa

Las resistencias mecánicas de diseño para el acero existente son:

- Resistencia a la tracción de diseño (elemento/fallo dúctil) f_{yd} 500.0 MPa
- Resistencia a la tracción de diseño (elemento/fallo frágil) f_{yd} 434.78 MPa

Para la evaluación de la capacidad estructural de elemento/fallo dúctil, se utiliza el valor medio de resistencia de los materiales existentes, determinado directamente con ensayos in situ o disponible en otra documentación, dividido por el factor de confianza, en relación con el nivel de conocimiento adoptado (§ 8.7.2 del CNT italiano 2018).

Para la evaluación de la capacidad estructural de elemento/fallo frágil, se utiliza el valor medio de resistencia de los materiales existentes, determinado directamente con ensayos in situ o disponible en otra documentación, dividido por el factor de confianza, en relación con el nivel de conocimiento adoptado, y por el factor de seguridad parcial del material. Para el hormigón, el factor de seguridad parcial γ_c es igual a 1,5, y para el acero γ_s es igual a 1,15 (§ 8.7.2 del NTC italiano 2018).

SOLICITACIONES DE DISEÑO

Las solicitaciones de diseño para la E.L.U. son:

Momento flector solicitante cuando se aplica el refuerzo M_0 49.0 kNm

Las solicitaciones de diseño para E.L.S. son:

Momento flector máximo $M_{Ed,ELS}$ 69.0 kNm

EVALUACIÓN DE LA SECCIÓN EXISTENTE

Las resistencias últimas de la sección existente en E.L.U son:

Máximo momento flector positivo resistente $M_{Rd,ELU,pos}$ 4.21 kNm
Máximo momento flector negativo resistente $M_{Rd,ELU,neg}$ -4.0 kNm
Máximo cortante resistente V_{Rd} 10.98 kN

TIPOLOGÍA DEL SISTEMA DE REFUERZO

El refuerzo con sistema FRP adoptado consiste en:

- **Lámina de fibra de carbono de 50mm de ancho y 1,4 mm de espesor de las características indicadas en el punto 6.2 “Refuerzo del forjado”.**

MECHANICAL PROPERTIES OF THE STRENGTHENING SYSTEM PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SISTEMA DE REFUERZO

Lámina CARBOPLATE E 250 para refuerzo a flexión

Espesor equivalente t_f	1.4 mm
Resistencia característica a rotura $f_{f,uk}$	2400.0 MPa
Módulo de Elasticidad E_f	250000.0 MPa
Deformación característica a rotura ε_{fk}	0.95 %
Número de capas n_f	1.0
Ancho b_f	50.0 mm
Coefficiente de seguridad para FRP γ_f	1,1
Factor tipo de ambiente η_a	A – 0.85

DISEÑO DEL SISTEMA DE REFUERZO

RINFO FLEXURAL STRENGTHENING

FLEXURAL STRENGTHENING DESIGN FOR THE U.L.S

Main assumptions:

- ✓ Conservation of the plane sections;
- ✓ No slip between the materials;
- ✓ Tensile strength of the concrete neglected;
- ✓ Constitutive model of the concrete and steel according to the relevant standard;
- ✓ Constitutive model of the FRP linear elastic up to failure.

The failure of the section for the U.L.S occur when one of the following ultimate strain is reached:

1. Ultimate compressive strain in the concrete

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

2. Debonding or ultimate tensile strain for the FRP

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; \varepsilon_{fdd} \right\}$$

where:

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

where:

ε_{sy} is the yield strain of the existing steel reinforcement

ε_0 is the strain at the tensile edge of the concrete at the time of strengthening

$f_{fdd,2}$ is the maximum design tensile strength, equal to:

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

where:

$k_{G,2} = 0,10 \text{ mm}$ is a correction factor

$k_q = 1,25$ for uniformly distributed loads and $k_q = 1,00$ for point loads

Caso 1. Momento flector ultimo debido a rotura del hormigón a compresión

Deformación del FRP

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

Deformación del hormigón en compresión

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$$

Deformación de la armadura de acero comprimida

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - c}{x}$$

Deformación de la armadura de acero traccionada

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

Si el acero no ha llegado a su límite elástico, las tensiones pueden obtenerse multiplicando la deformación correspondiente por su módulo de elasticidad; de lo contrario, la tensión del acero es igual a su límite elástico, f_{yd} .

Caso 2. Momento flector último debido a despegue o rotura a tracción del FRP

Deformación del FRP

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$$

Deformación del hormigón en compresión

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{h - x} \leq \varepsilon_{cu}$$

Deformación de la armadura de acero comprimida

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x - c}{h - c}$$

Deformación de la armadura de acero traccionada

$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d - x}{h - x}$$

donde:

ε_0 es la deformación en la fibra donde se coloca el FRP debida al momento de las cargas justo antes del refuerzo

$$\varepsilon_0 = \frac{M_0 \cdot (h - x_0)}{I_0 \cdot E_c}$$

donde:

El eje neutro es obtenido de la ecuación:

$$b \frac{x_0^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (x_0 - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - x_0) = 0 \rightarrow x_0$$

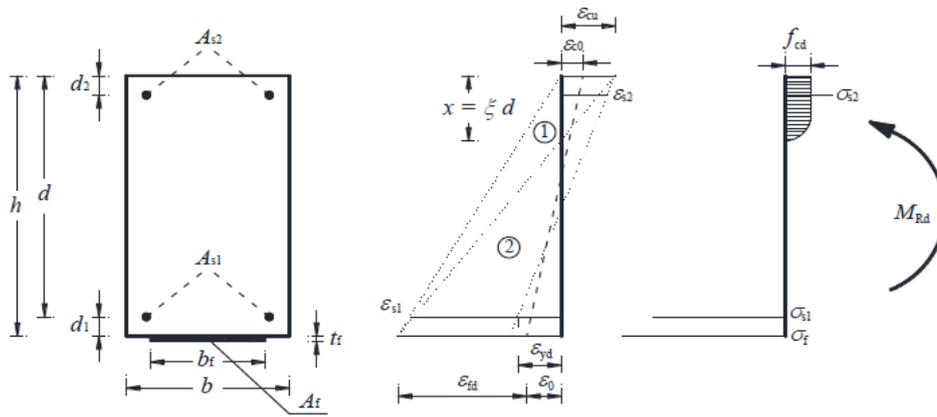
El momento de inercia de la sección es:

$$I_0 = b \frac{x_0^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (x_0 - c)^2 + n_s \cdot A_s \cdot (d - x_0)^2$$

donde:

M_0 es el momento flector actuante en el momento de la realización del refuerzo (acciones sin mayorar).

E_c es el módulo de elasticidad del hormigón según Código Estructural.



Para ambos fallos, la posición del eje neutro y la capacidad a flexión última se obtienen resolviendo las siguientes ecuaciones:

Ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales:

$$\Psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s - A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1} \cdot E_s - A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f = 0$$

Ecuación de equilibrio de momentos:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} [\Psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot (d - c) + A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \cdot c]$$

Con $\gamma_{Rd} = 1,00$, $\Psi = 0,809$ e $\lambda = 0,416$

Resumiendo, las deformaciones en E.L.U. de la sección reforzada son:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= 0.0011 \\ \varepsilon_{s1} &= 0.0173 \\ \varepsilon_{s2} &= -1.0E - 4 \\ \varepsilon_f &= 0.0019 \\ x &= 4.23 \text{ mm} \end{aligned}$$

CAPACIDAD ÚLTIMA DE DISEÑO A FLEXIÓN DE LA SECCIÓN REFORZADA

$$M_{Rd} = 13.67 \text{ kNm}$$

COMPROBACIÓN DE COMPATIBILIDAD DE TENSIONES EN SERVICIO DISEÑO DEL REFUERZO EN E.L.S.

Coefficiente de homogeneización acero-hormigón:

$$n_s = 15$$

Coefficiente de homogeneización FRP-hormigón:

$$n_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}}$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi}$$

con $\varphi = 2$

M_0 : Momento flector actuante cuando se realiza el refuerzo (peso propio y cargas muertas)

El eje neutro de la sección de hormigón existente se calcula como:

$$b \frac{y_c^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c) = 0 \rightarrow y_c$$

Momento de inercia homogeneizado de la sección de hormigón existente:

$$I_n = b \frac{y_c^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c)^2 + n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c)^2$$

Tensiones en los materiales debidas a M_0

Tensiones en el hormigón:

$$\sigma_c = \frac{M_0}{I_n} y_c \begin{cases} < 0,60f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones características} \\ < 0,45f_{ck} \rightarrow \text{ombinación de acciones cuasi – permanentes} \end{cases}$$

Para elementos de pequeño espesor, en comparación con las otras dos dimensiones (forjados, muros,...),ejecutados in situ con hormigón convencional y para espesores menores a 50 mm el valor límite establecido debe ser reducido un 20%.

Tensiones en la armadura de acero:

$$\sigma_s = n_s \frac{M_0}{I_n} (d - y_c) < 0,80f_{yk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

M_1 : Momento debido a las cargas cuasi-permanentes aplicadas después de la ejecución del sistema de refuerzo de FRP

La profundidad del eje neutro de la sección reforzada se obtiene de:

$$b \frac{y_c^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c) - n_f \cdot A_f \cdot (H - y_c) = 0 \rightarrow y_c$$

Momento de inercia homogeneizado de la sección de hormigón reforzada:

$$I_n = b \frac{y_c^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c)^2 - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c)^2 + n_f \cdot A_f \cdot (H - y_c)^2$$

Tensiones en los materiales debidas a M_1

Tensiones en el hormigón:

$$\sigma_c = \frac{M_1}{I_n} y_c \begin{cases} < 0,60f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones características} \\ < 0,45f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones cuasi – permanentes} \end{cases}$$

Para elementos de pequeño espesor, en comparación con las otras dos dimensiones (forjados, muros,...),ejecutados in situ con hormigón convencional y para espesores menores a 50 mm el valor límite establecido debe ser reducido un 20%.

Tensiones en la armadura de acero:

$$\sigma_s = n_s \frac{M_1}{I_n} (d - y_c) < 0,80f_{yk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

Tensiones en el refuerzo de FRP:

$$\sigma_f = n_f \frac{M_1}{I_n} (H - y_c) \leq \eta \cdot f_{fk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

Tabla3-3–Factor de conversión para efectos de larga duración η para varios sistemas FRP en cargas de servicio

Modalidad de carga	Tipo de fibra/resina	η_1
Carga de larga duración	Vidrio/Epóxico	0.30
	Arámideo/Epóxico	0.50
	Carbón/Epóxico	0.80
Cíclico	Todos	0.50

TENSIONES BAJO CONDICIONES DE SERVICIO (E.L.S.) PARA LA SECCIÓN REFORZADA

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 56.96 \text{ MPa} \\ \sigma_s &= -1474.87 \text{ MPa} \\ \sigma_f &= -267.5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Comprobación de tensiones en E.L.S.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 56.96 \text{ MPa} > \sigma_{c,lim} = 5.4 \text{ MPa} \\ \sigma_s &= -1474.87 \text{ MPa} < \sigma_{s,lim} = 400.0 \text{ MPa} \\ \sigma_f &= -267.5 \text{ MPa} > \sigma_{f,lim} = -2160.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

MEJORA DEBIDO AL REFUERZO: Capacidad Momento Positivo

$$M_{Rd,rinf} = 13.67kNm > M_{Rd} = 4.21 kNm$$

La mejora de la resistencia debido al sistema de refuerzo es *224.8%*.

Refuerzo Forjado Depósito de compensación 2

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE REFUERZO

La intervención consiste en el refuerzo a flexión de un forjado de hormigón armado utilizando láminas de fibra de carbono.

NORMATIVA DE DISEÑO

El diseño se realiza de acuerdo con:

- *Normativa italiana NTC 2018 para la construcción y la Circular n.7 de 2019*
- *EC2 – Norma Europea EN 1992, Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación.*
- *CNR DT 200 R1/2013 Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras existentes.*

GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN EXISTENTE

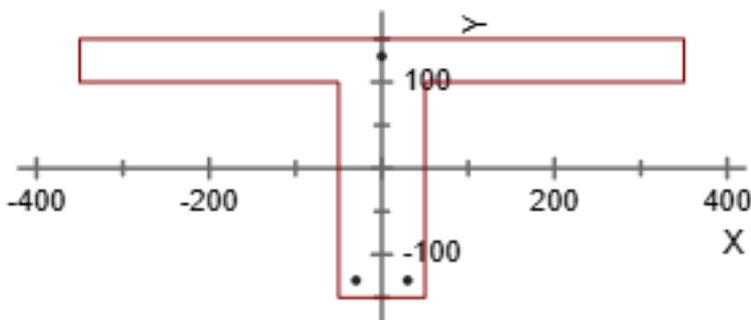
El elemento de hormigón armado a reforzar tiene una sección con ancho de 10.0 cm y una altura de 30.0 cm con un recubrimiento de hormigón de 2.0 cm. La sección tiene un armado longitudinal formado por 2.0 barras Ø12.0 en la parte inferior y con 1.0 barras Ø12.0 en la parte superior de la sección.

La viga a reforzar tiene una sección en T con las siguientes dimensiones:

Ancho del ala superior	70.0 cm
Altura del ala superior	5.0 cm
Ancho del alma	10.0 cm
Altura total	30.0 cm

La sección tiene una armadura longitudinal de 2.0 barras Ø12.0 en la parte inferior y de 1.0 barras Ø12.0 en la parte superior de la sección.

MATERIALES EXISTENTES



Las propiedades mecánicas del hormigón existente son:

- Resistencia media a la compresión f_{cm} 20.0 MPa
- Módulo elástico medio en compresión E_m 27085.0 MPa

Las propiedades mecánicas del acero existente son:

- Resistencia a la tracción media f_{ym} 500.0 MPa
- Módulo elástico medio en tracción E_s 210000.0 MPa
- Alargamiento en el límite elástico ε_{sy} 0.24%

NIVEL DE CONOCIMIENTO

A partir de la campaña de investigación realizada previamente a la etapa de diseño se ha determinado el nivel de conocimiento LC3 de los parámetros implicados en el modelo de diseño y se ha definido el correspondiente Factor de Confianza FC = 1.0 que se utilizará para la comprobación de diseño.

VALORES DE DISEÑO DE MATERIALES EXISTENTES

Las resistencias mecánicas de diseño para el hormigón existente son:

- Resistencia a la compresión del diseño (elemento/fallo dúctil) f_{cd} 20.0 MPa
- Resistencia a la compresión del diseño (elemento/fallo frágil) f_{cd} 13.33 MPa

Las resistencias mecánicas de diseño para el acero existente son:

- Resistencia a la tracción de diseño (elemento/fallo dúctil) f_{yd} 500.0 MPa
- Resistencia a la tracción de diseño (elemento/fallo frágil) f_{yd} 434.78 MPa

Para la evaluación de la capacidad estructural de elemento/fallo dúctil, se utiliza el valor medio de resistencia de los materiales existentes, determinado directamente con ensayos in situ o disponible en otra documentación, dividido por el factor de confianza, en relación con el nivel de conocimiento adoptado (§ 8.7.2 del CNT italiano 2018).

Para la evaluación de la capacidad estructural de elemento/fallo frágil, se utiliza el valor medio de resistencia de los materiales existentes, determinado directamente con ensayos in situ o disponible en otra documentación, dividido por el factor de confianza, en relación con el nivel de conocimiento adoptado, y por el factor de seguridad parcial del material. Para el hormigón, el factor de seguridad parcial γ_c es igual a 1,5, y para el acero γ_s es igual a 1,15 (§ 8.7.2 del NTC italiano 2018).

SOLICITACIONES DE DISEÑO

Las solicitaciones de diseño para la E.L.U. son:

Momento flector solicitante cuando se aplica el refuerzo M_0 49.0 kNm

Las solicitaciones de diseño para E.L.S. son:

Momento flector máximo $M_{Ed,ELS}$ 93.0 kNm

EVALUACIÓN DE LA SECCIÓN EXISTENTE

Las resistencias últimas de la sección existente en E.L.U son:

Máximo momento flector positivo resistente $M_{Rd,ELU,pos}$ 31.59k Nm
Máximo momento flector negativo resistente $M_{Rd,ELU,neg}$ -15.09k Nm
Máximo cortante resistente V_{Rd} 15.67 kN

El refuerzo con sistema FRP adoptado consiste en:

- **Lámina de fibra de carbono de 50mm de ancho y 1,4 mm de espesor de las características indicadas en el punto 6.2 “Refuerzo del forjado”.**

MECHANICAL PROPERTIES OF THE STRENGTHENING SYSTEM
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SISTEMA DE REFUERZO

Lamina CARBOPLATE E 250 para refuerzo a flexión

Espesor equivalente t_f	1.4 mm
Resistencia característica a rotura $f_{f,uk}$	2400.0 MPa
Módulo de Elasticidad E_f	250000.0 MPa
Deformación característica a rotura ε_{fk}	0.95 %
Número de capas n_f	2.0
Ancho b_f	50.0 mm
Coefficiente de seguridad para FRP γ_f	1,1
Factor tipo de ambiente η_a	A – 0.85

DISEÑO DEL SISTEMA DE REFUERZO

RINFO FLEXURAL STRENGTHENING
FLEXURAL STRENGTHENING DESIGN FOR THE U.L.S

Main assumptions:

- ✓ Conservation of the plane sections;
- ✓ No slip between the materials;
- ✓ Tensile strength of the concrete neglected;
- ✓ Constitutive model of the concrete and steel according to the relevant standard;
- ✓ Constitutive model of the FRP linear elastic up to failure.

The failure of the section for the U.L.S occur when one of the following ultimate strain is reached:

3. Ultimate compressive strain in the concrete

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

4. Debonding or ultimate tensile strain for the FRP

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; \varepsilon_{fdd} \right\}$$

where:

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

where:

ε_{sy} is the yield strain of the existing steel reinforcement

ε_0 is the strain at the tensile edge of the concrete at the time of strengthening

$f_{fdd,2}$ is the maximum design tensile strength, equal to:

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

where:

$k_{G,2} = 0,10 \text{ mm}$ is a correction factor

$k_q = 1,25$ for uniformly distributed loads and $k_q = 1,00$ for point loads

Caso 1. Momento flector ultimo debido a rotura del hormigón a compresión

Deformación del FRP

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$$

Deformación del hormigón en compresión

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$$

Deformación de la armadura de acero comprimida

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - c}{x}$$

Deformación de la armadura de acero traccionada

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$

Si el acero no ha llegado a su límite elástico, las tensiones pueden obtenerse multiplicando la deformación correspondiente por su módulo de elasticidad; de lo contrario, la tensión del acero es igual a su límite elástico, f_{yd} .

Caso 2. Momento flector último debido a despegue o rotura a tracción del FRP

Deformación del FRP

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$$

Deformación del hormigón en compresión

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{h - x} \leq \varepsilon_{cu}$$

Deformación de la armadura de acero comprimida

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x - c}{h - c}$$

Deformación de la armadura de acero traccionada

$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d - x}{h - x}$$

donde:

ε_0 es la deformación en la fibra donde se coloca el FRP debida al momento de las cargas justo antes del refuerzo

$$\varepsilon_0 = \frac{M_0 \cdot (h - x_0)}{I_0 \cdot E_c}$$

donde:

El eje neutro es obtenido de la ecuación:

$$b \frac{x_0^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (x_0 - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - x_0) = 0 \rightarrow x_0$$

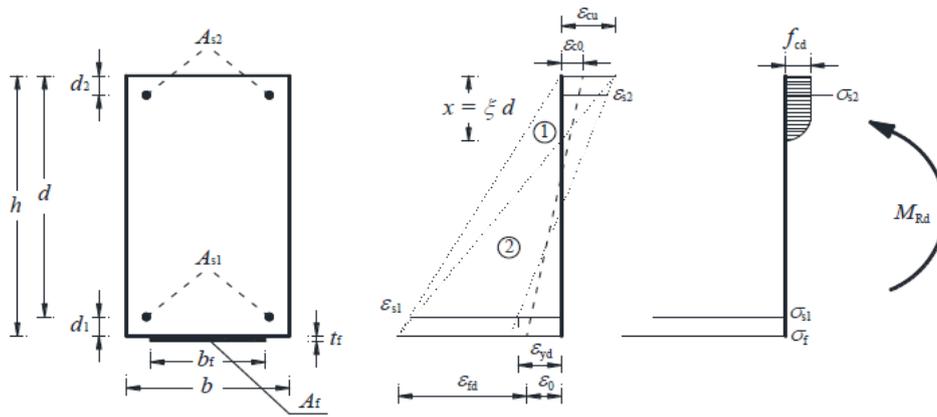
El momento de inercia de la sección es:

$$I_0 = b \frac{x_0^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (x_0 - c)^2 + n_s \cdot A_s \cdot (d - x_0)^2$$

donde:

M_0 es el momento flector actuante en el momento de la realización del refuerzo (acciones sin mayorar).

E_c es el módulo de elasticidad del hormigón según Código Estructural.



Para ambos fallos, la posición del eje neutro y la capacidad a flexión última se obtienen resolviendo las siguientes ecuaciones:

Ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales:

$$\Psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s - A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1} \cdot E_s - A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f = 0$$

Ecuación de equilibrio de momentos:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} [\Psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot (d - c) + A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \cdot c]$$

Con $\gamma_{Rd} = 1,00$, $\Psi = 0,809$ e $\lambda = 0,416$

Resumiendo, las deformaciones en E.L.U. de la sección reforzada son:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= 5.0E - 4 \\ \varepsilon_{s1} &= 0.0032 \\ \varepsilon_{s2} &= 0.0 \\ \varepsilon_f &= 0.0013 \\ x &= 14.27 \text{ mm} \end{aligned}$$

CAPACIDAD ÚLTIMA DE DISEÑO A FLEXIÓN DE LA SECCIÓN REFORZADA

$$M_{Rd} = 44.58 \text{ kNm}$$

COMPROBACIÓN DE COMPATIBILIDAD DE TENSIONES EN SERVICIO DISEÑO DEL REFUERZO EN E.L.S.

Coefficiente de homogeneización acero-hormigón:

$$n_s = 15$$

Coefficiente de homogeneización FRP-hormigón:

$$n_f = \frac{E_f}{E_{c,eff}}$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi}$$

con $\varphi = 2$

M_0 : Momento flector actuante cuando se realiza el refuerzo (peso propio y cargas muertas)

El eje neutro de la sección de hormigón existente se calcula como:

$$b \frac{y_c^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c) = 0 \rightarrow y_c$$

Momento de inercia homogeneizado de la sección de hormigón existente:

$$I_n = b \frac{y_c^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c)^2 + n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c)^2$$

Tensiones en los materiales debidas a M_0

Tensiones en el hormigón:

$$\sigma_c = \frac{M_0}{I_n} y_c \begin{cases} < 0,60f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones características} \\ < 0,45f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones cuasi – permanentes} \end{cases}$$

Para elementos de pequeño espesor, en comparación con las otras dos dimensiones (forjados, muros,...), ejecutados in situ con hormigón convencional y para espesores menores a 50 mm el valor límite establecido debe ser reducido un 20%.

Tensiones en la armadura de acero:

$$\sigma_s = n_s \frac{M_0}{I_n} (d - y_c) < 0,80f_{yk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

M_1 : Momento debido a las cargas cuasi-permanentes aplicadas después de la ejecución del sistema de refuerzo de FRP

La profundidad del eje neutro de la sección reforzada se obtiene de:

$$b \frac{y_c^2}{2} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c) - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c) - n_f \cdot A_f \cdot (H - y_c) = 0 \rightarrow y_c$$

Momento de inercia homogeneizado de la sección de hormigón reforzada:

$$I_n = b \frac{y_c^3}{3} + n_s \cdot A'_s \cdot (y_c - c)^2 - n_s \cdot A_s \cdot (d - y_c)^2 + n_f \cdot A_f \cdot (H - y_c)^2$$

Tensiones en los materiales debidas a M_1

Tensiones en el hormigón:

$$\sigma_c = \frac{M_1}{I_n} y_c \begin{cases} < 0,60f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones características} \\ < 0,45f_{ck} \rightarrow \text{Combinación de acciones cuasi – permanentes} \end{cases}$$

Para elementos de pequeño espesor, en comparación con las otras dos dimensiones (forjados, muros,...), ejecutados in situ con hormigón convencional y para espesores menores a 50 mm el valor límite establecido debe ser reducido un 20%.

Tensiones en la armadura de acero:

$$\sigma_s = n_s \frac{M_1}{I_n} (d - y_c) < 0,80f_{yk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

Tensiones en el refuerzo de FRP:

$$\sigma_f = n_f \frac{M_1}{I_n} (H - y_c) \leq \eta \cdot f_{fk} \rightarrow \text{Combinación de acciones características}$$

Tabla 3-3–Factor de conversión para efectos de larga duración η para varios sistemas FRP en cargas de servicio

Modalidad de carga	Tipo de fibra/resina	η_1
Carga de larga duración	Vidrio/Epóxico	0.30
	Arámideo/Epóxico	0.50
	Carbón/Epóxico	0.80
Cíclico	Todos	0.50

TENSIONES BAJO CONDICIONES DE SERVICIO (E.L.S.) PARA LA SECCIÓN REFORZADA

$$\sigma_c = 55.96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = -1408.47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = -373.54 \text{ MPa}$$

Comprobación de tensiones en E.L.S.

$$\sigma_c = 55.96 \text{ MPa} > \sigma_{c,lim} = 5.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = -1408.47 \text{ MPa} < \sigma_{s,lim} = 400.0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = -373.54 \text{ MPa} > \sigma_{f,lim} = -1920.0 \text{ MPa}$$

MEJORA DEBIDO AL REFUERZO: Capacidad Momento Positivo

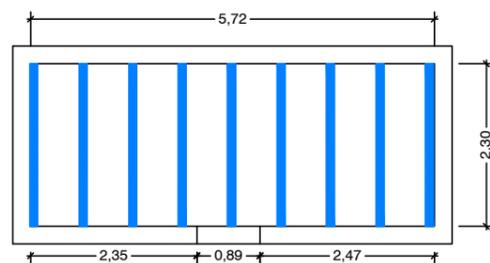
$$M_{Rd,rinf} = 44.58kNm > M_{Rd} = 31.59 kNm$$

La mejora de la resistencia debido al sistema de refuerzo es *41.1%*.

ANEXO III

PLANO

DEPÓSITO DE COMPENSACIÓN 1



REFUERZO

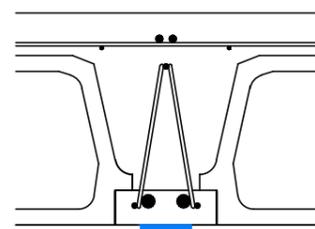
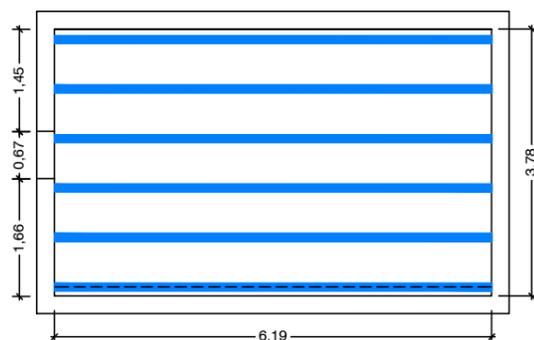


Lámina de fibra de carbono (50x1.4mm)

DEPÓSITO DE COMPENSACIÓN 2



REFUERZO

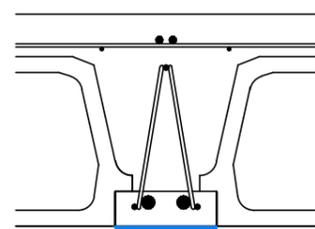
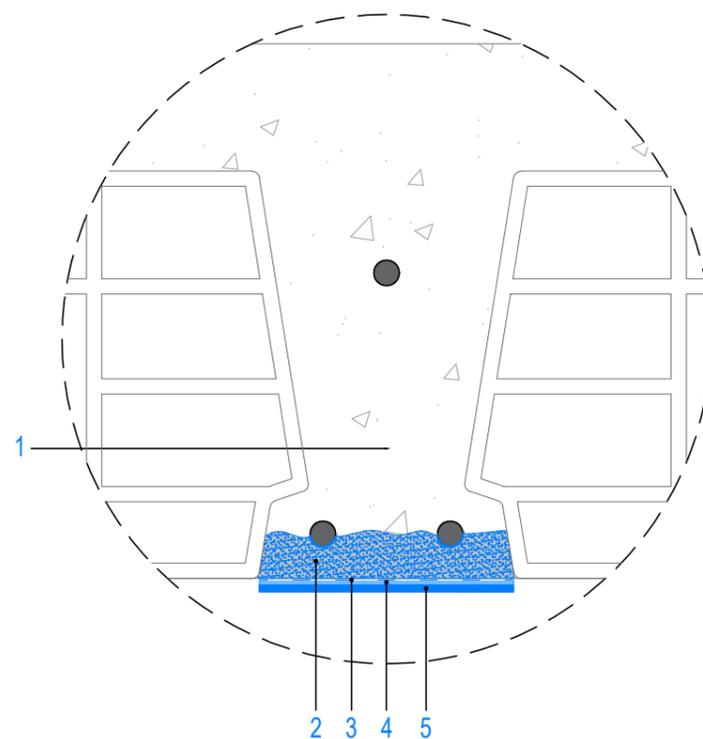


Lámina de fibra de carbono (50x1.4mm)
-2 Unidades-



1. VIGUETA EXISTENTE

2. PASIVACIÓN DE ARMADURAS Y REGENERACIÓN DE SUPERFICIES.

Reparación de sección: pasivado de los hierros a la vista (limpiados hasta obtener un aspecto de metal blanco), mediante la aplicación a brocha de una doble capa de mortero cementoso, anticorrosivo y monocomponente, y posterior reconstrucción con mortero tixotrópico monocomponente, de retracción compensada y fraguado rápido, de clase R4, para espesores de entre 0,3 y 4 cm por capa.

3. IMPRIMADOR EPOXÍDICO BICOMPONENTE

Capa de regularización y encolado con adhesivo epoxídico y bicomponente de consistencia tixotrópica

4. ESTUCO EPOXÍDICO BICOMPONENTE

Resina Epoxi, de baja viscosidad, tolerante a la humedad, utilizada como recubrimiento de sellado para consolidar e imprimir sustratos de hormigón.

5. REFUERZO

Una o más láminas pultrudas de fibra de carbono unidireccional de alta resistencia

Espesor de la lámina:	1,4	(mm)
Ancho de la lámina:	50/100/150	(mm)
Módulo elástico normal a tracción media:	250	(GPa)
Resistencia mecánica a tracción característica:	2.400	(MPa)
Resistencia mecánica a tracción media:	2.500	(MPa)
Deformación a rotura característica:	0,95	(%)
Deformación a rotura media:	1,00	(%)
Resistencia a cortante:	79	(MPa)
Coefficiente de dilatación térmica:	$0,4 \times 10^{-6}$	(m/m/°C)

La superficie del elemento a reforzar debe estar limpia.

Con excepción de las operaciones de reparación, todas las fases de puesta en obra del sistema de refuerzo deben realizarse fresco sobre fresco, con las resinas aún no endurecidas.

Para aplicar una eventual capa de acabado, retirar la película de la cara vista de la lámina de fibra de carbono, enlucir con el adhesivo epoxídico y espolvorear arena de cuarzo seca a saturación sobre la superficie de la capa de resina todavía fresca.