USO DE FIBRAS ESTRUCTURALES Y BARRAS DE FRP PARA ESTRUCTURAS DE FUNDACIÓN DE EQUIPAMIENTOS ELÉCTRICOS

INFORME FINAL DE PROYECTO

Autores:

Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafael Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162

Grupo de Hormigón Estructural, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

Montevideo, julio de 2024









UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

 Título Uso de fibras estructurales y barras de FRP para equipamientos eléctricos. Título breve 	3.Autores Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafael Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura	
Fundatores		
4. Financia Fondo de Desafíos UTE vía Agencia Nacional de Investigación e Innovación	5. Código del proyecto FDU_S_2022_1_173162	6. Apoyan Hormigones Artigas, Ingener, Sika, Halidar.
7. Lugar en el que se desarrolló Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería Univerisdad de la República Montevideo, Uruguay.	8. Iniciativa UTE - Oficina de Proyectos Civiles	9. Período Mayo 2023 - Julio 2024

10. Resumen

Los equipos eléctricos son capaces de inducir corrientes parasitas dentro de los elementos metálicos que se encuentren en un cierto radio de alcance. En consecuencia, de hacerse las fundaciones de estos equipos con hormigón armado tradicional se generarían corrientes dentro del hormigón que eleva su temperatura, pudiendo alcanzar temperaturas que debilitan el acero y su adherencia con el hormigón. El avance en nuevos materiales, asociados a metodologías de diseño, construcción y control, permiten utilizar actualmente materiales no ferrosos como sustitución de la armadura tradicional. En este proyecto se estudiaron e implementaron tres alternativas con refuerzos no metálicos para solucionar el problema planteado: a) Macro-fibras plásticas estructurales (HRF), b) Barras de polímeros con fibras (FRP), y c) Una combinación de las dos anteriores (HRF+FRP). El objetivo del proyecto es, mediante un estudio teórico-experimental, implementar las tres alternativas mencionadas y optimizar una solución. Para ello, se diseñó una solución de cada tipología, las cuales posteriormente se construyeron (3 por tipo) y ensayaron. A su vez, se construyeron 3 réplicas con la solución de hormigón armado convencional. Con los resultado se validó la viabilidad de las soluciones, y la confiabilidad de los modelos teóricos empleados. También, se presenta una resolución teórica (sin contraste experimental) a la elaboración de pilares de FRP. Por último, se desarrolló una guía de diseño, construcción, control y ejecución para estas nuevas tecnologías.

11. Documentos generados	
01 - Informe general	
A1 - Memoria de cálculo	
A2 - Memoria de cálculo de losetas	
A3 - Informe de hormigonado	
A4 - Ensayos y análisis de resultados de losetas	
A5 - Caracterización de los materiales	
A6 - Artículo de difusión	
B1 - Guía de diseño, control y ejecución	
B2 - Memoria de cálculo solución elevada con pilares	
12. Más información	13. Nro. paginas
https://hormigonestructural.com/	118

Revisión 00

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



GRUPO DE

HORMIGÓN

ESTRUCTURAL

UNIVERSIDAD

DE LA REPÚBLICA

URUGUAY

INFORME GENERAL

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 5 de julio de 2024



Tabla de contenido

1.	INT	RODUCCIÓN	3
	1.1.	OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
	-	Objetivos generales	3
	-	Objetivos particulares	4
2.	AN	TECEDENTES	4
	2.1.	REACTORES DE NÚCLEO DE AIRE:	4
	2.2.	SOLUCIÓN ACTUAL DE UTE PARA FUNDACIONES	5
	2.3.	Método Sulzberger [2]	5
	2.4.	FUNDACIONES PARA REACTORES EN URUGUAY, CON REFUERZO NO TRADICIONAL	6
	2.5.	HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)	6
	2.6.	Polímeros reforzados con fibras (FRP)	7
	2.7.	Combinación HRF + FRP	9
3.	DE	NOMINACIÓN DE MOMENTOS	9
4.	GU	ÍA DE LOS ANEXOS Y RESUMEN DE ESTOS	
	4.1.	A1 – Memoria de cálculo	10
	4.2.	A2 – Memoria de cálculo – Losetas para ensayar	10
	4.3.	A3 – INFORME DE HORMIGONADO	11
	4.4.	A4 – Ensayos y análisis de resultados de losetas	12
	4.5.	A5 – Caracterización de los materiales	13
	4.6.	A6 – Artículo de difusión	13
	4.7.	B1 – GUÍA DE DISEÑO, EJECUCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD PARA PLATEAS	13
	4.8.	B2 – Memoria de cálculo de pilares	14
5.	DII	⁻ USIÓN	15
	5.1.	CAPACITACIÓN DE FRP – DIRIGIDO A CONSTRUCTORES	15
	5.2.	6ª JORNADA DE AVANCES EN DISEÑO Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN	15
	5.3.	INGENIERÍA DEMUESTRA	16
	5.4.	Feria de la construcción	16
	5.5.	JORNADA DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO	16
	5.6.	TALLER DE CAPACITACIÓN DE FRP – DIRIGIDO A CALCULISTAS	16
	5.7.	Presentación de artículo en Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (JSIE)	16
	5.8.	VIDEO DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO	16
6.	CO	LABORADORES	17
7.	RE	FERENCIAS	17

Se ha hecho todo lo posible para garantizar la exactitud de la información presentada en este manual. Sin embargo, Udalar no puede aceptar responsabilidad por errores, descuidos o mal uso de la información contenida en este documento. El usuario debe reconocer que ningún manual o reglamento puede sustituir la experiencia y el buen juicio. Esta publicación está destinada al uso de personal competente para evaluar el significado y la limitación de la información que contiene, y aceptar la responsabilidad de su correcta interpretación.



1. INTRODUCCIÓN

Este informe resume los objetivos, metodología y principales resultados del proyecto ANII "*Uso de fibras estructurales y barras de FRP para estructuras de fundación de equipamientos eléctricos.*" (FDU_S_2022_1_173162) desarrollado entre mayo 2023 y julio 2024. Este proyecto surge en el marco del llamado a DESAFIOS UTE 2022, donde la Oficina de Proyectos Civiles de UTE planteó la problemática de realizar fundaciones de equipos reforzadas con acero, y propuso el desafío de realizar fundaciones de hormigón reforzado con fibras. No obstante, este proyecto evalúa la viabilidad no solo del hormigón reforzado con fibras (HRF) plásticas para fundaciones, sino que también el uso de barras de poílmeros reforzados con fibras de vidrio (FRP).

El diseño presentado busca servir de guía para el diseño de una amplia gama de equipos. Asimismo, con el fin de hacer el ejemplo más claro se desarrolla puntualmente el caso de plateas de fundación para Reactores de Núcleo de Aire, en dos configuraciones y con dos alcances: una a nivel de terreno (abarcando un estudio teórico experimental), y una solución elevada a 2,25 m (realizando un estudio teórico).

Los datos de partida para este proyecto son los siguientes planos, otorgados por UTE:

- BX210649 001
- CE-EM22-Reactor en 31.5kv (XYRR 631, 86mH-92A)
- CE-EM25-Fundaciones-Planta de reactores 31.5kv

Además de este informe, se desarrollaron documentos particulares en cada etapa del proyecto, los cuales se describen brevemente en este informe, pero se encuentran completos como anexos.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Objetivos generales

El objetivo del proyecto es, a través de un estudio teórico-experimental, implementar tres alternativas para diseñar, construir y controlar fundaciones estructurales, con soluciones que puedan sustituir completamente el acero, optimizando su solución desde una perspectiva que considere aspectos de funcionamiento, económicos y ambientales. Las tres alternativas a implementar consisten en: a) Hormigón Reforzado con Fibras (HRF); b) Hormigón Armado con barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP); y c) Hormigón Reforzado con una combinación de fibras y barras de GFRP.



El equipo para el cual se calcula la fundación es un reactor de núcleo de aire. Se diseñará una platea de fundación para el mismo, y se realizará un estudio teórico de pilares que permitan elevar la estructura del reactor.

2.2. Objetivos particulares

- 1. Modelar soluciones de fundaciones que utilicen barras de FRP y fibras
- 2. Diseñar, construir y ensayar prototipos que permitan comprobar las resistencias seccionales de elementos construidos con estas soluciones
- 3. Redactar una propuesta de diseño, ejecución y control de calidad para fundaciones de transformadores, que utilicen barras de FRP o HRF.
- 4. Difusión del proyecto

3. ANTECEDENTES

3.1. Reactores de núcleo de aire

Los reactores de núcleo de aire (ver Figura 1) son equipos usados tanto para la distribución como para la transmisión de voltaje en una amplia gama de aplicaciones [1]. En particular, el reactor ejemplo para el que se calcularon las fundaciones en este proyecto tiene un funcionamiento en serie y su objetivo es limitar la corriente de cortocircuito en la barra de compensación de una subestación eléctrica. Su funcionamiento genera un campo magnético en su entorno que afecta no solo a los componentes del reactor, sino también a todos los elementos metálicos dentro de su radio de alcance (llamado "MC2"). Así, puede suponerse que, de haber elementos metálicos dentro de ese radio, existirán corrientes parásitas. Estas corrientes afectan estructuras de hormigón armado tradicionales dado que aumentan la temperatura del acero y provocan fisuras en el hormigón, disminuyendo su durabilidad.



Figura 1: Ilustración de rector de núcleo de aire en estudio[1].

No existe consenso sobre la distancia de influencia del campo magnético, por lo que la misma debe ser establecida por el fabricante del reactor.

3.2. Solución actual de UTE para fundaciones

Actualmente las fundaciones se resuelven con hormigón reforzado con acero, aislando los puntos de contacto entre hierros con plastiducto de manera de evitar que se formen loops cerrados de armadura que puedan alojar corrientes parásitas. Esta solución tiene alto grado de inseguridad, dado que depende mucho de la mano de obra y del control. Así mismo, aumenta los plazos de ejecución, lo cual tiene consecuencias económicas.

En el caso de reactores elevados, los pilares se resuelven con hormigón armado tradicional asilando el acero como se comentó en el párrafo anterior, y las fundaciones se resuelven con dados de hormigón siguiendo el método Sulzberger. Se trata de grandes dados enterrados, que solo requieren armadura mínima por fisuración, y se asume que quedan por fuera del radio de influencia del campo magnético. La utilización de plateas de fundación en lugar de estos grandes dados enterrados mejoraría los tiempos de obra y los costos.

3.3. Método Sulzberger [2]

Principalmente, este método es diseñado para la fundación de postes. La premisa del mismo es asumir que bajo giros limitados de la base (menores a 0,57°) el suelo se comporta de manera elástica, por lo que frente a movimientos intentará volver a su posición, ejerciendo esfuerzos en las paredes del



prisma. Estos esfuerzos se pueden agrupar en dos: las tensiones normales a la base del prisma (que generan un momento M_s), y las tensiones colineales a las paredes (que generan un momento M_b). De esta manera el factor de seguridad de la cimentación queda definido como $FS = \frac{M_s + M_b}{M_v}$ donde M_v es el momento externo desestabilizador.

Partiendo de una geometría de paralepipedo rectangular y estimando el índice de compresibilidad del suelo (mediante ensayos o tablas) se puede llegar a una geometría de bases, las cuales serán un macizo de hormigón.

3.4. Fundaciones para reactores en Uruguay, con refuerzo no tradicional

Actualmente existen plateas ya ejecutadas de hormigón reforzado con fibras plásticas en Latinoamérica. Esta solución propone una ejecución más económica y segura. En Uruguay se pueden encontrar en la subestación MVD B, con un contenido de fibras de 4kg/m3, y tienen menos de un año de ejecutadas (Figura 2).



Figura 2: Fotos de fundaciones ya construidas en MVD B. (Fotos de julio 2023) a) Vista general del reactor b) platea de fundación.

3.5. Hormigón reforzado con fibras (HRF)

El hormigón reforzado con fibras (HRF) se puede definir como aquel que incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas. Distinguiendo por tamaño, existen micro-fibras y macro-fibras según la geometría de las fibras. De estas, las primeras no aportan propiedades estructurales a los elementos si no que cumplen funciones de control de fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, impacto, etc [3]. Por su parte, las macro-fibras estructurales son aquellas que aumentan la ductilidad del hormigón, para considerarlas de este tipo deben cumplir con una serie de requerimientos respecto a su geometría y materiales [3].





Existen macro-fibras de acero, poliméricas, de basalto, carbono, de vidrio [3], [4]. Respecto a las macro-fibras plásticas, existen diversos materiales para elaborarlas pudiendo ser polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, nylon, poliéster etc., y su longitud debe ser de al menos 3 veces el tamaño máximo del agregado [3].

Estructuralmente, la colaboración de las fibras al elemento de hormigón armado toma lugar una vez fisurada la sección. A partir de ese momento las fibras "cosen" la fisura aportando una resistencia residual a la pieza y mejorando la ductilidad. Las dosificaciones de HRF se hacen para garantizar determinados valores de resistencia residual para una apertura de fisura 0,5 mm (fr1), 1,5mm (fr2) y 2,5mm(fr3). Estas resistencias residuales se determinan mediante el ensayo de tracción por flexión EN 14651 [5].

Un inconveniente asociado al ensayo EN14651 es que, debido a su forma, es muy difícil la ejecución del ensayo en probetas extraídas de elementos existentes. Esto sería conveniente para evaluar la respuesta del material en aplicaciones reales, en donde la distribución y orientación de las fibras pueden diferir significativamente de la obtenida en probetas moldeadas. Un caso claro de esta situación es el hormigón proyectado, en donde a causa de la forma de aplicación y por fenómenos como el rebote, el contenido y la orientación de las fibras se ve afectado notoriamente [6]. Además, otro problema que ocurre con frecuencia en América Latina es el hecho que son muy pocos los laboratorios capacitados para hacer el ensayo EN14651 y, normalmente, estos laboratorios pertenecen a las universidades, que no deberían hacer trabajos de control de calidad regularmente. Para subsanar los problemas asociados al ensayo EN14651 descritos, el GHE en conjunto con profesores de la Universidad de Sao Paulo han desarrollado el denominado Ensayo Montevideo (MVD) [7], un ensayo simple, capaz de determinar el comportamiento constitutivo a tracción de muestras compactas de HRF. El grupo ya ha publicado trabajos que muestran la correlación entre el ensayo MVD y el EN14651 en forma analítica y con el ASTM C1609 en forma experimental [8], todos ellos para probetas moldeadas.

En los últimos años ha habido un avance grande a nivel mundial a nivel normativo, de guías y de recomendaciones, incorporando en distintos niveles aspectos de diseño, elaboración, construcción y control de calidad. A nivel normativo referido a diseño estructural, un documento de referencia es el "Código Modelo 2020" [4]. Además, cada vez más países tienen normas en este tema, por ejemplo: España [3], USA [9], Brasil [10] o Asia[11].

3.6. Polímeros reforzados con fibras (FRP)

Las barras de polímeros reforzados con fibras están hechas con fibras de grandes longitudes envueltas en una matriz epoxi, con un acabado que mejora la adherencia [12].

Las barras pueden estar hechas con fibras de distintos materiales, las más usuales son con vidrio (GFRP), con fibras de aramida (AFRP), o con fibras de carbono (CFRP). A su vez, existen de distintos



acabados pudiendo ser corrugados, asimilándose más al acabado tradicional en las barras de acero, o con un acabado arenado.

En general, las barras de polímetros reforzados con fibras alcanzan altas resistencias, tienen un módulo de elasticidad un poco más bajo que el del acero y su comportamiento es elástico hasta la rotura. Estos factores dependen principalmente del polímero dentro de la matriz. Por ejemplo, las barras de CFRP alcanzan resistencias últimas menores que las de GFRP, pero tienen un módulo de elasticidad mayor. Asimismo, las barras de AFRP y las de GFRP tienen módulo de elasticidad similar, pero las de AFRP alcanzan menores resistencias últimas [13]

Las barras de fibra de vidrio son el tipo más común de polímeros reforzados con fibras. Las fibras más comunes están hechas de E-glass, S-glass and Alkali-resistant (AR) glass. De estos, S-glass tiene mayor resistencia a la tensión y un módulo de elasticidad mayor, pero también su costo es el más elevado, por lo que no son tan populares. Por otro lado, aún no hay disponibles fibras alkali-resistant del todo compatibles con el proceso de fabricación de las fibras de vidrio[12]. Por esto es que las fibras más comunes son las de E-glass.

Respecto a su resistencia última, se sabe que, si bien las altas temperaturas afectan la resistencia última de las barras de fibra de vidrio, se pueden considerar constante en el rango de temperatura usualmente expuesto. La tensión última también se ve reducida por corrosión química y durante un largo periodo de carga sostenida. [14]

Las diferencias en el comportamiento mecánico entre las barras de FRP y las barras de Acero tienen consecuencias en los cálculos estructurales. La principal diferencia es que, a diferencia del acero, las barras de FRP no presentan un comportamiento dúctil. Esto provoca que los mecanismos de ruptura deseados para elementos reforzados con barras de FRP no sean los tradicionales. Mas precisamente, en lugar de diseñar para una ruptura por las barras, como es usual para hormigón reforzado con acero, el cálculo recomendado para estas barras consiste en la ruptura por la cabeza de compresión del hormigón [12], [14]. Otra diferencia radica en que el bajo módulo de elasticidad del GFRP implica mayores deformaciones en los elementos.

Las principales ventajas del hormigón reforzado con barras de FRP son una alta durabilidad en ambientes agresivos y neutralidad electromagnética. Además, las barras alcanzan altas resistencias y son mucho más livianas que las de acero [14]. Por otro lado, presentan una dificultad de aplicación: no pueden ser dobladas en obra, por lo contrario, deben pedirse a la fábrica ya dobladas.

Históricamente, los primeros usos de este material como refuerzo datan de alrededor del año 1970. No obstante, la primera versión de la normativa americana (ACI 440.1R) fue emitida en el 2001. Hoy en día, la ACI tiene distintas normas que abarcan distintos aspectos del hormigón reforzado con FRP como son el cálculo (ACI 440.11R-22 [15] y ACI 440.1R-15 [12]), ensayo de barras (ACI 440.3R-12 [16]), construcción (ACI 440.5R-08 [17]), etc. A su vez, en el marco europeo existe la guía del



FIB – Bulletin 40 [14], en Japón la JSCE 1997 [18] que contempla el cálculo y la construcción del FRP.

3.7. Combinación HRF + FRP

La combinación de hormigón reforzado con fibras y barras de polímeros reforzados ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. La motivación de combinar ambos materiales radica en mejorar algunas desventajas del FRP, como su ruptura frágil, grandes aperturas de fisura, y grandes longitudes de anclaje.

Los elementos reforzados con FRP son diseñados con cuantías altas de manera que la falla ocurra por la cabeza de compresión, por lo que mejorando la ductilidad del hormigón se puede mejorar la ductilidad de la pieza. La incorporación de macro fibras confina el hormigón, mejorando su deformación y tensión última. H. Wang demostró que la combinación de FRP y macrofibras plásticas de polipropileno efectivamente aumentan la deformación última del hormigón y logran aumentan en un 30% de la ductilidad final de la piza[19]. También se demostró que disminuyen la apertura de fisura bajo cargas de servicio significativamente [19], [20] y que disminuye las longitudes de anclaje [21]. Una desventaja respecto a la combinación de estos materiales es que la normativa actual no contempla el uso híbrido de ambos materiales.

4. DENOMINACIÓN DE MOMENTOS

A lo largo de este informe se mencionan distintos valores de momento último, que se representan como $M_{i,j,k-mat}$

Donde:

- *i* toma nombre de *u* cuando se hace referencia al momento último de la sección, y *n* cuando se referencia al momento nominal
- *j* toma nombre de *teo* cuando se hace referencia valores teóricos calculados siguiendo la normativa, y *exp* cuando se hace referencia a resultados de ensayos
- k solo se utiliza cuando j es teo, y toma nombre de d cuando hace referencia a resultados teóricos de diseño considerando resistencias características y factores de seguridad sobre los materiales, y m cuando se consideran valores medios de los materiales y no se consideran coeficientes de seguridad
- mat hace referencia al tipo de refuerzo empleado, siendo HRF cuando se trata de un elemento reforzado únicamente con HRF. FRP cuando se trata de un elemento reforzado únicamente con FRP. H + F cuando el elemento es reforzado con una combinación de HRF y FRP, y A cuando es reforzado con acero.



5. GUÍA DE LOS ANEXOS Y RESUMEN DE ESTOS

A continuación, se describen brevemente los anexos del proyecto.

5.1. A1 – Memoria de cálculo

A partir de la información suministrada por UTE respecto a cagas y geometría del reactor, se realizó una propuesta de geometría que verificase la condición de no vuelco con factor de seguridad mayor a 1,5. Luego, se realizó un modelo de cálculo de elementos finitos en el software *Robot Structural Analysis*, a partir del cual se obtuvieron las solicitaciones de diseño.

El diseño final es de plateas de 2,3x2,3x0,2 m3 con los armados presentados en la Tabla 1.

En este anexo se presentan las hipótesis de diseño para las plateas de fundación, así como las verificaciones de flexión, corte y punzonado para los distintos refuerzos, y las normativas empleadas.

	M _{u,teo,d} (kNm/m)	Armado
HRF	6,57	8 kg/m3
FRP	38,28	Doble malla $\Phi 10/12$ (FRP)
HRF + FRP	28,08	Malla centrada Φ 10/12 (FRP) + 8 kg/m3
Acero	33,16	Doble malla $\Phi 10/15$ (Acero)

Tabla 1: Refuerzo resultante para los distintos tipos de plateas.

5.2. A2 – Memoria de cálculo – Losetas para ensayar

Con el fin de contrastar los resultados teóricos con resultados experimentales, se extrapoló la solución presentada en la sección 5.1 a los tas ensayables en el laboratorio.

La geometría de las losetas se definió de manera tal que se asemejen en gran medida a las plateas, pero que puedan ubicarse dentro de la prensa de facultad, y el momento de ruptura esté en el rango de la prensa. De esta manera, la geometría propuesta es la presentada en la Tabla 2. Se construyeron 3 losetas de cada tipo.



Tipo de	Dimonsionos (hybyl)	Estribos	Refuerzo	Refuerzo
Loseta		Estitoos	inferior	superior
HRF	0,45x0,2x3,4 m3	No lleva	No lleva	No lleva
FDD	0,36x0,2x3,4 m3	Acero	FRP 5Ф8	FRP 3Ф6
TNI		Φ6/10		
H+F	0,36x0,2x3,4 m3	No lleva	FRP 5Φ8	No lleva
А	0,45x0,2x3,4 m3	Acero	Acero 3Φ10	Acero 3Ф6
		Φ6/10		

Se diseñaron con una cuantía equivalente a la de las plateas, con la salvedad de que en lugar de varillas $\Phi 10$ de FRP se utilizaron $\Phi 8$, por ser a las que se tenía acceso (ver refuerzo en Tabla 2).

Respecto al cálculo, la diferencia para los cálculos en este caso es que se utilizaron valores medios de resistencia, y no se utilizaron coeficientes de seguridad sobre los materiales. Asimismo, en el diseño de la de HRF se considera el factor de orientación de las fibras k_0 igual a 0,5, obtenido como consecuencia de la geometría del elemento a ensayar.

5.3. A3 – Informe de hormigonado

El hormigonado de las losetas ocurrió el 21 de septiembre de 2023, en el obrador de Ingener dentro de la subestación eléctrica MVD B. Además de las losetas descriptas en la sección 5.15.2 se elaboraron 2 losetas a usar en eventos de difusión, de 4,0x0,4x0,1 m3, reforzadas con 3 barras inferiores Φ 8 de FRP, y hormigón reforzado con fibras. A estas losetas se les dejó una "ventana" de manera de que se pueda visualizar el interior (ver en la Figura 3).



Figura 3: "Ventana" en losetas de difusión.

En este anexo se describen por un lado los materiales empleados, incluyendo las dosificaciones del hormigón y la caracterización en estado fresco del mismo. Y por otro, se describen las precauciones y particularidades que se tuvieron en cuenta a la hora de elaborar las losetas, así como las condiciones de curado y compactación.



5.4. A4 – Ensayos y análisis de resultados de losetas

Las losetas fueron ensayadas luego de los 56 días del hormigonado en el laboratorio del Instituto de Estructuras y Transporte de Facultad de Ingeniería. Se ensayaron en una prensa por control de desplazamientos hasta que se alcanzó la rotura. Los descensos de las losetas se midieron utilizando dos LVDT's situados en el centro longitudinal de la pieza, uno de cada cara (ver Figura 4).



Figura 4: Loseta posicionada para ser ensayada. a) Se muestra el esquema longitudinal de la loseta. b) Se muestra la posición de los LVDT'S (señalados con círculos rojos)

Para cada loseta se obtuvo una curva fuerza-desplazamiento, que permitió obtener las curvas M_{exp}^* desplazamiento para cada una. Donde M_{exp}^* es el momento que está ejerciendo la prensa sobre la loseta.

Una vez caracterizados todos los materiales (sección 5.5), se ajustaron los modelos de cálculo y se obtuvieron los valores de momento último teórico a utilizar en la comparación.

Todos los tipos de losetas mostraron un comportamiento esperado para su tipo (ver Figura 5), y todos alcanzaron el momento último esperado (ver Tabla 3).



Figura 5: Curvas Mexp-desplazamiento para los distintos refuerzos. a) Se muestran todos los resultados. b) Se muestran los resultados para un momento de hasta 15 kNm, y un desplazamiento de hasta 20 mm.



Tabla 3: Resultados experimentales individuales y promedios para las losetas. El error presentado es calculado como el cociente entre la diferencia $M_{u,exp,promedio}^* - M_{u,teo,m,2}^*$, y $M_{u,exp,promedio}^*$.

	$M_{u,exp}^{*}$ (kNm)		$M^*_{u,exp,promedio}$ (kNm)	$M^*_{u,teo,m,2}$ (kNm)	Error	
	1	2	3			
HRF	1,11	4,86	0,94	2,3	1,56	32%
FRP	28,2	31,39	28,13	29,24	24,74	15%
H+F	19,85	20,92	19,86	20,21	19,04	6%
А	21,37	25,17	23,23	23,26	15,81	32%

De los refuerzos estudiados, el de mayor dispersión de resultados fue el HRF. Sin embargo, esta dispersión es inherente a la naturaleza de su elaboración.

5.5. A5 – Caracterización de los materiales

Para la caracterización en estado endurecido del HRF y del hormigón convencional se construyeron probetas que fueron curadas en Hormigones Artigas, y ensayadas en Facultad de Ingeniería. El detalle de las probetas elaboradas y ensayadas se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Descripción de las probetas elaboradas y ensayadas. (*) 6 eran prismáticas de 15x15x20. (**) 3 eran prismáticas de 15x15x55.

Cantidad	Geometría	Hormigón	Ensayo
6	Cilindros 15x30	C30	UNIT 1920-4 [22]
6	Cilindros 15x30	HRF30	UNIT 1920-4[22]
18 (*)	Cubos 15x15x15	HRF30	Ensayo MVD[7]
16 viguetas (**)	Prismas 15x15x60	HRF30	Ensayo EN-14651[5]

Además, se realizó el ensayo a tracción de las barras de FRP donde se validaron algunas pr propiedades brindados por el fabricante.

5.6. A6 – Artículo de difusión

Se redactó un artículo de difusión breve sobre la campaña experimental realizada para el proyecto. El mismo se presentó en las Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (JSIE).

5.7. B1 – Guía de diseño, ejecución y control de calidad para plateas

Establece principales aspectos teóricos a contemplar en el cálculo para los distintos materiales, precauciones en la construcción, y medidas de seguridad para la manipulación de los materiales.



5.8. B2 – Memoria de cálculo de pilares

Se calcularon pilares cuadrados de 35x35 reforzados únicamente con FRP, capaces de elevar la estructura del reactor 2,25 m de altura. También se dimensionaron las fundaciones para esta situación, y se elaboró una planilla excel capaz de trazar los diagramas de interacción Directa-Momento para pilares de FRP.

Esta solución se elaboró desde un marco teórico, sin contraste experimental.

6. CONCLUSIONES

Se diseñaron plateas de fundación con tres tipos de refuerzo no metálico: Reforzada solo con macrofibras, reforzada solo con barras de FRP, y reforzada con una mezcla de ambos. Asimismo, se logró extrapolar estas soluciones a elementos ensayables en el laboratorio, las cuales se construyeron y ensayaron.

Los modelos desarrollados para todos los materiales estudiados muestran una alta concordancia con los resultados experimentales, tanto en términos de esfuerzos como de deformaciones. Esto indica que las metodologías empleadas son robustas y pueden ser aplicadas con confianza en proyectos futuros.

Para el refuerzo con polímeros reforzados con fibra (FRP), existe normativa específica que permite su diseño exclusivo utilizando este material. Los resultados experimentales de los momentos últimos han demostrado ser superiores a los teóricos. Sin embargo, existen dificultades constructivas significativas en el uso de barras dobladas, lo que complejiza la instalación de estribos. En cuanto al refuerzo con fibras estructurales (HRF), también hay normativas que permiten su diseño. No obstante, las resistencias alcanzables con HRF son inferiores a las obtenidas con FRP. Además, utilizando fibras de plástico, no sería posible reforzar reactores de mayor tamaño al utilizado en el ejemplo sin incrementar considerablemente el espesor de la fundación. La combinación de FRP y HRF presenta una solución prometedora, donde el FRP puede ser utilizado para absorber los esfuerzos de flexión, y el HRF los de corte y punzonado. No obstante, y aunque ya existen varios resultados experimentales que respaldan esta estrategia, todavía no hay una normativa que abarque explícitamente el diseño conjunto de estos materiales.

Todas las soluciones presentadas implican una mejora en la confiabilidad del elemento respecto a la solución actual, así como una reducción en los plazos de obra y un aumento de la durabilidad. Aun así, dada la reciente incorporación de estas tecnologías a la industria uruguaya, recomendamos un estricto control de calidad, tanto del refuerzo aislado como de la platea durante su construcción.

Respecto a los materiales, todos se lograron caracterizar adecuadamente. Además, se comprobó la correlación entre el ensayo MVD y el ensayo según EN 14651. Esto implica que sería viable un control de calidad durante la obra mediante ensayos MVD, lo cual simplifica significativamente la



tarea por tratarse de probetas más livianas, y que pueden ensayarse bajo prensas usuales. Aun así, se recomienda ejecutar ambos ensayos en la etapa de diseño de dosificación.

Finalmente, se considera la posibilidad de utilizar refuerzos puntuales con acero, evitando la formación de "loops" que podrían generar corrientes parásitas. También se puede explorar el refuerzo combinando fibras de acero y plásticas, aunque esto requeriría una evaluación adicional del comportamiento electromagnético para asegurar su viabilidad.

En resumen, cada material y combinación estudiados presentan ventajas y desafíos específicos, y su aplicación dependerá de las condiciones particulares de cada proyecto y de la evolución de las normativas que regulan su uso.

Por otro lado, se generó memoria de cálculo y planos para la configuración elevada. Esto se hizo mediante un estudio teórico basado en la última versión de la normativa de diseño de FRP de la ACI [15].

7. DIFUSIÓN

Existieron diversas instancias de difusión al proyecto, y de acercamiento de la nueva tecnología tanto a la industria como a estudiantes y egresados. Creemos que estas instancias son esenciales para la inserción de los materiales en el medio.

7.1. Capacitación de FRP – Dirigido a constructores

El día 17 de agosto 2023 se realizó una presentación al personal de obra de Ingener con las precauciones a tener a la hora de trabajar con las barras de FRP. Esta instancia colabora a una mejor inserción de las tecnologías al mercado, dado permite que el personal que va a trabajar directamente con él pueda entenderlo mejor, así como sentirse más seguro y confiado de trabajarlo.

7.2. 6^a Jornada de avances en diseño y tecnología del Hormigón

Se trata de un evento dirigido a profesionales del sector donde se exponen novedades relativas al hormigón, que toma lugar en Facultad de Ingeniería. Esta edición tuvo lugar el 28 de agosto 2023 y hubo exponentes de diversos países de la región presentando avances en el hormigón reforzado con fibras, en el desarrollo de barras de FRP, y casos de estudios de puentes.

El proyecto se presentó en un stand fuera del Anfiteatro del Edificio polifuncional José L. Massera, con un póster informativo y muestra de los refuerzos utilizados.



7.3. Ingeniería demuestra

El 6 y 7 de octubre del 2023 se presentó una de las vigas realizadas para difusión. A esta se le incorporó un LVDT con el cual, a partir del descenso de la loseta, estimaba el peso de quien se paraba sobre ella. Este evento permitió atraer la atención tanto de estudiantes como de egresados que se detuvieron a preguntar sobre el proyecto y los materiales novedosos.

7.4. Feria de la construcción

Este evento ocurrió entre el 18 y el 22 de octubre 2023, en la Rural del Prado. Tuvimos la oportunidad de exponer la segunda viga elaborada para difusión en el stand de la Liga de la Construcción.

7.5. Jornada de difusión del proyecto

El día 6 de mayo de 2024 se realizó una jornada de difusión de resultados y de introducción de las nuevas tecnologías: el FRP y el HRF. Luis Segura realizó una presentación sobre el HRF, luego Daniel Cardoso (Dr. Ing de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro) realizó una presentación sobre el FRP. Una vez finalizada la introducción, Victoria Olivera y Bruno Bouchard presentaron el proyecto, indicando objetivos, metodología, resultados y conclusiones alcanzadas. Esta jornada tuvo una invitación abierta al público general.

7.6. Taller de capacitación de FRP – Dirigido a calculistas

El día 7 de mayo 2024 se realizó una jornada de capacitación en diseño de FRP, dictada por Luis Segura, Daniel Cardoso, Victoria Olivera y Bruno Bouchard. Se vio una introducción general con principales diferencias respecto al cálculo hormigón reforzado con acero, seguido por ejemplos de cálculo de una viga a flexión y corte, una losa y un pilar.

7.7. Presentación de artículo en Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (JSIE)

Se presentó un artículo breve, de 5 páginas, que resume algunos de los resultados obtenidos en losetas.

7.8. Video de difusión del proyecto

Se elaboró un video de difusión del proyecto con una duración de aproximadamente 4 minutos, disponible en el perfil de Youtube del Grupo de hormigón estructural (https://www.youtube.com/watch?v=l6igJtR6AI4).



8. COLABORADORES

Este proyecto fue financiado por ANII con el fin de resolver un problema específico para UTE. Además, contó con colaboradores de varias empresas de la industria uruguaya, como son: Ingener, Hormigones Artigas, Sika y Halidar.

Ingener estuvo a cargo de la construcción de las losetas, y de las probetas para caracterización. Hormigones Artigas suministró el hormigón para la construcción, también realizó probetas para estudiar la dosificación de la mezcla, y se encargó del curado de las probetas de caracterización. Sika contribuyó con las fibras para la elaboración del HRF, así como Halidar aportó las barras de FRP.

Desde Facultad de Ingeniería, recibimos el apoyo de Rafael Leites de Moraes, Eneas Do Santos, Ignacio Acher y Anyela Molina para la ejecución de los ensayos. Además, Alberto Gómez y Federico Gonda colaboraron en la difusión del proyecto.

9. Referencias

- [1] Fabricante, "BX210649 001."
- [2] T. Maciejewski and O. J. Piñón Jiménez, "Calculo de fundaciones para lineas de transmision de energia electrica con el metodo de Sulzberger," *Revista Electrotécnica Argentina*, pp. 59–69, 1964.
- [3] Gobierno de España, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA," 2008.
- [4] International Federation for Structural Concrete (FIB), "Model Code 2020," 2020.
- [5] British Standards Institution., *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* 2005.
- [6] H.S. Armelin, "Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete," 1997, *The University of British Columbia*.
- [7] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. De Figueredo, "Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test, Constr. Build. Mater," 2018.
- [8] V. Cornelius, D. Hasard, M. Neme, M. Pedrón, and S. Riveiro, "CORRELATION BETWEEN 4-POINT BENDING TEST AND MONTEVIDEO TEST FOR THE CHARACTERIZATION OF FRC."
- [9] ACI Committee 544, *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. 2018.
- [10] ABNT NBR 16935, "Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras— Procedimento," 2021.



- [11] SS 674, "Fibre concrete—design of fibre concrete structures. Singapore Standard, Singapore Standards Council.," 2021.
- [12] ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute, 2015.
- [13] Fédération internationale du béton. Task Group 9.3. Working Party., FRP reinforcement in RC structures : technical report. International Federation for Structural Concrete, 2007.
- [14] fib, "FRP reinforcement in RC structures," 2007.
- [15] ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber- Reinforce Polymer (GFRP) Bars Code and commentary," 2022.
- [16] ACI Committee 440, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures," 2012.
- [17] ACI Committee 440, "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars," 2008.
- [18] Japan Society of Civil Engineers, "RECOMMENDATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES USING CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS," 1997.
- [19] H. Wang and A. Belarbi, "Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars," *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 5, pp. 2391–2401, May 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.040.
- [20] W. K. Lee, D. C. Jansen, K. B. Berlin, and I. E. Cohen, "Title no. 107-S31 Flexural Cracks in Fiber-Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars," 2010.
- [21] S. Sólyom and G. L. Balázs, "Influence of FRC on bond characteristics of FRP reinforcement," 2016.
- [22] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS UNIT 1920-4, "Ensayos de hormigón Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido," 2020, *Montevideo*.

Revisión 01





Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162

USO DE FIBRAS ESTRUCTURALES Y BARRAS DE FRP PARA ESTRUCTURAS DE FUNDACIÓN DE EQUIPAMIENTOS ELÉCTRICOS

Anexo 1 - Memoria de cálculo

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafel Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 5 de julio de 2024



Tabla de contenido

1.	IN	NTRODUCCIÓN	
	1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	
	1.2.	Hipótesis de cargas	
	1.3.	ESQUEMA BÁSICO DE CÁLCULO	4
	1.4.	Ambiente de exposición	6
	1.5.	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	6
	1.6.	NORMATIVA Y BASES DE CÁLCULO	
	1.7.	MATERIALES	
	1.8.	CARGAS Y COMBINACIÓN DE CARGAS	7
2.	VI	ERIFICACIONES GEOTÉCNICAS	8
	2.1.	VERIFICACIÓN DE TENSIONES ADMISIBLES	
	2.2.	VERIFICACIÓN DE NO VUELCO	
3.	M	ODELO DE ELEMENTOS FINITOS	9
4.	VI	ERIFICACIONES PARA LOSA HRF	9
	4.1.	VERIFICACIÓN A FLEXIÓN	9
	-	Momento de diseño	9
	-	Cuantía mecánica mínima	
	4.2.	VERIFICACIÓN A CORTE	
	-	Verificación a punzonado	
5.	VE	ERIFICACIONES PARA PLATEA CON BARRAS DE FRP	
	5.1.	VERIFICACIÓN A FLEXIÓN	
	-	Momento último	
	-	Cuantía geométrica mínima	
	-	Cuantía mecánica mínima	
	5.2.	VERIFICACIÓN A CORTE	
	-	Punzonado	
	5.3.	Anclajes	
6.	VI	ERIFICACIONES PARA LA SOLUCIÓN MIXTA	
	6.1.	VERIFICACIÓN A FLEXIÓN	
	-	Momento último	
	-	Cuantía mecánica mínima	
7.	RI	EFERENCIAS	



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es establecer las bases de cálculo utilizadas para el cálculo de la platea de fundación para reactores de núcleo de aire, bajo el proyecto FDU_S_2022_1_173162 de ANII. En particular se implementarán barras de FRP y hormigón reforzado con macro fibras plásticas ya que la estructura se verá expuesta a grandes campos magnéticos que elevan la temperatura del acero y dañan el hormigón.

1.1. Descripción de la estructura

La estructura de interés es una platea de 2,3 x 2,3 x 0,2 m sobre la que se apoya un reactor de núcleo de aire, de una altura menor a 1,7 m.

1.2. Hipótesis de cargas

Se conocen los esfuerzos sobre el reactor a través del plano BC210649 – 001 otorgado por UTE, siendo:

- *F_{c.c}+F_v*: Fuerza de cortocircuito y Fuerza de viento = 15,10 kN. Ambas son fuerzas horizontales, cuya dirección puede variar. La fuerza de cortocircuito es una fuerza accidental que actúa sobre los reactores ocasionalmente.
- F_c : Fuerza del cable = 0,49 kN Esta es una fuerza de dirección variable.
- P_p : Peso propio de la estructura: 3,87 kN

En la Figura 1 se puede ver una de las ilustraciones presentes en el plano, donde se ve el punto de aplicación de $F_{c,c}+F_{\nu}$, y de F_c .



Figura 1: Vista frontal de un reactor - estructura a soportar por la platea

1.3. Esquema básico de cálculo

Se asume que el reactor se comportará como un rígido que se encuentra articulado a la platea en estudio. Además, se considera que el suelo sobre el que apoya la misma es elástico, con un módulo de balasto uniforme en toda su extensión y sin capacidad de soportar tracciones.

En la Figura 2 se puede observar el esquema básico de cálculo de la estructura, considerando una aplicación de las fuerzas horizontales ($F_c y F_v + F_{c.c.}$) según la dirección de A de la Figura 3. Las fuerzas horizontales actuando sobre la estructura pueden actuar tanto sobre la dirección A, como sobre la dirección B de la Figura 3.

Por su parte, dado F_c es de dirección variable, se considera la dirección vertical la cual implica la peor situación para el vuelco.





Figura 2: Esquema básico de cálculo (vista en alzado).



Figura 3: Posibles direcciones de aplicación de la carga horizontal (vista en planta).



1.4. Ambiente de exposición

El ambiente de exposición de mayor incidencia en la durabilidad del elemento es el campo magnético en el que se ve inmerso, ya que este induce corrientes parásitas dentro de la masa de hormigón que aumentan su temperatura y perjudican su vida útil. Para evitar este problema se propone el uso de refuerzos no metálicos, por lo que tampoco presentarán problemas de corrosión.

Considerando las clases generales de exposición relativas a la corrosión de armaduras definidas por la EHE-08[1], se tiene que el ambiente de exposición será igual al de un hormigón en masa identificado como Clase I (no agresiva).

Aun así, las barras de FRP pueden presentar alteraciones en su comportamiento debido a la exposición a agua, exposición ultravioleta, elevada temperatura, soluciones alcalinas o acidas y la salinidad. Considerando una exposición de la pieza al suelo y al agua se tiene un coeficiente de reducción de tensión de diseño Ce=0,7 (ACI 440.1R-15)[2].

1.5. Características geotécnicas

Dado que se trata de un elemento a construirse de manera sistemática sobre diferentes suelos es imposible conocer con exactitud las características de este. Es por lo que, sin perder generalidad, se trabaja con dos valores distintos de módulo de balasto, considerando por un lado la estructura sobre un suelo de 3 kg/cm3, y por otro lado sobre 10 kg/cm3. Se dimensiona con el peor de estos en cada solicitación de interés.

Se considera que la tensión admisible del suelo es igual a 100 kPa.

1.6. Normativa y bases de cálculo

La solución de Acero es calculada a partir de la instrucción española EHE-08[1], al igual que la de HRF que es calculada según el Anejo 14 de dicha instrucción.

La solución de FRP fue diseñada según la ACI 440.1R -15[2], y la solución mixta es calculada a partir de la ACI 544.4R-18[3].

1.7. Materiales

Hormigón:

- f_{ck}= 30 MPa = f_c'. Resistencia asociada a la compresión a 28 días de edad, de acuerdo a la norma UNIT ISO 1920-4[4]
- $\gamma_c=1,5$. Factor de seguridad sobre el hormigón
- $\varepsilon_{cu} = 3,5\%_0$

Hormigón reforzado con fibras:



- HMF 30 / P -1,5 1,5 / F / 20 48 / I Clasificación según Anejo 14 EHE-08 [1].
 - Donde:
 - HMF-30: Hormigón en masa clase C30
 - P 1,5 1,5: Fibras plásticas, con una dosificación tal que la resistencia residual del hormigón resulta en 1,5 tanto para el $f_{r1,k}$ (primer valor de la lista) como para el $f_{r3,k}$.
 - F: Indica la consistencia de la dosificación, en este caso se trata de una dosificación fluida (de entre 10 y 15 cm)
 - 20-48 Indican el tamaño máximo del agregado (20) y la longitud de las fibras (48)
 - Ambiente de exposición
- f_{R3,k}= 1,48 MPa Resistencia característica residual a flexotracción asociada a una apertura de fisura (CMOD) de 2,5 mm, obtenida a partir del ensayo de probetas prismáticas de ancho 15x15x60 a los 28 días de edad, ensayadas de acuerdo a la norma UNE-EN 14651 [5].

Barras GFRP:

Se consideran barras de Glass Fiber Reinforced Polymer Bar con propiedades:

- $f_{fu}^* = 800 \text{ MPa}$
- $E_f = 50$ GPa. Módulo elástico de las barras de FRP

Barras acero

- $f_{yk} = 500$ MPa Resistencia a tracción según UNIT 843-1995[6]
- E_s= 200 GPa. Módulo elástico de las barras de acero

1.8. Cargas y combinación de cargas

En la Tabla 1 se presentan las combinaciones de carga utilizadas en los cálculos. Las cargas son las presentadas en la sección 1.2.

Tabla 1: Factores de seguridad aplicadas a las distintas cargas, según las distintas combinaciones.

Norma	Combinación	Рр	$F_{V+F.C.C}$	F _c
EHE	ELU	1,35	1,50	1,50
ACI	LRDF	1,20	1,60	1,60

Dado que se desconoce la naturaleza de la fuera F_c , se asumirá el peor caso, que es que ambas sean de la misma naturaleza.



2. VERIFICACIONES GEOTÉCNICAS

2.1. Verificación de tensiones admisibles

El diagrama de cuerpo libre considerado para el cálculo es el presentado en la Figura 4.

Para esta verificación se asume una distribución triangular de tensiones en el suelo. A partir de la misma, y limitando la tensión del suelo a la de diseño, se puede hacer un equilibrio de esfuerzos verticales resultando que x=0,24 m. Es decir, existe un valor de x positivo tal que las tensiones en el suelo son admisibles.



Figura 4: Diagrama de cuerpo libre considerado para la verificación a vuelco.

2.2. Verificación de no vuelco

Considerando que el posible vuelco se da en torno al punto O se tiene que el Factor de seguridad (F_s) es igual al cociente entre el momento estabilizador (M_{est}) y el momento desestabilizador (M_{desest}):

$$F_{S} = \frac{M_{est}}{M_{desest}} = \frac{M_{pp} + M_{react}}{M_{c} + M_{suelo} + M_{V+F.C.C}} = 1,75 > 1,5$$

Donde:

- M_{pp} es el momento generado por el peso propio de la platea
- M_{react}^{\square} es el momento generado por el peso del reactor
- $M_{V+F.c.c}$ es el momento generado por el esfuerzo $F_v + F_{c.c}$
- M_c es el momento generado por el esfuerzo F_c

Para esta verificación se considera que M_{suelo} es nulo, dado que en el estado límite de vuelco las tensiones en el suelo tienden a 0.



3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se trabaja con dos modelos planos con el fin de estudiar los efectos de las dos direcciones más críticas de aplicación de carga (Figura 3). Los modelos son realizados en el software Robot Structural Analysis, que trabaja mediante elementos finitos, y son calculados a partir de un análisis no lineal de manera de despreciar las tracciones en el suelo.

Las solicitaciones de diseño obtenidas se pueden ver en la Tabla 2 distinguiéndose las direcciones de carga de la Figura 3, donde los valores de momentos de diseño son según la teoría Wood Armer.

	Dirección A		Dirección B	
	ELU	LRDF	ELU	LRDF
m_x^+ (kNm/m)	3,00	2,97	2,88	5,80
$m_x^-(kNm/m)$	1,75	5,42	2,84	5,59
m_y^+ (kNm/m)	1,62	3,25	2,88	5,88
$m_y^-(kNm/m)$	1,09	3,85	2,83	5,58
q_x (MPa)	0,08	0,09	0,09	0,09
$q_{\gamma}(MPa)$	0,09	0,08	0,09	0,09

Tabla 2: Solicitaciones de diseño extraídas de Robot Structural Analysis. El subíndice indica la dirección que arma. m indica momentos, y q tensiones rasantes.

4. VERIFICACIONES PARA LOSA HRF

4.1. Verificación a flexión

A partir de ensayos de caracterización previa para una determinada dosificación, se determinó que se obtiene el hormigón necesario para un hormigón C30 con cuantía de fibras de 8 kg/m^3 .

- Momento de diseño

Se asume que el esquema de tensiones en la sección es igual al presentado en la Figura 5. Donde existe una tracción uniforme en toda la pieza dada por las fibras, y una compresión concentrada en el extremo superior por el hormigón. Del equilibrio de la sección resulta que el momento es igual a

$$M = k_0 f_{ct,R,d} \frac{bh^2}{2}$$

Donde:

- b es el ancho
- h es la altura
- $f_{ct,r,d} = \frac{f_{ct,r,k}}{1,5} = \frac{f_{r3,k}}{3*1,5}$
- k_0 es el factor de orientación de las fibras, en este caso igual a 1





Figura 5: Esquema de tensiones dentro de una sección de HRF.

Se verifica que el momento último de la pieza es mayor que cualquiera de los momentos de diseño presentados en la Tabla 2.

$$M_u = \frac{f_{r3,k}h^2}{1,5*3*2} = 6,57 \ kNm/m > M_d$$

- Cuantía mecánica mínima

Esta exigencia implica imponer que el momento último de la pieza sea al menos igual que el momento de fisuración, es decir $\frac{M_u}{M_{fis}} \ge 100\%$. Esta limitante existe para evitar que se dé una ruptura frágil en la pieza cuando el momento de diseño supera al momento de fisuración. En este caso, cumplir con esta exigencia implica un volumen de fibras plásticas inviable en la práctica. Asimismo, como el momento de diseño es significativamente menor que el de fisuración de la pieza, se recurre al comentario del artículo 42.3.2 de la EHE-08[1]. Este comentario minora la cuantía mecánica mínima exigida para piezas donde el momento de diseño es significativamente menor que el momento que el momento de fisuración. Aplicando esto la cuantía requerida es $\alpha A_{s,nec}$, donde $A_{s,nec}$ es la armadura necesaria a partir del momento de diseño y $\alpha = 1,5 - 1,95 \frac{A_{s,nec}hf_{yd}}{f_{cd}W}$, con W igual al módulo de rigidez de la pieza.

Para utilizar este comentario de la norma calcula considerando una pieza equivalente de acero, con el fin de obtener la relación mínima a cumplir entre el momento último de la pieza y su momento de fisuración. Considerando un momento de diseño igual al máximo de la Tabla 2 y un canto útil igual a 0,75h, resulta que $A_{s,nec} = 0,49 \ cm^2$ y $\alpha = 1,46$, por lo que la cuantía mínima a disponer por norma es igual a $A_{s,mec,min,red} = 0,71 \ cm^2$. Por otro lado, la cuantía mecánica mínima sin considerar esta reducción es igual a $A_{s,mec,min} = 7,14 \ cm^2$.

Esto implica una relación $\frac{A_{s,mec,min,red}}{A_{s,mec,min}} = 10\%$, que es equivalente a pedir $\frac{M_u}{M_{fis}} = 10\%$. En nuestro caso se tiene $M_{fis} = f_{ctm,fl} \frac{bh^2}{6} = 27,34 \text{ kNm/m}$, y se verifica $\frac{M_u}{M_{fis}} = \frac{6,57}{27.34} = 24\% > 10\%$



4.2. Verificación a corte

- Verificación a punzonado

Se realiza una verificación simplificada, contemplando únicamente la resistencia de las fibras al rasante, despreciando la colaboración del hormigón.

Cada reactor está vinculado a la platea mediante cuatro apoyos. De estos, el máximo esfuerzo nominal que puede ejercer uno de los apoyos del reactor es de 10,56 kN. A este valor se le aplica un coeficiente de mayoración igual a 1,5 de manera simplificada y estando del lado de la seguridad, resultando un esfuerzo de diseño igual a 15,86 kN. Esta carga es aplicada sobre la platea en un cuadrado de 150 mm de lado (ver Figura 6), equivalente a un esfuerzo por metro de 26,39 kN/m aplicado en el perímetro del apoyo.



Figura 6: Detalle de vínculo de reactor con platea, extraído del plano BX210649.

Siguiendo el Artículo 46 del Anejo 14 de la EHE-08 [1] se tiene un valor aproximado de la tensión de punzonamiento, igual a $\tau_{rd} = 0.5 f_{ct,rd}$, equivalente a un esfuerzo de $0.5 f_{ct,rd} d = 36.0 \ kN/m$ superando el valor de diseño, y verificando el estado.



5. VERIFICACIONES PARA PLATEA CON BARRAS DE FRP

5.1. Verificación a flexión

Se propone un armado uniforme superior e inferior de $\Phi 10/12$ (6,83 cm2/m).

Momento último

A diferencia del Hormigón armado tradicional, que se diseña para que la ruptura sea por el acero, para una pieza reforzada con FRP la ruptura puede ser por compresión hormigón o por el FRP. De esta manera, para el cálculo lo primero que debe conocerse es la cuantía de equilibrio de la sección. Y a partir de ella, se conoce si la ruptura será por hormigón o por FRP.

La cuantía de equilibrio se calcula (según la ACI-440.1R-06 [2]) como:

$$\rho_{fb}=0.85\beta_1\frac{f_c'}{f_{fu}}\frac{E_f\varepsilon_{cu}}{E_f+f_{fu}}$$

Donde:

- ε_{cu} = deformación última del hormigón a compresión
- β_1 es un factor igual al cociente entre la profundidad del rectángulo de tensiones en la sección sobre la profundidad de la línea neutra, igual a 0,85 para f'_c menor o igual a 28 MPa.
- El resto de los parámetros se definen en la sección 1.7.

La tensión de diseño (f_{fu}) a usar en los cálculos debe ser minorada según el factor de reducción ambiental (C_e) , resultando $f_{fu} = C_e f_{fu}^* = 0.7 * 800$ MPa = 560 *MPa*.

Considerando esta tensión se tiene que la cuantía de balance de la pieza $\rho_{fb} = 0,0091$, y la cuantía de la pieza es igual a $\rho_f = 0,0034 < \rho_{fb}$ por lo que la pieza rompe por tracción, y el factor de seguridad a considerar sobre el momento último nominal es igual a $\Phi = 0,55$.

Dado el mecanismo de ruptura supuesto se conoce la tensión y la deformación última del FRP, pero se desconocen estos datos sobre el hormigón. Para resolver esto, la norma propone una manera simplificada, y del lado de la seguridad, para calcular el Momento nominal en este caso. Siguiendo con la guía se tiene que:

$$M_{n,teo,d-FRP} = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right)$$

Donde x es la posición de la línea neutra, calculada asumiendo que se alcanza la deformación última del hormigón y del FRP a la vez. Es decir:

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d$$

Esta última hipótesis es conservadora y otorga un valor último menor que el real.



La deformación última del FRP es igual a

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} = 1,1\%$$

Siguiendo con la guía se tiene que:

$$M_{u,teo,d-FR} = \Phi A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) = 30,68 \ kN/m$$

Verificándose los momentos de diseño para los distintos casos.

Se desprecia la colaboración de las barras en la cara a compresión.

- Cuantía geométrica mínima

De manera análoga que para el caso del HRF, se busca que la tracción soportada por las barras dispuestas sea mayor a 180 kN. En este caso se dispone un total de $20\Phi10$, lo que equivale a una tracción última de 880 kN, verificando el requisito.

- Cuantía mecánica mínima

En los casos en los que $\rho < \rho_{fb}$ se exige una cuantía mínima igual a

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{fc'}}{f_{fu}} d \ge \frac{2.26}{f_{fu}} d$$
$$A_{f,min} = 6.57 \ cm2/m$$

5.2. Verificación a corte

Punzonado

El valor de diseño es igual al presentado en la sección 4, es decir 26,39 kN/m. Para este tipo de platea la colaboración al punzonado se da únicamente por el hormigón. Siguiendo el Artículo 46.3 de la EHE-08[1] se tiene que

$$\tau_{rd} = \frac{0.18}{\gamma_c} \xi (100\rho_l f_{ck})^{1/3} \ge \frac{0.075}{\gamma_c} \xi^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

Donde:

- $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \le 2 \text{ con d en mm. En este caso } \xi = 2$
- $\rho_l = \frac{A_s}{A_c} \le 0,02$. En este caso $\rho_l = 0,0034$

Resultando $\tau_{rd} = 2121 \ kPa$, que integrados en el espesor de la platea equivalen a 339,41 kN/m, superando el esfuerzo de diseño.

5.3. Anclajes

Dado que las barras de FRP no pueden ser dobladas en sitio, los anclajes deben realizarse mediante prolongación recta.



Se tomará como un anclaje mínimo el dispuesto por Japan Society for Civil Engineering[7], igual a 20 veces el diámetro de la varilla.

6. VERIFICACIONES PARA LA SOLUCIÓN MIXTA

6.1. Verificación a flexión

Se propone un armado de $\Phi 10/12$ con hormigón HMF – 30 / P -1,88 – 1,70 / F / 20 – 48 / I, con la armadura dispuesta en el centro de la altura de la sección.

- Momento último

En este caso la pieza se arma como una combinación de las últimas dos, considerando que el refuerzo predominante sobre la sección es la armadura de FRP y que ésta fija la posición de la línea neutra, por lo tanto el momento último de la pieza es igual a $M_{u, HRF} + M_{u, FRP}$. Consecuentemente se asume que la cuantía de balance se calcula con la misma fórmula presentada, resultando $\rho_{fb} = 0,0091$.

Considerando el armado propuesto para la platea de FRP la cuantía es igual $\rho_f = 0,0067$ por lo que la pieza falla por tracción de las barras de FRP. El cálculo del momento último por el FRP es análogo al calculado en 5.1. En este caso d es igual a 0,10 m, y x resulta 0,02 m

$$M_{n,teo,d-FRP} = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) = 31,38 \ kNm/m$$

Aplicando el coeficiente de seguridad:

$$M_{u,teo,d-FRP} = \Phi M_{n,teo,d-FRP} = 17,26 \, kNm/m$$

Donde el coeficiente de seguridad Φ es igual a 0,55.



Figura 7: Esquema de tensiones para la solución de HRF+ FRP

Luego, la porción de momento último aportado por las fibras, calculado a partir de hacer equilibrio en la Figura 7 es igual a:

$$M_{u,teo,d-HRF} = f_{ct,R,d}(h-x)\frac{b}{2}(h+x(1-\beta_1))$$



Resultando $M_{u,teo,d-HRF} = 6,87 \ kNm$ y el momento último de la pieza para el ensayo $M_{u,teo,d-MIXTO} = 24,13 \ kNm$.

- Cuantía mecánica mínima

Basta con verificarse que la cuantía de HRF o la de FRP es suficiente.

Se verifica la cuantía de FRP siguiendo la fórmula presentada en 5.14.1, resultando que se requiere de 4,02 cm2/m, lo cual es menor a lo dispuesto.

7. REFERENCIAS

- Gobierno de España, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA," 2008.
- [2] ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute, 2015.
- [3] ACI Committee 544, *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. 2018.
- [4] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS UNIT 1920-4, "Ensayos de hormigón – Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido." Montevideo, 2020.
- [5] British Standards Institution., *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* 2005.
- [6] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS and UNIT 843:95, "Barras de acero conformadas con resaltes y nervios, laminadas en caliente, para hormigón armada." 1995.
- [7] Japan Society of Civil Engineers, "RECOMMENDATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES USING CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS," *Series 23.* 1997.

Revisión 01

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



Anexo 2 - Memoria de cálculo: Losetas para ensayar

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafel Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 5 de julio de 2024




Tabla de contenido

1.	I	NTRODUCCIÓN
1	.1.	DATOS DE PARTIDA
1	.2.	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO
1	.3.	MATERIALES4
1	.4.	NORMATIVA Y RECOMENDACIONES
1	.5.	ENSAYO5
2.	C	CÁLCULOS RESISTENCIAS ÚLTIMAS6
2	.1.	TIPO 1) REFORZADA ÚNICAMENTE CON HRF6
	-	Cálculo del momento último
	-	Verificación de cortante último7
2	.2.	TIPO 2) REFORZADA ÚNICAMENTE CON FRP
	-	Momento último
	-	Verificación de cortante último9
	-	Anclaje
2	.3.	TIPO 3) REFORZADA CON HRF + FRP9
	-	Cálculo de momento último9
	-	Cortante último
	-	Anclaje
2	.4.	TIPO 4) Armadura tradicional11
	-	Cálculo momento último
	-	Armadura a cortante
	-	Anclaje
3.	V	/ERIFICACIÓN A IZAJE
	-	Anclaje
4.	R	REFERENCIAS



1. INTRODUCCIÓN

En esto documento se detallan las bases de cálculo y principales resultados teóricos sobre las losetas a construir, y posteriormente ensayar, en el marco del proyecto "Uso de fibras estructurales y barras de FRP para estructuras de Fundación de equipamientos eléctricos", correspondiente al llamado Desafíos UTE (Proyectos) – 2022 (Código ANII: FDU_S_2022_1_173162).

El objetivo del ensayo es contrastar los momentos últimos teóricos con los experimentales, considerando las cuantías propuestas para el armado de plateas de fundación para reactores. A su vez, se construirá una loseta control de barras de acero, cuya capacidad resistente es equivalente a la de FRP.

1.1. Datos de partida

En la Tabla 1 se presentan los armados propuestos y los momentos últimos asociados a estos para las plateas de fundación, también se presenta la relación con el momento de fisuración de la pieza, y el tipo de ruptura esperado.

Se debe tener en cuenta que los momentos últimos presentados en esa tabla consideran resistencias características y coeficientes de seguridad sobre todos los materiales.

	Mu,teo,d (kNm/m)	Armado	Mu,teo,d/Mfis	Ruptura
HRF	6,57	8 kg/m3	26%	Fibras
FRP	38,28	Φ10/12 (FRP)	153%	FRP
HRF + FRP	28,08	$\Phi 10/12 (FRP) + 8 \text{ kg/m3}$	112%	FRP
Acero	33,16	Φ10/15	133%	Acero

Tabla 1: Resumen de momentos y armados para los distintos tipos de platea de fundación.

1.2. Descripción del ensayo

Las dimensiones de las losetas y su refuerzo se presentan en la Tabla 2. Las mismas se ensayarán en la prensa del Instituto de Estructuras y Transporte, de Facultad de Ingeniería. Se estudiarán 3 tipologías de refuerzo distintas, y una de control:

Por cada tipología se construirán 3 losetas.

Tipo	Refuerzo	Dimensiones (bxhxl)
1) HRF	HRF	0,45x0,20x3,4 m
2) FRP	FRP	0,36x0,20x3,4 m
3) H+F	HRF+FRP	0,36x0,20x3,4 m
4) A	Acero	0,45x0,20x3,4 m



1.3. Materiales

Dado que se trata de elementos a ensayar en laboratorio hasta la rotura, se considerarán valores medios de resistencias de manera que los resultados experimentales tengan mayor cercanía con los teóricos.

Hormigón:

- f_{cm} = 30 + 8 Mpa = fc'. Resistencia media asociada a la compresión a 28 días, ensayo sobre probeta cilíndrica
- $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$

Hormigón reforzado con fibras:

- HMF 30 / P -1,5 1,5 / F / 20 48 / I Clasificación según Anejo 14 EHE-08 [1].
 - Donde:
 - HMF-30: Hormigón en masa clase C30
 - P 1,5 1,5: Fibras plásticas, con una dosificación tal que la resistencia residual del hormigón resulta en 1,5 tanto para el $f_{r1,k}$ (primer valor de la lista) como para el $f_{r3,k}$.
 - F: Indica la consistencia de la dosificación, en este caso se trata de una dosificación fluida (de entre 10 y 15 cm)
 - 20-48 Indican el tamaño máximo del agregado (20) y la longitud de las fibras (48)
 - Ambiente de exposición
- $f_{R3,k}$ = 1,48 MPa Resistencia característica residual a flexotracción asociada a una apertura de fisura (CMOD) de 2,5 mm, obtenida a partir del ensayo de probetas prismáticas de ancho 15x15x60 a los 28 días de edad, ensayadas de acuerdo a la norma UNE-EN 14651 [2].

Barras FRP:

Se consideran barras de Glass Fiber Reinforced Polymer Bar con propiedades:

- $f_{fu}^* = 800 \text{ MPa}$
- $E_f = 50$ GPa. Módulo elástico de las barras de FRP

Barras Acero:

- $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- Es = 200 GPa



1.4. Normativa y recomendaciones

- EHE 08: Instrucción española de Hormigón Estructural [1]
- ACI 440.1R-15: Guide for Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars [3]
- FIB Bulletin 105 Fiber Reinforced Concrete[4]
- ACI 544.4R 18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete [5]
- TR34: Concrete industrial Ground Floors [6]
- EN 1992.1.1 Design of concrete structures Part 1-1 [7]

En la Tabla 3 se presenta la normativa de guía empleada en el cálculo del momento último en cada tipología particular.

Тіро	Guía usada
1) HRF	EHE - 08
2) FRP	ACI 440.1R-15
3) H + F	ACI 544.4R-18 + ACI 440.1R-15
(4) A	EHE - 08

Tabla 3: Guías para cada tipo

1.5. Ensayo

El esquema de cálculo al que estará sometida la loseta a la hora de ensayarse es el presentado en la Figura 1, donde el valor de P es variable hasta alcanzar la rotura en cada ensayo.



Figura 1: Esquema básico del ensayo a realizar.

El esfuerzo P que debe ejercer la prensa para alcanzar un momento último Mu es igual a P=2Mu/1,2m. En la Tabla 4 se presentan los momentos últimos teóricos para cada tipo de loseta y la carga estimada a ejercer por la prensa descontando el peso propio del elemento. En las siguiente secciones se desarrolla el cálculo de los momentos últimos para cada material.



Tabla 4: Momentos últimos teóricos para cada tipo de loseta, y esfuerzo P a ejercer por la prensa.

	Mu,teo (kNm)	$M_{pp}(kNm)$	$M_{u,teo} - M_{pp}$ (kNm)	P (kN)
HRF	3,21	2,05	1,16	2,02
FRP	36,25	1,64	34,61	60,19
H + F	17,49	1,64	15,85	27,57
А	17,85	2,05	15,80	27,49

2. CÁLCULOS RESISTENCIAS ÚLTIMAS

2.1. TIPO 1) Reforzada únicamente con HRF

- Cálculo del momento último

Se considera que las fibras realizan una tracción uniforme en toda la sección de la pieza, de valor igual a:

$$f_{ctrm} = \frac{f_{r3,m}}{3}$$

Donde $f_{r_{3,m}}$ se presentó en la Sección 1.3. Resultando en este caso $f_{ctrm} = \frac{2.14 MPa}{3} = 0.71 MPa$

Dado que se trata de un elemento tipo viga, la incidencia de la orientación de las fibras por efecto pared es mayor. Por esto, siguiendo el Código Modelo 2020 [4], en su sección "18.5 Orientation factor", se opta por multiplicar la resistencia residual de las fibras por $k_0 = 0.5$.

Considerando que el esquema de tensiones sobre la losa presentado en la Figura 2 se tiene que el momento último sobre la losa es igual a:

$$M_{u,teo,m-HRF} = k_0 f_{ctrm} \frac{h^2 b}{2} = 3,21 \ kNm$$

Donde h corresponde a la altura de la loseta, y b a su base, presentadas en la Tabla 2.



Figura 2: Esquema de tensiones sobre sección HRF



- Verificación de cortante último

Esta comprobación se realiza a partir del Anejo 14 de la EHE – 08 [1].

En este caso, el cortante de diseño es igual tanto para la verificación por compresión oblicua en el alma, como en la verificación de agotamiento del primer tirante, así $V_{rd,1} = V_{rd,2} = 4,05 kN$, obtenido a partir de considerar una carga P aplicada igual a la indicada en la Tabla 4 y un esquema de cortante consecuente al ensayo (Figura 1).

El valor de canto útil *d* se aproxima como se indica en la guía TR-34 [6]d = 0,75h = 0,15 m. La comprobación de agotamiento por compresión oblicua al alma se realiza igual que para una viga de refuerzo tradicional (Art. 44.2.3.1 EHE-08[1]) con la salvedad de que se usa valor medio de resistencia, por lo que

$$V_{u1} = K \ 0.6 \ f_{cm} b_0 d \ \frac{\cot g(\theta) + \cot g(\alpha)}{1 + \cot g^2(\theta)} = 765.9 \ kN \gg 3.95 \ kN$$

Donde

- K =1
- $b_0 = b = 0,45 m$
- cotg(θ) = 1 y cotg(α) = 0. Siendo α el ángulo de inclinación de los estribos (en este caso igual a 90) y θ inclinación de las bielas (igual a 45).

Por otro lado, la resistencia al agotamiento por tracción en el alma vale $V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu}$ donde V_{fu} es la contribución de las fibras.

 V_{cu} se calcula según el artículo 44.2.3.2.2 de la EHE-08[1], considerando el valor mínimo, resultando $V_{cu} = 58,85 \ kN$, cubriendo el valor de diseño.

Asimismo, la cuantía mínima a refuerzo de cortante en el caso de HRF es igual a

$$V_{fu} + V_{su} \ge \frac{f_{ct,m}}{7.5} bd = 33,73 \ kN$$

Donde V_{fu} se calcula de la siguiente manera:

$$V_{fu} = 0,7\xi\tau_{fd}bd$$

Donde

•
$$\tau_{rd} = 0.5 f_{ctrm}$$

Por lo que $V_{fu} = 33,73 kN$

De esta manera, se concluye que no es necesario colocar estribado dado que la resistencia a cortante de las fibras es suficiente.



2.2. TIPO 2) Reforzada únicamente con FRP

- Momento último

Los cálculos descriptos a continuación se basan en el capítulo 7 de la norma de ACI 440.1R-15 [3] A partir de la tensión última de las barras y considerando que el factor de reducción de resistencia ambiental no aplica en el marco de un ensayo de laboratorio, se tiene que $f_{fu} = f_{fu}^* = 950 MPa$. Asumiendo un coeficiente $\beta_1 = 0,84$ se tiene que la cuantía de balance para la pieza es igual a $\rho_{fb} =$ 0,0044. El factor β_1 es un coeficiente que al multiplicarse por la profundidad de la línea neutra aporta una altura estimada de la cabeza de compresión. Este coeficiente depende de la resistencia a compresión del hormigón.

Si bien el armado propuesto para estas plateas implicaría un armado de $3\Phi 10$, dado que no se cuenta con barras de ese diámetro en el momento del hormigonado, se reemplaza por $5\Phi 8$. Esto implica un área de refuerzo $A_f = 2,51 \text{ cm}^2$ ($\rho_f = 0,0043$) por lo que $\rho_f < \rho_{fb}$ y la ruptura de la pieza será por tracción en las barras.

Asimismo, en los casos en los que $\rho_f < \rho_{fb}$ la norma exige una cuantía mínima igual a

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{fc'}}{f_{fu}}bd \ge \frac{2.26}{f_{fu}}bd$$

Donde f_c es la resistencia característica a la compresión, correspondiente a la resistencia media a la compresión en este ensayo. El resto de los parámetros ya fueron presentados.

Resultando en este caso $A_{f,min} = 1,53 \ cm^2$, la cual se verifica.

Dado el mecanismo de ruptura supuesto se conoce la tensión y la deformación última del FRP, pero se desconocen estos datos sobre el hormigón. Para resolver esto, la norma propone una manera simplificada, y del lado de la seguridad, para calcular el Momento nominal en este caso. A su vez, en la búsqueda de un resultado contrastable con el experimental no se aplica coeficiente de seguridad sobre este Momento, de manera que el momento nominal es igual al momento último de la pieza.

Siguiendo con la guía se tiene que

$$M_{u,teo,m-FRP} = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) = 36,25 \ kNm$$

Donde x es la posición de la línea neutra, calculada asumiendo que se alcanza la deformación última del hormigón y del FRP a la vez. Es decir:

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d$$

Esta última hipótesis es conservadora y otorga un valor último menor que el real. Este momento último implica que la prensa ejerza un esfuerzo de P=60,19 kN.



Las barras constructivas de este elemento serán $3\Phi 6$ de FRP, no obstante, se desprecia su colaboración a la resistencia a flexión.

- Verificación de cortante último

Esta verificación se realiza siguiendo la norma EHE-08 [1].

Dado que las barras de FRP no se pueden doblar en obra sin contar con equipo especializado, el estribado para esta loseta será de acero.

A partir del momento último calculado para este caso y el esquema del ensayo, incluyendo el cortante del peso propio, se obtiene el cortante máximo sobre la viga igual a 31,53 kN. De manera aproximada, se verifica tanto la compresión en el alma (V_{u1}) como el esfuerzo sobre el tirante (V_{u2}) con ese valor.

$$V_{u1} = K \ 0.6 \ f_{cm} b_0 d \ \frac{\cot g(\theta) + \cot g(\alpha)}{1 + \cot g^2(\theta)} = 660.74 \ kN \gg 32.53 \ kN$$

Donde

- K=1
- $b_0 = b = 0,36 m$
- cotg(θ) = 1 y cotg(α) = 0. Siendo α el ángulo de inclinación de los estribos (90) y θ inclinación de las bielas (igual a 45°).

$$V_{u2} = V_{su} + V_{cu}$$

 V_{cu} se calcula como se muestra en el artículo 44.3.2.2 de la EHE-08 [1]resultando $V_{cu} = 53,1 \ kN$. Dado que con V_{cu} ya se verifica el cortante de diseño, se coloca el estribado mínimo definido en el artículo 44.2.3.4.1 de la misma norma, el cual resulta en $\Phi 6/10$.

- Anclaje

El mecanismo de anclaje será por prolongación recta, como consecuencia de la la complejidad del doblado de barras. A su vez, dadas el esquema de las losetas (Figura 1), el momento positivo en el apoyo es nulo por lo que se dispone el anclaje mínimo según las recomendaciones extraídas del FIB[8], anclando a partir del cero del momento decalado. En particular, la Japan Society for Civil Engineering[9] establece un anclaje mínimo igual a 20 veces el diámetro de la varilla.

2.3. TIPO 3) Reforzada con HRF + FRP

- Cálculo de momento último

En este caso la pieza se arma como una combinación de las últimas dos losetas, considerando que el refuerzo predominante sobre la sección es la armadura de FRP y que ésta fija la posición de la línea neutra, por lo tanto el momento último de la pieza es igual a $M_{u, HRF} + M_{u, FRP}$. Consecuentemente se calcula la cuantía de balance con la misma fórmula presentada, resultando $\rho_{fb} = 0,0044$.



Considerando el armado propuesto para la losa ($\Phi 10/12$, o equivalentemente, $\Phi 8/8$) la cuantía es igual $\rho_f = 0,0070$ por lo que la pieza falla en su cabeza de compresión. En este caso el momento último de las barras de FRP se calcula como



Figura 3: Esquema de tensiones para la solución de HRF+ FRP

Luego, la porción de momento último aportado por las fibras es igual a

$$M_{u,teo,m-HRF} = k_0 f_{frm} (h - x) \frac{b}{2} (h + x(1 - \beta_1))$$

Donde la posición de la línea neutra es

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} d = 0,02 m$$

La deformación de las barras es $\varepsilon_f = \frac{f_f}{E_f}$, donde la tensión en las barras se calcula como

$$f_f = \sqrt{\frac{\left(E_f \varepsilon_{cu}\right)^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f_{cm}}{\rho_f}} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} = 648,60 MPa$$

Resultando $M_{u,teo,m-HRF} = 2,34 \ kNm$ y el momento último de la pieza para el ensayo $M_{u,teo,m-H+F} = 17,49 \ kNm$.

- Cortante último

Los siguientes cálculos son basados en la EHE 08[1] El valor de diseño en este caso es igual a $V_{rd,1} = V_{rd,2} = 16,82 \ kNm$ Considerando el canto útil igual a 0,10 m se tiene que $V_{u1} = 410,40 \ kNm > V_{rd,1}$.

Luego, de manera análoga a lo presentado en 2.1 se tiene que $V_{cu,min} = 31,38 kN y V_{fu} = 17,99 kN$ Asimismo, la cuantía mínima de refuerzo a cortante es 13,90 kN por lo que queda cubierta con la contribución de las fibras.

- *Anclaje* Análogo al punto 2.2.



2.4. TIPO 4) Armadura tradicional

- Cálculo momento último

De hacerse una platea reforzada con barras de acero la pieza sería clasificada en un ambiente de exposición II b (Tabla 8.2.2 EHE-08). Considerando también un cemento común (CEM I), una vida útil de 100 años y un control regular de obra, resulta un recubrimiento geométrico nominal igual a 4 cm.

Por lo tanto, se tiene una sección de 36x20 cm, armada con $3\Phi10$ y un canto útil d = 14,6 cm. A continuación, se presenta el cálculo del Momento último de la pieza a partir de ecuaciones adimensionales:

$$A_s = 2,36 \ cm^2 \rightleftharpoons \omega = \frac{A_s f_{yk}}{bdf_{cm}} = 0,073 \rightleftharpoons \mu = 1 - \sqrt{1 - \omega} = 0,071$$
$$M_{u,teo,m} = \mu b d^2 f_{cm} = 17,85 \ kNm$$

- Armadura a cortante

Siguiendo de manera análoga a lo presentado para el caso de FRP, se tiene que a partir del momento último y el esquema del ensayo se obtiene el cortante máximo sobre la viga igual a 16,17 kN y se verifica tanto la compresión en el alma (V_{u1}) como el esfuerzo sobre el tirante (V_{u2}) con ese valor.

$$V_{u1} = K \ 0.6 \ f_{cm} b_0 d \ \frac{\cot g(\theta) + \cot g(\alpha)}{1 + \cot g^2(\theta)} = 795,15 \ kN \gg 16,17 \ kN$$

Donde

- K =1
- $b_0 = b = 0,45 m$
- cotg(θ) = 1 y cotg(α) = 0. Siendo α el ángulo de inclinación de los estribos (90) y θ (45) inclinación de las bielas.

$$V_{u2} = V_{su} + V_{cu}$$

 V_{cu} se calcula como se muestra en el artículo 44.3.2.2 de la EHE-08[1] resultando V_{cu} = 78,09 kN.

Dado que con V_{cu} ya se verifica el cortante de diseño, se coloca el estribado mínimo definido en el artículo 44.2.3.4.1 de la misma norma, el cual resulta en $\Phi 6/10$.

- Anclaje

La longitud de anclaje necesaria es igual a $l_{b,neta} = M \acute{a}x \left\{ 150 \text{ mm}; 10\Phi; \frac{l_b}{3}; \beta l_b \frac{As,nec}{As,real} \right\} = 150 \text{ mm}$ Donde $l_b = \max \left\{ m\Phi^2; \frac{f_{yk}}{20}\Phi \right\}, \beta = 1 \text{ y } A_{s,nec}$ se obtiene a partir del momento decalado.



3. VERIFICACIÓN A IZAJE

Se propone el esquema de izaje presentado en la Figura 1. La ubicación de los ganchos busca igualar los momentos máximos negativos con los positivos.



Figura 4: Esquema de izaje

Momento de diseño para vigas de ancho 45 cm:

$$M^{-} = 25 \frac{kN}{m^{3}} * 0,2 m * 0,45 m * \frac{(0,7 m)^{2}}{2} = 0,55 kNm$$
$$M^{+} = 25 \frac{kN}{m^{3}} * 0,2 m * 0,45 m * \frac{(2m)^{2}}{8} - \frac{(0,7 m)^{2}}{2} = 0,57 kNm$$

Momento de diseño para vigas de ancho 36 cm:

$$M^{-} = 0,44 \ kNm$$

 $M^{+} = 0,46 \ kNm$

Como se puede ver estos momentos son significativamente menores que lo momentos últimos.

- Anclaje

En el momento de izaje las losetas estarán sometidas únicamente a su peso propio, por lo que en la sección donde se ubican los ganchos el momento será negativo. Por lo tanto, el anclaje deberá estar en el tercio inferior de la loseta.

Se ancla una longitud de anclaje de $\Phi 8$ en posición 1 (buena) de llenado:

$$l_b = \max\left\{m\Phi^2; \frac{f_{yk}}{20}\Phi\right\} = 200 \ mm$$

Donde m es como se define en la tabla 69.5.1.2.a de la EHE[1], en este caso igual a 1,4.



4. **Referencias**

- [1] Gobierno de España, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA," 2008.
- [2] British Standards Institution., *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* 2005.
- [3] ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute, 2015.
- [4] International Federation for Structural Concrete (FIB), "Model Code 2020." 2020.
- [5] ACI Committee 544, *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. 2018.
- [6] Concrete Society, Concrete industrial ground floors : a guide to design and construction. 2016.
- [7] "EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings," 2004.
- [8] fib, "FRP reinforcement in RC structures," *Bulletin 40*. 2007.
- [9] Japan Society of Civil Engineers, "RECOMMENDATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES USING CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS," *Series 23.* 1997.

Revisión 01





Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162

USO DE FIBRAS ESTRUCTURALES Y BARRAS DE FRP PARA ESTRUCTURAS DE FUNDACIÓN DE EQUIPAMIENTOS ELÉCTRICOS

Anexo 3 - Informe de hormigonado

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafael Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 5 de julio de 2024



Tabla de contenido

1.	INTF	RODUCCIÓN
	1.1.	OBJETIVOS:
	1.2.	ASISTENTES:
2.	LOSE	ETAS A CONSTRUIR
	2.1.	CARACTERÍSTICAS DE LAS LOSETAS
	2.2.	CÁLCULOS
3.	МАТ	ERIALES UTILIZADOS
	3.1.	Dosificación del hormigón
	3.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE REFUERZO UTILIZADOS EN LAS LOSETAS
4.	CON	TROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN8
	4.1.	ENSAYOS
	4.2.	RECEPCIÓN DEL HORMIGÓN Y ENSAYOS EN ESTADO FRESCO
	4.3.	Moldeo de Probetas para el control de calidad en estado endurecido10
5.	HOR	MIGONADO DE LOSETAS 12
	5.1.	DISPOSICIÓN DE ARMADURAS12
	5.2.	ORDEN DE LLENADO
	5.3.	COMPACTACIÓN
	5.4.	CURADO15
	5.5.	DIFERENCIAS CON LOS PLANOS
6.	REFI	ERENCIAS



1. INTRODUCCIÓN

El 21 de septiembre de 2023 se realizó el hormigonado para las losetas del proyecto <u>Fundatores: Uso</u> de fibras estructurales y barras de FRP para estructuras de fundación de equipamientos eléctricos. Dicho proyecto cuenta con la colaboración de empresas del medio como son: Ingener, Sika, Hormigones Artigas y Halidar. Particularmente, en este hito del proyecto Ingener brindó mano de obra, asesoramiento de construcción, encofrados, y lugar para el evento. Asimismo, Sika aportó fibras plásticas y Hormigones Artigas suministró tanto hormigón reforzado con dichas fibras como Hormigón C30 convencional. Halidar contribuyó con las barras de GFRP.

La construcción tuvo lugar en el obrador de Ingener, dentro de la subestación MVD-B de UTE, al noroeste del departamento de Montevideo (Figura 1.)



Figura 1: Ubicación de subestación Montevideo B.

1.1. Objetivos:

El objetivo de este informe es asentar las particularidades del evento; registrando involucrados, materiales utilizados y sus características, logística de llenado, y otros datos que puedan ser de interés para el posterior análisis de resultados.

Los elementos hormigonados serán ensayados para contrastar los resultados con las resistencias esperadas según el cálculo teórico realizado.

1.2. Asistentes:

A continuación, se listan los participantes de la jornada Por el Instituto de Estructuras y Transporte, de Facultad de Ingeniería:

- Luis Segura
- Rafael Leites de Moraes
- Valentina Seoane
- Victoria Olivera



- Alberto Gomez
- Cinthia Planchon

Por Hormigones Artigas:

- Anyela Molina
- Ariel Guzzo

Por Halidar:

- Rodolfo Loureiro

Por Ingener:

- Ari Blanco
- Ignacio Núñez
- Marcello Gregorio
- Jorge Da Silva (Capataz)
- Damian Da Silva (Of. Carpintero)
- Gonzalo Piñero (Of. Carpintero)
- José Darías (1/2 Of. Carpintero)
- José Golbo (1/2 Of. Carpintero)
- Gonzalo Gazto (1/2 Of. Albañil)
- Agustín Pereira (1/2 Of. Albañil)
- Michel Silva (1/2 Of. Albañil)

Comunicación:

- Claudio Di Mauro

2. LOSETAS A CONSTRUIR

2.1. Características de las losetas.

Se hormigonaron 14 losetas, de las cuales 12 se ensayarán para el proyecto, las restantes son para exponer en Ingeniería de Muestra y en la Feria de la construcción.

En la Tabla 1 se puede ver el resumen de los tipos de loseta, sus dimensiones, la cantidad de losetas a construir y el plano de referencia para el caso.

Tabla 1: Tipos de losetas construidas, sus dimensiones, cantidades, y plano de referencia.

Tipo de Loseta	Refuerzo	Dimensiones (bxhxl)	Cantidad	Plano
1) HRF	HRF	0,45x0,2x3,4 m	3	
2) FRP	FRP	0,36x0,2x3,4 m	3	F-E01v04
3) H+F	HRF+FRP	0,36x0,2x3,4 m	3	
4) A	Acero	0,45x0,2x3,4 m	3	-
5) H + F (difusión)	HRF+FRP	0,40x0,1x4,0 m	2	F-E02v02



Por otro lado, en la Tabla 2 se resume el refuerzo utilizado. La losa tipo 5) H+F (difusión) contaba con una ventana en el centro de su luz que permitía ver las barras de FRP de su interior. El plano F-E01v04 se encuentra en el Anexo 3: Memoria de cálculo de Losetas, y el F-E02v02 se encuentra al final de este informe.

Tipo de loseta	Estribos	Armadura inferior	Armadura superior
1) HRF	No lleva	No lleva	No lleva
2) FRP	Acero Φ6/10	FRP 5Φ8	FRP 3Ф6
3) H+F	No lleva	FRP 5Φ8	No lleva
4) A	Acero Φ6/10	Acero 3Φ10	Acero 3Ф6
5) H+F	No lleva	FRP 3Φ8	No lleva
(Difusión))		

Tabla 2: Resumen de armados por tipo de loseta.

2.2. Cálculos

Los cálculos se realizaron siguiendo las Normas presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Guías de Diseño utilizadas según el tipo de loseta

Tipo de loseta	Guía de Diseño
1) HRF	EHE - 08
2) FRP	ACI 440.1R-15
3) H + F	ACI 544.4R-18
4) A	EHE - 08
5) H+F (Difusión)	ACI 544.4R-18

3. MATERIALES UTILIZADOS

A continuación, se indican las dosificaciones de los hormigones y las características de los elementos de refuerzo utilizados en las losetas.

3.1. Dosificación del hormigón

Por un lado, se solicitó hormigón convencional con una resistencia característica a 28 días de 30 MPa (C30), determinada a partir de probetas cilíndricas de 15x30 según UNIT ISO 1920-4 [1], y un asentamiento de cono de Abrams de 10 ± 2 cm determinado según UNIT ISO 1920-2 [2].



Por otro lado, para el hormigón reforzado con fibras (HRF30) se solicitó hormigón C30 con un contenido de 8 kg/m3 dado que en etapas previas del proyecto se estudiaron posibles dosificaciones resultando que esa era la conveniente.

Este hormigón es clasificado según la EHE-08 [3] como HMF-30/P-1,9-1,7/F/20-48/I donde:

- HMF: hormigón en masa con fibras
- 30: resistencia característica a la compresión (MPa)
- P: indicativo del tipo de fibras empleadas, en este caso plásticas
- 1,9: resistencia residual característica para una apertura de fisura de 0,5 mm (MPa)
- 1,7: resistencia residual característica para una apertura de fisura de 2,5 mm (MPa)
- F: Clasificación de la consistencia, en este caso fluida por el asentamiento requerido
- 20: tamaño máximo del árido en mm
- 48: longitud de las fibras
- I: Designación del ambiente

El detalle completo de ambas dosificaciones se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Dosificación empleada para el Hormigón Convencional (C30) y para el Hormigón reforzado con fibras (HRF)

	Cantidad		
Material	C30	HRF	Unidad
Arena fina	275,55	275,55	kg/m3
Arena gruesa	484,83	484,83	kg/m3
Piedra partida 5/20	1026,66	1026,66	kg/m3
Cemento Artigas	360	360	kg/m3
Polvo electro filtro	40	40	kg/m3
Agua	155	155	1
Aditivo - Viscocrete artigas	2,6	2,6	kg/m3
Aditivo - Viscocrete 6	0	0,2	kg/m3
Fibras SikaForce PP-48	0	8	kg/m3

3.2. Características de los elementos de refuerzo utilizados en las losetas

Macro-fibras plásticas

Las fibras usadas en este caso corresponden a las tipo SikaFiber Force PP-48 / RAD-48 s (ver Figura 2).

- o Fibras sintéticas de poliolefina
- Dimensiones de las fibras
 - largo: 48 mm
 - ancho 1,37 mm



espesor 0,34 mm

Se adjunta ficha técnica al final del presente informe.



Figura 2: Macro fibras plásticas SikaForce PP-48 / RAD-48s

GFRP- Glass Fiber Reinforced Polymer

Las barras de GFRP (ver Figura 3) utilizadas son fabricadas por Composite Group Brazil, y fueron suministradas por Halidar, Se recibió un rollo de 200 m de Φ 6, y un rollo de 200 m de Φ 8.

Ambos rollos fueron recibidos en el Instituto de Estructuras y Transporte, y posteriormente trasladados por Ingner hacia la planta.

Se adjunta ficha técnica al final del presente informe.



Figura 3: Barras de FRP

Barras de acero

Se utilizó acero B500S en diámetros de varillas $\Phi 6$ y $\Phi 10$, aportado por Ingener.



4. CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN

4.1. Ensayos

En la Tabla 5 se listan las propiedades a evaluar para realizar el control de calidad del hormigón en estado fresco y endurecido, y las normas de referencia correspondientes.

Tabla 5: Propiedades a evaluar discriminadas por estado, y norma de referencia correspondiente.

Estado fresco:	Norma
Asentamiento mediante el Cono de Abrams	UNIT-ISO 1920-2 [2]
Determinación de la cuantía de fibras	UNE-EN 14721 [4]
Estado endurecido:	
Resistencia a Compresión	UNIT-ISO 1920-4 [1]
Módulo de Elasticidad	UNIT-ISO 1920-10 [5]
Resistencia residual a la tracción por flexión	EN 14651 [6]
Resistencia residual a la tracción	Ensayo MVD [7] [8]

4.2. Recepción del hormigón y ensayos en estado fresco

El primer camión recibido fue el de hormigón convencional, de clase C30. Este llegó a las 10 am y presentó un asentamiento de 9 cm a partir del cono de Abrams. En las Figura 4 y Figura 5 se muestra la recepción y el cono de Abrams para el primer camión, respectivamente.

El segundo mixer, de HRF de clase C30 con una dosificación de fibras de 8 kg/m3 llegó 11.30 aproximadamente, con un asentamiento de 13cm (Figura 5 y Figura 6). Las macro fibras fueron incorporadas en planta.





Figura 4: Recepción de hormigón convencional.



Figura 5: Ensayo de cono de Abrams. A la izquierda se ve el ensayo para el C30, y a la derecha para el HRF.



Figura 6: Hormigón reforzado con fibras.

Además, se realizó una versión simplificada del ensayo EN-14721 [4] para verificar la cuantía de fibras en la mezcla. Este ensayo consiste en colocar un volumen conocido de hormigón reforzado con



fibras en un volumen mayor de agua, de manera de limpiar la mezcla y extraer las fibras, las cuales posteriormente son lavadas y secadas.

En la Figura 7 se puede ver el latón lleno de agua donde se volcó el HRF. Como volumen conocido se utilizó una probeta cilíndrica de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, y se tomaron dos muestras: Una al comienzo del hormigonado (muestra 1), y otra al final (muestra 2). Las fibras se lavaron, secaron y pesaron en el laboratorio del instituto. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Cabe mencionar que el ensayo de referencia es para fibras metálicas, no obstante, es de utilidad también para este caso.



Figura 7: Ensayo simplificado EN-1472 [6]

Tabla 6: Resultados de cuantía de fibras en masa obtenidos según la norma EN 1472.

Muestra	Fibras (kg)	Dosificación (kg/m3)
1	0,050	9,43
2	0,045	8,51

4.3. Moldeo de Probetas para el control de calidad en estado endurecido

Se hormigonaron 24 cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. De estos, 12 se llenaron con HRF y 12 con hormigón convencional C30. Todos se compactaron con varilla, no obstante, no fueron todos compactados por la misma persona.



Por otro lado, con HRF se llenaron 16 vigas prismáticas para ensayo según EN 14651 [6], 12 cubos y 6 prismas 15x15x20 para ensayo MVD [7] [8]. Todos estos elementos fueron compactados mediante mesa de vibrado. La mesa fue prestada por Facultad de Ingeniería.

Se aplicó desmoldante en todos los moldes, pincelando el interior y colocando la etiqueta en el fondo. Todas las probetas se etiquetaron para identificar el proyecto y el tipo de hormigón empleado.



Figura 8: Probetas previo al llenado



Figura 9: Compactación de cubo de HRF para ensayo MVD [7] en mesa compactadora.



Figura 10: Compactación de viga para ensayo EN 14651[6] en mesa compactadora.



a the second of the second of

Figura 11: Probetas llenas, prontas para su curado.

Las probetas se dejaron cubiertas por nylon, y al otro día fueron transportadas a Hormigones Artigas. Una vez allí, se desmoldaron y se colocaron en una cámara de curado, donde pasaron 28 días, y luego fueron transportadas a Facultad de Ingeniería. Donde se ensayaron a partir de los 56 días.

5. HORMIGONADO DE LOSETAS

En la Figura 12 se pueden ver, comenzando de izquierda a derecha, primero los encofrados para losetas Tipo 3) HRF, luego las tipo 1, seguidas por las tipo 2 y por último tipo 4.



Figura 12: Disposición de encofrados para losetas.

5.1. Disposición de armaduras

Dado que en este proyecto se busca evitar los materiales metálicos dentro de la masa de hormigón, el posicionamiento de las barras también se realizó con elementos no metálicos. Por su parte, el atado de las varillas se realizó con precintos como se puede ver en la Figura 13. En la misma imagen también



se puede ver que las barras están sostenidas por tanza. En particular, para la loseta de la imagen (Loseta tipo 3) FRP) la armadura se posicionó en el centro de su altura, es por esto que no se pudieron utilizar separadores plásticos (no son usuales los separadores de 10 cm). Por lo contrato, se utilizó un método propuesto por personal de Ingener donde los hierros se sujetaban de tanzas transversales. Con los ensayos ya realizados detectamos que ese método no era ideal y no colaboraba a fijar la posición, sería mejor utilizar barras de FRP transversales para sujetarlo.



Figura 13: Atado y posicionamiento de FRP sin uso de materiales metálicos.

5.2. Orden de llenado

Primero se llenaron los elementos de hormigón sin fibras, siendo primero las losetas tipo 4) y luego las tipo 2). En paralelo al llenado de esas losetas se llenaron y compactaron los cilindros de 15x30 para el posterior control de calidad del hormigón.



Figura 14: Distribución espacial de losetas. Se indica tipo de loseta por hilera y orientación de llenado.



A continuación, se llenaron las losetas de HRF, comenzando por las losetas tipo 1) (Figura 15), luego las tipo 3) y por último las losetas para difusión.

La ubicación de las losetas y la orientación de llenado por hilera se puede ver en la Figura 14.



Figura 15: Llenado de loseta tipo 1), reforzada exclusivamente con HRF.

5.3. Compactación

Todas las losetas se compactaron con aguja vibratoria de 35 mm de diámetro. Se controló la utilización – controlando que sea lo más vertical posible. Se señalizaron los 40 cm centrales de las losetas (ver Figura 16), indicando que en esa zona no se debía compactar para no provocar puntos débiles a consecuencia de dar una orientación preferencial a las fibras.





Figura 16: Llenado de losetas. En la zona inferior izquierda se puede ver la zona marcada para indicar el no vibrado.

5.4. Curado

Se dejaron las siguientes indicaciones de curado al personal de Ingener: Cubrir con nylon y regar una vez al día durante una semana.

5.5. Diferencias con los planos

Se hormigonó siguiendo los planos F-E01v04 y F-E02v02, con las siguientes salvedades:

- Los ganchos de izaje de las vigas para IDM se colocaron en sentido contrario al plano.
- Los planos tenían la nomenclatura incorrecta de hierros, se indicaban como hierros E los inferiores y A los superiores. Se colocaron correctamente.

6. REFERENCIAS

[1] NORMA UNIT-ISO 1920-4:2020 Ensayos de hormigón – Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido

[2] NORMA UNIT-ISO 1920-2:2016 Ensayos de hormigón – Parte 2: Propiedades del hormigón en estado fresco

[3] EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural

[4] UNE EN-1472:2006 Método de ensayo para el hormigón con fibras metálicas. Determinación del contenido en fibras en el hormigón fresco y en el endurecido.

[5] NORMA UNIT-ISO 1920-10:2010 Ensayos de hormigón – Parte 10: Determinación del módulo de elasticidad estático en compresión.

[6] BS EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)



[7] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. de Figueiredo, "Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test," *Constr Build Mater*, vol. 192, pp. 731–741, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101.

[8] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. De Figueiredo, "ANALYTICAL CORRELATION BETWEEN MONTEVIDEO TEST (MVD) AND THREE-POINT BENDING TEST FOR FIBRE REINFORCED CONCRETE (FRC)," 2019.

Revisión 00

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



GRUPO DE

HORMIGÓN

ESTRUCTURAL

UNIVERSIDAD

DE LA REPÚBLICA

URUGUAY

Anexo 4 – Ensayos y análisis de resultados de losetas

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Ing. Rafael Leites de Moraes Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 5 de julio de 2024



Tabla de contenido

1.	INT	RODUCCIÓN	
2.	DIS	POSITIVO EXPERIMENTAL	
3.	AJU	STE DE DATOS	5
4.	RES	SULTADOS	6
4	.1.	LOSETAS TIPO HRF	6
4	.2.	LOSETAS TIPO FRP	8
4	.3.	LOSETAS TIPO H+F	
4	.4.	Losetas tipo A (de control)	
4	.5.	COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES SOLUCIONES	
5.	CON	NCLUSIONES	



1. INTRODUCCIÓN

Las losetas cuyo diseño se detalla en el *Anexo 2 – Memoria de cálculo de losetas para ensayar*, y su hormigonado en el *Anexo 3 – Informe de hormigonado* fueron ensayadas en el mes de noviembre 2023 en el laboratorio del Instituto de Estructuras y Transporte de Facultad de Ingeniería.

Las dimensiones de las losetas se presentan en la Tabla 1.

Tipo	Refuerzo	Sección (bxh) (cm)	Largo (cm)
1) HRF	Macrofibras plásticas	45x20	340
2) FRP	Barras de FRP	36x20	340
3) H+F	Macofibras pláticas y barras de FRP	36x20	340
4) A	Barras de acero	45x20	340

Tabla 1: Dimensiones de losetas a ensayar.

Dado que se hormigonaron 3 por tipo, las losetas se denominarán según una identificación del refuerzo empleado, seguido por un número de indica cuál fue su orden de llenado, de esta manera HRF1 es la primera loseta que se hormigonó reforzada únicamente con macro fibras plásticas, y HRF3 es la tercer loseta hormigonada con el mismo refuerzo.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Las losetas se sometieron a un ensayo de flexión de 4 puntos, en la Figura 1 se presenta el esquema básico del ensayo. A partir de este esquema, se conoce el momento al que está solicitado (M_{exp}) la pieza, siendo igual a $M_{exp} = M_{pp} + M_{prensa}$. Donde M_{pp} y M_{prensa} son los momentos del peso propio y el momento ejercido por la prensa, respectivamente.

En esta experiencia el momento por el peso propio se calculó teóricamente, y los resultados experimentales que se presentan son valores de M_{prensa} . Se llamará $M_{u,exp}^*$ y M_{exp}^* al momento último ejercido por la prensa durante al ensayo, y al momento ejercido por la prensa para cada desplazamiento, respectivamente.



Figura 1: Esquema básico del ensayo realizado.

Los ensayos se realizaron con la prensa del laboratorio, esta permite aplicar la fuerza a una velocidad controlada. La imagen de la Figura 2 fue tomada durante el ensayo de la loseta H+F1, allí se puede ver la loseta ubicada dentro de la prensa.



Figura 2: Ensayo de H+F1.

A su vez, se midió el desplazamiento en el centro longitudinal de la loseta utilizando dos transductores diferenciales de variación lineal (LVDT), valores que se promediaron. La ubicación de estos LVDTs se puede ver en la Ubicación de los LVDTs.





Figura 3: Ubicación de los LVDTs.

3. AJUSTE DE DATOS

Una vez ensayadas todas las losetas, se ajustaron los momentos últimos esperados considerando los siguientes aspectos:

- Resistencia del hormigón (C30 y HRF30) según ensayos de caracterización
 - fcm = 38,32MPa resistencia media a la compresión según ensayo a cilindros de 15x30 a 56 días para el C30
 - fcm = 37,60MPa resistencia media a la compresión según ensayo a cilindros de 15x30 a 56 días para el HRF30
 - o $f_{r_{3,m}}=2,30$ MPa resistencia residual para una apertura de fisura de 2,5mm, según ensayo EN 14651.
- Resistencia de las barras de FRP según ensayos de caracterización
 - $\circ f_{fu} = 1068 \text{MPa}$
 - $\circ \quad \emptyset = 6,6mm$
 - Ubicación real de las barras Recubrimiento medio según tipo de loseta
 - En losetas tipo FRP: 0,044m
 - En losetas tipo A: 0,040m
 - En losetas tipo H+F: 0,076m

Luego, de manera análogo a lo descripto en el *Anexo 2 – Memoria de cálculo de losetas para ensayar* se obtuvieron los valores de momentos últimos corregidos. La Tabla 1 resume, por tipo de loseta, el valor de momento experimental previo y posterior al ajuste de datos.

Tabla 2: Comparativa de momentos últimos previos y posteriores a la caracterización de los materiales.

Tipo	$M_{u,teo,m,1}$ (kNm)	$M_{u,teo,m,2}$ (kNm)
HRF	3,21	3,45
FRP	36,25	26,38
H+F	17,49	20,68
А	17,85	17,86



Luego, al valor del momento último resistente de la pieza, se le restó el valor del momento del peso propio, para obtener el momento máximo esperable a ejercer por la prensa. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tipo	$M_{u,teo,m,2}$ (kNm)	M_{pp} (kNm)	$M^*_{u,teo,m,2}(kNm)$
HRF	3,45	2,05	1,40
FRP	26,38	1,64	24,74
H+F	20,68	1,64	19,04
А	17,86	2,05	15,81

Tabla 3: Momento estimado a ejercer por la prensa para cada tipo de loseta.

4. **Resultados**

4.1. Losetas tipo HRF

En la Figura 5 se pueden ver los resultados individuales para las losetas de tipo HRF. En cada loseta ensayada, se observó un crecimiento de la curva M_{exp}^* - desplazamiento lineal hasta la fisuración. Posterior a ese punto se observa un descenso, característico de una dosificación tipo "softening", con una tendencia de la curva a volverse horizontal. Para estas losetas se define el momento último como aquel que provoca una apertura de fisura de 2,5 mm. Asumiendo que la loseta se comporta como un rígido se puede calcular la apertura de fisura (CMOD) en función del desplazamiento (despl) como:

$$CMOD = \frac{4 * h * despl}{l}$$

Donde h es la altura de la loseta (0,2 m) y l es la luz (2,7 m).



Figura 4: Resultados individuales y promedio para las losetas de HRF.



En la Figura 5 se muestra la curva teórica esperada, la resultante del promedio de los ensayos, y el momento último teórico esperado para ese tipo de loseta. Se puede ver que el momento de fisuración teórico está por encima del medido experimentalmente.



Figura 5: Comparación entre curva teórica, curva promedio y el momento teórico para las losetas de HRF.

En este conjunto de datos se puede ver que los resultados tienen gran dispersión, y esto es consecuencia a la heterogeneidad de la mezcla. Asimismo, respecto a las secciones de rotura (Tabla 4) se observa que la loseta "HRF 2" es la que aparenta mayor concentración de fibras plásticas. Dicha loseta, es la que tiene mayores resistencias residuales (Figura 4). Por otro lado, como era de esperar dado el esquema del ensayo, todas estas secciones de rotura ocurrieron dentro de los 40 cm centrales de las losetas.







4.2. Losetas tipo FRP

Las losetas reforzadas con barras de fibra de vidrio muestran un comportamiento lineal hasta la fisuración seguido por un tramo también lineal, pero con distinta pendiente (ver Figura 6). En todas se puede observar ausencia de tramo plástico dado que la ruptura en todas las losetas fue por las barras. Se podría llegar a observar una pequeña plastificación previo a la ruptura si la falla hubiese sido por la cabeza de compresión. En general, este grupo presenta una baja dispersión de resultados.



Figura 6: Resultados individuales, y el promedio, para las losetas de FRP.

Las deformaciones en el centro de la loseta fueron en todos los casos de una magnitud apreciable a simple vista. En la Figura 7 se muestra cualitativamente la deformación de la loseta FRP 2 previo a la ruptura.




Figura 7: Imagen tomada durante el ensayo de la loseta FRP2. Se puede observar la magnitud de la deformación previa a la ruptura.

Las secciones de rotura tomaron lugar en los 40 cm centrales de la loseta, y en general ocurrieron en aquellas secciones donde había estribos y separadores. Esto último es de esperarse dado que dichas secciones son las más débiles de la loseta.



Figura 8: Sección de rotura para FRP2.

En la Figura 9 se puede ver que el comportamiento guarda relación con la curva teórica esperada, ajustándose muy bien para cargas bajas, pero alejándose a medida que aumenta la carga. Es decir que



para cargas de servicio el modelo teórico se ajusta a la experiencia. Asimismo, el momento último real fue superior al momento último esperado.



Figura 9: Superposición de curva teórica, curva promedio y momento último teórico para las losetas de FRP.

4.3. Losetas tipo H+F

El comportamiento en este tipo de losetas fue análogo a las del tipo FRP, con dos tramos lineales y una clara distinción entre sus pendientes (ver Figura 10). A su vez, se ve una dispersión baja entre resultados.

La diferencia observada entre las losetas tipo FRP y H+F se puede atribuir a los distintos cantos útiles.



Figura 10: Resultados individuales y promedio para losetas tipo H+*F*

En la Figura 11 se puede comparar la curva teórica esperada con el promedio de los ensayos. Al igual que para la loseta reforzada únicamente con FRP, las curvas guardan estrecha relación bajo cargas de servicio, separándose cuando se acerca a la ruptura.



Figura 11: Superposición de curva teórica, curva promedio y momento último teórico para las losetas H+F.

Al igual que para las losetas reforzadas con FRP, se observaron deformaciones significativas durante el ensayo (ver Figura 12)



Figura 12: Imagen tomada durante el ensayo de la loseta H+F1 previo a la ruptura.

4.4. Losetas tipo A (de control)

Las losetas reforzadas con acero presentaron curvas M_{exp}^* -Desplazamiento esperados en todos los casos (ver Figura 11). El momento último fue significativamente mayor que el teórico esperado (ver Figura 13). Esto probablemente sea consecuencia de que para este elemento se utilizó el valor característico de resistencia de la barra de acero, por no contar con información sobre su resistencia media.





Figura 13: Resultados individuales y promedio para las losetas tipo A.



Figura 14: Resultado promedio y curva esperada para las losetas tipo A.

4.5. Comparativa entre diferentes soluciones

En la Figura 15 se presentan las curvas promedio para los 4 tipos de refuerzos estudiados, y a la derecha de dicha figura se presenta una ampliación al primer tramo de las curvas. Respecto al momento de fisuración, se presentan los valores teóricos y experimentales en la Tabla 6. En general se observa que el momento experimental es menor que el teórico, esto puede deberse a que el cálculo asume que la sección en su totalidad es de hormigón, cuando en realidad existe un porcentaje de la sección ocupado por el refuerzo. Además, se observa que la única loseta en la que el momento experimental es superior al esperado es en la reforzada con acero, esto nos hace pensar que tal vez el acero esté aportando resistencia a la fisuración en esta sección.



Tipo	$M_{fis,exp}^{*}$	$M_{fis,teo}^*$	Error %
HRF	8,36	10,11	-21%
FRP	6,60	8,09	-23%
H+F	7,90	10,11	-28%
А	8,75	8,09	8%

Tabla 5: Comparativa momentos de fisuración empíricos respecto a los teóricos.

Por otro lado, se destaca la diferencia del comportamiento para los distintos refuerzos una vez alcanzado el momento de fisuración.

Se puede ver que el momento último de mayor magnitud se da para el refuerzo de FRP, como se esperaba.

También se puede apreciar la diferencia entre las pendientes del tramo elástico de la curva del FRP respecto a la de Acero, donde dado un M*exp la deformación del FRP es mayor que la del Acero.



Figura 15: superposición de curvas promedio para los cuatro materiales. A la derecha se muestra un zoom al tramo inicial del gráfico.

Los valores de momento último experimental obtenido para cada loseta se presentan en la Tabla 6, junto con el promedio de los resultados. Para las losetas tipo FRP, H+F y A el valor de momento último se definió como aquel calculado a partir de la carga máxima que soportó la pieza en el estudio. Por otro lado, para la loseta tipo HRF se definió como aquella que provocaba una apertura de fisura en la sección fisurada de 2,5 mm. Particularmente, para las losetas reforzadas con macrofibras plásticas se observó mayor desviación estándar que en para el resto de refuerzos. No obstante, es esperable que esto ocurra cuando se trata de HRF.



	$M_{u,exp}^{*}(KNm)$			$M^*_{u,exp,medio}$ (kNm)	SD (kNm)	CV(%)
	1	2	3			
HRF	1,11	4,86	0,94	2,30	2,21	96
FRP	28,20	31,39	28,13	29,24	1,86	6
H+F	19,85	20,92	19,86	20,21	0,62	3
Α	21,37	25,17	23,23	23,26	1,90	8

Tabla 6: Momentos últimos experimentales para cada loseta, y el promedio por tipo.

Prof. Julio Ricaldoni

Para todas las losetas se observó un valor medio de resultados superior al momento último esperado, estos valores se muestran en la Tabla 7, junto con el porcentaje de error definido como el cociente entre la diferencia $M_{u,exp,medio}^* - M_{u,teo}^*$, y $M_{u,exp,medio}^*$.

Tabla 7: Comparativa de valores medios obtenidos con los valores teóricos. Se muestra también la desviación estándar de los resultados y el coeficiente de variación.

	$M^*_{u,exp,medio}$ (kNm)	$M^*_{u,teo}(kNm)$	Error (%)
HRF	2,30	1,56	32%
FRP	29,24	24,74	15%
H+F	20,21	19,04	6%
Α	23,26	15,81	32%

5. CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados para distintos refuerzos estudiados muestran una alta concordancia con los resultados experimentales, tanto en términos de esfuerzos como de deformaciones. Respecto a los momentos de rotura en todos los casos se superó el momento último teórico, con un error del modelo respecto a lo empírico de entre el 6 y el 32%. Los modelos que más se ajustaron son los del FRP y los del H+F, lo cual puede atribuirse a que utilizó un valor medio de resistencia a la tracción para las barras de FRP, ensayadas en el marco de este proyecto. Por otro lado, para las losetas de acero se utilizó la resistencia característica a tracción de las barras ya que no se contaba con información de la resistencia media, y se obtuvo un error del 32%. El error para las losetas de HRF puede atribuirse, al igual que su alto coeficiente de variación, a la naturaleza del material ya que la distribución de las fibras a lo largo de las losetas es aleatoria. Es importante destacar que el signo de los errores es positivo en todos los casos, es decir que el resultado experimental es mayor que el esperado teóricamente, asegurando la seguridad del diseño. Asimismo, los con coeficientes de variación fueron bajos (entre 3% y 8 %) para todos los materiales salvo para las losetas de HRF.

Revisión 00

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



Anexo 5 - Caracterización de los materiales

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Mg. Arq. Iliana Rodríguez Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 15 de abril de 2024





Tabla de contenido

1.	INTI	RODUCCIÓN	3
	1.1.	PROBETAS ELABORADAS	3
2.	ENS	AYO A COMPRESIÓN - UNIT 1920-4[1]	3
3.	PRO	BETAS CÚBICAS/PRISMÁTICAS	4
	3.1. 3.2.	DESCRIPCIÓN DE PROBETAS Y FECHAS ENSAYO Resultados	4 5
4.	ENS	AYO MVD	6
	4.1. 4.2. 4.3.	TRANSFORMACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO MONTEVIDEO A EQUIVALENTE ENSAYO EN Resultados Relación de los resultados EN con los resultados del ensayo MVD	7 8 9
5.	ENS	AYO A TRACCIÓN EN BARRAS DE FRP 1	0
6.	CON	CLUSIONES 1	1
7.	REF	ERENCIAS 1	1



1. INTRODUCCIÓN

Para el control de calidad del hormigón en estado endurecido se hormigonaron probetas el día 21 de septiembre según detalla el *Anexo 3 – Informe de hormigonado*. Las mismas permanecieron 28 días posteriores a su hormigonado en pileta de curado, en Hormigones Artigas.

1.1. Probetas elaboradas

En la Tabla 1 se presenta el total de probetas elaboradas y ensayadas.

Tabla 1: Descripción de las probetas elaboradas y ensayadas. (*) 6 eran prismáticas de 15x15x20. (**) 3 eran prismáticas de 15x15x55.

Cantidad	Geometría	Hormigón	Ensayo
6	Cilindros 15x30	C30	UNIT 1920-4 [1]
6	Cilindros 15x30	HRF30	UNIT 1920-4 [1]
18 (*)	Cubos 15x15x15	HRF30	Ensayo MVD [2]
16 viguetas (**)	Prismas 15x15x60	HRF30	Ensayo EN[3]

2. ENSAYO A COMPRESIÓN – UNIT 1920-4[1]

Se ensayaron 3 probeta de cada material a los 28 días de edad, y la misma cantidad a 56 días. Las probetas fueron ensayadas siguiendo la norma UNIT 1920-4 en el laboratorio de hormigones artigas Los resultados individuales se presentan en la Tabla 2.

		Resistencia a la compresión (MPa)			
		28 días	56 días		
	HRF	35,08	39,25		
		37,34	35,88		
		34,78	37,66		
		34,86	37,03		
C30	35,11	38,61			
		35,86	39,32		

Tabla 2: Resultados a la compresión de probetas cilíndricas según UNIT 1920-4.

En la Tabla 3 se presenta, según edad y material, el valor medio (fcm), la desviación estándar de los resultados (SD), el coeficiente de variación (SD) y el valor característico (fck).



	fcm (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	fck (Mpa)	
Edad	28 días				
HRF	35,73	1,40	3,92	33,44	
C30	35,28	0,52	1,48	34,42	
Edad	56 días				
HRF	37,60	1,69	4,48	34,83	
C30	38,32	1,17	3,06	36,40	

Tabla	3:	Resultados	estadísticos	para el	ensavo.
1 000 000	•••	10000000000	00101010000	p an a cr	0.1.507.0.

3. PROBETAS CÚBICAS/PRISMÁTICAS

3.1. Descripción de probetas y fechas ensayo

Los ensayos se realizaron siguiendo la norma EN 14651 [3] en el laboratorio del Instituto de estructuras y Transporte, en la Facultad de Ingeniería (ver Figura 1), entre 60 y 100 días posteriores al hormigonado. Este ensayo permite determinar la resistencia residual a la tracción por flexión mediante un ensayo de 3 puntos controlado por la apertura de fisura.



Figura 1: Fotografia tomada durante el ensayo.

Para la realización de este ensayo las probetas requieren una entalla en su centro, de 2,5 cm de profundidad y de menos de 5 mm de espesor. También, es necesario adherir chapas delgadas a cada lado de la entalla. En dicha entalla se coloca un dispositivo capaz de registrar la apertura de fisura en el tiempo. El esquema de ensayo es el presentado en la Figura 2.



Figura 2: Esquema de ensayo según EN 14651[3]

3.2. Resultados

En la Figura 3 se muestra los resultados individuales fuerza en función de la apertura de fisuras para las probetas, y el promedio obtenido. Allí se puede ver gráficamente la estabilidad de la resistencia residual luego de la fisuración. Luego, en la Figura 4 se presenta un diagrama de dispersión de puntos de la muestra estudiada. Se presenta para cada probeta los valores de resistencia residual a la tracción.



Figura 3: Fuerza en función de la apertura de fisuras para el ensayo EN. Se presentan los resultados individuales y el promedio de todos los resultados.



Figura 4: Diagrama de dispersión de los resultados obtenidos. Para cara probeta (FUN-EN-i de 1 a la 16) Se presentan los valores obtenidos para cada tensión residual.

Con los esfuerzos obtenidos se calculó la tensión en la pieza para cada apertura de fisura, para cada probeta, y en la Tabla 4 se presentan los valores de resistencia estadísticos para la muestra. Se puede ver que luego de la fisuración la tensión residual en la pieza se mantiene relativamente uniforme (en el rango de 1,57 \pm 0,05 MPa), al igual que el coeficiente de variación.

	CMOD (mm)	Media (Mpa)	SD (Mpa)	CV (%)	Característica (Mpa)
fl		4,23	0,54	13	3,35
fr1	0,5	2,17	0,33	15	1,62
fr2	1,5	2,27	0,42	18	1,58
fr3	2,5	2,30	0,44	19	1,58
fr4	3,5	2,19	0,41	19	1,52

Tabla 4: Resultados estadísticos para la muestra de probetas de ensayo EN.

4. ENSAYO MVD

Este es un ensayo que se está desarrollando en Facultad de Ingeniería, que permite obtener resultados fácilmente relacionables con los del ensayo de viga EN pero con probetas más pequeñas, y ensayable en prensas más presentes en las empresas constructoras uruguayas. [4], [5], [6]

Para la ejecución de este ensayo es necesario primero realizar una entalla en las probetas que permita introducir una cuña. Al momento del ensayo la carga se aplica en la cuña de manera de ejercer una tracción indirecta en la probeta (ver Figura 5).

Instituto de Estructuras y Transporte Prof. Julio Ricaldoni

Grupo de Hormigón Estructural



Figura 5: a) Esquema del ensayo MVD b) Ensayo MVD en la prensa del Instituto de Estructuras y Transporte.

A partir de este ensayo se obtienen valores de esfuerzo ejercido por la prensa, en función del desplazamiento del pistón, también de la prensa. Luego, para esfuerzos mayores al límite elástico de la probeta, es posible traducir los valores de desplazamiento del pistón a valores de apertura de fisura de la probeta. De esta manera se obtienen curvas de esfuerzo en función de apertura de fisura comparables con los que se tienen para el ensayo de flexotracción a 3 puntos según EN 14651.

El objetivo de realizar este ensayo en este proyecto es validar el factor de conversión entre el ensayo EN y el ensayo MVD.

4.1. Transformación de resultados de ensayo Montevideo a equivalente ensayo EN

A continuación se describirá brevemente como se puede pasar de resultados a ensayos MVD, al equivalente según ensayo EN. Se puede ver con más detalle en la bibliografía [4], [5], [6].

- 1) Identificar el límite de proporcionalidad (F_L) de la probeta ensayada, que será igual a la máxima fuerza aplicada durante el ensayo
- 2) Calcular para cada esfuerzo (F), mayor al límite de proporcionalidad (F_L), el "Delta pistón" que será igual al desplazamiento del pistón para ese esfuerzo (δ) menos el desplazamiento en el momento de alcanzar el límite de proporcionalidad (δ_o). $\Delta_{pistón} = \delta \delta_0$
- 3) Calcular la apertura de fisura equivalente (*CMOD*) para cada delta pistón, igual a $w_m = \Delta_{pistón} * 2 * \tan(0.15^\circ)$
- 4) Identificar las fuerzas F1, F2, F3 y F4 del ensayo correspondientes a las aperturas de fisura (*CMOD*) 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 respectivamente.



5) Calcular las tensiones residuales para cada fuerza con b y h_{sp} de la probeta en cuestión, asumiendo la luz de una probeta EN usual (l=500 mm)

$$f_{R,i} = \frac{3}{2} \frac{F_i l}{b h_{sp}^2}$$

6) Multiplicar los resultados de esfuerzo residual por 1,4 , y por 1,1 para el resultado del límite de proporcionalidad.

4.2. Resultados

Los resultados individuales de fuerza en función de apertura de fisura para las probetas, y el promedio de la muestra, se muestra en la Figura 6. Allí se puede ver que la forma de la curva guarda estrecha relación con la presentada en la Figura 3. Luego, en la Figura 7 se presenta el diagrama de dispersión de resultado de resistencias residuales para la muestra estudiada, donde también se puede ver un comportamiento similar al presentado en la Figura 4.



Figura 6: Fuerza en función de apertura de fisura para cada probeta, y promedio de todas. Se distinguen resultados de probetas prismáticas vs. cúbicas.



Figura 7: Diagrama de dispersión de puntos. Para cada probeta Fun-MVD-i se presentan las resistencias residuales a tracción.

4.3. Relación de los resultados EN con los resultados del ensayo MVD

En la Tabla 5 se muestran por un lado los resultados obtenidos en el ensayo EN 14651, por otro para el ensayo MVD, los valores transformados del ensayo MVD, y la relación entre los resultados transformados y los resultados del ensayo EN. El factor que convierte los resultados del ensayo MVD al ensayo EN, Ki, toma el valor 1,1 para la resistencia en el límite de proporcionalidad, y 1,4 para el resto de resistencias residuales.

	EN	MVD	MVD*ki	MVD*Ki/EN
fl (MPa)	4,23	3,75	4,12	0,97
fr1 (MPa)	2,17	1,59	2,23	1,03
fr2 (MPa)	2,27	1,70	2,38	1,05
fr3 (MPa)	2,30	1,55	2,16	0,94
fr4 (MPa)	2,19	1,41	1,98	0,90

Tabla 5: Resultados de resistencias residuales para cada ensayo, y transformación de resultados del ensayo MVD.

En la Figura 8 se puede ver como la curva Fuerza en función de CMOD para el ensayo MVD transformado se asemeja con la curva obtenida en el ensayo EN.





Figura 8: Curva Fuerza (CMOD) para los ensyaos EN y MVD.

5. ENSAYO A TRACCIÓN EN BARRAS DE FRP

Para este ensayo se siguieron los lineamientos de ASTM D7205 D7205M [7]. El ensayo se realizó en el laboratorio del Instituto de Estructuras y Transporte.

Se ensayaron 3 barras de diámetro comercial 8 mm, y 3 de 6 mm. Se utilizaron barras de 60 cm de longitud, donde los 20 cm superiores e inferiores se colocaron dentro de un tubo metálico, utilizando para la unión una resina epoxi. Las barras se sujetaron a la prensa mediante mordazas, que quedaron en contacto directo con el tubo metálico (ver Figura 9). El ensayo se realizó a una velocidad de 10 kN/min, y los resultados se presentan en la Tabla 6.



Figura 9: Ensayo de barra de FRP en el laboratorio de estructuras y transporte, en el IET.



	Promedio	SD	CV (%)	Característico	
	Φ6				
Diámetro valle (mm)					
	5,04	0,10	2,02	5,03	
ffu (MPa)					
	1.193,39	76,89	6,44	1.067,29	
		Φ	8		
Diámetro valle (mm)					
	6,60	0,03	0,51	6,55	
ffu (MPa)					
	1.067,98	90,62	8,49	919,36	

Tabla 6: Resultados estadísticos para el ensayo realizado, para ambos diámetros estudiados.

6. CONCLUSIONES

A partir de los ensayos realizados se logró determinar los valores de resistencia a utilizar en el ajuste de modelos.

En dicho ajuste, se considerarán los siguientes:

- Resistencia del hormigón (C30 y HRF30)
 - fcm = 38,32MPa resistencia media a la compresión según ensayo a cilindros de 15x30 a 56 días para el C30
 - fcm = 37,60MPa resistencia media a la compresión según ensayo a cilindros de 15x30 a 56 días para el HRF30
 - o $f_{r_{3,m}}=2,30$ MPa resistencia residual para una apertura de fisura de 2,5mm, según ensayo EN 14651.
- Resistencia de las barras de FRP según ensayos de caracterización
 - $\circ f_{fu} = 1068 \text{MPa}$
 - $\circ \quad \emptyset = 6,6mm$

Se compararon los resultados de resistencia residual según los diferentes ensayos, y se validó el factor 1,4 como factor de correlación.

Respecto a la comparación entre el ensayo MVD y el ensayo según EN 14651, se verifica existe una relación estrecha entre ambos materiales. Esto implica que en este caso podría usarse el ensayo MVD como sustitutivo durante el control de calidad en la obra.

7. **Referencias**

- [1] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS UNIT 1920-4, "Ensayos de hormigón – Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido." Montevideo, 2020.
- [2] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. De Figueredo, "Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test, Constr. Build. Mater," *Constr. Bulid Mater*, vol. 192. pp. 731–741, 2018.



- [3] British Standards Institution., *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* 2005.
- [4] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. De Figueiredo, "ANALYTICAL CORRELATION BETWEEN MONTEVIDEO TEST (MVD) AND THREE-POINT BENDING TEST FOR FIBRE REINFORCED CONCRETE (FRC)," 2019.
- [5] "Ensayo Montevideo-B-1."
- [6] L. Segura-Castillo, R. Monte, and A. D. de Figueiredo, "Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test," *Constr Build Mater*, vol. 192, pp. 731–741, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101.
- [7] ASTM, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars 1," 2016, doi: 10.1520/D7205_D7205M-06R16.

Revisión 00

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



Anexo 6 – Artículo de difusión

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Mg. Arq. Iliana Rodríguez Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 9 de julio de 2024





Instituto de Estructuras y Transporte Prof. Julio Ricaldoni

Grupo de Hormigón Estructural

Índice

1.	INTI	RODUCCIÓN	4
2.	МЕТ	rodología	5
	2.1.	Modelo de cálculo	5
	2.2.	Ensayos	6
3.	RES	ULTADOS	8
4.	CON	ICLUSIONES	8
5.	AGR	ADECIMIENTOS	9
6.	REF	ERENCIAS	9

Este artículo resume los resultados preeliminares del proyecto, consideran los ensayos de una loseta por tipo. El mismo fue enviado al congreso "Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural – 2024".



Victoria Olivera ⁽¹⁾, Rafael Leites de Moraes ⁽¹⁾, Iliana Rodríguez ⁽¹⁾, Bruno Bouchard ⁽¹⁾ y Luis Segura-Castillo ⁽¹⁾ ¹ Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, 11300, Uruguay <u>victoria.olivera@fing.com.uy</u> y <u>lsegura@fing.edu.uy</u>

Resumen

Los reactores de núcleo de aire inducen corrientes de Foucault (corrientes parásitas) en los conductores eléctricos de su cercanía. De fundarse estos equipos con hormigón armado tradicional, las corrientes generadas en las barras de acero atentarían contra su durabilidad. Nuevas normas permiten diseñar y construir estructuras sin refuerzo metálico, utilizando hormigón reforzado con macro-fibras plásticas (HRF) y/o con barras de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP). El objetivo de este proyecto es diseñar losetas de HRF y FRP y contrastar experimentalmente su capacidad estructural. Para ello, se determinó teóricamente el momento último para cada material. Se construyeron 12 losetas de 3,4 m de longitud, con refuerzo principal de: a) HRF; b) FRP; c) Combinación de HRF y FRP; y d) Acero, a modo de control (3 repeticiones por tipo). Resultados preliminares muestran: a) Para todos los materiales curvas cualitativas fuerza-desplazamiento esperables; b) Para el HRF, resistencias menores a las esperadas (Mteo= 1.40 kNm; Mexp= 4.86 kNm); y c) Para el FRP, resistencias cercanas a las esperadas (Mteo= 24.74 kNm; Mexp= 31.39 kNm). Los resultados muestran la viabilidad del refuerzo no metálico en estructuras de hormigón.

Abstract

Air core reactors induce Foucault currents (eddy currents) in the electric conductors nearby. If these devices were founded with traditional reinforced concrete, currents generated in steel bars would compromise their durability. New standards allow the design and construction of structures without metallic reinforcement, using concrete reinforced with macro-plastic fibers (HRF) and/or with Fiber Reinforced Polymers (FRP) bars. The aim of this project is to design HRF and FRP slab strip and experimentally compare their structural capacity. To achieve this, the ultimate moment was theoretically determined for each material. Twelve slab trips of 3.4 m length were constructed, with the main reinforcement of: a) HRF; b) FRP; c) Combination of HRF and FRP; and d) Steel, as a control (3 repetitions per type). Preliminary results show: a) Qualitative force-displacement curves expected for all materials; b) For HRF, lower resistances than expected (Mteo = 1.4 kNm; Mexp = 4.86 kNm); and c) For FRP, resistances close to the expected values (Mteo = 24.74 kNm; Mexp = 31.39 kNm). It is observed that structures with non-metallic reinforcement are viable. **Keywords:** *reactors, non-metallic reinforcement, concrete.*



1. INTRODUCCIÓN

Los reactores de núcleo de aire son equipos usados tanto para la distribución como para la transmisión de voltaje en una amplia gama de aplicaciones [1]. En particular, el reactor ejemplo para el que se calcularon las fundaciones en este proyecto tiene un funcionamiento en serie y su objetivo es limitar la corriente de cortocircuito en la barra de compensación de una subestación eléctrica. Su funcionamiento genera un campo magnético en su entorno que afecta no solo a los componentes del reactor, sino también a todos los elementos metálicos dentro de su radio de alcance. Así, es capaz de inducir corrientes parásitas dentro de los loops cerrados de elementos metálicos que alcance. En particular, si se realizan fundaciones de hormigón armado tradicional, se generan corrientes en el acero de refuerzo, aumentando su temperatura, lo cual atenta con la durabilidad de la estructura.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados preliminares de un estudio con el fin de diseñar y validar experimentalmente bases con refuerzo no metálico para reactores de núcleo de aire. En particular, se plantean soluciones con Hormigón Reforzado con macro fibras plásticas (HRF) y barras de *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP).

Las fibras de acero y sintéticas se han utilizado en pisos, pavimentos y refuerzos de hormigón por más de 40 años, para mejorar distintas propiedades del hormigón. Se pueden distinguir dos tipos: Micro-fibras plásticas (con longitudes de entre 13-25 mm) y Macro-fibras estructurales (con longitudes de 25-65 mm). Las segundas, habitualmente sintéticas o de acero, se utilizan para mejorar el enlace de la matriz endurecida: reduce la fisuración visible, aumenta la resistencia al corte, la fatiga a la flexión, la resistencia al impacto y, después de formada una fisura, aporta una resistencia residual, siendo capaz de transmitir los esfuerzos de la matriz. Gracias a esta resistencia residual, pueden sustituir hasta completamente las armaduras convencionales.

En los últimos años ha habido un avance grande a nivel mundial a nivel normativo, de guías y de recomendaciones, incorporando en distintos niveles aspectos de diseño, elaboración, construcción y control de calidad. A nivel normativo referido a diseño estructural, un documento de referencia es el "Código Modelo 2020" [2]. Además, cada vez más países tienen normas en este tema, por ejemplo: España [3], USA [4], Brasil[5] o Asia[6].

Las barras de GFRP son fibras de vidrio envueltas en una matriz epoxi, y logran alcanzar altas resistencias (800 a 1500 MPa). No obstante, tienen un módulo de elasticidad menor que el acero y presentan un comportamiento frágil. Estas características hacen que el cálculo de hormigón reforzado con FRP tenga diferencias respecto al cálculo tradicional. Al igual que para el HRF, existen guías, normas y recomendaciones que contemplan el diseño, la construcción, y el control de calidad de este material [7], [8]



2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo de cálculo

A partir de la estructura en estudio (ver Figura 1) y las cargas dadas por el fabricante se realizó un modelo de cálculo en un software de elementos finitos. De este modelo se extrajeron las solicitaciones de diseño para dimensionar las plateas de fundación.



Figura 1: Reactor a fundar.

Se diseñaron 4 alternativas: una reforzada únicamente con hormigón reforzado con fibras (HRF), una reforzada únicamente con una doble malla (superior e inferior) de barras de Glass Fiber Reinforced Polymer (FRP), una con una malla de FRP centrada en el canto y HRF (H+F), y una a modo de control (Acero). La geometría de las plateas para las 4 alternativas es 2,4x2,4x0,2m3 y el armado para cada tipo se presenta en la Tabla 1. En la misma tabla se presentan la normativa utilizada para cada tipo. En ninguna de estas normas se explicita el uso combinado de HRF+FRP. El diseño de las plateas se extrapoló a losetas de menor tamaño, ensayables en laboratorio, cuyas dimensiones también se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1: Momentos últimos de diseño $(M_{u,teo,d})$, refuerzo asociado, dimensiones y normas de diseño para las plateas.

Tipo	Refuerzo	Mu,teo,d	Armado	Dimensiones	Norma
		(kNm/m)		losetas (bxhxl)	usada
1) HRF	HRF	6,57	8 kg/m3	0,45x0,20x3,4 m	EHE - 08
2) FRP	FRP	38,28	Φ10/12	0,36x0,20x3,4 m	ACI 440.1R-
			(FRP)		15
3) H+F	HRF+FRP	28,08	Φ10/12	0,36x0,20x3,4 m	ACI 544.4R-
			(FRP) + 8		18 + ACI
			kg/m3		440.1R-15
					(*)
4) A	Acero	33,16	Φ10/15	0,45x0,20x3,4 m	EHE - 08

La cuantía de las losetas se definió para que sea igual que la de las plateas, y el momento último se obtuvo considerando resistencias medias, y sin contemplar factores de seguridad sobre los materiales. Asimismo, para la de HRF se consideró un factor de orientación de las fibras (k_0) igual a 0,5 por tratarse de una sección menor, más similar a la de una viga, donde la orientación de las fibras tiene mayor incidencia. Los valores esperados para el momento de rotura se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Momentos últimos esperados para las losetas, considerando resistencias medias sobre los materiales, y sin factores de seguridad.

Тіро	$M_{u,teo,m}$ (kNm)
1) HRF	1,40
2) FRP	24,74
3) H+F	16,52
4) A	15,81

2.2. Ensayos

Las losetas se sometieron a un ensayo a flexión a 4 puntos, según el esquema presentado en la Figura 2a. El ensayo se realizó con control de desplazamiento, el cual se midió mediante dos LVDTs, ubicados en el centro de la luz y en la cara superior. Se promediaron los valores de ambos. Se puede ver una foto durante el ensayo en la Figura 2b.



Figura 2: Configuración del ensayo: a) Esquema del ensayo, b) Foto durante el ensayo.

El momento máximo en la loseta es igual a el momento causado por el peso propio del elemento, más el momento ejercido por la prensa *(Ec. (1))*.

$$M = M_{pp} + M_{prensa} \tag{1}$$

Donde el momento provocado por el peso propio es M_{pp} y vale aproximadamente 2,05 kNm para las losetas de 45 cm de ancho, y 1,64 kNm para las losetas de 36 cm. En esta experiencia el momento por el peso propio se calculó teóricamente, y los resultados experimentales que se presentan son valores de M_{prensa} . Se llamará $M_{u,exp}^*$ y M_{exp}^* al momento último ejercido por la prensa durante al ensayo, y al momento ejercido por la prensa para cada desplazamiento, respectivamente. M_{prensa} se calcula en función de la carga ejercida por la prensa (P) siguiendo la *Ec. (2)*.

$$M_{prensa} = M_{exp}^* = \frac{P \times 1,15m}{2}$$
(2)



3. RESULTADOS

En la Figura 3 se puede ver la curva M_{exp}^* -Desplazamiento para cada loseta ensayada. En la Figura 3a se muestra el diagrama completo para las curvas, mientras que en la Figura 3b se muestra para desplazamientos de entre 0 y 20 mm. Se observa que para todos los materiales la curva tiene la forma esperada: El acero presenta un comportamiento lineal, con un cambio de pendiente en la fisuración, y luego un comportamiento plástico hasta la rotura.

En la curva de FRP así como en la de H+F se puede ver que la pendiente es menor que la del tramo elástico del acero, esto se corresponde con la diferencia entre los módulos de elasticidad de estos materiales. Además, no se alcanza una zona de plastificación. En particular, en este ensayo ambas losetas rompieron por las barras de FRP. En el caso de que rompan por el hormigón se podría llegar a ver una pequeña fluencia en el final. A su vez, se ve que el momento último de la loseta de FRP es mayor que el de H+F, esto se corresponde con la diferencia de canto útil entre estas losetas.

Por otro lado, la loseta de HRF presenta un comportamiento totalmente distinto al resto, pero esperable para su tipo. Se puede ver una curva del tipo "*softening*", donde luego de la fisuración la resistencia disminuye.



Figura 3: Curvas M^*_{exp} -(δ) para cada tipo de loseta ensayado: a) curva general, b) detalle para desplazamientos entre 0 y 20 mm.

Sobre las resistencias últimas se observa un comportamiento esperado, donde la mayor es la del FRP, siguiendo la del acero y la de H+F. También se destaca que si bien el FRP no tiene un comportamiento dúctil, se puede ver que cuando se acerca a la rotura las deformaciones son igual de significativas que las de acero previo a la rotura.

4. CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados para todos los materiales estudiados muestran una alta concordancia con los resultados experimentales, tanto en términos de esfuerzos como de deformaciones. Esto indica que las metodologías empleadas son robustas y pueden ser aplicadas con confianza en proyectos futuros.





Para el refuerzo con polímeros reforzados con fibra (FRP), existe normativa específica que permite su diseño exclusivo utilizando este material. Los resultados experimentales de los momentos últimos han demostrado ser superiores a los teóricos, lo cual es alentador. Sin embargo, se presentan dificultades constructivas significativas al intentar armar esfuerzos de corte, especialmente en la instalación de estribos.

En cuanto al refuerzo con fibras estructurales (HRF), también hay normativas que permiten su diseño. No obstante, las resistencias alcanzables con HRF son inferiores a las obtenidas con FRP. Además, con las fibras utilizadas en los estudios, no sería posible reforzar reactores de mayor tamaño al utilizado en el ejemplo sin incrementar considerablemente el espesor de la fundación.

La combinación de FRP y HRF presenta una solución prometedora, donde el FRP puede ser utilizado para absorber los esfuerzos de flexión y el HRF para manejar los esfuerzos de corte y punzonado. Aunque ya existen varios resultados experimentales que respaldan esta estrategia, todavía no hay una normativa que abarque explícitamente el diseño conjunto de estos materiales, lo que representa un área de oportunidad para el desarrollo de nuevas directrices.

Finalmente, se considera la posibilidad de utilizar refuerzos puntuales con acero, evitando la formación de "loops" que podrían generar corrientes parásitas. También se puede explorar el refuerzo combinando fibras de acero y plásticas, aunque esto requeriría una evaluación adicional del comportamiento magnético para asegurar su viabilidad.

En resumen, cada material y combinación estudiados presentan ventajas y desafíos específicos, y su aplicación dependerá de las condiciones particulares de cada proyecto y de la evolución de las normativas que regulan su uso.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y a UTE por la financiación de este proyecto (Proyecto FDU_S_2022_1_173162), y a las empresas que lo apoyaron aportando diversas ayudas: Hormigones Artigas, Ingener, Sika y Halidar. También agradecer también a Eneas do Santos, quien realizó gran parte de los ensayos que implicó este proyecto, y a Ignacio Nuñez quien contribuyó con sus conocimientos sobre subestaciones eléctricas.

6. **Referencias**

[1] D. Caverly, K. Pointner, R. Presta, P. Griebler, H. Reisinger, and O. Haslehner, "Air Core Reactors: Magnetic Clearances, Electrical Connection, and Grounding of their Supports," 2017.

[2] International Federation for Structural Concrete (FIB), "Model Code 2020." 2020.

[3] Gobierno de España, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA," 2008.

[4] ACI Committee 544, *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. 2018.



[5] ABNT NBR 16935, " Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras— Procedimento." 2021.

[6] SS 674, "Fibre concrete—design of fibre concrete structures. Singapore Standard, Singapore Standards Council." 2021.

[7] Fédération internationale du béton. Task Group 9.3. Working Party., *FRP reinforcement in RC structures : technical report*. International Federation for Structural Concrete, 2007.

[8] ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute, 2015.

Revisión 00

Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162



GRUPO DE

HORMIGÓN

ESTRUCTURAL

UNIVERSIDAD

DE LA REPÚBLICA

URUGUAY

Guía de diseño, control y ejecución

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 9 de julio de 2024



Tabla de contenido

1.	INT	RODUCCIÓN
2.	DISI	EÑO3
:	2.1.	HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)
	-	Introducción
	-	Guías de diseño y normas3
	-	Diseño4
:	2.2.	BARRAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)5
	-	Introducción
	-	Guías y normas de diseño5
	-	Diseño5
3.	CON	ITROL DE CALIDAD
	3.1.	HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)6
	-	HRF en estado fresco
	-	HRF en estado endurecido
	3.2.	BARRAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)
4.	EJEC	CUCIÓN
4	4.1.	HRF7
4	4.2.	FRP7
5.	REF	ERENCIAS



1. INTRODUCCIÓN

En la presente guía se brinda información necesaria, aunque no exhaustiva, para el diseño, control y ejecución de plateas de fundación con refuerzos no metálicos. La misma pretende ser un primer acercamiento a estos materiales, y deberá profundizarse con bibliografía complementaria.

2. DISEÑO

Se desarrolla un ejemplo de las verificaciones en el anexo A1- Memoria de cálculo. Asimismo, en este apartado se explican las bases teóricas principales para el diseño con los distintos materiales.

2.1. Hormigón reforzado con fibras (HRF)

- Introducción

Las fibras cobran importancia en un elemento cuando este se fisura, dado que las fibras comienzan a trabajar "cociendo la fisura" (ver Figura 1). Es por esto que la tensión que aportan las fibras se denomina Resistencia residual. Además, dado que el ensayo de caracterización en estado endurecido es un ensayo a flexión, los valores de interés para el diseño corresponden a la resistencia residual a la flexotracción. En particular, para la caracterización se evalúa la resistencia para aperturas de fisura iguales a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm, asociados a los valores de resistencias residuales característicos $f_{r,1,k}$, $f_{r,2,k}$, $f_{r,3,k}$ y $f_{r,4,k}$, respectivamente.



Figura 1:Esquema de fibras cociendo una fisura.

- Guías de diseño y normas

Hoy en día existen varias normativas y recomendaciones respecto al HRF, en particular para este proyecto se usaron y se recomiendan como bibliografía de consulta las siguientes:

- Código Modelo 2022 [1]
- EHE 08 Instrucción española EHE (Anejo 14) [2]
- ACI 544-18 Guide to design with fiber reinforced concrete [3]
- TR-14 Concrete industrial ground floors: a guide to design and construction [4]



- SS 674 Fibre concrete—design of fibre concrete structures. Singapore Standard, Singapore Standards Council [5]
- ABNT NBR 16935 Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras—Procedimento [6]

- Diseño

Para el diseño se simplifica el esquema de tensiones en la sección, asumiendo una tracción uniforme en toda la sección, con una compresión puntual en el extremo superior de la pieza (ver Figura 2) Dicha tracción uniforme en la pieza es la resistencia del hormigón a la tracción ($f_{ctR,d}$) y vale un tercio de $f_{r,3,d}$. El esquema constitutivo es el presentado en la Figura 3.



Así, considerando el esquema de tensiones descripto, si se considera una sección de bxh se tiene que la tracción de diseño es igual a $T = f_{ct,R,d}bh$, el brazo de par es igual a h/2, y por tanto el momento resistente de la sección es $M_u = f_{ct,R,d} \frac{bh^2}{2}$.

La cuantía de fibras requerida para el proyecto particular será aquella que provea un valor de tensión residual deseado, el cual se determinará a partir de ensayos y pruebas de dosificación.

Para que el Hormigón Reforzado con Fibras se considere estructural debe cumplirse que la resistencia residual $f_{r,1,k}$ mayor al 40% de f_{rL} , y $f_{r,3,k}$ mayor al 20% de f_{rL} , siendo f_{rL} la tensión en el momento de fisuración.



2.2. Barras de Polímeros reforzados con fibras (FRP)

- Introducción

En los elementos de hormigón armado las barras de FRP pueden tomar el lugar de las barras de acero. Asimismo, se deben contemplar una serie de propiedades mecánicas de estas barras que son distintas a las del Acero (ver Tabla 1).

Tabla 1: Tabla comparativa entre las propiedades principales de las barras de FRP y las de Acero

Acero	GFRP
Elemento dúctil, con un tramo de plasticidad	Elemento frágil, tiene un comportamiento
previo a la rotura	elástico hasta la rotura
Módulo de elasticidad 7 veces mayor al del	Módulo de elasticidad aproximadamente el
hormigón	doble del hormigón
Tensión de rotura usual en el acero hormigón	Tensión de rotura de 800 MPa (Pudiendo variar
armado en Uruguay 500 MPa	según el fabricante)

- Guías y normas de diseño

- ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars [7]
- ACI 440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber- Reinforce Polymer (GFRP) Bars Code and commentary [8]
- FRP reinforcement in RC structures: technical report [9]

Diseño

Dado que las barras de FRP rompen bruscamente sin pasar por un período plástico, el diseño a flexión de los elementos reforzados con estas barras penaliza más la rotura por las barras, que la rotura por el hormigón. Es decir, es preferente diseñar para que la falla se de por el hormigón.

Para esto, se define una cuantía de balance que representa la cuantía para la cual la falla se da en los dos elementos simultáneamente. Cuando la cuantía de la pieza es mayor que la cuantía de balance, la pieza falla por su cabeza de compresión, y cuando es menor falla por las barras. Está cuantía se calcula (según la ACI-440.1R-06 [7]) como:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f + f_{fu}}$$

Donde:

- ε_{cu} es la deformación última del hormigón a compresión.
- β_1 es un factor igual al cociente entre la profundidad del rectángulo de tensiones en la sección sobre la profundidad de la línea neutra, igual a 0,85 para f'_c menor o igual a 28 MPa.
- $f_c y f_{fu}$ son las resistencias características a compresión del hormigón, y a tracción de las barras, respectivamente.
- E_f es el módulo de elasticidad de las barras.



Respecto a la armadura a cortante, se reduce la capacidad de las barras a un 60% (pudiendo ser mayor si se tiene información dada por el fabricante), y se limita la deformación de las barras a cortante a un 0,5%. De esta manera la resistencia a considerar de las barras a cortante es el mínimo entre $0,005 * E_f y 0,6 * f_{fu}$.

Por otro lado, respecto a los estados límites último de servicio, dado que las barras de FRP tienen un bajo módulo de elasticidad, suelen tener mayores deformaciones y aperturas de fisura que los elementos reforzados con acero. No obstante, para este material la apertura de fisura no es una limitante desde el punto de vista de durabilidad, como sí lo es para el acero, si no que es meramente estético (en los casos en los que la pieza no esté expuesta al agua).

3. CONTROL DE CALIDAD

3.1. Hormigón reforzado con fibras (HRF)

- HRF en estado fresco

Debe seguirse el control de calidad habitual para el hormigón convencional, agregando el ensayo de conteo de fibras en estado fresco *EN 14721 – Determinación del contenido de fibras en el hormigón fresco en el endurecido* [10].

- HRF en estado endurecido

Además de realizarse probetas cilíndricas para la caracterización a compresión del hormigón, como es habitual, deben realizarse probetas prismáticas de 15x15x55/60 para la caracterización del material en estado endurecido siguiendo *EN 14651 - Test method for metallic fibre concrete: measuring the flexural tensile strength* [11].

3.2. Barras de polímeros reforzados con fibras (FRP)

Dado que se trata de una tecnología emergente para el mercado uruguayo, es altamente recomendable realizar los ensayos pertinentes para validar los datos dados por el proveedor. Existen lineamientos tanto por ACI como por ASTM para la determinación de diversos ensayos. En particular, la norma ACI 440.3R-12 [12] contiene una tabla (Tabla 1.3 [12]) donde se indica para cada propiedad la norma ASTM y el capítulo de la ACI para determinarla.



4. EJECUCIÓN

4.1. HRF

Respecto a la mezcla de HRF:

- Es altamente recomendado incorporar las fibras mediante dosificador, existiendo dos opciones:
 - Incorporar junto con los áridos
 - Incorporar al final de la mezcla
 - La velocidad recomendada para la incorporación de las fibras es la siguiente:
 - Fibras de acero: 40 kg/min
 - Fibras plásticas 5 kg/min

Un problema habitual es la formación de erizos en la mezcla. Esto ocurre cuando el mezclado se hace durante largos periodos de tiempo, o la incorporación de las fibras no es adecuada. Para reducir el riesgo de ocurrencia es recomendable incorporar las fibras en grupos – fibras que vienen encoladas con un producto soluble en agua.

Respecto al hormigonado, este material puede ser vertido directamente con tacho, así como bombeado o proyectado, y deben contemplarse las mismas precauciones que para el hormigón convencional. Por otro lado, respecto a la compactación, es altamente recomendable utilizar medios externos de compactación dado que las agujas vibratorias condicionan la orientación de las fibras. Esto no quiere decir que no sea correcto usar agujas vibratorias, sino que debe usarse con precaución.

4.2. FRP

La norma ACI 440.5R-08[13] establece lineamientos para la construcción de hormigón reforzado con barras de FRP. Además de dicha norma se destacan los siguientes puntos:

Precauciones de seguridad para los operarios

- El equipo de protección personal habitual de obra es necesario.
- Las barras deben ser cortadas en lugares ventilados y usando mascarilla.
- No deben manipularse las barras sin guantes.

Aspectos a tener en cuenta para su manipulación

- Vienen en rollos.
- Son livianas. Un solo operario puede levantar muchos metros fácilmente.
- Son fáciles de cortar. Se pueden cortar con una cierra manual.
- Por normativa no se pueden doblar en obra. En caso de querer usarse barras dobladas deben solicitarse a fábrica.



- No deben golpearse las barras. Esto las debilita y disminuye su resistencia.
- Dado que son más flexibles y livianas que las de acero, a la hora de armar la jaula se necesitan más apoyos intermedios para evitar "panzas" excesivas, y asegurar la correcta sujeción para que no floten.

5. Referencias

- [1] International Federation for Structural Concrete (FIB), "Model Code 2020." 2020.
- [2] Gobierno de España, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA," 2008.
- [3] ACI Committee 544, *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. 2018.
- [4] Concrete Society, Concrete industrial ground floors : a guide to design and construction. 2016.
- [5] SS 674, "Fibre concrete—design of fibre concrete structures. Singapore Standard, Singapore Standards Council." 2021.
- [6] ABNT NBR 16935, "Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras—Procedimento." 2021.
- [7] ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars*. American Concrete Institute, 2015.
- [8] ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber- Reinforce Polymer (GFRP) Bars Code and commentary," *CODE-440.11-22*. 2022.
- [9] Fédération internationale du béton. Task Group 9.3. Working Party., *FRP reinforcement in RC structures : technical report*. International Federation for Structural Concrete, 2007.
- [10] Asociación española de normalización y certificación, "Métodos de ensayo para hormigón con fibras metálicas Determinación del contenido en fibras en el hormigón fresco y en el endurecido - UNE-EN 14721," 2008.
- [11] British Standards Institution., *Test method for metallic fibre concrete : measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).* 2005.
- [12] ACI Committee 440, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures," *ACI 440.3R-12*. 2012.
- [13] ACI Committee 440, "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars," ACI 440.5-08. 2008.
Revisión 00





Proyecto ANII: FDU_S_2022_1_173162

USO DE FIBRAS ESTRUCTURALES Y BARRAS DE FRP PARA ESTRUCTURAS DE FUNDACIÓN DE EQUIPAMIENTOS ELÉCTRICOS

B2 - Memoria de cálculo de pilares

Preparado por: Ing. Victoria Olivera Ing. Bruno Bouchard Dr. Ing. Luis Segura

Grupo Hormigón Estructural Instituto de Estructuras y Transporte Facultad de Ingeniería – Udelar

Montevideo, 26 de junio de 2024



Tabla de contenido

1.	INTR	CODUCCIÓN
	1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA:
	1.2.	ESQUEMA BÁSICO DE CÁLCULO:4
	1.3.	NORMATIVA Y BASES DE CÁLCULO
	1.4.	AMBIENTE DE EXPOSICIÓN
	1.5.	Materiales5
	1.6.	CARGAS Y COMBINACIÓN DE CARGAS
2.	MOD	ELO DE ELEMENTOS FINITOS6
3.	ANÁ	LISIS DE EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN7
4.	VERI	FICACIONES PARA LOS PILARES CON BARRAS DE FRP8
	4.1.	VERIFICACIÓN PARA SOLICITACIONES NORMALES
	4.2.	VERIFICACIÓN PARA CORTANTE
5.	FUNI	DACIÓN



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es establecer las bases de cálculo utilizadas para el cálculo de los pilares de elevación para reactores, bajo el proyecto FDU_S_2022_1_173162 de ANII. En particular se implementarán barras de FRP ya que la estructura se verá expuesta a grandes campos magnéticos que elevan la temperatura del acero y dañan el hormigón.

1.1. Descripción de la estructura:

El objeto de la presente memoria es el cálculo de 4 columnas, de sección cuadrada de 30 cm de lado y 2,25 m de altura, y la base de fundación de la estructura.

Se conocen los esfuerzos sobre la estructura del reactor a través del plano BC210649 – 001 otorgado por UTE. En la Figura 1 se puede ver una de las ilustraciones presentes en el plano. En adición a las fuerzas presentes, dicho plano también informa que el peso de esta estructura es de 387 kg (3,87 kN).



Figura 1: Vista frontal de un reactor - estructura a soportar por la platea



1.2. Esquema básico de cálculo:

En la Figura 2 se puede observar el esquema básico de cálculo de la estructura, modelado como 4 barras de 2,25 metros de altura empotradas a fundación.

Sobre ellas se coloca el reactor que se comporta como un rígido articulado en 4 puntos a los pilares.



Figura 2 Esquema básico de cálculo de la estructura

1.3. Normativa y bases de cálculo

Los pilares se calculan con la norma ACI 440.11-22 (ACI Committee 440 (2023). ACI CODE-440.11-22 (SI units)) de hormigón armado con barras de FRP. Entre paréntesis rectos "[]" se indicará la referencia de la mencionada norma (indicando si es Artículo, Comentario, Tabla, Ecuación o Figura).

1.4. Ambiente de exposición

El factor predominante del ambiente de exposición de la platea es el campo magnético en el que se ve inmerso. Para evitar problemas de calentamiento de la pieza por la generación de circuitos la solución propone el uso de materiales únicamente de origen no metálico, por lo que tampoco se presentarán problemas de corrosión como sí existen en piezas con acero.



Aun así, las barras de FRP pueden presentar alteraciones en su comportamiento debido a la exposición a agua, exposición ultravioleta, elevada temperatura, soluciones alcalinas o acidas y la salinidad. Considerando una exposición de la pieza al suelo y al agua se tiene un coeficiente de reducción de tensión de diseño Ce=0,85 [Tabla 20.2.2.3].

Se considera un recubrimiento geométrico de 38mm asociado a evitar fisuras longitudinales originadas por la diferencia de coeficiente térmico entre el FRP y el hormigón. [Tabla 20.5.1.3.1].

En fundaciones, se considera un recubrimiento de 75mm por estar en contacto con el terreno [Tabla 20.5.1.3.1].

1.5. Materiales

Hormigón:

- f'c= 30 MPa. Resistencia asociada a la compresión a 28 días, según UNIT ISO 1920-4
- E= 25924 MPa

Barras FRP:

Se consideran barras Composite Brasil con propiedades:

- $f_{fu}^* = 800 \text{ MPa}$
- $E_f = 50 \text{ GPa}$

Barras acero

- $f_{fk} = 500 \text{ MPa}$
- $E_s = 200 \text{ GPa}$

1.6. Cargas y combinación de cargas

Sobre la estructura actúa una carga variable asociada al viento y a la fuerza de cortocircuito (F.C.C) igual a 15,10 kN, en dirección horizontal, a 1,07 m de altura del reactor, y otra vertical gravitatoria, igual al peso propio del transformador, de 3,87 kN. Adicionalmente hay una fuerza de tiro Fc aplicada en cualquier dirección. Se trabaja con combinaciones LRFD tal como especifica la normativa estadounidense [Tabla 5.3.1]. Dado que se desconoce la naturaleza de la fuera Fc, se trabajará con el peor caso, que es que ambas sean de la misma naturaleza.

En la Figura 3 se puede ver las direcciones consideradas para la carga horizontal actuante.



Figura 3 Direcciones de carga horizontal

Tabla I	!: :	Factores	de	seguridad	apli	icadas	a	las	distintas	cargas,	según	las	distintas	combin	naciones.
				0						0	0				

Norma	Combinación	Peso propio	$F_{V+F.C.C}$	F _c
ACI	LRDF1	1,40	0,00	0,00
ACI	LRDF2	1,20	1,60	1,60
ACI	LRDF3	0,90	1,60	1,60

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se trabaja con un modelo en SAP2000, el cual funciona mediante elementos finitos.



Figura 4 Modelo de elementos finitos

Las solicitaciones de diseño de primer orden se pueden ver en la Tabla 2. Estas se obtienen en la base de las columnas donde las solicitaciones de flexión son máximas.



Combinación	Pu (kN)	Vu (kN)	Mu (kNm)
Máxima tracción	12,6	6,24	14,05
Máxima compresión	-25,2	6,24	14,05

3. ANÁLISIS DE EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN

En los casos de columna comprimida, puede haber efectos de segundo orden. Se calculan los efectos de segundo orden globales según el artículo 6.6.4.6. La carga crítica de la cada columna se calcula como [Ecuación 6.6.4.4.2]:

$$P_c = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{(k \ l_c)^2} = 1997 \ kN$$

Donde:

- k = 2, por considerarse una ménsula
- $(EI)_{eff} = 0,24 EI (6.6.4.4.4a)$

Luego, el momento de diseño se debe calcular mediante la siguiente mayoración (6.6.4.6.1):

$$M_2 = \delta_s M_{2s}$$

Con la [Ecuación 6.6.4.6.2b]:

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{0.75 \sum P_c}} = 1,005$$

Siendo $\sum P_u$ la carga gravitatoria total sobre la estructura y $\sum P_c$ la suma de las cargas críticas de todas las columnas.

Por lo tanto, se desprecian los efectos de segundo orden globales.

Repitiendo para cada columna localmente se obtiene que los efectos de segundo orden locales también son despreciables [Ecuación 6.6.4.5.1]:

$$M_c = \delta M_2$$

Con la [Ecuación 6.6.4.5.2]:

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0.75 P_c}} = 0.61 \ge 1 \to \delta = 1$$

Adicionalmente se verifica que el momento de cálculo sea mayor que el momento mínimo de primer orden $(M_{2,min})$ [Ecuación 6.6.4.5.4]:

$$M_{2,min} = P_{u_1}(15 + 0.03h) = 0.72 \ kNm \le M_u = M_2$$



4. VERIFICACIONES PARA LOS PILARES CON BARRAS DE FRP

4.1. Verificación para solicitaciones normales

Se diseña considerando las siguientes hipótesis y limitaciones:

- Cuantía mínima: 0,01 del área de hormigón [Artículo 10.6.1.1]
- Cuantía máxima: 0,08 del área de hormigón [Artículo 10.6.1.1]
- La resistencia a tracción de las barras se considera: $f_{fu} = C_e f_{fu}^* = 680 MPa$
- Si la compresión de diseño es mayor al 10% de (Ac fc') se debe limitar la deformación de las barras de FRP a 0,01. [Artículo 10.3.2.1]
- La deformación de rotura del hormigón es de $\varepsilon_{cu} = 0,003$.
- La compresión máxima que puede soportar una columna es $0,80A_c f_c$ [Tabla 22.4.2.1]
- El factor LRFD se define: [Tabla 21.2.2]

Net tensile strain at failure in the outermost layer of reinforcement, ϵ_{fl}	Classification	ф
$\varepsilon_{ft} = \varepsilon_{fl}$	Tension-controlled	0.55
$\epsilon_{fl} > \epsilon_{fl} > 0.8 \epsilon_{fl}$	Transition*	1.05 - 0.5ε _{ft} /ε _{ft}
$\epsilon_{ft} \le 0.8 \epsilon_{fu}$	Compression- controlled	0.65

Bajo estas hipótesis se define un armado longitudinal de $12\emptyset 10$ (A_f = 9,42 cm², cumpliendo con la cuantía mínima).

En la Figura 5Figura 3 se muestra un diagrama de interacción del pilar, en él se indica la posición de la verificación considerando la dirección de carga A, para los casos de máxima compresión y tracción para viento paralelo a ejes de pilares.



Figura 5: Diagrama de interacción para el caso de dirección de carga A (eje x en kN; eje y en kNm)



En la Casos de máxima compresión y tracción para viento a 45° respecto a ejes de pilares (dirección de carga B, ver Figura 6Figura 3):



Figura 6: Diagrama de interacción para el caso de dirección de carga B (eje x en kN; eje y en kNm)

Como se ve el efecto de la directa es despreciable en el comportamiento de la pieza, que trabaja principalmente a flexión.

4.2. Verificación para cortante

Se aplican las siguientes condiciones para definir el armado a cortante:

- Diámetro mínimo de barras en pilares: Ø10 [Artículo 25.7.2.2]
- Separación máxima en pilares: mínimo entre 12Ø_{long}; 24Ø_{trans}, y la dimensión mínima del elemento [Artículo 25.7.2.1]
- La contribución del hormigón a cortante se considera nula debido a que la sección puede estar traccionada, es decir, $k_{cr} = 0$ (hipótesis conservadora [Comentario R22.5.5.1]).
- Para el cálculo de la armadura de cortante se restringe la deformación a 0,005 [Artículo 20.2.2.6].
- La resistencia a tracción de los estribos (f_{ft}) es el mínimo entre 0,005 E_f [Artículo 20.2.2.6] y 0,60 f_{fu} (reducción que considera como se debilita la barra en la zona de doblado, obtenida de ASTM 7957/D7957M).
- El factor de reducción LRFD es 0,75 [Tabla 21.2.1].

La resistencia de la biela comprimida se calcula: $V_{res} = \phi \ 0,2 \ f'_c b_w d = 441 \ kN$ [Ecuación 22.5.1.2].

El cuantía mínima necesaria se calcula [Artículo 10.6.2.2]: $A_{fv,min} = \max\left(\frac{0.062\sqrt{f_c'}b_{ws}}{f_{ft}};\frac{0.35 b_{ws}}{f_{ft}}\right) =$

$50,4 mm^2$

Se coloca la cuantía geométrica mínima exigida para pilares: Ø10c/12cm ($A_{fv} = 157 mm^2$) Luego, se calcula la resistencia de la sección [Ecuación 22.5.8.5.3]:



$$V_{res} = \phi V_f = \frac{\phi A_{fv} f_{ft} d}{s} = 65 \ kN$$

Por lo cual Vres > Vu = 6,24 kN

En la Figura 7 se muestran detalles de armado que prevé la norma. De estos, se opta por la tercera opción de estribos, colocando ganchos en una de las dos barras centrales. Los ganchos se colocan al tresbolillo.



Fig. R25.7.2.3a—Illustrations to clarify measurements between laterally supported column bars and rectilinear tie anchorage. Figura 7: Esquema de armado de estribos [Figura R25.7.2.3a]



El empalme de las dos C que conforman el estribo exterior es igual al máximo entre $20\emptyset$ (siendo \emptyset el diámetro de la barra) y 15cm.

Los empalmes se colocan intercalados, de manera de evitar que queden contenidos todos en un mismo plano, tal como se muestra en la siguiente figura:



Fig. R25.7.2.3b—Illustrations to clarify staggering of ties. Figura 8: Colocación de empalmes intercalados [Figura R25.7.2.3b]

5. FUNDACIÓN

Se dimensiona una fundación de base cuadrada de 2 metro de lado y profundidad 0,80 metros sobre las que apoyan las 4 columnas.

Las solicitaciones globales en la base de los pilares son las presentadas en la Tabla 3. Luego, en la Tabla 4, se realiza la verificación a vuelco, considerando al eje de giro en la base de la fundación y que el peso propio del macizo actúa como estabilizador. Asimismo, la verificación de tensiones admisibles se realiza con áreas cobaricéntricas en la Tabla 5.

Solicitaciones globales (COMBINACIÓN CARÁCTERÍSTICA)						
N -23,31 kN						
M 52,20 kNm						
V	15,59	kN				

Tabla 3: Solicitaciones globales para cálculo geotécnico



М		
desestabilizador	64,67	kNm
M estabilizador	100,11	kNm
FS	1,55	

Tabla 5: a) Verificación geotécnica para el caso de viento paralelo a ejes de pilares (Caso A, Figura 3) b)Verificación geotécnica para viento a 45° respecto a los ejes de pilares (Caso B, Figura 3)

Caso vie	ento paralelo a los ejes	s de pilares	Caso viento en diagonal a los ejes de pilares			
N	100,11	kN	N	100,11	kN	
My	65	kNm	My	46	kNm	
Mx	0	kNm	Mx	46	kNm	
ex	0,65	m	ex	0,46	Μ	
ey	0	m	ey	0,46	Μ	
A cob	1,42	m2	A cob	1,18	m2	
σ	71	kPa	σ	85	kPa	
σ	0,71	kg/cm2	σ	0,85	kg/cm2	

Siendo razonable admitir una tensión admisible del terreno de 1 kg/cm², se considera aceptable la verificación.

Finalmente, la norma en el [Artículo 13.3.4.1] define zapatas combinadas trabajando en ambas direcciones que se pueden diseñar igual a una losa bidireccional, coherente con las tensiones del terreno adoptadas para el cálculo.

No se alcanzan las tensiones de fisuración por tracción en ninguna parte de la cimentación.

En el [Artículo 13.3.4.4] se indica respetar las cuantías mínimas en la cara traccionada para losas bidireccionales [Artículo 8.6.1.1]:

$$A_{f,min,mec} = \frac{2,1}{f_{fu}} A_g = 4941 \ mm^2$$

Adicionalmente se pide cumplir con la armadura mínima para efectos de retracción, debiendo respetarse una cuantía geométrica mínima [Artículo 24.4.3.2]:

$$A_{f,min,geo} = \frac{140}{E_f} A_g = 4480 \ mm^2$$

Se colocan entonces $16\emptyset 20$ ($A_f = 5027mm^2$) en ambas caras, pues al traccionarse pilares se generan momentos negativos.