

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD, MODO DE FALLA Y DEFLEXIONES DE LOSAS DE CONCRETO DE DIFERENTES ESPESORES Y CUANTÍAS DE REFUERZO CFRP.

Ing. Fredd Hernández Osorio¹, Dra. Nancy Torres Castellanos, PhD²

¹ Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Facultad Ingeniería civil. Bogota, Colombia

² Directora Centro de Estudios de Estructuras, Materiales y Construcción. Decana Facultad Ingeniería civil, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogota, Colombia.

Resumen: En los últimos cien años la construcción en Colombia se ha fundamentado en principios de ingeniería estructural, compilados a través de códigos, enfatizado el uso de concreto y acero, que condujo a establecer una tradición en el país de edificaciones construidas a partir de concreto reforzado con barras de acero, en este tipo de estructuras el acero es susceptible a ambientes agresivos que pueden producir corrosión y degradación, debilitando la estructura. A nivel mundial las barras de polímeros reforzadas con fibra (FRP Fiber Reinforced Polymer) se han presentado como opción para sustituir el acero, debido a sus múltiples ventajas, entre ellas que no son vulnerables a corrosión. Dada la novedad del material falta consenso técnico en sus aplicaciones, el objetivo de la investigación es aportar al entendimiento del comportamiento de los elementos estructurales, reforzados con este material, para lo cual se elaboraron losas de concreto reforzado con barras de fibra de carbono (CR-CFRP), sometidas a flexión. Se revisó el estado del arte sobre el comportamiento del CFRP y se detalla los criterios de cálculo de resistencia y deflexión que ofrecen ACI 440 y NSR-10. En esta dirección se hace un análisis teórico de capacidad de carga y deflexión que presentaron ante solicitaciones de flexión. Se evaluaron las losas con dos espesores 18 y 12 cm reforzadas tanto con barras de CFRP y Acero A706 a modo de comparación. Los resultados se comparan y discuten entendiendo el comportamiento de las losas, al final las losas con refuerzo CFRP, actúan elásticamente en los primeros ciclos de carga previos al agrietamiento P_{cr} , en los siguientes ciclos aumenta la deformación y fisuración por pérdida de rigidez ($E_c I_g$). Los elementos ganan capacidad con una mayor cuantía y espesor, es necesario menos refuerzo CFRP para soportar iguales cargas a la losa Patron. La falta de adherencia Concreto-CFRP, produce separación entre materiales originando una falla más acelerada por deflexión con fisuración excesiva y deflexión mayor de los elementos por encima del cálculo teórico de Bischoff y Barton.

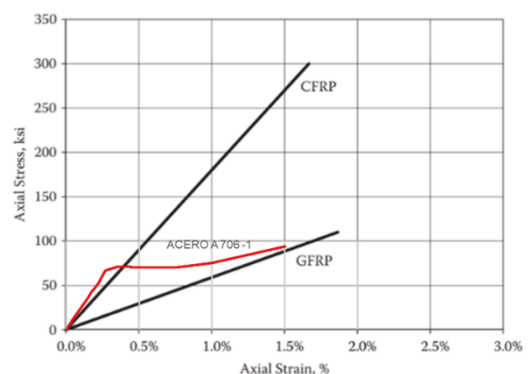
1. Introducción

El acero desde hace décadas ha sido la única opción de refuerzo del concreto en estructuras de edificaciones, pero es vulnerable en ambientes agresivos a sufrir corrosión y con ella su degradación, debilitando la estructura. En la búsqueda para solucionar este inconveniente se encontró una aplicación en la construcción de los polímeros reforzados con fibra. Este material alternativo fue desarrollado en la segunda mitad del siglo XIX se encuentra conformado por fibras longitudinales incorporadas en matriz de resina de éster- vinilo o éster-epoxi, denominado "polímero". Wallace Carothers(1928) trabajando para DuPont desarrollo otros polímeros (poliésteres, poliamidas, neopreno, etc.). Millington, Watt y Johnson desarrollaron el proceso para fabricar fibras con 99% carbono (CFRP, 2017). Las estructuras de concreto reforzado internamente con barras CFRP han exhibido adecuado desempeño a lo largo del tiempo, haciéndolas más duraderas y su mantenimiento es más económico a largo plazo. Las barras de refuerzo de fibra de vidrio o carbono resisten la corrosión teniendo buen desempeño en ambientes marinos, con ciclos de humedecimiento y secado intermitente, igualmente congelación y deshielo, exposición a ácidos o sulfatos, carbonatación. (ACI 440, 2002), (Solares, 2015), (ACI-318-19, n.d.), (Nanni et al., 2014). Al prolongar la vida de las estructuras, se disminuyen costos, compensando así el costo inicial del material (Nanni et al., 2014). Las barras CFRP tienen una resistencia a tracción de dos a tres veces el acero aumentando la capacidad de flexión, exhiben un comportamiento elástico causante que el elemento estructural falle frágil o súbitamente, así que se busca que en elementos sometidos a flexión se desee un diseño sobre-reforzado y para compensar problemas de deflexión por presentar un menor módulo elástico se requieren mayores espesores de los elementos y una mayor cuantía de refuerzo.

Marco teórico

Formulación teórica de diseño

Las propiedades mecánicas de barras CFRP siguen normas ASTM D7205 y D7957, la resistencia a la tensión última del CFRP va de 490 a 1610 MPa, siendo mayor que la resistencia de fluencia del acero, que va de 240 a 420 MPa, (Dolan & Nilson, 2016). La Gráfica.1 muestra que el CFRP posee resistencia a la tensión mayor que GFRP, y ambas tienen una deformación mayor que la del A-706.



Gráfica 1. Curva Tensión-Deformación barras GFRP y CFRP (Nanni et al., 2014), Curva A-706 experimental ECI, (2023)

Propiedades del material para diseño

Las propiedades del CFRP deben ser establecidas por el fabricante. La Guía ACI 440.1R-15, indica que las propiedades garantizadas deben reducirse mediante el uso del factor C_E ambiental (tabla 6.2). $f_{fu} = C_E f * f_u$ (2.1)

Estados límites de falla en losas reforzadas con CFRP-ACI 440.1R-15

El estado límite de resistencia para una losa se determina comparando cuantía ρ_f de CR-CFRP con cuantía de CR-CFRP balanceada ρ_{fb} , cuando ($\rho_f < \rho_{fb}$), fallará primero el CFRP por tracción y se considera sección “Sub-reforzada”, cuando ($\rho_f > \rho_{fb}$) fallará por aplastamiento del concreto, es sección “sobre-reforzada”. Para el cálculo de ρ_{fb} en elementos CR-CFRP se usa ecuación 2.2, Guía ACI 440.1R-15 :

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c E_f \epsilon_{cu}}{f_{fu} E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.2)$$

El refuerzo mínimo CFRP es según ACI 440.1R-15 (7.2.4) para unidades SI:

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d \quad (2.3)$$

para el acero con las fórmulas (NSR-10, 2010):

$$A_{s,min} = \frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \quad (C.10-3) \quad (2.4)$$

$$\frac{0,0018 \times 420}{f_y} \quad (2.5)$$

Momento efectivo de inercia

Respecto a serviciabilidad ACI 440.1R-15, analiza el momento de inercia efectivo del elemento fisurado, para cuantificar la deformación del elemento, método Bischoff (Bischoff & Gross,2011). Para calcular el espesor de un elemento con barras FRP sometido a flexión, ACI 440.1R-15 tabla 7.3.2.1 recomienda un espesor mínimo $e=L/13$ de luz libre en elementos simplemente apoyados, mientras ACI-318-19 y (NSR-10, 2010), recomiendan, para elementos de CR con acero, $e=L/20$ (ACI-318-19, tabla 7.3.1.1.):

$$\text{CR-A (NSR-10)} \quad e = \frac{l}{20} \quad (2.6)$$

$$\text{CR-CFRP (ACI 440.1R-15)} \quad e = \frac{l}{13} \quad (2.7)$$

En control de deflexiones en elementos CR-A, se aplica ACI 318-11 y NSR-10 (C.9.5). Para limitar cualquier deflexión que afecte adversamente el funcionamiento estructural se utiliza el momento efectivo de inercia I_e , que posibilita tener en cuenta variación de inercia de la sección bruta.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad \text{NSR-10 (C.9-8)} \quad (2.8)$$

Donde

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (2.9)$$

para concreto de peso normal

$$f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (2.10)$$

Si existe la posibilidad de que un elemento CR-FRP se agriete en una o más secciones se emplea Bischoff 2011, ACI 440.1R-15, (7.3.2.2)

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2} \leq I_g \quad (\text{Bischoff 2005}) \quad (2.11)$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g \quad (\text{Bischoff 2011}) \quad (2.12)$$

$$\eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \quad \gamma = 3 - 2 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)$$

$$I_{cr} = \frac{bh^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad \text{ACI 440.1R-15 (2.13)}$$

Para cálculo del momento de agrietamiento M_{cr} , se sigue el método NSR-10 C.9.5, también ACI 440.1R-15, (7.3.2.2).

$$\sigma_c = \frac{M_{cr} * c}{I} \quad (2.14)$$

Donde σ_{cr} es el esfuerzo a tensión cuando se inicia fisuración:

$$\sigma_{cr} = 0,62 \lambda (f'_c)^{0,5} \quad (2.15)$$

Sustituyendo y despejando: (NSR-10 C.9-9) y ACI 440.1R-15(7.3.2.2).

$$M_{cr} = \frac{0,62 \sqrt{f'_c} I_g}{c/2} \quad (2.16)$$

Cálculo de Deflexión

Para vigas simplemente apoyadas, con carga central, la deflexión se obtiene por análisis elástico::

$$M_n = \frac{PL}{4} \quad \Delta = \frac{PL^3}{48 E_c I} \quad (2.17)$$

Resistencia al corte

Las disposiciones de diseño por cortante CR-CFRP, de ACI-440.1R-15(7.3.2.2), se basan en ecuaciones de diseño por resistencia para miembros CR-A.

Directrices American Concrete Institute ACI-318-19 y ACI 440.1R-15

La resistencia al cortante del concreto V_c , en elementos sometidos a flexión que utilizan como refuerzo CFRP se halla a partir de ecuaciones:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (2.18)$$

$$c = kd \quad (2.19)$$

$$k = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f} - n_f \rho_f \quad (2.20)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (2.21)$$

En NSR-10(C.11-3) el valor de V_c es:

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{NSR-10} \quad (2.28)$$

Resistencia nominal a flexión

El cálculo de resistencia nominal a flexión cuando el estado límite de falla del elemento es el aplastamiento del concreto ($\rho_f > \rho_{fb}$) usa la ecuación 2.29.

$$M_n = \rho f_f b d^2 \left(1 - 0,59 \frac{\rho f_f}{f'_c}\right) \quad (2.29)$$

Si el estado límite de falla es la rotura del refuerzo CFRP ($\rho_f < \rho_{fb}$), se emplean las ecuaciones (2.30) y (2.31), ACI 440.1R-15, (7.2.2).

$$M_n = f_{fu} A_f \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right) \quad (2.30)$$

$$c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}}\right) d \quad (2.31)$$

2. Estado del arte

Investigaciones recientes han evaluado el comportamiento de elementos CR-FRP, como refuerzo de vigas y losas, estudiando la influencia de la cuantía en su rigidez y geometría.

En estas investigaciones como la de (Abdul-Salam et al., 2016)⁽¹⁾ *Mecanismos de resistencia al corte de losas CR-FRP*,

analiza el comportamiento a corte de losas con CFRP y GFRP. Con las variables, cuantía refuerzo ρ_f , resistencia concreto, tipo refuerzo, configuración y diámetro, Concluyó que los modos de falla en losas GFRP-RC y CFRP-RC, fueron corte, compresión, tensión diagonal y adherencia/anclaje. Prosiguiendo con el tema, (Buitrago Parra, 2020)⁽¹⁰⁾, Comportamiento a flexión de elementos de concreto reforzados con barras GFRP, investiga con losas CR-GFRP, se diseñaron y ensayaron losas variando cuantía de refuerzo, diseños sub-reforzados, sobre-reforzados, y cuantía balanceada, y un elemento patrón CR-A. Verificando que la condición de carga fue flexión con aplicación de cargas en tercios del elemento, concluyendo que losas CR-GFRP se caracterizan por altas deflexiones y un número importante de fisuras debido al bajo módulo de elasticidad GFRP.

Así mismo en el documento de (Nanni et al., 2014)⁽²²⁾, *Concreto armado con barras FRP*. Hace el estudio experimental de materiales estructurales, presentan diseños de losas reforzadas a una y dos direcciones, vigas T, columnas y cimentaciones CR-CFRP. Las investigaciones del comportamiento de elementos CR-GFRP a flexión, ratifica que en losas la rigidez calculada con fórmula Branson es subestimada, ocasionando fisuras más anchas. Al realizar el análisis experimental de elementos a flexión, el ajuste presentado por Bischoff (2011) en fórmulas de I_e da una razonable aproximación a deflexiones de elementos CR-FRP. Por otro lado (Gooranorimi et al., 2018)⁽¹⁶⁾, con el Texto: *El efecto de adherencia-deslizamiento en el comportamiento a flexión de losas CR-GFRP*. Realiza experimentación con modelo de elementos finitos (FEM) en estructuras CR-CFRP, encontrándose que el deslizamiento entre el concreto y el refuerzo es apreciable, aunque normalmente se asuma que se presenta unión sin desplazamiento.

3. Programa de investigación

Cálculo de espesores y longitudes típicas de losas

Longitud de losa $L=2500$ mm, definida por las barras CFRP de 2.40 m, espesor de Tabla C.9.5(a) NSR-10 ($L/20$) $e=125$ mm, y el Código ACI 440.11-22, permite definir espesores con ACI 440.1R-15(7.3.2.1) con ($L/13$) $e=177$ mm. Se toma 1,0 m ancho de losa y recubrimiento 25 mm NSR-10 C.7.7.

Diseño de los elementos

Con base al dimensionamiento se evaluaron las cargas muertas y carga viva usadas en losas, para oficinas según NSR-10.

Espesores de placas de ensayo

Se construyeron seis losas con barras de $\frac{1}{2}$ " CFRP y una con barras de $\frac{1}{2}$ " A706 a modo comparativo. La resistencia de diseño del concreto a compresión se tomó 56 MPa como referencia, tabla 6. con resistencia real por losa.

Tabla 1. Longitudes losas

Elemento	longitud	Und	Observaciones
L	2500	mm	Longitud total de losa
Le	2300	mm	Longitud de ensayo -Distancia entre apoyos
L/20	115	mm	ACI-318-19, Tabla 7.3.1.1, NSR-10 Tabla C.9
L/13	177	mm	Guía ACI 440.1R-15

Para evaluar la variación del espesor en la fisuración y resistencia a flexión, se toman espesores, 180 mm y 120 mm.

Selección de cuantías del refuerzo

Al seleccionar las cuantías se buscó estudiar diseños entre los estados límite de falla sobre-reforzada, sub-reforzada y balanceadas, comparados con cuantía balanceada ρ_b de cada losa. La cuantía influyó en la deflexión teórica y experimental. El proceso de cálculo fue el siguiente:

- Cálculo cuantía acero para soportar cargas últimas de diseño.

- Cálculo cuantía CFRP para cargas últimas equivalente a cuantía de acero.
- Cálculo cuantía balanceada CFRP.
- Cuantía necesaria de CFRP para cumplir deflexiones límite de ACI 440.1R-15(Tabla 7.2.1).

Evaluación de cargas

Tabla 2. Valoración de Cargas en la losa.

Peso propio de la losa:	0,180*1*24	4,32	kN/m ²
Baldosa sobre 25mm de mortero:	1,1*1	1,10	kN/m ²
Cielo raso entramado metálico afinado yeso:	0,7*1	0,70	kN/m ²
Mobiliario para aire acondicionado y red contraincendios	1,75*1	1,75	kN/m ²
Carga Xparticiones muros: Mampostería, arcilla pañete 2 caras	2,5*1,8	4,50	kN/m ²
TOTAL, CARGA MUERTA		12,37	kN/m²
Carga viva –Sitio de reunión, oficinas	2,0*1	2,00	kN/m ²
TOTAL, CARGA VIVA		2,00	kN/m²
		14,37	

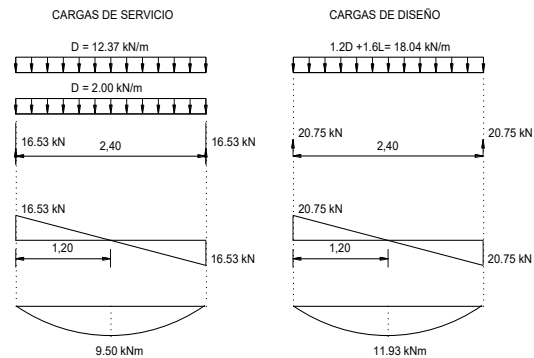
Resistencia concreto $f'_c=8542,7$ psi (58.9MPa). Como la resistencia teórica es 56 MPa, se ajustan los cálculos. El refuerzo son barras CFRP $\frac{1}{2}$ " de diámetro (12.5mm) y barras de acero A-706 $\frac{1}{2}$ ". Según guía ACI 440.1R-15(Tabla 7.2.1).

Tabla 3. Propiedades de materiales

f_{tu}	de 600 a 3690	MPa
Módulo de elasticidad	de 120 a 580	GPa
Resistencia a tracción (Tensile Strength) barras Carbopree HS 12.5 mm		
f_{tu}	2300	MPa
Módulo de elasticidad de CFRP - Fabricante		
$E_r=E_{f,ave}$	127.78	GPa
Acero de refuerzo - A-706 de grado 60		
f_y (Fluencia)	420	MPa
Resistencia a la Tracción	550	MPa

Diseño de losas con CFRP

La combinación de cargas NSR-10(B.2.4-2): 1.2D+1.6L. Las cargas repartidas se convierten en carga puntual a aplicar en ensayo. Los valores se resumen en la siguiente gráfica y tabla 4:



Gráfica 2. Diagramas fuerzas internas en losas con CFRP, simplemente apoyadas.

Tabla 4. Resumen de carga para diseño

Solicitación	Condición de servicio	Condición resistencia última
Carga distribuida combinada (kN/m)	14,37	18,04
Fuerza cortante (kN)	16,53	20,75
Momento (kN.m)	9,50	11,93

La cuantía balanceada de la losa se calculó teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_d \frac{f'_c E_f \epsilon_{cu}}{f_{tu} E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.32)$$

Tabla 5. Cuantía balanceada de la losa

Deformación última del concreto	ϵ_{cu}	0,0030	
Esfuerzo último de diseño	f_{fu}^*	2.300,0	MPa
Módulo de elasticidad de diseño de CFRP	E_f	127.800,0	MPa
Factor de reducción ambiental	C_E	1,00	
Resistencia a la tracción de diseño CFRP	f_{fu}	2.300,0	MPa
Resistencia última a la compresión	f'_c	58,92	MPa
Deformación última del CFRP	$\epsilon_{frpu} = f_f / E_f$	0,0180	
Factor de diseño de Concreto β_1	β_1	0,80	
Cuantía balanceada del elemento	ρ_{fb}	0,00249	

La cuantía balanceada define cantidad de refuerzo a colocar en los elementos.

Diseño a Flexión

En el diseño de la losa reforzada con CFRP-Método resistencia última LRFD se usa la ecuac.(2.29) del marco teórico, la cual define cuantía del refuerzo para que el momento nominal resistente de la sección sea igual o mayor al momento ultimo calculado anteriormente:

- Propiedades de materiales

Tabla 6. Propiedades de los materiales

Resistencia del concreto	F'_c	58,92	MPa
Factor de diseño de concreto	β_1	0,8	
Resistencia a tensión CFRP	F_{tu}^*	2.300	MPa
Factor de reducción ambiental	C_E	1,0	
Resistencia de diseño CFRP	F_{fu}	2.300	MPa
Módulo de elasticidad CFRP	E_f	127.800	MPa

- Geometría de la sección

Tabla 7. Geometría de la sección

Ancho de la seccion	b	1,00	m
Altura de la seccion	h	0,18	m
Recubrimiento de concreto	r	0,025	m
Altura útil de la seccion	$d = (h-r-\phi/2)$	0,1457	m
Longitud de losa	L	2,5	m
Longitud de Ensayo	L_e	2,3	m

Con ecuación (2.29) se encuentra la cuantía requerida:

$$\rho \text{ (req)} = 0.00025$$

La cuantía es menor que la balanceada confirmando que la sección falla por tensión del refuerzo.

- Área de requerida por flexión:

$$A_s \text{ (req)} = 0.00025 * 1m * 0.1456m = 36,4mm^2 / m$$

$\rho \text{ (req)}$	0.00029	mm ² /m
$A_s \text{ (req)}$	36,4	mm ² /m
Refuerzo CFRP (min.)	2	Varillas $\phi 1/2"$

- Verificación de área mínima de refuerzo por cortante, usando $f'_c = 58.92$ MPa:

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d$$

f'_c (Experimental)	58.92	MPa
$A_{f,min}$	234.3	mm ² /m
Refuerzo varillas $\phi 1/2"$	2	un

Se utiliza por aproximación $A_f = 253.35$ mm², superior al requerido.

- Verificación resistencia cortante del elemento con NSR-10:

$$V_c = 0.17\sqrt{f'_c} b * d$$

$V_c = 0.17\sqrt{f'_c} (b.d)$	190.0	kN/m
$\phi V_c = 0.75 * V_c$	142.5	kN/m

Calculando con ecuación ACI 440.1R-15, se tiene:

$$V_c = \frac{2}{5}\sqrt{f'_c} b_w c, \quad c = kd, \quad k = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f} - n_f \rho_f$$

V_c	53,0	kN
k	0.1186	
$c = kd$	17,26	mm
n_f	4.58	

El cortante último que ocurre a distancia "d" del apoyo de la losa es: $V_u = 20.75 \text{ kN} - (0.1457 \text{ m} * 18.04 \text{ kN/m}) = 18.13 \text{ kN/m}$

Cumple a cortante, según lo calculado de NSR-10 ($\phi V_c > V_u$), y el cortante calculado de ACI 440.1R-15, también cumple a cortante ($\phi V_c > V_u$).

Espesor $e = 0.18 \text{ m}$, de ACI 440.1R-15 (tabla 7.3.2.1), resiste el esfuerzo a cortante calculado:

$$\rho = \frac{A_f}{b.d} = \frac{253.35}{1000 * (177 - 25 - 12.5 * 0.5)} = 0.00174$$

$$k = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f} - n_f \rho_f =$$

$$\sqrt{(4.58 * 0.00174)^2 + 2 * 4.58 * 0.00174} - 4.58 * 0.00174$$

$$k = 0.1186 \quad V_c = 0.40 * \sqrt{f'_c} * b_w * kd \quad \phi V_c = 0.75 * V_c = 0.75 * 0.40 * (58.9)^{0.5} * 1000 * 0.1186 * 0.1456 = 39.7 \text{ kN}$$

Cálculo deflexiones de losas con CFRP, método Bischoff ACI 440.1R-15

Deflexiones máximas calculadas método Bischoff 2011.

Tabla 8. Cálculo deflexiones losas reforzadas CFRP

Deflexión esperada	Nom	Valor	Und	Método de Bischoff
Momento actuante máximo	Ma	69,23	kNm	Ec. (2.29)
Inercia de la sección	Ig	4.62E-04	m ⁴	
Momento de agrietamiento	Mcr	22,94	kNm	Ec. (2.16)
Relación de Módulos	mf	4.58		Ec. (2.21)
Relación Prof. Eje neutro y altura útil	k	0,1186		Ec. (2.20)
Inercia del elemento fisurado	Icr	2.22E-05	m ⁴	Ec. (2.13)
Factor de viga simpl. apoyada	λ	1.0		
Inercia efectiva de la losa	Ie	2.94E-05	m ⁴	Ec.(2.12)
Deflexión máxima	Dmax	0,037	m	Ec (2.17)
Deflexión máxima	Dmax	37,26	mm	

Tabla 9. Deflexión máxima admisible

Tabla C.9.5(b) - NSR-10		Límite de deflexión (mm)		Deflexión Calculada (mm)
Tipo de elemento	Deflexión considerada			
Entrepisos que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	Deflexión inmediata debida a la carga viva, L	l/360	6.4	2.25
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (la suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional)†	l/480 †	4.8	6.79
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales no susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.		l/240 §	9.6	6.79

Las deflexiones para el elemento reforzado con dos barras CFRP de 1/2" no cumple al primer caso de la tabla C.9.5(b) de NSR-10; tampoco cumple para segundo caso, para tercer caso sí se cumple. Para cumplir con el límite propuesto en NSR-10 se incrementó la cantidad de barras CFRP en el elemento y se calcularon las deflexiones con estas cuantías para verificar con

cuánto refuerzo cumple lo requerido en norma, según Tabla C.9.5(b) NSR-10 (Tabla 12). La nomenclatura es :

Tabla 10. Código, Dimensión y refuerzo losas

Referencia LOSA	Material de Refuerzo	Espesor losa	Refuerzo Losa
		(cm)	(Pulgadas)
A706-1 (18x4)	Acero A706	18	4 ϕ 1/2"
CFRP-1 (18x2)	CFRP	18	2 ϕ 1/2"
CFRP-2 (18x3)	CFRP	18	3 ϕ 1/2"
CFRP-3 (18x4)	CFRP	18	4 ϕ 1/2"
CFRP-4 (12x2)	CFRP	12	2 ϕ 1/2"
CFRP-5 (12x4)	CFRP	12	4 ϕ 1/2"
CFRP-6 (12x7)	CFRP	12	7 ϕ 1/2"

Tabla 11. Deflexiones teóricas variando cuantía.

Tipo de elemento	Límite de deflexión	Deflexión considerada	Refuerzo colocado (CFRP)							
			(18X2)	(18X3)	(18X4)	(12X2)	(12X4)	(12X7)	[A706] [18x4]	
Entrepisos que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	1/360	6.4	Deflexión inmediata por carga viva (mm)	2.25	1.73	1.42	5.51	3.29	2.01	1.72
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	1/480	4.8	La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (mm) (suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional)	6.79	5.98	4.82	10.09	5.43	3.65	2.62
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales no susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	1/240	9.6								

La cuantía de refuerzo cumple en la losa CRFP(12X7) de $e=12\text{cm}$ con siete barras CFRP y la losa CRFP(18X4) de $e=18\text{cm}$ con cuatro barras CFRP.

Diseño losa reforzada con acero ASTM A-706

Se diseña losa CR-A706 con cargas calculadas en tabla 4, (tabla 12). $f'c = 58.9\text{ MPa}$.

Tabla 12. Cuantía balanceada losa A706.

Deformación última del concreto	ϵ_{cu}	0.0030	
Resistencia a la tracción último Acero A-706	f_s	420.0	MPa
Módulo de elasticidad de diseño Acero A-706	E_f	200,000.0	MPa
Deformación última del Acero A-706	ϵ_r	0.0021	
Coefficiente de diseño de concreto	β_1	0.80	
Resistencia última del concreto a compresión	$f'c$	58.9	MPa
Resistencia a tracción diseño Acero A-706	f_y	240.0	
Cuantía balanceada	ρ_b	0,05613	

V_c se verificó de forma similar al punto anterior, puesto que la sección de losa $1.0\text{x}0.18\text{ m}$ se mantuvo sin modificaciones.

• Diseño a Flexión A-706

Con ecuac.(2.29) del marco teórico, se halla el refuerzo requerido para soportar el momento nominal resistente de una sección igual o mayor al momento último calculado anteriormente.

$M_u = \phi M_n$	30.53	kN/m
A_f, min	665.2	mm^2
ρ_s (requerida)	0.0035	
A_s (Requerida)	506.71	mm^2/m
Barras 1/2"	4	A-706

• Cálculo de deflexiones de losa acero A-706

En la tabla 13 se resumen las deflexiones calculadas por Branson

Tabla 13. Deflexiones Losa con A706.

Tabla C.9.5(b) - NSR-10		Límite de deflexión (mm)		Deflexión Calculada (mm)
o de elemento	Deflexión considerada			
Entrepisos que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	Deflexión inmediata debida a la carga viva, L	1/360	6.4	1.45
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (la suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional)†	1/480 ‡	4.8	2,64
Sistema de entripiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales no susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.		1/240 §	9.6	3,2

La separación entre barras de acero $S=238\text{ mm}$.

Resumen deflexiones losas

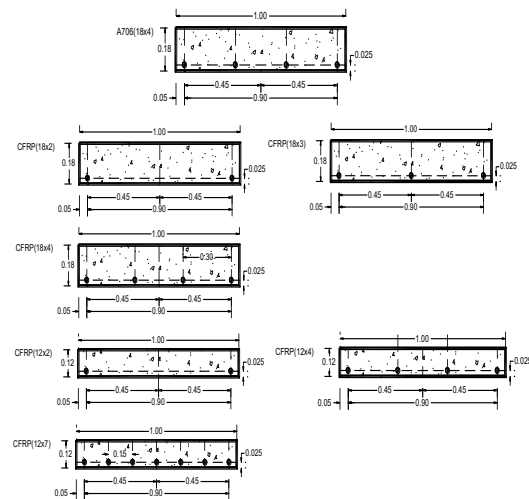
La tabla 14 resume las deflexiones teóricas calculadas en las siete losas, comparándolas con NSR-10.

Tabla 14. Resumen deflexiones losas.

Referencia LOSA	NSR-10	CFRP-1 (18x2)	CFRP-2 (18x3)	CFRP-3 (18x4)	CFRP-4 (12x2)	CFRP-5 (12x4)	CFRP-6 (12x7)	A706-1 (18x4)
$(\Delta) cr$	6.40	2.25	1.73	1.42	5.51	3.29	2.01	1.44
$(\Delta) n$	4.80	6.79	53.98	4.82	10.09	5.43	3.65	2.62
$(\Delta) utms$	-	37.26	42.66	45.91	66.72	72.76	72.08	3.20

Elementos propuestos para ensayo

Dos espesores: 0.18 m y 0.12 m, con los siguientes refuerzos grafica 2 y cuantías tabla 15:



Gráfica 3. Dimensiones de las secciones principales de las losas ensayadas con su refuerzo

Tabla 15. Resumen Cuantías Losas y modo de falla

Referencia LOSA	Cuantía Losa	Cuantía Balanceada Losa	Resistencia de la sección	Modo de falla	Cuantía
	(ρ_r)	(ρ_b)			
A706-1 (18x4)	0,00348	0,05664	$\rho_r < \rho_b$	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-1 (18x2)	0,00174	0,00213	$\rho_r < \rho_b$	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-2 (18x3)	0,00261	0,00279	$\rho_r < \rho_b$	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-3 (18x4)	0,00348	0,00269	$\rho_r > \rho_b$	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-4 (12x2)	0,00303	0,00261	$\rho_r < \rho_b$	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-5 (12x4)	0,00606	0,00212	$\rho_r > \rho_b$	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-6 (12x7)	0,01060	0,00257	$\rho_r > \rho_b$	Compresion concreto	Sobre-reforzada

Capacidades teóricas de losas y Protocolo de carga

Para el diseño siguió la siguiente secuencia de cálculos:

1. Valoración cargas sobre la losa.
2. Cálculo cuantía balanceada.
3. Diseño a flexión losa CR-CFRP Método-LRFD.
4. Cálculo refuerzo CFRP.
5. Verificación área mínima refuerzo.
6. Verificación resistencia a fuerzas .
7. Cálculo deflexiones losas CR-CFRP.
8. Verificación separación refuerzo.

Tabla 16. Dimensiones y datos teóricos losas

Referencia LOSA	Largo	Ancho	Espesor	Concreto $f'c$	Refuerzo	Modo de falla	Condición de falla
	mm	mm	mm	kg/cm^2	tipo		
A706-1 (18x4)	2500	1000	180	600,7	A706	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-1 (18x2)	2500	1000	180	600,7	CFRP	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-2 (18x3)	2500	1000	180	600,7	CFRP	Traccion refuerzo	Sub-reforzada
CFRP-3 (18x4)	2500	1000	180	600,7	CFRP	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-4 (12x2)	2500	1000	120	600,7	CFRP	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-5 (12x4)	2500	1000	120	600,7	CFRP	Compresion concreto	Sobre-reforzada
CFRP-6 (12x7)	2500	1000	120	600,7	CFRP	Compresion concreto	Sobre-reforzada

Programa experimental con siete losas, para evaluar resultados experimentales de deflexiones en losas CR-CFRP variando los espesores de losa con diferentes cuantías; y una losa reforzada con A-706 como patrón.

Espesores de placas de ensayo

Dimensión	L	un	Observación
L =	2500	mm	Longitud elemento a ensayar
L/20	120	mm	ACI-318-19, tabla 7.3.1.1 , NSR-10, 2010
L/13	180	mm	ACI 440.1 R-15 , ACI 440.11-22

Se estableció Resistencia última teórica de losas con barras 1/2" A706 y CFRP, los diámetros y cuantías de barras se calcularon de forma que los elementos fallaran de forma balanceada, sub-reforzada y sobre-reforzada para cargas límites. Con base en los cálculos el elemento cumplió con resistencia última al esfuerzo cortante.

Cálculo capacidad y deflexión Método Bischoff (2005/2011)

El cálculo teórico se desarrolló con Bischoff (2005/2011). Las etapas de cálculo son:

1. Área de acero $A_{b,losa}$ por losa
2. Cuantía real de la losa $\rho_{fr} = \frac{A_f}{bd}$
3. Momento de inercia bruto $I_g = \frac{bh^3}{12}$ sección.
4. Momento actuante M_a losa (Ec.2.29) y carga P deducida para el actuador de ensayo.
5. Cuantía balanceada

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c E_f \epsilon_{cu}}{f_y E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$$

del elemento referencia.

6. Cuantía ρ_{fr} y n_f se calculó el k_r real.

$$k = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f} - n_f \rho_f \quad n_f = \frac{E_f}{E_c}$$

7. Con valores anteriores se calculó Momento de agrietamiento M_{cr} elemento:

$$M_{cr} = \frac{0.62 \lambda \sqrt{f'_c} I_g}{y_f}$$

8. Momento de inercia de agrietamiento I_{cr} con valores n_f y k_r reales

$$I_{cr} = \frac{bh^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2$$

9. Momento de inercia efectivo I_e a partir de Branson(1965) con valores M_{cr} y M_a :

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$$

10. Momento de inercia efectivo I'_e Bischoff(2011) con valores γ y η :

$$I'_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \eta \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2} \quad \eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \quad \gamma = 3 - 2 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)$$

11. Deflexión teórica Δ_n del elemento $\Delta_n = \frac{PL^3}{48 E_c I_e}$, se calcula para Momento de inercia efectivo I'_e Bischoff(2011) del punto 10 y para Momento inercia efectivo I_e Bischoff(2005):

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \eta \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2}$$

12. Se calculan área refuerzo mínimo A_{smin} según NSR-10(C.10.5)

$$A_{smin} = \frac{0.25 \sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \text{ y ACI-440.11-22,}$$

$$A_{smin} = \frac{0.41 \sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d \text{ sección 9.6.1.2(a),}$$

Los tablas 17, 18 y 19 resumen el cálculo teórico de capacidades y deflexiones para las losas que fueron ensayadas, y f'_c de cilindros de laboratorio usadas.

Tabla 17. Datos básicos losas

Referencia LOSA	f'_c	f_{m^*}	f_{m^*}	C_e	E_c	$E_f = E_{f_{max}}$	b	L	L_c	Recubrimiento	h	d_s	d	A_s	γ_f
	Mpa	Mpa	Mpa		Gpa	Gpa	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm
A706-1 (18x4)	61.84	-	420	-	27.9	200	1000.00	2500	2300	25	177	12.70	145.7	126.68	88.5
CFRP-1 (18x2)	52.32	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	177	12.70	145.7	126.68	88.5
CFRP-2 (18x3)	66.08	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	177	12.70	145.7	126.68	88.5
CFRP-3 (18x4)	66.17	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	177	12.70	145.7	126.68	88.5
CFRP-4 (12x2)	64.40	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	115	12.70	83.7	126.68	57.5
CFRP-5 (12x4)	66.93	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	115	12.70	83.7	126.68	57.5
CFRP-6 (12x7)	63.15	2300	1.955	0.85	27.9	127.8	1000.00	2500	2300	25	115	12.70	83.7	126.68	57.5

Referencia LOSA	Refuerzo asignado	Área del refuerzo	Cuantía asignada	P Carga aplicar x actuador			M_n	M_{cr}	P_{cr}
				mm ²	ρ	kN			
A706-1 (18x4)	4 # 4	506.71	0.00348	53.10	5.41	30.53	24.94	4.42	
CFRP-1 (18x2)	2 # 4	253.35	0.00174	120.39	12.28	69.23	22.94	4.07	
CFRP-2 (18x3)	3 # 4	380.03	0.00261	179.52	18.31	103.23	26.29	4.66	
CFRP-3 (18x4)	4 # 4	506.71	0.00348	234.97	23.96	135.11	25.80	4.58	
CFRP-4 (12x2)	2 # 4	253.35	0.00303	67.99	6.93	39.09	10.75	1.91	
CFRP-5 (12x4)	4 # 4	506.71	0.00606	124.08	12.65	71.35	9.69	1.72	
CFRP-6 (12x7)	7 # 4	886.74	0.01060	201.43	20.54	115.82	10.65	1.89	

Tabla 18. Cuantía, Momentos y Cortantes

Referencia LOSA	CARGAS	DEFLEXI ONES (Bischoff 2011)		M_n Flexión	M_{cr}	V_c NSR-10 (Ec. 2.28)	ACI 440.11-22 (Ec.2.18)	MODO DE FALLA	Cuantía Losa	Cuantía Balanceada Losa	Cuantía Balanceada (r=)	Relacion
		(mm)	(mm)									
A706-1 (18x4)	5.41	3.20	30.53	24.94	19.46	9.15		Tension refuerzo	0.00348	0.05664	-0.05316	$\rho_f < \rho_{fb}$
CFRP-1 (18x2)	12.28	37.26	69.23	22.94	17.90	4.99		Tension refuerzo	0.00174	0.00287	-0.00113	$\rho_f < \rho_{fb}$
CFRP-2 (18x3)	18.31	42.66	103.23	26.29	20.51	6.91		Tension refuerzo	0.00261	0.00377	-0.00116	$\rho_f < \rho_{fb}$
CFRP-3 (18x4)	23.96	45.91	135.11	25.80	20.13	7.74		Tension refuerzo	0.00348	0.00363	-0.00015	$\rho_f < \rho_{fb}$
CFRP-4 (12x2)	6.93	66.72	39.09	10.75	11.41	4.12		Tension refuerzo	0.00303	0.00353	-0.00050	$\rho_f < \rho_{fb}$
CFRP-5 (12x4)	12.65	72.76	71.35	9.69	10.28	5.07		Compresion concreto	0.00606	0.00287	0.00319	$\rho_f > \rho_{fb}$
CFRP-6 (12x7)	20.54	72.08	115.82	10.65	11.30	7.10		Compresion concreto	0.01060	0.00346	0.00714	$\rho_f > \rho_{fb}$

Tabla 19. Resumen calculo Momentos de inercia, Cargas y Momentos de agrietamiento

Referencia LOSA	Unid	A706-1 (18x4)	CFRP-1 (18x2)	CFRP-2 (18x3)	CFRP-3 (18x4)	CFRP-4 (12x2)	CFRP-5 (12x4)	CFRP-6 (12x7)	Formulas
ϵ_{cu}		0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	
f_u	MPa	420.0	1.955.0	1.955.0	1.955.0	1.955.0	1.955.0	1.955.0	
$E_f = E_{f_{max}}$	MPa	2.00E+05	1.28E+05	1.28E+05	1.28E+05	1.28E+05	1.28E+05	1.28E+05	
$\epsilon_{f_{max}} = f_f / E_f$		0.0021	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180	
β_1		0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	
f'_c	MPa	59.47	50.32	66.08	63.64	61.9	50.27	60.74	
f_{m^*}	MPa	420.0	2.300.0	2.300.0	2.300.0	2.300.0	2.300.0	2.300.0	
ρ_{fb}		0.05664	0.00287	0.00377	0.00363	0.00353	0.00287	0.00346	$\rho_b = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c E_f \epsilon_{cu}}{f_y E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$
$c = kd$	mm	29.1	17.3	20.8	23.8	12.8	17.5	22.3	
k		0.1999	0.1186	0.1432	0.1634	0.1533	0.2095	0.2669	$k = \sqrt{(n_f \rho_f)^2 + 2n_f \rho_f} - n_f \rho_f$
$n_f = (E_f/E_c)$		7.17	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	
γ		1.13	2.34	2.49	2.62	2.45	2.73	2.82	$\gamma = 3 - 2(M_{cr}/M_a)$
λ		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
I_g	mm ⁴	4.62E-04	4.62E-04	4.62E-04	4.62E-04	1.27E-08	1.27E-08	1.27E-08	$I_g = \frac{bh^3}{12}$
I_e	m ⁴	1.66E-04	2.79E-05	3.62E-05	4.53E-05	1.27E-04	1.27E-04	1.27E-04	$I_e = \frac{I_g}{1 - \gamma \eta (M_{cr}/M_a)^2} \leq I_g$
I_{cr}	m ⁴	6.40E-05	2.22E-05	3.25E-05	4.25E-05	7.65E-06	1.48E-05	2.49E-05	$I_{cr} = \frac{bh^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2$
$(A_s)_{min}$	mm ²	3.20	37.26	42.66	45.91	66.72	72.76	72.08	$A_s = \rho_f I'_e / 48 E_f l_e$
I_{cr}/I_g		0.139	0.048	0.070	0.09	0.06	0.12	0.20	
$\eta = 1 - I_{cr}/I_g$		0.861	0.952	0.930	0.908	0.940	0.883	0.803	
I_e	m ⁴	1.51E-04	2.48E-05	3.46E-05	4.39E-05	8.24E-06	1.51E-05	2.51E-05	$I_e = \frac{bh^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2$
M_{cr}	kNm	24.94	22.94	26.29	25.80	10.75	9.69	10.65	$M_{cr} = \frac{0.62 \lambda \sqrt{f'_c} I_g}{y_f}$
P_{cr}	ton	4.42	4.07	4.66	4.58	1.91	1.72	1.89	

Construcción de losas

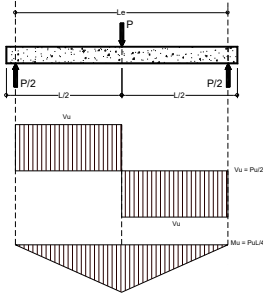
Las dimensiones de losas (Tabla 10), construcción 28 febrero al 28 marzo 2023, se usaron formaleas metálicas y madera. Se tomaron tres probetas/losa, ensayadas el día de prueba de la losa.



Fotografía 1. Construcción losa CFRP-6

Montaje de laboratorio

El ensayo realizado “flexión de tres puntos” consistente en aplicación de una carga puntual en el centro (Gráfica 5), luz libre entre apoyos 2.3 m. La carga es aplicada en forma cíclica hasta la falla, con el fin de poder predecir la carga aplicada está en función del esfuerzo cortante y el momento flector en centro.



$$M_n = \frac{PL}{4}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48 E_c I} \quad (2.17)$$

Gráfica 4. Diagrama de fuerza cortante y momento flector

La medición de carga aplicada con celda de carga (Load Cell SL410-50T-De 50 ton) y control digital de cargas con Display digital DATALOG 8.



Fotografía 2. Celda de carga

Equipos de gatos hidráulicos, Enerpac, de 294.2 kN(30 ton) y 117,7 kN(12 ton).

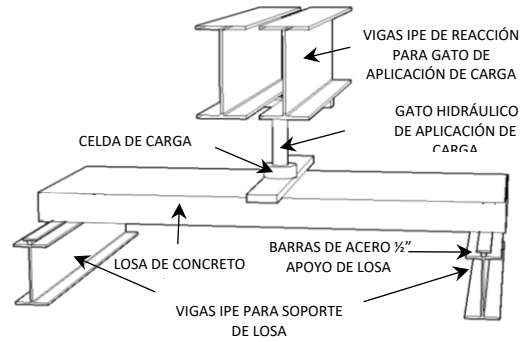


Fotografía 3. Gato hidráulico Enerpac 30ton

LDVT localizados según el siguiente foto.



Fotografía 4. Montaje de 3 LDVT por cara.



Gráfica 5. Esquema de montaje. Fuente propia.

Protocolo de carga

El protocolo de carga son cuatro ciclos de carga con 25, 50, 75 y 100% (carga teórica esperada de falla), incrementos parciales de 500 kg.

Tabla 20. Protocolos Teóricos de Carga (Ton)

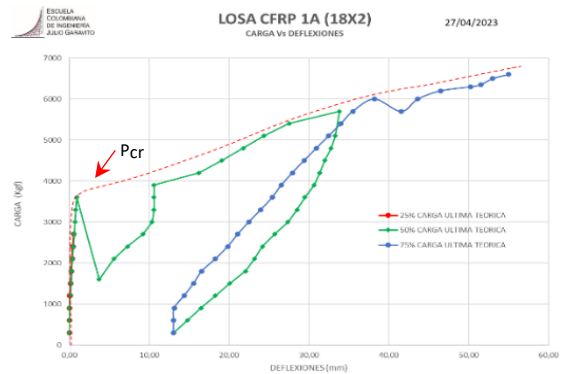
Referencia LOSA	CARGA TEORICA (Ton)	CICLOS DE CARGAS TEORICAS			
		25%	50%	75%	100%
A706-1 (18x4)	5,41	1,35	2,71	4,06	5,41
CFRP-1 (18x2)	11,58	2,90	5,79	8,69	11,58
CFRP-2 (18x3)	17,28	4,32	8,64	12,96	17,28
CFRP-3 (18x4)	22,64	5,66	11,32	16,98	22,64
CFRP-4 (12x2)	6,55	1,64	3,27	4,91	6,55
CFRP-5 (12x4)	12,02	3,01	6,01	9,02	12,02
CFRP-6 (12x7)	19,62	4,90	9,81	14,71	19,62

4. Resultados

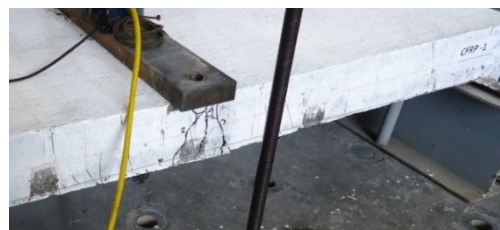
Los resultados de ensayos en siete losas: valores carga máxima y deformaciones últimas, ciclo, curvas envolventes de deflexiones. Gráficas Carga vs. Deflexión, deflexiones/ciclo. Carga agrietamiento (Pcr), última (Pu), deflexión máx. (Δu). Carga(Kg) Vs Deformación(mm).

ENSAYO CFRP-1A

Gráfica 6 resume ciclos carga y descarga CFRP-1A. Ciclo 50%, caída carga del gato punto Pcr=3600kg, (Foto 5).



Gráfica 6. Resumen ciclos CFRP-1a



Fotografía 5. Fisuración zona central CFRP-1A

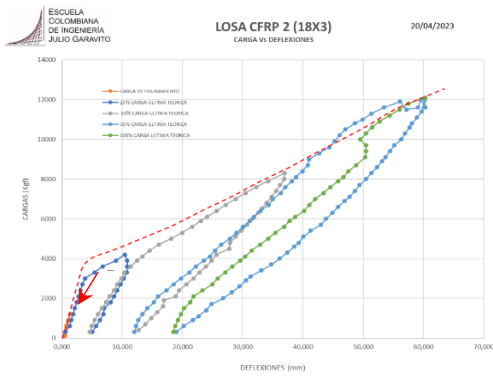
Tabla valores/ciclo, carga máxima, carga última $P_u=6600\text{kg}$, $\Delta_{max}=57\text{ mm}$.

Tabla 21. Resumen Cargas CFRP-1A

CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)
1	25%	0,00	1,00	0,00	2700		
2	50%	0,00	33,81	13,06	5700		
3	75%	13,06	57,00	21,00	6600	3.300	32
4	100%	No se realizo pues la losa colapso en el ciclo de 75%					

ENSAYO CFRP-2

Gráfica 7 ciclos CFRP-2, ciclo inicial no fisuración, ciclo 25%, $P_{cr}=3000\text{ kg}$, gato se descompresiona, desde allí aumenta agrietamiento. $P_u=12100\text{ kg}$, $\Delta_{max}=60.29\text{mm}$ (tabla 22).



Gráfica 7. Resumen ciclos CFRP-2



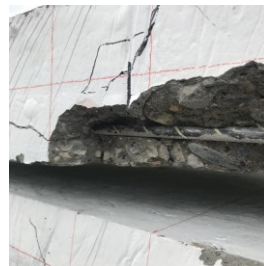
Fotografía 6. Falla losa CFRP-2

Tabla 22. Resumen valores ciclos de cargas CFRP-2

CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)
0	FISURAS	0,47	1,34	0,50	1200		
1	25%	0,58	10,42	5,03	4200		
2	50%	4,62	36,94	12,69	8300		
3	75%	12,03	60,30	18,99	12000		
4	100%	18,48	60,29	52,00	12100	6.050	59



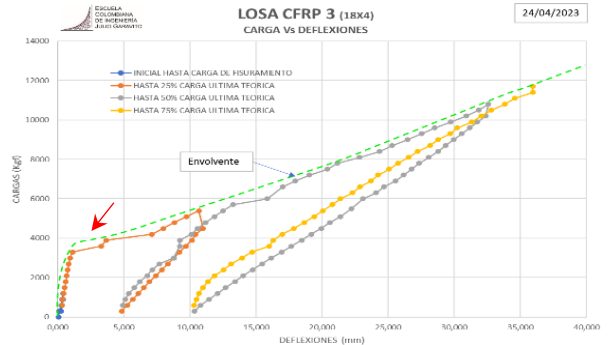
Fotografía 7. Detalle de falla adherencia CFRP-Concreto



Fotografía 8. Falla fisuras diagonales.

ENSAYO CFRP-3

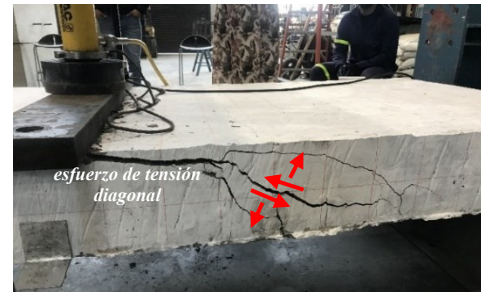
Gráfica 8, ciclos CFRP-3, ciclo 50% deformación remanente 10.36 mm, CFRP comporta elásticamente. Ciclo 75%, deformación lineal, $P_u=15600\text{ kg}$, $\Delta_{max}=56.81\text{mm}$ (Tabla 23).(foto.8)



Gráfica 8. Resumen ciclos CFRP-3

Tabla 23. Resumen ciclos CFRP-3

CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)
1	FISURAMIENTO	0,00	1,54	1,54	1200		
2	25%	0,33	11,00	4,85	5400		
3	50%	4,92	32,59	10,36	10800		
4	75%	10,32	56,81	10,50	15600	7.800	76
5	100%	No se realizo pues la losa colapso en el ciclo de 75%					



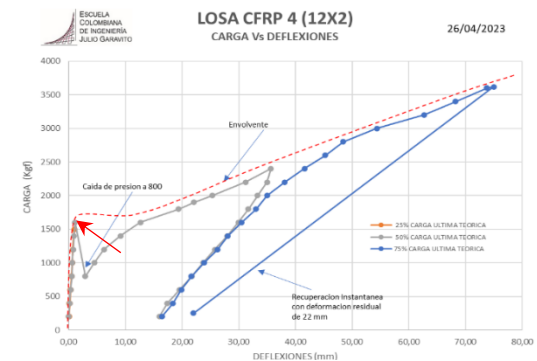
Fotografía 9. Fisuramiento y agrietamiento CFRP4).

ENSAYO CFRP-4

Gráfica 9 ciclos CFRP 4, ciclo 25% elástica no fisura; ciclo 50% caída de carga, $P_{cr}=1600\text{ kg}$ (Foto.10). Ciclo 75%, carga sube gran deflexión. Losa CFRP-4($\rho_f > \rho_{fb}$) aplastamiento del concreto. $P_u=3620\text{ kg}$, $\Delta_{max}=74.79\text{mm}$ (Tabla 24).



Fotografía 9. Fisuramiento y agrietamiento CFRP4).



Gráfica 9 Resumen ciclos CFRP-4

Tabla 24. Resumen Valores ciclos CFRP-4

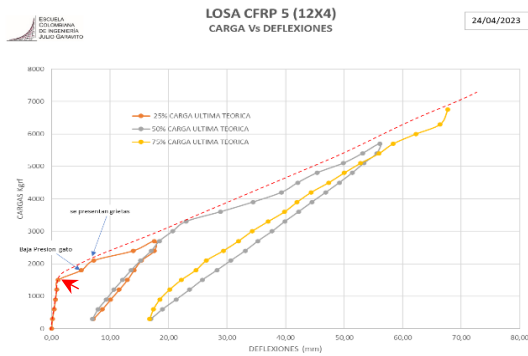
CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c	
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)	
1	25%	0,00	0,96	0,06	1500			
2	50%	0,15	35,65	16,00	2400			
3	75%	16,40	74,79	22,00	3620	1.810	18	
4	100%	No se realizo pues la losa colapso en el ciclo de 75%						



Fotografía 10. Ensayo CFRP-4.

ENSAYO CFRP-5

Gráfica 10, Tabla 25, ciclos CFRP-5. Ciclo 50%, gato se descarga $P_{cr}=1600\text{kg}$ y $\Delta_{max}=1.14\text{mm}$ (Foto.11), ciclo 75% grietas zona tracción, deformación plástica, (Fotog.12), zona a compresión antes P_{cr} no muestra fisuración. $P_u=6750\text{kg}$, $\Delta_{max}=67,72\text{mm}$.



Gráfica 9. Resumen ciclos CFRP-5



Fotografía 11. Fisuración ciclo 50%

CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c	
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)	
1	0,25	0,00	17,57	7,16	2700			
2	50%	7,95	56,12	17,01	5700			
3	75%	16,78	67,72	20,00	6750	3375	33,1	
4	100%	la losa colapso en el ciclo de 75%						

Tabla 25. Resumen ciclos CFRP-5

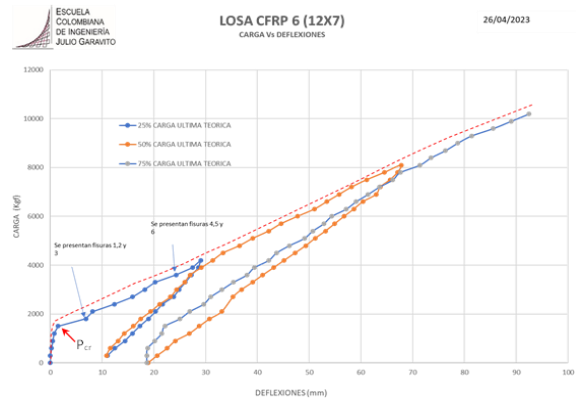


Fotografía 12. Falla por aplastamiento centro CFRP 5 (12X4)

ENSAYO CFRP-6

Gráfica 11 ciclos CFRP-6, sobre-reforzado ($\rho_f > \rho_{fb}$). Falla por compresión (Foto.13). Fisuración $P_{cr}=1500\text{kg}$, $\Delta_{max}=1.49\text{mm}$. En falla deformación ϵ_{cu} y aplastamiento

produce fallo (foto.14). Tabla 26 Carga y deflexiones, $P_u=10900\text{kg}$, $\Delta_{max}=92,49\text{mm}$.



Gráfica 10. Resumen de ciclos CFRP 6

CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA	V_c	V_c	
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)	
1	25%	0,00	29,04	11,06	4200			
2	50%	10,85	67,76	18,87	8100			
3	75%	19,68	92,49	43,00	10900	5.450	53	
4	100%	No se realizo pues la losa colapso en el ciclo de 75%						

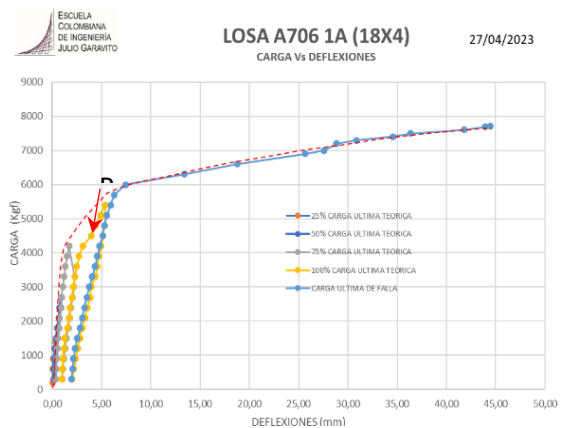
Tabla 26. Resumen ciclos CFRP-6



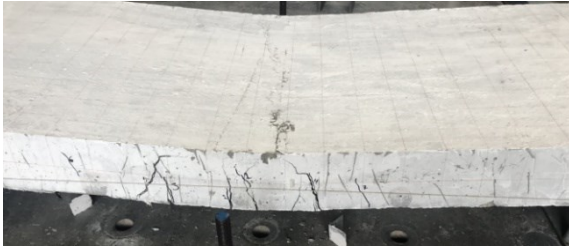
Fotografía 13. Falla aplastamiento del concreto.

ENSAYO A706-1

Gráfica 12 ciclos A706-1A, sub-reforzada ($\rho_f < \rho_{fb}$). Ciclo 25% elástico, $P_{cr}=5700\text{kg}$, $\Delta_{max}=7.42\text{mm}$. Encima de P_{cr} , acero supera límite de fluencia y comportamiento dúctil, grietas y deflexiones amplias. El concreto falla primero (Foto.14). Tabla 27 $P_u=7200\text{kg}$, $\Delta_{max}=44,47\text{mm}$.



Gráfica 11. Resumen ciclos A706-1A



Fotografía 14. Fisuramiento por flexión A706-1.

Tabla 27. Resumen Valores ciclos de cargas CFRP-3

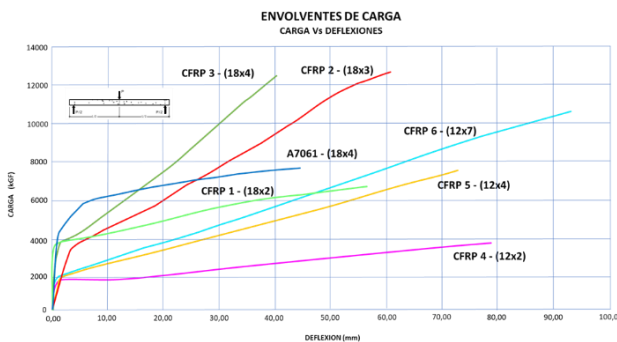
CICLO	ETAPA DE CARGA	DEFLEXION INICIAL	DEFLEXION MAXIMA EN CARGA	DEFLEXION PERMANENTE AL FINAL DE LA DESCARGA	CARGA MAXIMA ALCANZADA X CICLO	V _c	V _c
Nº		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(kgf)	(kN)
1	0,25	0,00	0,32	0,14	1400		
2	50%	0,14	0,87	0,34	2700		
3	75%	0,34	2,27	0,99	4200		
4	100%	0,96	5,34	1,99	5400		
5	FALLA	1,96	44,47	44,47	7720	3.860	38

Tabla 28. Cargas y deflexiones Teóricas y experimentales

Referencia LOSA	Per (Teórica)	Deflexion Teórica fisuramiento (Δ_{cr})	P _{cr} (Carga de Agrietamiento Experimental)	Deflexion Experimental fisuramiento (Δ_{cr})	Deflexion Teórica Ultima (Δ_u)
	ton	mm	kg	mm	mm
A706-1 (18x4)	4,423	2,6	4200	1,7	4,9
CFRP-1 (18x2)	4,069	12,4	3600	1,0	41,8
CFRP-2 (18x3)	4,663	10,9	3000	3,8	40,9
CFRP-3 (18x4)	4,576	8,8	3300	1,1	42,3
CFRP-4 (12x2)	1,907	18,3	1600	1,1	63,9
CFRP-5 (12x4)	1,718	9,9	1500	1,2	65,0
CFRP-6 (12x7)	1,889	6,6	1500	1,5	57,3

Envolventes de carga

Gráfica 12, losas CFRP-3, 2 y 6, muestran mayor capacidad de cargas últimas espesor $e=18$ cm, y $e=12$ cm, CFRP-1, 5 y 4, son menos resistentes, presentan agrietamiento más temprano, sus zonas elásticas son más cortas.

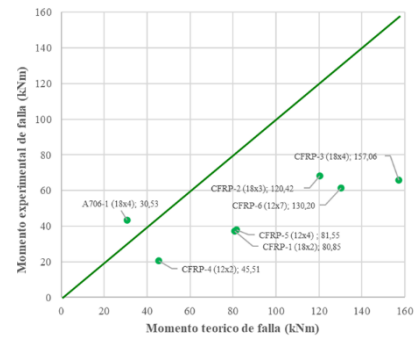


Gráfica 12. Curvas envolventes de carga

Análisis de capacidad a flexión

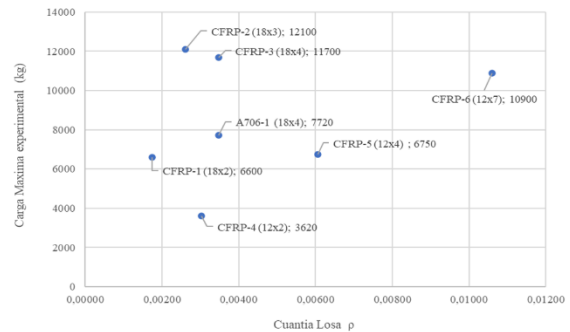
Gráfica 13, Momento de falla Experimental Vs teórico, hay correlación lineal entre ambos valores, valores experimentales son 55.78% de valor teórico momento falla; Este hallazgo es muy importante ya que indica que la guía de diseño está sobrestimando la capacidad teórica del elemento. Gráfica 14, Carga máxima experimental vs cuantía ρ ; La mayor cuantía CFRP-6, tiene $P_u=10900$ kg similar a CFRP-2 con $P_u=12100$ kg y CFRP-3, $P_u=11700$ kg, de cuantía menor.

Momento de falla Experimental Vs Teórico de falla (kNm)



Gráfica 13. Momento falla experimental Vs Momento teórico (Tabla 34)

Carga Máxima experimental (kg) Vs Cuantía Losa ρ

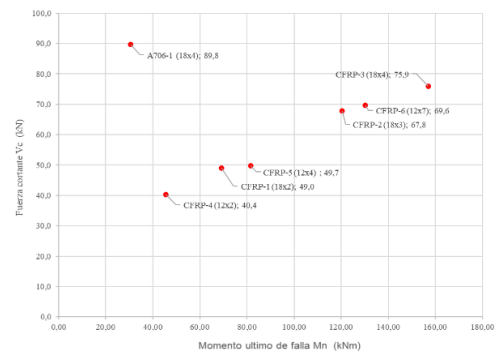


Gráfica 14. Carga Máxima experimental Vs Cuantía losa ρ (Tabla 34)

Análisis de Fuerzas cortantes

Gráfica 15 losas CFRP-5 y 6 alto refuerzo, falla por aplastamiento sobre-reforzadas ($\rho_f > \rho_{fb}$), CFRP-5 $\Delta_{max}=67,72$ mm, CFRP-6 $\Delta_{max}=92,49$ mm.

Fuerza cortante Vc (kN) Vs Momento ultimo de falla Mn (kNm)



Gráfica 15. Fuerza Cortante Vs Momento de falla Mn Experimental, Tabla 29

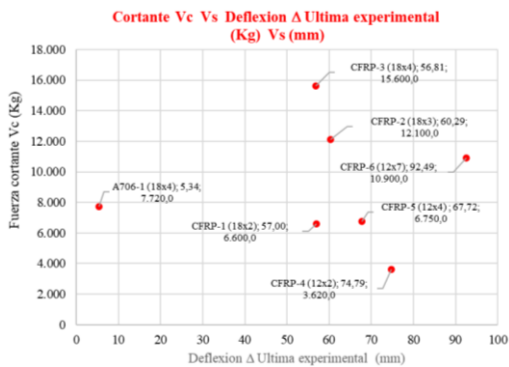
Tabla 29. Resumen de Cortantes para cada losa

Referencia LOSA	Refuerzo asignado	Area del refuerzo mm ²	Cuantía asignada ρ	P Carga aplicar x actuador	M _u kN	M _{cr} kNm	P _{cr} ton	Modo de falla	V _c (kN)
A706-1 (18x4)	4 # 4	506,71	0,00348	53,10	5,41	30,53	24,94	4,42	Tracc ref 89,8
CFRP-1 (18x2)	2 # 4	253,35	0,00174	120,39	12,28	69,23	22,94	4,07	Tracc ref 49,0
CFRP-2 (18x3)	3 # 4	380,03	0,00261	209,43	21,36	120,42	26,29	4,66	Tracc ref 67,8
CFRP-3 (18x4)	4 # 4	506,71	0,00348	273,15	27,85	157,06	25,80	4,58	Tracc ref 75,9
CFRP-4 (12x2)	2 # 4	253,35	0,00303	79,14	8,07	45,51	10,75	1,91	Tracc ref 40,4
CFRP-5 (12x4)	4 # 4	506,71	0,00606	141,82	14,46	81,55	9,69	1,72	Compr concr 49,7
CFRP-6 (12x7)	7 # 4	886,74	0,01060	226,44	23,09	130,20	10,65	1,89	Compr concr 69,6

Tabla 30. Deflexiones teóricas y experimentales

Referencia LOSA	Vc (falla)			(A _i) _{ultima Experimental}	(A _i) _{ultima Teorica}
	kg	ton	kN	mm	mm
A706-1 (18x4)	7.720,0	7,72	75,71	5,34	3,20
CFRP-1 (18x2)	6.600,0	6,60	64,72	57,00	37,26
CFRP-2 (18x3)	12.100,0	12,10	118,66	60,29	51,90
CFRP-3 (18x4)	15.600,0	15,60	152,99	56,81	54,61
CFRP-4 (12x2)	3.620,0	3,62	35,50	74,79	81,57
CFRP-5 (12x4)	6.750,0	6,75	66,20	67,72	84,03
CFRP-6 (12x7)	10.900,0	10,90	106,89	92,49	81,35

En gráfica 16, losas CFRP más flexibles pues sus deflexiones últimas están alejadas de deflexión última de CR-A706-1, se infiere que, aunque la losa reforzada con acero tiene una rigidez $E_c I_e = 7,83E+03 \text{ kN/m}^2$ y las losas CFRP-2 y 3 son más flexibles con rigidez $E_c I_e = 1,27E+03 \text{ kN/m}^2$ (es menor), las losas 2 y 3 alcanzan una resistencia al cortante superior a A706-1.

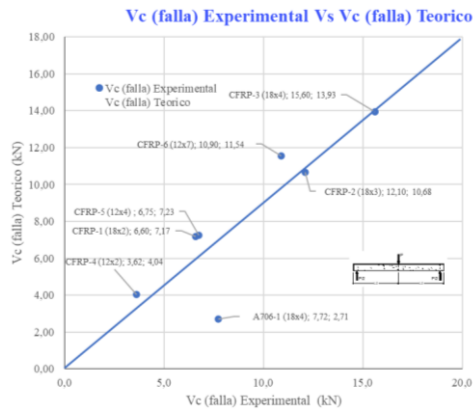


Gráfica 16. Fuerza cortante teórica Vs Deflexión experimental(mm) (Tabla 30)

Tabla 31. Resumen Corte Teórico Vs Experimental

Referencia LOSA	Vc (falla) Experimental	Vc (falla) Teorico
	ton	ton
A706-1 (18x4)	7,72	2,71
CFRP-1 (18x2)	6,60	6,14
CFRP-2 (18x3)	12,10	10,68
CFRP-3 (18x4)	15,60	13,93
CFRP-4 (12x2)	3,62	4,04
CFRP-5 (12x4)	6,75	7,23
CFRP-6 (12x7)	10,90	11,54

Tabla 31 y Gráfica 17, valores V_c obtenidos teóricamente en losas con CFRP son cercanos a los experimentales, comprobando que el método de cálculo es correcto.



Gráfica 17. Cortante Experimental Vs Cortante Teórico (Tabla 31)

Verificación de modos de falla

Tabla 33 y Gráfica 16 losas sobre-reforzados ($\rho_f > \rho_{fb}$)

Tabla 32. Resumen Fuerzas de falla-deflexiones ultimas.

Referencia LOSA	Vc (falla)			(A _i) _{ultima Experimental}	(A _i) _{ultima Teorica}
	kg	ton	kN	mm	mm
A706-1 (18x4)	7.720,0	7,72	75,71	5,34	1,72
CFRP-1 (18x2)	6.600,0	6,60	64,72	57,00	33,97
CFRP-2 (18x3)	12.100,0	12,10	118,66	60,29	39,49
CFRP-3 (18x4)	15.600,0	15,60	152,99	56,81	42,93
CFRP-4 (12x2)	3.620,0	3,62	35,50	74,79	61,60
CFRP-5 (12x4)	6.750,0	6,75	66,20	67,72	68,80
CFRP-6 (12x7)	10.900,0	10,90	106,89	92,49	68,72

Tabla 33. Deflexión teórica vs deflexión experimental

Referencia LOSA	Espesor de losa	Deflexion Teorica Ultima (Di)	Deflexion Experimental Ultima (Di)
		mm	mm
A706-1 (18x4)	18	4,9	5,3
CFRP-1 (18x2)	18	41,8	57,0
CFRP-2 (18x3)	18	40,9	60,3
CFRP-3 (18x4)	18	42,3	56,8
CFRP-4 (12x2)	12	63,9	74,8
CFRP-5 (12x4)	12	65,0	67,7
CFRP-6 (12x7)	12	57,3	92,5

Análisis de las deflexiones

Tabla 33 y Gráfica 21, Deflexión máxima teórica vs. Deflexión experimental; losas CFRP-1 a 6 soportan la mitad del momento flector teórico y losas A706-1 soportan 1,43 veces el momento flector teórico.

Tabla 34. momento teórico vs momento experimental

Referencia LOSA	Refuerzo Losa	Carga Maxima experimental	(A) _a Teorica	(A) _a Experimental	(A) _{a,Teor} / (A) _{a,Exp}	Momento experimental de falla	Momento teorico de falla	M _f /M _t	
			ρ	kg	(mm)	(mm)	(mm)	kNm	kNm
A706-1 (18x4)	4 # 4	0,00348	7720	4,9	44,5	9,13	43,53	30,53	1,43
CFRP-1 (18x2)	2 # 4	0,00174	6600	37,3	57,0	1,53	37,22	69,23	0,54
CFRP-2 (18x3)	3 # 4	0,00261	12100	51,9	60,3	1,16	68,23	120,42	0,57
CFRP-3 (18x4)	4 # 4	0,00348	11700	54,6	36,5	0,67	65,98	157,06	0,42
CFRP-4 (12x2)	2 # 4	0,00303	3620	81,6	74,8	0,92	20,41	45,51	0,45
CFRP-5 (12x4)	4 # 4	0,00606	6750	84,0	67,7	0,81	38,06	81,55	0,47
CFRP-6 (12x7)	7 # 4	0,01060	10900	81,3	92,0	1,13	61,46	130,20	0,47

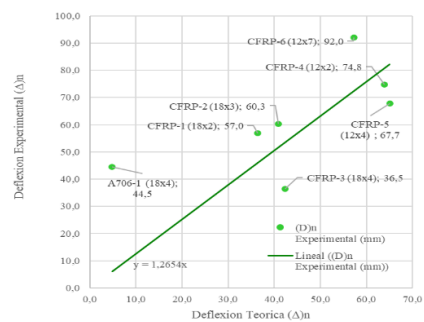
Tabla 35, Deflexiones de agrietamiento (Δ_{cr}) vs. teóricas (Δ_a). La relación arroja un menor valor para cargas de fisuramiento teóricas comparadas con experimentales, gráfica 19 y gráfica 20, Cuantía teórica vs. Δ experimental.

Tabla 35. Deflexiones agrietamiento teóricas vs experimentales

Referencia LOSA	Refuerzo Losa	Cuantia Losa	(A) _a Teorica	(A) _a Experimental	(A) _{a,Teor} / (A) _{a,Exp}	(A) _{cr} Teorica	(A) _{cr} Experimental	(A) _{cr,Teor} / (A) _{cr,Exp}
			ρ	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
A706-1 (18x4)	4 # 4	0,00348	0,88	0,43	2,05	1,8	0,87	2,04
CFRP-1 (18x2)	2 # 4	0,00174	3,10	0,13	24,78	6,3	0,95	6,58
CFRP-2 (18x3)	3 # 4	0,00261	2,39	2,29	1,04	4,8	3,83	1,26
CFRP-3 (18x4)	4 # 4	0,00348	1,91	0,57	3,35	3,9	1,12	3,44
CFRP-4 (12x2)	2 # 4	0,00303	8,88	12,66	0,70	8,4	1,12	7,52
CFRP-5 (12x4)	4 # 4	0,00606	5,04	3,11	1,62	4,8	5,08	0,94
CFRP-6 (12x7)	7 # 4	0,01060	3,06	4,20	0,73	5,1	6,89	0,73

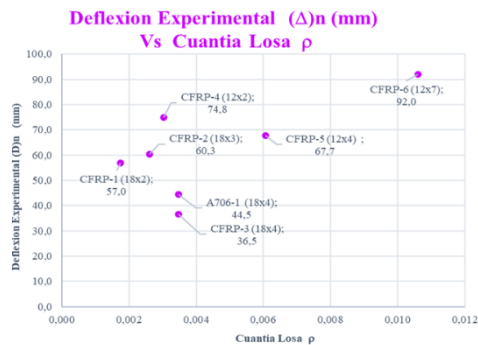
Deflexiones experimentales de falla

Deflexiones en la Falla Teóricas Vs Experimentales (A_a,Teor / (A_a,Exp)



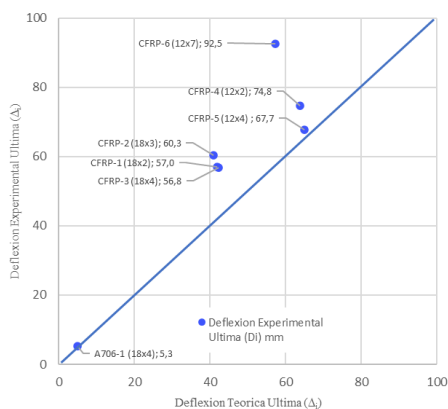
Gráfica 18. Deflexiones Teóricas Vs Experimentales (Tabla 34)

En Gráfica 19 Deflexiones experimentales vs. Cuantía, losas con menor cuantía y mayor espesor mejoran su desempeño a deflexión, todas las losas, excepto CFRP-3, superan deflexión losa A706-1.



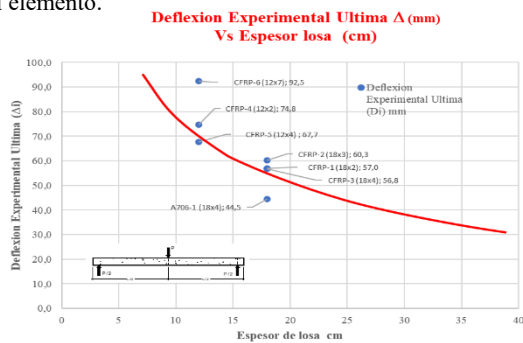
Gráfica 19. Deflexiones Experimentales Vs Cuantía (Tabla 34)

Deflexion Experimental Ultima (Δ_f) mm



Gráfica 20. Deflexiones Teórica Vs Experimental (Tabla 34)

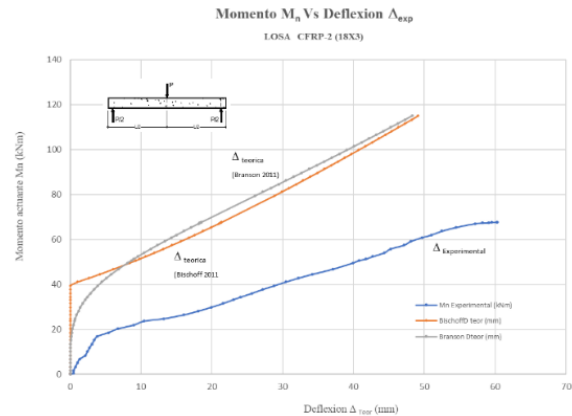
En Gráfica 21 Espesor Vs Deflexión las losas, Al aumentar espesor disminuye el esfuerzo a tensión diagonal causante de grietas, por tanto, la deflexión disminuye al ser mayor la rigidez del elemento.



Gráfica 21. Deflexiones experimentales Vs espesores de losa (Tabla 36)

Deflexiones losa CFRP-6

Gráfica 23, Momento flector vs. Deflexión experimental losa CFRP-6(12x7)(curva azul). La gráfica esta trazada junto Gráfica Momento flector vs. Deflexión teóricas con momento efectivo de inercia I_e Branson(ggris) y Bischoff (2011) (naranja), calculadas con (2.8),(2.11),(2.12),(2.13) y (2.17), si se comparan con Gráfica azul, La deflexión de losa experimental y curvas de deflexión teóricas con momento efectivo de inercia Bischoff y Branson, son muy diferentes a los valores $M_{Bischoff}$ y $M_{Branson}$ que son muy cercanos entre sí.



Gráfica 22. Momento Vs Deflexiones Losa CFRP-6

6. Conclusiones

- Losas con refuerzo de barras CFRP, sometidas a un ensayo de tres puntos, actúan elásticamente en los primeros ciclos de carga (cargas pequeñas) antes P_{cr} , en los siguientes ciclos se da una mayor deformación por pérdida de rigidez ($E_c I_g$), aparecen grietas inclinadas y verticales por flexión.
- Se confirma que los elementos ganan capacidad de carga ante una mayor cuantía y con mayor espesor, es necesario menos refuerzo CFRP para soportar iguales cargas.
- La falta de adherencia Concreto-CFRP, produce separación entre materiales originando una falla más acelerada por deflexión con fisuración excesiva y deflexión mayor de los elementos por encima del cálculo teórico de Bischoff y Barton.

Agradecimientos

A la Ingeniera Nancy Torres, por su dedicación al Trabajo, dando la oportunidad de una interesante investigación. A la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería quien apoyo esta investigación con su personal de cátedra y científico del laboratorio Alejandro Sandino.

Bibliografía

1. Abdul-Salam, Bahira., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2016). Mechanisms of shear resistance of one-way concrete slabs reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 127, 959–970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.015>
2. ACI-318-19. (n.d.). *An ACI 318-19 Standard*.
3. ACI Committee 440. (2002). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-06. In *Normos* (Vol. 88, Issue Reapproved).
4. Guía ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.
5. ACI CODE 440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber - Reinforced Polymer (GFRP) Bars-Code an Commentary
6. Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2012). Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2125–2134. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.007>
7. Bischoff, P. H., & Gross, S. P. (2011). Equivalent Moment of Inertia Based on Integration of Curvature. *Journal of Composites for Construction*, 15(3), 263–273. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000164](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000164)
8. Peter H. Bischoff (2005), Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 5, May 1, 2005.
9. Branson-1965-dot_42307_DS1. (1965). *Bureau of Public Affairs. June*.

10. Buitrago Parra, B. R.-2020 R. (2020). *COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADOS CON BARRAS DE GFRP*.
11. CFRP, D. (2017). Polímero reforzado con fibra de carbono. *Tasuns Composite Technology Co.- <http://www.t-composites.net/newslist-31378-1>*
12. CSA. (2002). Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. *Csa S806-02, Reaffirmed*, 206.
13. Dolan, C. W., & Nilson, A. H. (2016). Design of concrete structures. In *Seismic Design of Buildings to Eurocode 8*. <https://doi.org/10.1201/9781315368221-12>
14. El-Nemr, A., Ahmed, E. A., El-Safty, A., & Benmokrane, B. (2018). Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars. *Engineering Structures*, 173(June), 606–619. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.089>
15. Francis, J., Bakht, B., Richard, G., Tharmabala, T. ., & Yea, H. (2006). *Canadian Highway Bridge design code - A National Standard of Canada*. 1–800.
16. Gooranorimi, O., Claire, G., Suaris, W., & Nanni, A. (2018). Bond-slip effect in flexural behavior of GFRP RC slabs. *Composite Structures*, 193(March), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.027>
17. Ham, H. A. Q. P., Chemical, D., Arks, M. A. J. M., & Chemical, D. (2012). *Epoxy Resins*. <https://doi.org/10.1002/14356007.a09>
18. Hault, N. A., Sherwood, E. G., Bentz, E. C., & Collins, M. P. (2008). Does the Use of FRP Reinforcement Change the One-Way Shear Behavior of Reinforced Concrete Slabs? *Journal of Composites for Construction*, 12(2), 125–133. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:2(125))
19. Jabbar, S. A. A., & Farid, S. B. H. (2018). Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. *Karbala International Journal of Modern Science*, 4(2), 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002>
20. JSCE. (1998). *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. 31(31).
21. Mark, J. E., Allcock, H. R., & West, R. (2005). *Inorganic Polymers, Second Edition*.
22. Nanni, A., De Luca, A., & Zadeh, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design. In *Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design*.
23. NSR-10. (2010). *NSR-10 - REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE*. 530–827.
24. Sheet, T. D. (2018). *GEOTECHNICS & CIVIL ENGINEERING Carbopree® HS Rods - High Strength*. 06, 3–5.
25. Solares, E. R. G. (2015). *A Novel Structural Health Monitoring Method for Full-Scale CFRP Structures*. 6422, 1–221.
26. Staudinger1920. (2019). *Über Polymerisation* (<http://doi.wiley.com/10.1002/cber.19200530627>). *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*.