

Comparación del comportamiento mecánico de losas reforzadas con PRFV y acero

R. Christ¹,* , H. Z. Ehrenbring² , F. Pacheco² , D. Schneider² ,
B. F. Tutikian² , G. F. Moreira² , L. Wegher³ , O. Beliaev⁴ 

*Autor de Contacto: rchrist@unisinós.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.759>

Recibido: 01/06/2024 | Correcciones recibidas: 31/07/2024 | Aceptado: 02/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento mecánico del PRFV en losas de hormigón macizo. El uso de barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en el diseño de la construcción ha sido una técnica alternativa para proporcionar estructuras más duraderas. Sin embargo, es necesario evaluar el comportamiento de las losas reforzadas con PRFV bajo flexión y comparar el estado de servicio (SS) y el estado de servicio final (USS) del elemento cargado. Así, se construyeron losas de hormigón armado de diferentes espesores con acero y barras de refuerzo de PRFV. Los resultados muestran que la carga aplicada para la deflexión máxima del vano de la losa de PRFV bajo SS fue un 50% menor que para la de la placa con armadura de acero. La deflexión máxima del tramo de la losa de PRFV bajo USS también fue un 282% mayor que la del refuerzo de barras de refuerzo de acero.

Palabras clave: PRFV; estructura de hormigón; losas; fuerza flexible; comportamiento mecánico.

Citar como: Christ, R., Ehrenbring, H. Z., Pacheco, F., Schneider, D., Tutikian, B. F., Moreira, G. F., Wegher, L., Beliaev, O. (2024), “Comparación del comportamiento mecánico de losas reforzadas con PRFV y acero”, Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 224 – 240, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.759>

¹ Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Calle 58 #55-66, Barranquilla 080002, Colombia.

² Polytechnical School, UNISINOS University, São Leopoldo, 93040-230, Brazil.

³ Civil engineering and is the CEO for te Composit Group Brasil, Chapecó, 89801-000, Brazil.

⁴ State Institute of Commerce, Смольная, 125195, Moscow.

Contribución de cada autor

Conceptualización, Roberto Christ, Hinoel Z. Ehrenbring y Fernanda Pacheco; metodología, Roberto Christ, Hinoel Z. Ehrenbring, Fernanda Pacheco y Gian de Fraga Moreira; validación, Bernardo F. Tutikian; investigación, Diego Schneider; administración del proyecto, Leandro Wegher y Oleg Beliaev.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2025.

Comparison of mechanical behavior of slabs reinforced with GFRP and steel

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the mechanical behavior of GRFP in massive concrete slabs. The use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars in construction design has been an alternative technique to provide more durable structures. However, there is a need to evaluate the behavior of GFRP reinforced slabs under flexure and to compare the service state (SS) and ultimate service state (USS) of the loaded element. Thus, reinforced concrete slabs of varying thicknesses were constructed with steel and GFRP rebars. Results show that the applied load for maximum span deflection of the GFRP slab under SS was 50% lower than for the one with steel reinforcement. The maximum span deflection of the GFRP slab under USS was also 282% larger than for steel rebars reinforcement.

Keywords: GFRP; reinforced concrete; slabs; flexural tensile; mechanical behavior.

Comparação do comportamento mecânico de lajes reforçadas com PRFV e aço

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico do GRFP em lajes maciças de concreto. O uso de vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) no projeto de construção tem sido uma técnica alternativa para fornecer estruturas mais duráveis. No entanto, existe a necessidade de avaliar o comportamento das lajes reforçadas com PRFV sob flexão e comparar o estado de serviço (SS) e o estado de serviço último (USS) do elemento carregado. Assim, lajes de concreto armado de espessuras variadas foram construídas com vergalhões de aço e PRFV. Os resultados mostram que a carga aplicada para a deflexão máxima do vão da laje de PRFV sob SS foi 50% menor do que para aquela com armadura de aço. A deflexão máxima do vão da laje de PRFV sob USS também foi 282% maior do que para armaduras de vergalhões de aço.

Palavras-chave: PRFV; estrutura de concreto; lajes; resistência à flexão; comportamento mecânico.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de polímeros reforzados con fibra (FRP) en estructuras, tanto en hormigón armado como en elementos estructurales con un perfil variado, ha ido en aumento (Satasivam et al., 2018). Como resultado, se han realizado estudios para evaluar las ventajas del hormigón reforzado con PRF en varios países. Estos estudios evaluaron las propiedades mecánicas del PRF y su posible efecto sobre el rendimiento cuando se incorpora a un elemento estructural (Ahmed et al., 2020; Gajdošová et al., 2020; Gravina et al., 2020; Zhang et al., 2021; Бондалетова, 2013). En todo el mundo se han desarrollado normas específicas para barras de FRP y estructuras reforzadas, como ACI 440.1R-15 (2015), CAN/CSA S806-12 (2012), CNR-DT 206 (2006), GOST 31938 (2014), GOST 30247.0 (1994) y GOST 32486 (2013).

La corrosión es el mecanismo de degradación más relevante en las estructuras de hormigón armado y de mayor impacto, ya sea por contacto con iones de dióxido de carbono o cloruro (Gajdošová et al., 2020). Los refuerzos de acero bajo corrosión se degradan, reduciendo la estabilidad estructural de cada edificio (Jabbar; Farid, 2018). Este fenómeno por sí solo demuestra la importancia del refuerzo de FRP, ya que no se corroe y prolonga la vida útil en el estado límite de servicio (SLS) de la estructura. Los estudios ya han demostrado que el PRF es resistente a ambientes alcalinos, como las matrices cementicias (Gravina et al., 2020; Manalo et al., 2020).

Por otro lado, dado que el FRP es un compuesto formado por fibras y resina, se debe utilizar una combinación específica de materiales en función de su aplicación para asegurar ciertas características de durabilidad del elemento (Bakouregui et al., 2021). En FRP para producir polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). Sin embargo, el tipo de fibra de vidrio utilizada también debe ser resistente a los álcalis (Arczewska; Polak; Penlidis, 2021).

Las losas de hormigón armado son elementos estructurales importantes que absorben y distribuyen las cargas de un edificio y están principalmente sujetas a flexión (Mahroug; Ashour; Lam, 2014). Varios estudios han examinado el efecto de diferentes tipos de FRP en el comportamiento de losas y vigas (Ahmed et al., 2020; Ashour, 2006; Barris et al., 2013; Mahroug; Ashour; Lam, 2014; Noël; Soudki, 2014; Satasivam et al., 2018). Sin embargo, Kaszubska et al. (Kaszubska; Kotynia; Barros, 2017) observó que un obstáculo en el uso de PRF era que este tipo de armadura de refuerzo tenía un comportamiento elástico-lineal y un bajo módulo de elasticidad, lo que la hacía propensa a la rotura frágil al ser sometida a una alta tensión de tracción, lo que provocaba un fallo brusco.

Los diseños de hormigón reforzado con acero aprovechan el potencial de ambos materiales, a saber, la resistencia a la compresión del hormigón y la resistencia a la tracción del acero. En este caso, la resistencia del acero se utiliza plenamente cuando el acero de refuerzo comienza a hundirse y contribuye a la ductilidad de la estructura (Shi et al., 2020). En el caso de proyectos de hormigón armado con PRF, el flujo excesivo del elemento es indeseable, porque el PRF no cede, tiene un comportamiento elástico lineal y la deformación del elemento es mayor que la del acero (Chu; Hossain; Lachemi, 2020).

La deformación de las barras de refuerzo de PRFV afectó directamente al rendimiento estructural y al ELS (Starkova et al., 2012). Hubo tres etapas de deformación de FRP. En la primera etapa, se observó principalmente deformación en la resina debido a su bajo módulo de elasticidad y redistribución de tensiones en las fibras (Shi et al., 2015). La segunda etapa contenía un lento aumento de la deformación debido a las características constructivas de la barra de refuerzo, como los huecos en la resina y la fibra. La tercera etapa ocurrió cuando la tensión de la barra de refuerzo superó el 60% de su tensión máxima (Wang et al., 2014).

En el caso de la PRFV, la relación entre la deformación máxima y la deformación elástica inicial disminuyó cuando la tensión aplicada superó el 30% de su resistencia máxima a la tracción (Najafabadi et al., 2018). Los ensayos mecánicos en losas reforzadas con PRFV sometidas a flexión a temperatura ambiente y elevadas fueron realizados por Gao et al. (Gao et al., 2020) y Rosa et al.

(Rosa et al., 2020). Sin embargo, estos estudios se centraron en la capacidad portante y la deformación final de los elementos.

El objetivo de este estudio, por tanto, es aumentar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico de losas reforzadas con PRFV de diferentes espesores bajo flexión. Se realizaron estudios experimentales y analíticos para evaluar el ELU y el ELS de las losas reforzadas con PRFV en comparación con el acero. Se realizó un estudio detallado sobre la ocurrencia de primeras cargas de fisura para diferentes espesores de losa y se analizó su relación con los momentos máximos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se fabricaron doce losas de 3.000 mm de longitud y 1.100 mm de ancho. Los espesores (w) seleccionados fueron 70 mm, 100 mm y 120 mm. El refuerzo se proporcionó con barras de PRFV de 8 mm de diámetro y se realizaron tres conjuntos de losas de prueba para cada espesor de losa. A modo de comparación, se fabricaron 3 losas de 100 mm de espesor con barras de acero del mismo diámetro. Los especímenes se identificaron como GFRP-70 ($w = 70$ mm), GFRP-100 ($w = 100$ mm), GFRP-120 ($w = 120$ mm) y Steel-100 ($w = 100$ mm). Las losas con secciones transversales que se muestran en la Figura 1. La clase de resistencia del hormigón fue de 40 MPa, según lo recomendado en la norma C143-20 (ASTM, 2020).

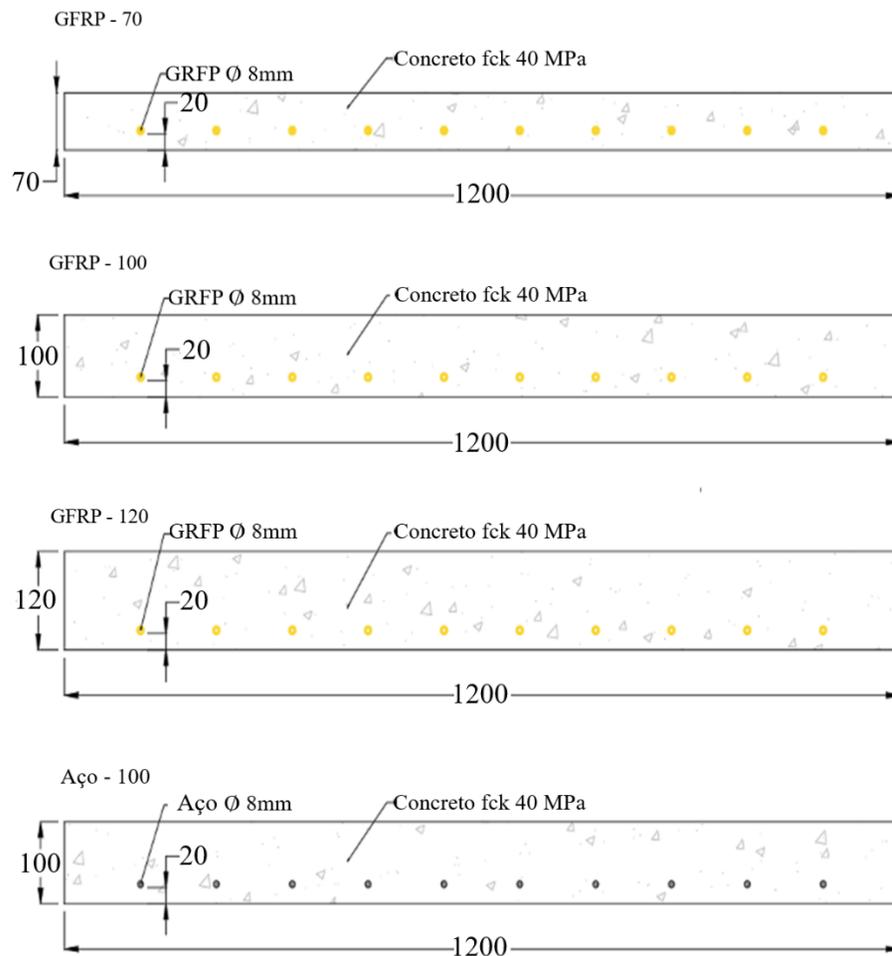


Figura 1. Sección transversal de la muestra de losas de este estudio (dimensiones en mm).

Tanto las barras de PRFV como las de acero tenían diámetros nominales de 8 mm y un área de sección transversal de 40,5 mm². Las barras de PRFV se fabricaron en un proceso de pultrusión

con fibras de fibra de vidrio tipo E, impregnadas con resina epoxi. La superficie exterior de las barras de PRFV tenía ranuras correspondientes al tipo de fibra y resina utilizada en la fabricación. Las barras de acero eran de acero al carbono A615/A615M-14. Las propiedades mecánicas de las barras de PRFV utilizadas en este estudio se muestran en la Tabla 1. Las barras de PRFV se han evaluado de acuerdo con la norma ASTM D7205 y las barras de acero de acuerdo con los requisitos de la norma ASTM A615.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las barras de PRFV y el acero de este estudio

Propiedades	Acero	GFRP
Resistencia a la compresión (MPa)	500	300
Resistencia a la tracción (MPa)	500	1,000
Resistencia al cisallamiento (MPa)	500	150
Módulo de elasticidad (GPa)	210	50

Las losas se sometieron a ensayos estáticos de flexión de 4 puntos, como se muestra en la Figura 2. La capacidad de carga del dispositivo era de 300 kN monitoreada por una celda de carga de 50 kN con una resolución de 0,01 kN. La deflexión de la losa se midió con dos transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT) con una resolución de 0,002 mm colocados en los extremos medios del vano. Los datos de carga y deflexión se registraron a una velocidad de 10 Hz. La metodología de prueba fue el desplazamiento prescrito a una velocidad de 5 mm/min.

Se analizaron las cargas experimentales máximas y se compararon con los momentos nominales calculados analíticamente según la norma ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015). Las losas de PRFV se evaluaron para dos modos de falla: (a) falla gobernada por aplastamiento de concreto y (b) falla de FRP gobernada por falla, como se muestra en la Figura 3.

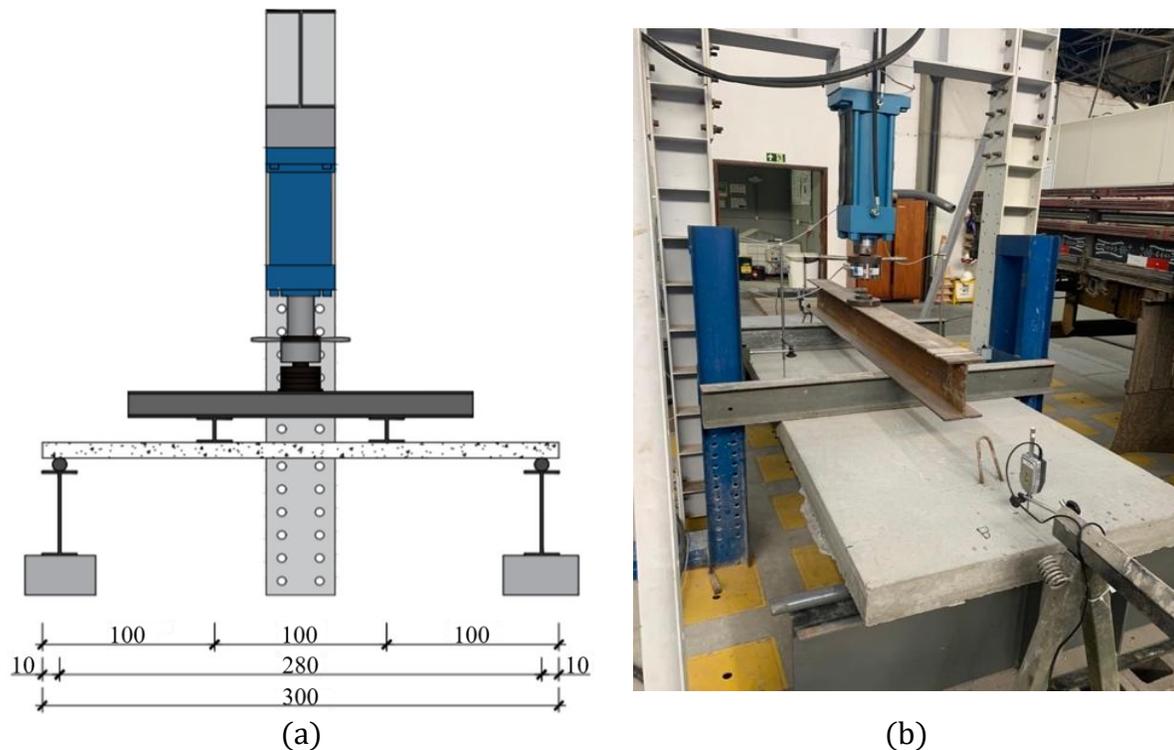


Figura 2. Dimensiones del aparato de ensayo de flexión en centímetros: a) posicionamiento e instrumentación de la muestra de ensayo y b) ensayo real en curso.

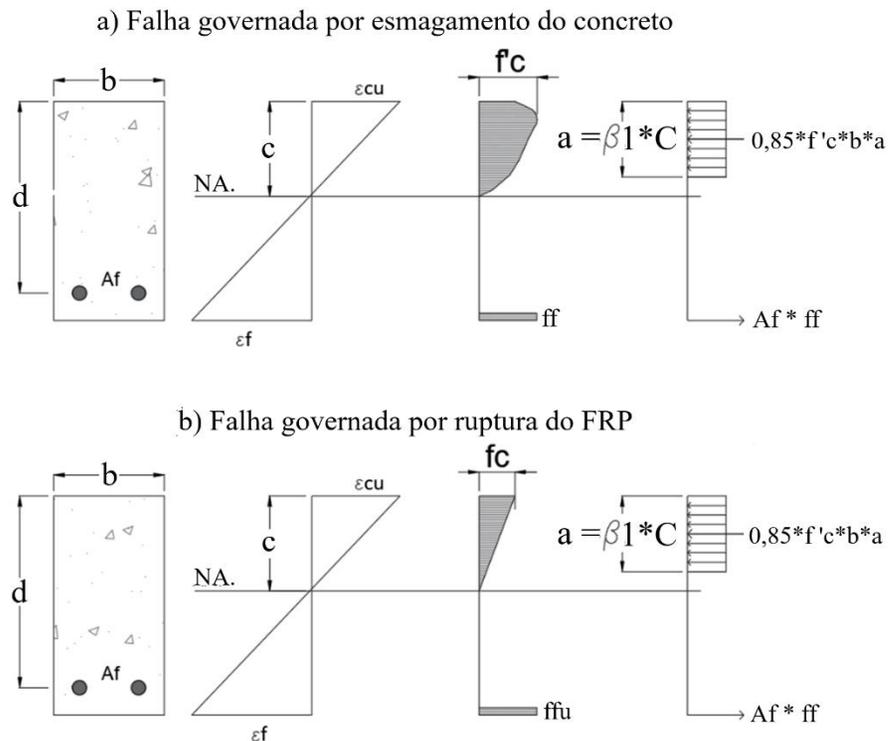


Figura 3. Condiciones de fallo por flexión para hormigón reforzado con FRP.
Fuente: ACI 440.1R-15 (2015).

El modo de ruptura por flexión resultante dependía de la relación entre la tasa de refuerzo y la tasa de refuerzo equilibrada. La tasa de refuerzo (ρ_f), mostrada en la Ec. 1, es la relación entre el área de la sección transversal efectiva de la armadura y el área de la sección transversal efectiva del hormigón. La relación de armadura equilibrada (ρ_{fb}), que se muestra en la Ec. 2, es la relación de armadura en la que se produce la transición del modo de falla. Si ρ_f era menor o igual que ρ_{fb} ($\rho_f \leq \rho_{fb}$), la ruptura se controlaba mediante la tensión en la barra de refuerzo de FRP. Si ρ_f era 1,4 veces mayor o igual que ρ_{fb} ($\rho_f \geq 1,4 \rho_{fb}$), la falla se produjo por aplastamiento del hormigón. Pero si ρ_f era menor que ρ_{fb} e inferior a $1,4 \rho_{fb}$ ($\rho_f < \rho_{fb} < 1,4 \rho_{fb}$), la falla se produjo tanto por el aplastamiento del hormigón como por la tensión del FRP.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \times d} \tag{Eq. 1}$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f'_c}{f_{fc}} \times \frac{E_f \times \epsilon_{cu}}{E_f \times \epsilon_{cu} + f_{fu}} \tag{Eq. 2}$$

A partir del análisis del modo de falla en relación con la tasa de refuerzo, se puede determinar la resistencia del momento nominal de las losas (M_n). En el caso de fallo por aplastamiento del hormigón, el momento viene dado por la Ec. 3. En caso de rotura de la barra de refuerzo de FRP, el momento viene dado por la Ec. 4. El momento nominal de cualquier modo de fallo se multiplicará por un coeficiente de reducción (ϕ) dado por la Ec. 5. Los cálculos se realizaron de acuerdo con ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015) y se compararon con los momentos máximos y momentos límite de deformación de los datos experimentales. A partir de estos resultados, se evaluaron los coeficientes de seguridad de cada uno de los elementos estructurales de losa ensayados.

$$M_n = A_f \times f_f \times x \left(d - \frac{A_f \times f_f}{0,85 \times f'_c \times b} \right) \tag{Ec.3}$$

$$M_n = A_f \times f_{fu} \times x \left(d - \frac{\left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) \times d}{2} \right) \tag{Ec.4}$$

$$\phi = \left\{ 0,55 \text{ for } \rho_f \leq \rho_{fb} \text{ , } 0,3 + 0,25 \times \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ for } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \text{ , } 0,65 \text{ for } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \right\} \tag{Ec.5}$$

3. RESULTADO

3.1. Comportamiento experimental de flexión de PRFV.

Los resultados de los ensayos de flexión de 4 puntos en las losas de GRFP se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores medios y desviación estándar de las propiedades medidas en losas reforzadas con PRFV.

Propiedades	Losa		
	GRFP-70 (70 mm)	GRFP-100 (100 mm)	GRFP-120 (120 mm)
f_1 (kN)	0.2 ± 0.01	6.5 ± 0.99	12.6 ± 0.80
δ_1 (mm)	0.2 ± 0.05	3.8 ± 0.54	7.1 ± 0.86
$f\delta_{ELS}$ (kN)	0.3 ± 0.03	7.5 ± 0.54	13.3 ± 0.60
f_u (kN)	5.8 ± 0.27	42.8 ± 2.20	45.7 ± 0.11
δ_{ELS} (mm)	255 ± 180	209 ± 139	116 ± 040
M_{cr} (kN.m)	0.2 ± 0.01	6.4 ± 0.97	12.3 ± 0.78
M_{max} (kN.m)	5.7 ± 0.27	42.0 ± 2.16	44.8 ± 0.11
$M_{LD,initial}/M_{cr}$	0.9 ± 0.00	0.5 ± 0.00	0.2 ± 0.00
$M_{LD,final}/M_{max}$	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00

f_1 – carga máxima en la primera fisura; δ_1 – deflexión en la primera fisura; $f\delta_{ELS}$: – carga máxima para ELS; f_u – carga máxima; δ_{ELS} – deflexión máxima para ELS; M_{cr} – momento en la primera fisura; M_{max} – momento máximo, $M_{LD,initial}$ – momento en la disminución de la carga inicial, $M_{LD,final}$ – momento en la disminución de la carga final

En la Tabla 2 se observa que f_1 para todas las losas fue menor que la carga de desplazamiento de $L/250$ a 11.2 mm, considerando el tamaño de la probeta. Los valores de f_1 y $f\delta_{ELS}$ también aumentaron a medida que aumentaba el espesor de la losa, pero a un ritmo bajo. Sin embargo, la formación de la primera grieta se ralentizó y la ganancia de rigidez se debió básicamente al espesor de la losa.

La relación $f_1/f\delta_{ELS}$ se acercó a 1,0 a medida que aumentaba el espesor de la losa: 0,66 para GRFP-70, 0,87 para GRFP-100 y 0,95 para GRFP-120. La disminución de la rigidez de un elemento se asoció con la aparición prematura de la primera grieta, según lo observado por Jabbar y Farid (Jabbar; Farid, 2018).

En consecuencia, las losas más delgadas con menos presencia de concreto dependieron de la tasa de refuerzo para resistir las grietas del concreto (Ebead; Marzouk, 2004). Así, en el caso de la losa

de PRFV de 70 mm, los incrementos en la relación de armadura aportarían más relevancia al aumentar el M_{cr} que al aumentar el espesor de la losa.

Los aumentos en el espesor de la losa limitaron la deformabilidad, lo que se esperaba de los estudios de referencia (PELED; BENTUR; YANKELEVSKY, 1998). Las losas GRFP-120 tuvieron la deflexión más baja, hasta 116 mm, que fue menos de la mitad de la deflexión máxima del tramo medido para GRFP-70. Los momentos M_{cr} y M_{max} también aumentaron con el aumento del espesor de la losa, con un aumento del 70% en el espesor, lo que resultó en un aumento de 7 veces en M_{max} . A medida que la carga disminuyó en relación con el aumento de la deflexión de la línea central (verificado en una curva de deflexión), se determinaron los momentos instantáneos en la disminución de la carga (MLD). En el caso de las losas GRFP, la mayor deformabilidad fue consecuencia del módulo de elasticidad de 50 GPa de la armadura, lo que hizo que el MLD fuera más importante en el primer 1/3 de la curva de carga debido a la fisuración.

También se observó en la Tabla 2 que la relación $MLD_{inicial}/M_{cr}$ disminuyó a medida que aumentaba el espesor de la losa. El valor de MLD fue sustancial para las losas GFRP-70, representando casi el 90% de la carga para que ocurriera la primera grieta. Esta relación disminuyó a 50% para GFRP-100 y 20% para GFRP-120. Incluso para losas más gruesas, esta disminución de la carga resultante de la formación o propagación de grietas sería de interés, como señalan Zheng, Yu (ZHENG; YU; PAN, 2012).

Las losas más gruesas tenían más control sobre las grietas, ya que los refuerzos estaban más cerca de los bordes que se estaban tensando. En el caso de la losa GRFP-70 más delgada, la cubierta de hormigón era de 20 mm, los refuerzos estaban más cerca del centro de gravedad del elemento que el borde, y la losa más delgada también tenía un brazo de momento más pequeño. Estas características dieron lugar a un retraso en la redistribución de las cargas y a caídas más significativas de la tensión.

La Figura 4 muestra los puntos de datos y los ajustes de la curva del momento de fisuración (M_{cr}), el momento máximo (M_{max}) y los momentos en las disminuciones de carga inicial y final ($MLD_{inicial}/M_{cr}$ y MLD_{final}/M_{max}) en relación con el espesor de la losa para todas las losas GRFP.

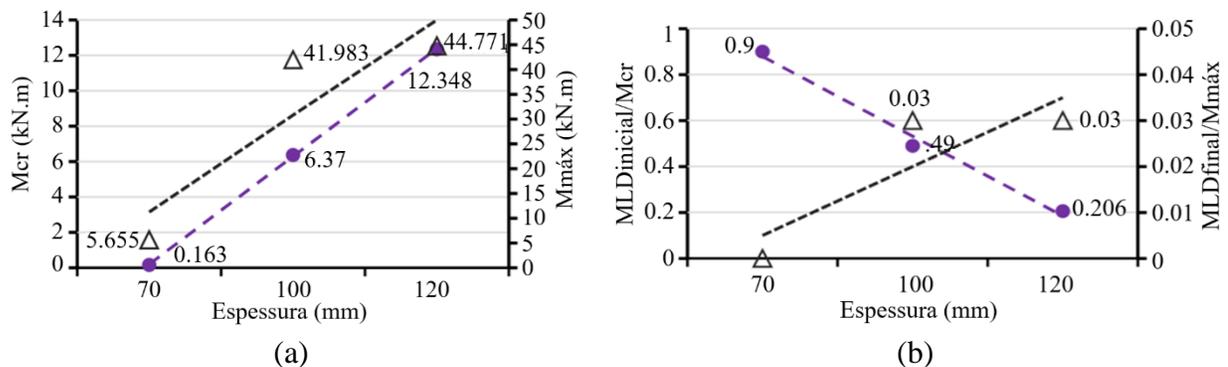


Figura 4. (a) Fisuración y momentos máximos y (b) relaciones MLD en relación al espesor de las losas reforzadas con PRFV de este estudio.

La Figura 4 (a) muestra que el M_{cr} aumentó a medida que aumentaba el espesor de la losa, y los valores se correlacionaron, ya que el ajuste de la curva tuvo $R^2 = 1$. El mismo resultado analítico se observó para M_{max} . En cuanto a las proporciones de la Fig. 4 (b), $MLD_{inicial}/M_{cr}$ disminuyó a medida que aumentaba el espesor de la losa. Este comportamiento se atribuyó al aumento de la rigidez del elemento, que se relacionó directamente con el cambio de inercia a medida que aumentaba el espesor. El MLD inicial se mantuvo proporcional entre las losas como resultado de que todas las losas se produjeron con el mismo tipo de concreto con una resistencia a la tracción de aproximadamente 3.2 MPa. Por otro lado, MLD_{final}/M_{max} se mantuvo esencialmente en cero para todas las losas. Esto fue representativo de la ausencia o disminución insignificante de las

cargas en el último 1/3 de las curvas de deflexión en la Figura 5. La Figura 5 también muestra que, en las etapas inicial y final de la prueba, hubo formación y propagación de varias grietas, respectivamente, como se observó (Ahmed et al., 2020). Esto fue resultado de la elongación del refuerzo a través de la fisura y fue un comportamiento esperado también observado en los estudios de (BARRIS et al., 2013; ERFAN et al., 2021).

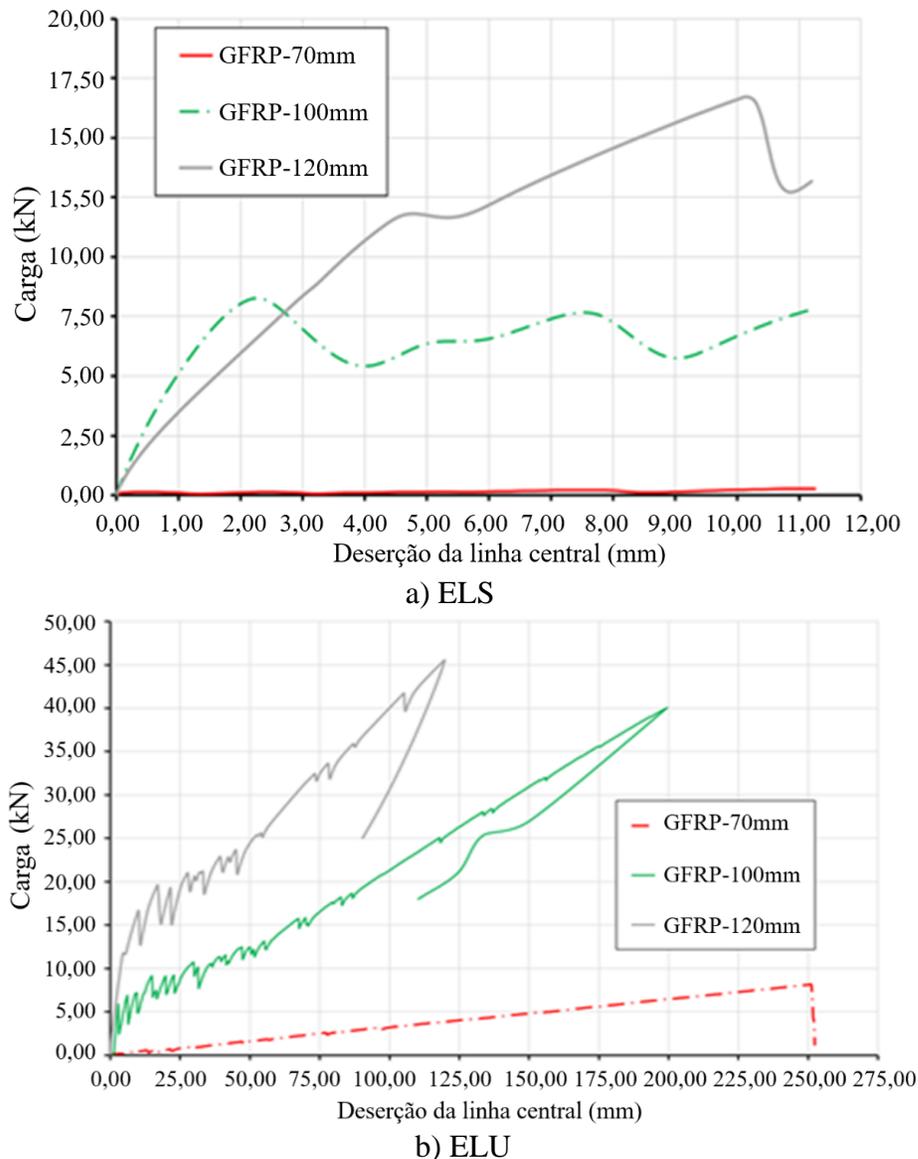


Figure 5. Curvas de deflexión para losas reforzadas con PRFV en este estudio, a) etapa límite de servicio; b) Etapa límite última.

La figura 5 (a) muestra las cargas ELS y sus fluctuaciones hasta una deflexión de 11,2 mm. Las losas GFRP-100 y GFRP 120 mostraron reducción de carga y altas deflexiones, con un comportamiento similar, caracterizando el comportamiento de fisuración múltiple. La losa GFRP 120 mostró una reducción tanto en la fisuración principal como en la deflexión del vano. Solo las losas identificadas como GFRP-70 mm no se comportaron de manera similar, debido a la propagación de una sola grieta. Las cargas ELS mostraron varios picos indicativos de fisuras iniciales antes de que se alcanzara el límite de deflexión en el análisis. Esto fue el resultado de la relación entre la carga de fisuración y el límite de deflexión ELS. A medida que aumentaba el espesor de la losa, las curvas se volvían más similares, pero el número de caídas de carga disminuía.

Esto estaba de acuerdo con la hipótesis de una mayor rigidez de los elementos y una nucleación tardía de fisuras a mayores espesores (Jabbar; Farid, 2018).

Los resultados de ELU en la Fig. 5 (b) muestran distintas etapas iniciales y finales para todas las losas. En el caso de GFRP-100 y GFRP-120, la ocurrencia de caídas en la carga y en el número de picos se amortiguó cuando la carga alcanzó el 50% del valor máximo. Estos comportamientos se debieron a que las barras de PRFV tenían un valor de módulo de elasticidad similar al tipo de hormigón utilizado. Las caídas en la carga y el aumento en la deflexión fueron indicativos de la formación de nuevas fisuras sin actividad de barra de refuerzo, que actuó como refuerzo pasivo en esta etapa. El refuerzo se activó cuando el hormigón se agrietó y estiró las fibras a través de las aberturas. Esto requirió que se aplicaran cargas más altas para formar nuevas grietas, ya que se requerían tensiones más altas para abrir nuevas grietas. Si no se alcanzaba el límite de carga para las nuevas fisuras, se producía la propagación de las fisuras más antiguas.

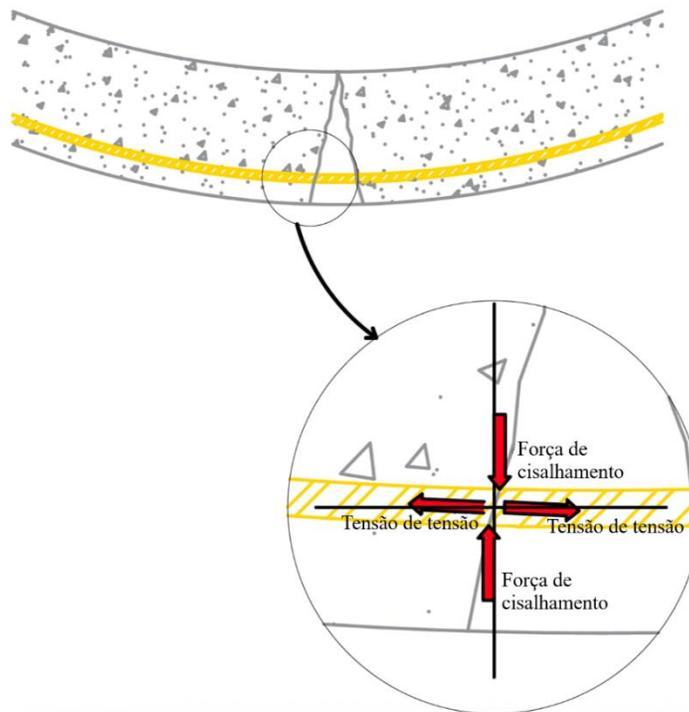


Figura 6. Distribución de tensiones en la región de la interfaz entre la barra de refuerzo de PRFV y la grieta que provocó la falla por cizallamiento.

Cabe señalar que la ruptura se produjo repentinamente en los elementos, a pesar de la alta flexibilidad. La Figura 6 muestra la distribución de tensiones en la región de la interfaz entre la barra de refuerzo GFRP y la grieta propagada. A medida que las grietas se propagaban, las barras giraban en relación con la grieta, induciendo esfuerzos combinados de tracción y cizallamiento en la región de la interfaz. Esto ocurría en el segmento desprendido de la abertura y al final de la grieta, donde la barra permanecía unida al hormigón y seguía el mismo ángulo de deformación del elemento. Las deflexiones medidas superaron los valores aceptables para los elementos de hormigón definidos por las normas ACI 318, EN1992-1-1, ABNT NBR 6118 y otras. La desalineación entre las paredes de la fisura indujo cizallamiento en la barra de refuerzo de PRFV. Esto se notó en la apariencia visual de la barra de refuerzo de PRFV después de la ruptura de la losa que se muestra en la Figura 7. Por lo tanto, la ruptura brusca de los elementos fue el resultado de las tensiones combinadas debidas a la tracción y al cortante de las barras de refuerzo.

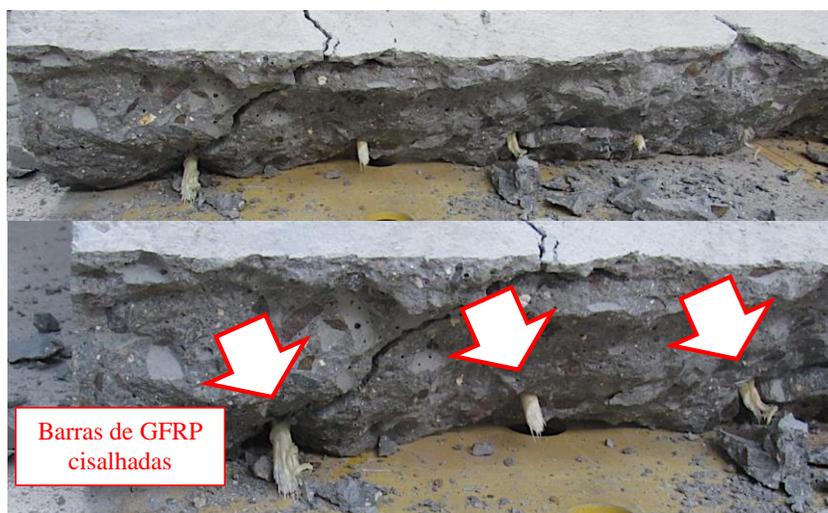


Figura 7. Aspecto visual de la armadura de PRFV tras un fallo de cortante interno causado por la propagación de grietas en la losa

3.2. Comparación entre losas de acero reforzado y PRFV

La losa de 100 mm de espesor con refuerzo de acero se comparó con el PRFV-100 y los resultados se muestran en la Tabla 3. Ambas losas tuvieron un comportamiento similar, ya que se agrietaron antes de que la carga aplicada alcanzara $f_{\delta SS}$. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 3, los valores específicos de $f_{\delta SS}$ fueron diferentes para cada tipo de refuerzo. El acero tenía un módulo de elasticidad más alto que el PRFV y, por extensión, un $f_{\delta SS}$ más alto. A pesar de presentar comportamientos superiores y predecibles, la carga máxima (f_u) de la losa de acero fue menor y la deflexión máxima (δ_{ELU}) fue 65% menor que el valor de GFRP-100.

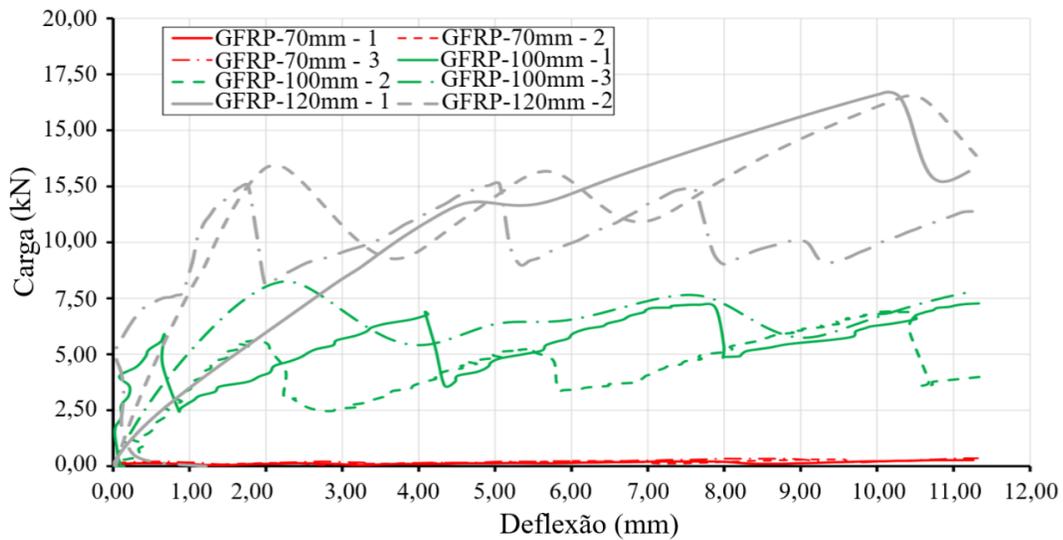
Tabela 3. Valores medios y desviación estándar de las propiedades de losas de 100 mm de espesor con armadura de acero o PRFV

Propiedad	Losa de espesor $h=100$ mm	
	Aço	GFRP-100
f_l (kN)	10.2 ± 1.02	6.5 ± 0.99
δ_l (mm)	2.41 ± 0.04	3.8 ± 0.54
$F\delta_{ELS}$ (kN)	15.0 ± 0.60	7.5 ± 0.54
f_u (kN)	37.2 ± 0.43	42.8 ± 2.20
δ_{ELU} (mm)	7.4 ± 1.93	20.9 ± 1.39
M_{cr} (kN.m)	10.0 ± 1.00	6.4 ± 0.97
M_{max} (kN.m)	36.5 ± 0.42	42.0 ± 2.16
$M_{LD,initial}/M_{cr}$	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.00
$M_{LD,final}/M_{max}$	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00

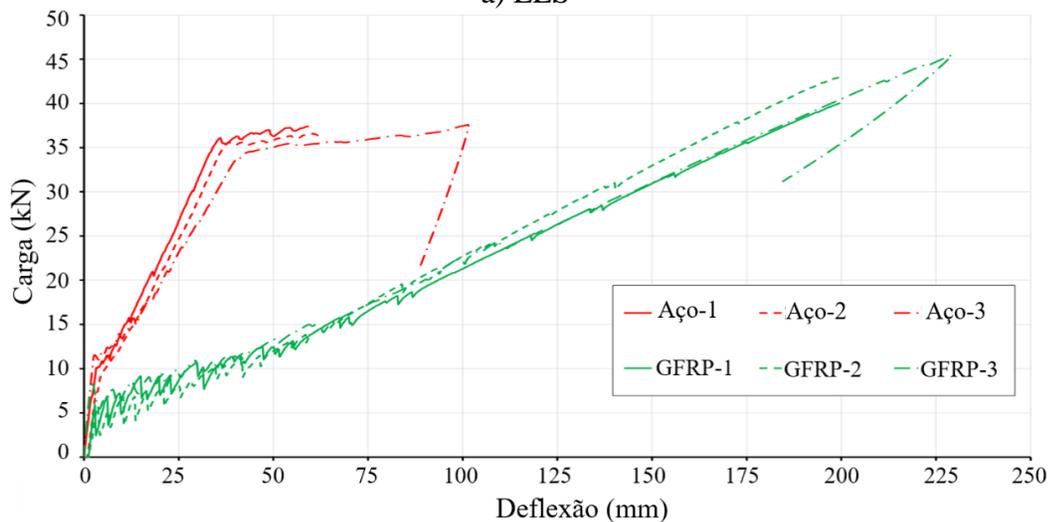
El módulo de elasticidad de cada tipo de armadura afectaba a la deformación del elemento. El acero tiene un módulo de elasticidad de 3 a 4 veces mayor que el PRFV y, por extensión; Los elementos de acero deben tener deformaciones alrededor de 3 veces más pequeñas. Sin embargo, los resultados mostraron que la carga máxima (f_u) fue menor para la losa de acero debido a que el PRFV tiene una mayor resistencia a la tracción que el acero.

Las comparaciones de las curvas de deflexión entre losas reforzadas con acero y GFRP se muestran en la Figura 8 para ELS y ELS. Se muestran los resultados para cada una de las 3 muestras de cada tipo de losa. La caída en las cargas para ELS, cuando se evaluó como MLD a lo largo de las curvas,

mostró que la losa de acero tenía variaciones de M_{cr} alrededor de 13 veces menores y M_{max} alrededor de 2 veces menores que GFRP-100. Este resultado también se atribuyó a la diferencia en el módulo de elasticidad entre los materiales. Para la curva ELU, la losa de acero también mostró una ganancia de resistencia ascendente que, después de la estabilización, representó el rendimiento del material. En contraste, el comportamiento del GFRP-100 mostró un aumento constante en la carga hasta una ruptura súbita. Este comportamiento lineal entre el estrés y la deformación fue observado en barras de refuerzo individuales por Sadraie, Khaloo y Soltani (Sadraie; Khaloo; Soltani, 2019) se muestra en este estudio que también se aplica a las losas reforzadas.



a) ELS



b) ELU

Figura 8. Curvas de deflexión de losas con armadura de acero y PRFV-100, a) Etapa límite de servicio; b) Etapa límite última.

La curva ELS en la Figura 8 también muestra caídas de carga de menos de 1 kN para la losa de acero que se volvió más intensa en el 1/3 final de la curva. En comparación, el GFRP-100 mostró caídas más relevantes en el 1/3 inicial y en el 1/3 final de la curva. Esto indicaba que la losa de acero tenía un mejor control sobre la fisuración y tenía más grietas con pequeñas aberturas, lo que explicaba las caídas más suaves de la carga. En el último 1/3 de la curva, la armadura de acero estaba en el límite de fluencia, lo que amplificaba las caídas de carga, ya que el tiempo de respuesta

del material ya se veía comprometido por el alargamiento. Las diferencias visuales en la fisuración en la cara tensada de la losa reforzada con acero y el PRFV-100 se muestran en la Figura 9.

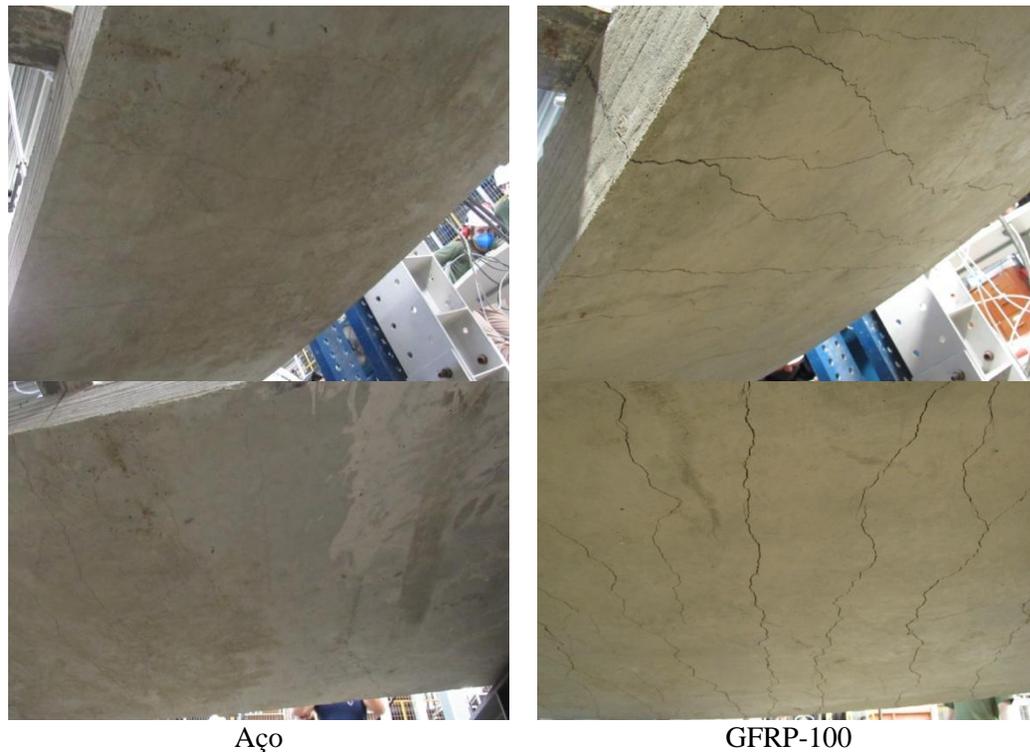


Figura 9. Cara de losa agrietada reforzada con acero y GFRP-100

En general, se puede afirmar que la magnitud de la reducción de la carga debido a las grietas y el número de picos en la curva de carga se relacionaron con el módulo de elasticidad de la armadura, mientras que M_{max} se relacionó con el límite de esfuerzo de fluencia de la armadura. Debido a que las barras de GFRP tenían una mayor resistencia, GFRP-100 pudo lograr un M_{max} más alto que la losa de acero, incluso si las barras de refuerzo se rompieron por cizallamiento.

3.3 Análisis comparativo experimental y analítico.

La Tabla 4 muestra el momento flector máximo (M_{max}) obtenido a partir de datos experimentales y el momento nominal (M_n) calculado a partir de la Ec. 3 y Ec. 4 de la regla. ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015).

Tabla 4. Comparación de momentos experimentales y analíticos para losas reforzadas con PRFV.

Momentos	Espesores de las losas		
	70 mm	100 mm	120 mm
M_{max} (kN.m)	5.7	42	44.8
M_n (kN.m)	5.99	10.94	13.86
$\frac{M_{max}}{M_n}$	0.95	3.84	3.23

El análisis comparativo de la Tabla 4 muestra que los momentos flectores experimentales para losas más gruesas fueron mayores que los valores analíticos. En contraste, para la losa más delgada de 70 mm, el momento analítico fue mayor que el valor experimental. En cuanto a la relación M_{max}/M_n , se puede afirmar que las losas más gruesas de 100 mm y 120 mm tenían un margen de

seguridad mayor que la losa de 70 mm.

La Figura 10 muestra una comparación gráfica de los momentos de flexión experimentales y analíticos. El momento analítico tuvo un comportamiento proporcional entre M_{max} y el espesor de la losa, lo que indica que el espesor de la losa tuvo poco efecto en las ganancias de resistencia. Por otro lado, los momentos experimentales mostraron claras ganancias de resistencia a medida que aumentaba el espesor de la losa. Hay que tener en cuenta que todas las losas tenían la misma relación de refuerzo, independientemente del espesor.

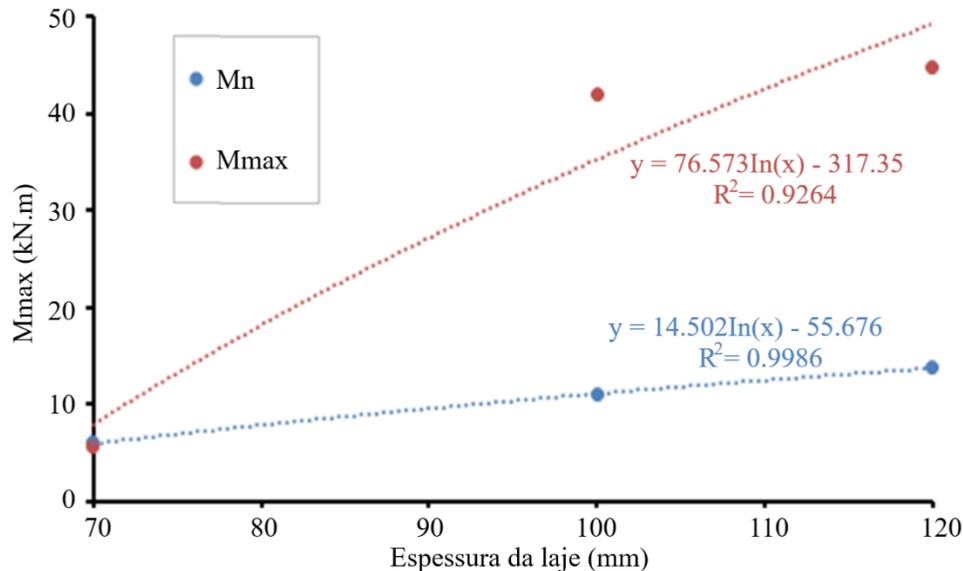


Figura 10. Momentos de flexión experimentales y analíticos en relación al espesor de la losa.

El análisis comparativo mostró un alto margen de seguridad. Sin embargo, la carga máxima aplicada que resultó en el momento flector máximo no debe considerarse un momento efectivo en condiciones normales de operación, ya que no incluye los efectos de fluencia y carga a largo plazo. Esto se debe a las condiciones de uso de la estructura, ya que si la deformación supera el límite, la estructura se considera inoperativa. Por otro lado, los momentos nominales calculados fueron menores, ya que incluyeron efectos de fluencia y otros factores en sus expresiones analíticas. Las normas ACI 318, EN1992-1-1, ABNT NBR 6118 y otras han definido un límite superior para las deformaciones específicas de las barras de refuerzo con el fin de evitar una deflexión excesiva de los elementos estructurales. Además, Fakoor y Nematzadeh (Fakoor; Nematzadeh, 2021) afirmaron que por encima del 8% de deformación específica, el elemento estructural ya no es plano y, en consecuencia, ya no es compatible con la ley de Hooke.

Otro análisis podría hacerse considerando que, para la losa de 70 mm, la relación de armadura calculada es inferior a la relación de armadura equilibrada. En consecuencia, la losa más delgada se rompió debido a la trituración del hormigón, mientras que las losas más gruesas se rompieron debido a las tensiones de la barra de refuerzo. Por lo tanto, para losas más gruesas, la disminución de la capacidad de carga debe ser responsable de la fluencia del material de la barra de refuerzo. Debido a que las barras de refuerzo de PRFV tenían un módulo de elasticidad relativamente bajo, la deformación debida a las cargas a largo plazo fue menor (Gonilha; Cinturón; Branco, 2013; Miàs et al., 2013).

Los efectos de la carga a corto y largo plazo en las vigas reforzadas con PRFV fueron evaluados por Miàs et al. (Miàs et al., 2015). Los resultados mostraron que las fisuras inducidas por flexión tenían aberturas un 25% más grandes para las vigas sometidas a cargas a largo plazo.

4. CONCLUSIÓN

Las conclusiones obtenidas en este estudio son:

- El aumento del espesor de las losas reforzadas con PRFV ha dado lugar a un aumento lineal efectivo de la capacidad de carga y a una disminución de la deflexión, debido a la mayor rigidez del elemento;
- Las curvas de deflexión de las losas de PRFV, especialmente las relacionadas con la USS, reflejaron el mismo comportamiento lineal de los experimentos realizados solo con barras de refuerzo;
- La comparación entre los tipos de armadura determinó que las losas reforzadas con PRFV mostraron mayor deflexión que las losas reforzadas con acero. Esto se ha atribuido a que el PRFV tiene un módulo de elasticidad aproximadamente 4 veces menor que el acero;
- La carga de la primera fisura evidenciada en la losa reforzada con acero y en la losa reforzada con PRFV, ambas con el mismo espesor y número de barras, fue de 10,2 kN y 6,5 kN, respectivamente. Sin embargo, si el espesor de la losa se incrementa en 2 cm, la primera carga de fisuración se incrementa, alcanzando un valor de 12,6 kN;
- Los resultados experimentales se compararon con los cálculos analíticos de estándares internacionales. Dado que el análisis experimental no incluyó todos los coeficientes en las expresiones matemáticas, se esperaba que los resultados experimentales fueran superiores a los cálculos analíticos, y esto se demostró correctamente en los resultados de este estudio. Demostrando que la norma técnica utilizada para calcular las estructuras reforzadas de PRFV es muy conservadora, y los coeficientes de mitigación pueden ser revisados.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en la realización de las pruebas y en la compra de material bruto, especialmente para itt Performance – UNISINOS

6. REFERENCIAS

- American Concrete Institute (2015), *ACI 440.1R-15 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Farmington Hills: Reported by ACI Committee 440.
- ASTM International (2020), *ASTM C143/20 - Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken, PA.
- Ahmed, A., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C., Zhu, D. (2020), *A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete*. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119484>
- Arczewska, P.; Polak, M. A.; Penlidis, A. (2021), *Degradation of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete environment*. *Construction and Building Materials*, v. 293, p. 123451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123451>
- Ashour, A. F. (2006), *Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars*. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 10, p. 1005–1015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.023>
- Bondaletova, L. I., Bondaletov, V. G. (2013), *Polymer Composite Materials*, p. 11-13 (in Russian).

Bakouregui, A. S., Mohamed, H. M., Yahia, A., Benmokrane, B. (2021), *Explainable extreme gradient boosting tree-based prediction of load-carrying capacity of FRP-RC columns*. Engineering Structures, v. 245, n. January, p. 112836. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112836>

BARRIS, C., Torres, L., Comas, J., Miàs, C. (2013), *Cracking and deflections in GFRP RC beams: An experimental study*. Composites Part B: Engineering, v. 55, p. 580–590. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.019>

Chu, K.; Hossain, K. M. A.; Lachemi, M. (2020), *Fatigue behavior of GFRP-reinforced ECC link slabs under variable stress levels and number of cycles*. Engineering Structures, v. 222, n. December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111130>

Ebead, U.; Marzouk, H. (2004), *Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slabs*. ACI Structural Journal, v. 101, n. 5, p. 650–659. <https://doi.org/10.14359/13387>

Erfan, A. M., Abd Elnaby, R. M., Aziz Badr, A., El-sayed, T. A. (2021), *Flexural behavior of HSC one way slabs reinforced with basalt FRP bars*. Case Studies in Construction Materials, v. 14, p. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00513>

Fakoor, M.; Nematzadeh, M. (2021), *A new post-peak behavior assessment approach for effect of steel fibers on bond stress-slip relationship of concrete and steel bar after exposure to high temperatures*. Construction and Building Materials, v. 278, p. 122340. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122340>

Gajdošová, K., Sonnenschein, R., Blaho, S., Kinčeková, S., Pecka, J. (2020), *Durability of FRP Reinforcements and Long-Term Properties*. Slovak Journal of Civil Engineering, v. 28, n. 2, p. 50–55. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0015>

Gao, D., Fang, D., You, P., Chen, G., Tang, J. (2020), *Flexural behavior of reinforced concrete one-way slabs strengthened via external post-tensioned FRP tendons*. Engineering Structures, v. 216, p. 110718. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110718>

Gonilha, J. A.; Correia, J. R.; Branco, F. A. (2013), *Creep response of GFRP-concrete hybrid structures: Application to a footbridge prototype*. Composites Part B: Engineering, v. 53, p. 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.054>

Gravina, R. J., Li, J., Smith, S. T., Visintin, P. (2020), *Environmental Durability of FRP Bar-to-Concrete Bond: Critical Review*. Journal of Composites for Construction, v. 24, n. 4, p. 03120001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001016)

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, v. 4, n. 2, p. 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002>

Kaszubska, M.; Kotynia, R.; Barros, J. A. O. (2017), *Influence of Longitudinal GFRP Reinforcement Ratio on Shear Capacity of Concrete Beams without Stirrups*. Procedia Engineering, v. 193, p. 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.225>

Mahroug, M. E. M.; Ashour, A. F.; Lam, D. (2014), *Experimental response and code modelling of continuous concrete slabs reinforced with BFRP bars*. Composite Structures, v. 107, p. 664–674. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.029>

Manalo, A., Maranan, G., Benmokrane, B., Cousin, P., Alajarmeh, O., Ferdous, W., Liang, R., Hota, G., (2020), *Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments*, Cement and Concrete Composites, Volume 109, 103564, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103564>

Miàs, C., Torres, L., Turon, A., Sharaky, I. A. (2013), *Effect of material properties on long-term deflections of GFRP reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.055>

- Miàs, C., Torres, L., Turon, A. (2015), *Short and long-term cracking behaviour of GFRP reinforced concrete beams*. Composites Part B: Engineering, v. 77, p. 223–231, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.024>
- Najafabadi, E. P., Bazli, M., Ashrafi, H., Oskouei, A. V. (2018), *Effect of applied stress and bar characteristics on the short-term creep behavior of FRP bars*, Construction and Building Materials, Volume 171, Pages 960-968, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.204>
- Noël, M.; Soudki, K. (2014), *Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement*. Engineering Structures, v. 59, p. 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.005>
- Peled, A., Bentur, A., Yankelevsky, D. Z. (1998), The nature of bonding between monofilament polyethylene yarns and cement matrices. Cement and Concrete Composites, v. 20, n. 4, p. 319–327. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00007-9)
- Rosa, I. C., Santos, P., Firmo, J. P., Correia, J. R. (2020), *Fire behaviour of concrete slab strips reinforced with sand-coated GFRP bars*. Composite Structures, v. 244, n. December 2019, p. 112270. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112270>
- Sadraie, H.; Khaloo, A.; Soltani, H. (2019), *Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading*. Engineering Structures, v. 191, n. December 2018, p. 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.038>
- Satasivam, S., Bai, Y., Yang, Y., Zhu, L., Zhao, X.-L. (2018), *Mechanical performance of two-way modular FRP sandwich slabs*. Composite Structures, v. 184, n. September 2017, p. 904–916, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.026>
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z., Zhu, Z. (2015), Creep behavior enhancement of a basalt fiber-reinforced polymer tendon. Construction and Building Materials, v. 94, p. 750–757, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.118>
- Shi, X., Park, P., Rew, Y., Huang, K., Sim, C. (2020), *Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension*, Construction and Building Materials, Volume 233, 117316, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316>
- Starkova, O., Buschhorn, S. T., Mannov, E., Schulte, K., Aniskevich, A. (2012), *Creep and recovery of epoxy/MWCNT nanocomposites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 43, Issue 8, Pages 1212-1218, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.03.015>.
- Wang, X., Shi, J., Liu, J., Yang, L., Wu, Z. (2014), *Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing application*. Materials and Design, v. 59, p. 558–564, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.009>
- Zhang, P., Hu, R., Zou, X., Liu, Y., Li, Q., Wu, G., Sheikh, S. A. (2021), *Experimental study of a novel continuous FRP-UHPC hybrid beam*, Composite Structures, Volume 261, 113329, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113329>.
- Zheng, Y., Yu, G., Pan, Y. (2012), *Investigation of ultimate strengths of concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP bars*. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.002>