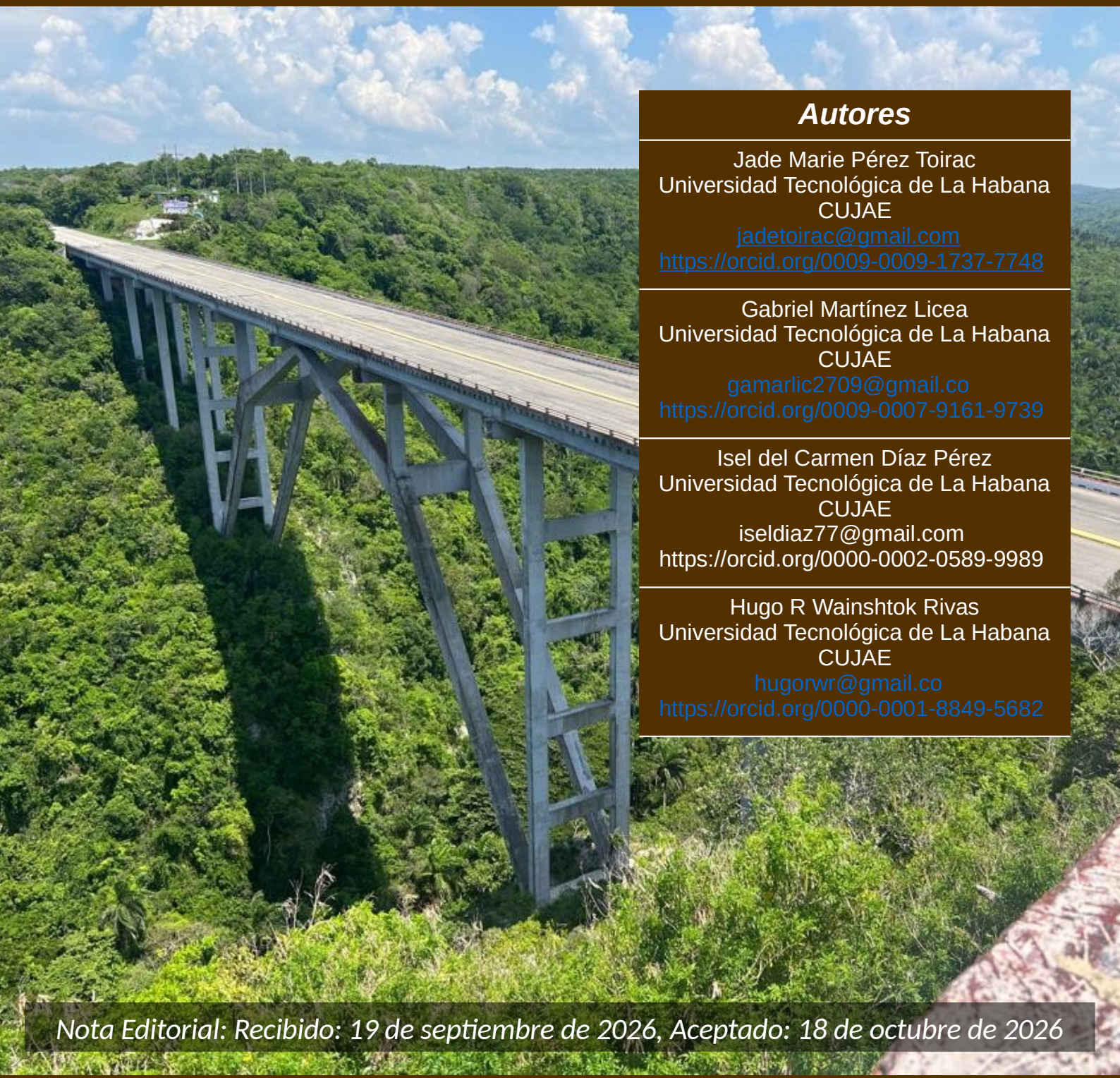
5

Estudio De La Influencia De La Distancia De Aplicación De Carga Al Apoyo En La Resistencia A Cortante De La Losa Canal De Mortero Armado Con Refuerzo Híbrido, Mediante Modelación Computacional

Study Of The Influence Of The Distance From The Load Application Point To The Support On The Shear Strength Of A Reinforced Mortar Channel Slab With Hybrid Reinforcement, Using Computational Modeling



Autores

Jade Marie Pérez Toirac
Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE
jadetoirac@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-1737-7748

Gabriel Martínez Licea
Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE
gamarlic2709@gmail.co
https://orcid.org/0009-0007-9161-9739

Isel del Carmen Díaz Pérez
Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE
iseldiaz77@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-0589-9989

Hugo R Wainshtok Rivas
Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE
hugorwr@gmail.co
https://orcid.org/0000-0001-8849-5682

Nota Editorial: Recibido: 19 de septiembre de 2026, Aceptado: 18 de octubre de 2026

5

Estudio De La Influencia De La Distancia De Aplicación De Carga Al Apoyo En La Resistencia A Cortante De La Losa Canal De Mortero Armado Con Refuerzo Híbrido, Mediante Modelación Computacional



Resumen

El uso de los polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) constituye una solución para mitigar el fenómeno de la corrosión en paneles de sección canal de ferrocemento; sin embargo, la baja resistencia al cortante de este tipo de refuerzo, sumado a la menor resistencia ante esfuerzos tangenciales de los elementos de paredes delgadas, en comparación a las losas de hormigón armado convencional, conducen a la propuesta de combinación híbrida del PRFV y el acero. Estudios previos sobre resistencia al cortante en elementos de hormigón armado han demostrado la relación entre la distancia del punto de aplicación de la carga al apoyo y el peralto como un parámetro de gran influencia en ensayos a flexión. En el caso específico de los elementos de paredes delgadas de ferrocemento, el fallo por cortante frecuentemente se obtiene para cargas puntuales aplicadas cerca del apoyo; en cambio, cuando se utiliza el PRF como refuerzo longitudinal, se ha registrado la ocurrencia de este tipo de fallo para posiciones de carga más alejadas, en correspondencia con el comportamiento estructural de una viga esbelta. En el presente trabajo se realiza el estudio de la influencia de la relación brazo-peralto en el rango de viga esbelta en la resistencia al cortante de paneles de sección tipo canal con el refuerzo híbrido descrito, mediante simulaciones computacionales en el software MIDAS FEA NX. Los resultados arrojan una disminución de 22% en el cortante resistente con el aumento del factor de estudio.

Palabras Clave

cortante, losa canal, mortero armado, paredes delgadas, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV), relación brazo – peralto (a/h), simulación computacional.

5

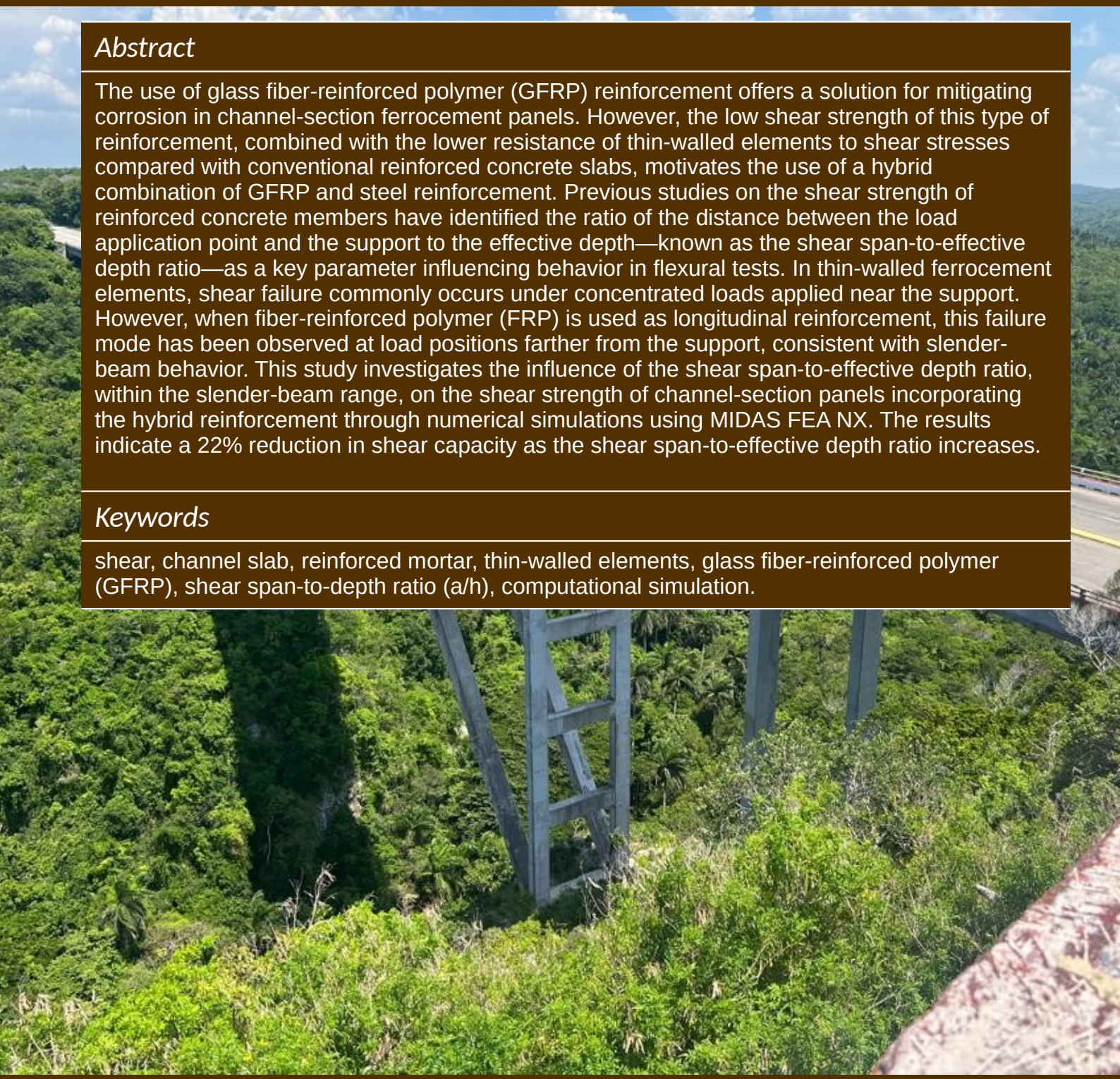
Study Of The Influence Of The Distance From The Load Application Point To The Support On The Shear Strength Of A Reinforced Mortar Channel Slab With Hybrid Reinforcement, Using Computational Modeling

Abstract

The use of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforcement offers a solution for mitigating corrosion in channel-section ferrocement panels. However, the low shear strength of this type of reinforcement, combined with the lower resistance of thin-walled elements to shear stresses compared with conventional reinforced concrete slabs, motivates the use of a hybrid combination of GFRP and steel reinforcement. Previous studies on the shear strength of reinforced concrete members have identified the ratio of the distance between the load application point and the support to the effective depth—known as the shear span-to-effective depth ratio—as a key parameter influencing behavior in flexural tests. In thin-walled ferrocement elements, shear failure commonly occurs under concentrated loads applied near the support. However, when fiber-reinforced polymer (FRP) is used as longitudinal reinforcement, this failure mode has been observed at load positions farther from the support, consistent with slender-beam behavior. This study investigates the influence of the shear span-to-effective depth ratio, within the slender-beam range, on the shear strength of channel-section panels incorporating the hybrid reinforcement through numerical simulations using MIDAS FEA NX. The results indicate a 22% reduction in shear capacity as the shear span-to-effective depth ratio increases.

Keywords

shear, channel slab, reinforced mortar, thin-walled elements, glass fiber-reinforced polymer (GFRP), shear span-to-depth ratio (a/h), computational simulation.



1. INTRODUCCIÓN

Los paneles de sección tipo canal de ferrocemento constituyen una de las soluciones más factibles y de adecuadas prestaciones para ser empleados en entrepisos y cubiertas de viviendas [1, 2]. Las ventajas de dicha solución se fundamentan en los bajos volúmenes de materiales que requieren para su conformación. Sus pequeños espesores, en el orden de 20 a 30mm, implican un consumo de cemento equivalente a la mitad del necesario para una losa de hormigón armado convencional, y una disminución del 35% del refuerzo de acero respecto al mismo. Sin embargo, el problema de la corrosión prevalece, siendo el uso con barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) una alternativa para eliminar este fenómeno [3]

Los PRF poseen una resistencia a tracción superior al acero, menor peso que las barras tradicionales, mayor resistencia a ataques químicos, así como mayor durabilidad [4, 5]. Sin embargo, dicho material presenta menor resistencia al cortante, y su menor módulo de elasticidad provoca una mayor fisuración del hormigón en el elemento estructural, que conduce a una disminución en la resistencia a cortante del mismo [6, 7]. Por otro lado, es reconocida la menor resistencia al cortante de los elementos de paredes delgadas de mortero en comparación al hormigón armado [8], lo que provoca una limitación en el uso del PRF como refuerzo en este tipo de elementos y una necesidad de mayor cantidad de estudios al respecto.

De esta manera, el estudio de un refuerzo híbrido conformado por mallas de alambres de acero galvanizado y barras de PRF se propone como una respuesta a suplir las deficiencias de elementos de paredes delgadas de un material único, tal sea PRF o acero [7, 9, 10]. Se propone dicha combinación debido a que su ventaja radica en asegurar la durabilidad requerida en ambientes agresivos mediante la combinación compatible entre el uso de las barras de PRF y las mallas galvanizadas, y, a su vez, aumentar la ductilidad y la resistencia a cortante con respecto a una malla elaborada con el material polimérico [11].

La resistencia al cortante puede ser calculada a través del método clásico de analogía de una armadura con la sumatoria del aporte del refuerzo transversal y el aporte del mortero [6, 12]. La Canadian Standard Association CSA (2012) [13] entre sus líneas integra el refuerzo híbrido formado por barras longitudinales de PRF y refuerzo transversal con acero. Por otra parte, el American Concrete Institute ACI no presenta una norma única para el cálculo de dicho tipo de refuerzo híbrido, pero la aplicación conjunta de los códigos para el diseño con acero ACI-318 [12], y con PRFV ACI-440 [6] posibilitan una vía similar a la recomendada por la CSA [13]. Las simplificaciones realizadas por el ACI disminuyen la dificultad del procedimiento, lo cual otorga una facilidad de aplicación con respecto a otras normativas.

Como parte del estudio de los elementos de paredes delgadas a cortante, se han realizado investigaciones, donde se identificó que la relación entre la distancia de aplicación de la carga al apoyo y el peralto (a/h) constituye uno de los factores de mayor influencia en el fallo por esfuerzos tangenciales. En el caso de los elementos de ferrocemento, la ocurrencia del fallo por cortante se evidenció principalmente para relaciones a/h<2. Con respecto a las losas canales reforzadas con PRF, pueden destacarse los ensayos experimentales realizados por Dang Quang, en el cual se evidenció un fallo por flexo-cortante en elementos de sección U invertida reforzados con mallas y barras de PRFV, con una carga aplicada correspondiente a una relación a/h=3, a diferencia de lo observado en el ferrocemento.

El objetivo de este artículo es evaluar la influencia de la relación a/h en la resistencia a cortante de la losa canal de mortero armado con refuerzo híbrido constituido por barras de PRFV y mallas de alambres de acero, mediante el uso de modelos computacionales basados en el método de los elementos finitos. Este método garantiza la optimización del tiempo y un ahorro considerable de recursos, lo cual conlleva a una ventaja económica en comparación a un programa de ensayos físicos [14]. Para la calibración del modelo computacional se tendrá en cuenta el estudio realizado por Ahmad [15], mientras para la validación los trabajos de Tian [16] y Quang [1]. Adicionalmente se realiza una comparación de los resultados de la modelación con el método de obtención de la resistencia al cortante según recomendaciones del ACI.

2. DESARROLLO

2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS FÍSICOS

Los resultados de los experimentos de elementos canales anteriormente realizados por Ahmad [15], Tian [16], y Quang [1], constituyen la referencia a la calibración y validación de los modelos desarrollados en este artículo (Figura 1). Dichas investigaciones fueron ejecutadas como ensayos de cuatro puntos como se muestra en la Figura 2. En la Tabla 1 se resumen las características de los elementos ensayados, y en la Tabla 2 las propiedades de algunos de los materiales empleados.

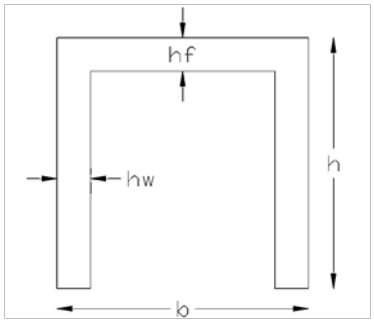


Fig. 1- Esquema de la sección transversal genérica de la losa canal.

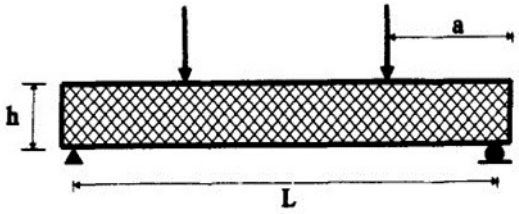


Fig. 2- Representación del ensayo a cuatro puntos.

Tabla 1- Resumen de características de las losas ensayadas.

Programa experimental	Elemento	b (mm)	f'c (MPa)	h (mm)	hf (mm)	hw (mm)	Barras a tracción (U)	Malla de refuerzo	a/h
Ahmad [15]	BII3	100	44.3	200	25	25	4 Ø3/8'' (acero)	Ø0.95mm @6.25mm (acero)	2
Tian [16]	U4	400	63	100	22	18	⌐	Ø1.60mm @12.5mm (acero)	1.5
Quang [1]	P2	400	62.5	150	20	30	2 Ø10 (PRFV)	@17.0mm (PRFC)	3

Tabla 2- Propiedades de materiales usados en la calibración y las simulaciones.

Propiedades	Barras Acero	Malla Alambres	Barras PRFV	Mallas PRFV
Resistencia límite en tracción	450MPa [15]	300 MPa [15] [16]	800 MPa [1]	1720 MPa [1]
Módulo de elasticidad	200 GPa [15]	200 GPa [15] [16]	45 000 MPa [1]	112 000 MPa [1]

2.2. MODELACIÓN COMPUTACIONAL

En la modelación computacional se utilizará el método de los elementos finitos, implementado en el software MIDAS FEA NX, de demostrada precisión para la simulación estructural del hormigón armado [14]. A continuación se muestran las diferentes invariantes del proceso de modelación computacional que se tuvieron en cuenta: geometría, materiales, cargas y condiciones de borde.

2.2.1. MATERIALES

Para la modelación de los materiales se tiene en cuenta las leyes constitutivas que caracterizan su comportamiento, y se asume de forma general la perfecta homogeneidad de estos. Para describir el acero de las barras y mallas de refuerzo se adoptó un modelo bilineal, mientras que el PRFV se considera como un material lineal elástico hasta la rotura [17].

En el caso del mortero se utiliza el modelo de daño plástico, el cual tiene en cuenta su comportamiento no lineal y además resulta favorable para el análisis del cortante al tomar en consideración las deformaciones transversales, por lo que evita la necesidad de inducir una ley de comportamiento tangencial [18]. Este modelo depende de los siguientes parámetros:

- Ángulo de dilatancia Ψ^{o}: Parámetro que tiene en cuenta el fenómeno atribuido a los materiales friccionales, que comprende el cambio de volumen inelástico debido a la desviación plástica. Este parámetro es requerido en el modelo ajustado por Drucker-Prager, empleado en el software MIDAS FEA NX. Se asume un valor de 13^{o} según recomendación de Oller [18].
- Excentricidad ϵ: Define la proximidad del flujo de potencial hiperbólico a su asíntota, y cuyo valor recomendado es 0,1 [19].
- Factor $^{\sigma_{b0}}/_{\sigma_{c0}}$: Es la relación entre las resistencias a compresión y a tracción biaxial. Se recomienda escoger un valor de 1,16 [19].
- Factor K_c: Es la relación entre la magnitud de la tensión desviadora en tracción uniaxial y la de compresión uniaxial, equivale a 0,67 [19].
- Viscosidad υ: Parámetro que representa el tiempo de relajación del sistema visco-plástico, el cual, según estudios, la recomendación de valores está en el rango de $1x10^{-5}$ a $1x10^{-7}$, siendo $1x10^{-6}$ el más adecuado [19].

A su vez, el comportamiento uniaxial del mortero a compresión se definió a través de la Ley de Popovics [16, 20], expresada como:

$$\sigma = f_{cm}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}\right)\left(\frac{n}{n-1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}\right)^{n}}\right) \quad (1)$$

Donde:
- σ: tensión a compresión del mortero
- fcm: resistencia a compresión del mortero
- ε: deformación a compresión del mortero
- $\varepsilon c1$: deformación a compresión correspondiente a la máxima tensión a compresión del mortero
- $n=0{,}058fcm+1{,}0$

El comportamiento en tracción del mortero bajo carga uniaxial fue asumido bilineal descendente como establece el CEB – FIB, model code 2010 [6], tal y como se evidencia en la Figura 3:

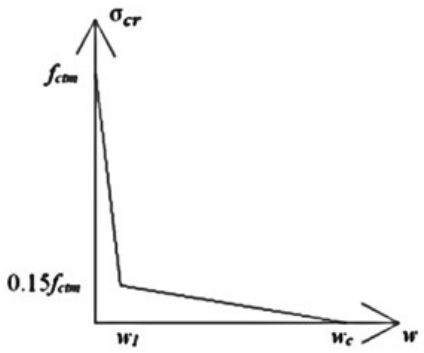


Fig. 3- Comportamiento del mortero a tracción uniaxial postfisurado (CEB – FIB, model code 2010).

Los valores de $w1$ y $w2$ se calculan a partir de las expresiones (2) y (3), respectivamente:

$$w_1 = 2\frac{G_F}{f_{ctm}} - 0,15w_c \quad (2)$$

$$w_c = \alpha_F \frac{G_F}{f_{ctm}} \quad (3)$$

Donde se tiene que:

- $fctm$: resistencia a tracción del mortero.
- $w1$: ancho de fisura correspondiente al 15% de la resistencia a tracción del mortero.
- wc: ancho de fisura correspondiente al 0,01% de la resistencia a tracción del mortero .
- αF: coeficiente basado en el tamaño máximo del árido. Dado a la ausencia de árido grueso en la matriz, el valor mínimo recomendado de 8 es seleccionado para este estudio.
- GF: Energía de fractura. Este parámetro depende de la composición interna del hormigón y está vinculado directamente a su comportamiento postfisurado. Para un mortero con alta densidad de refuerzo, el fenómeno de rigidización por tracción es más acentuado, y por tanto, el valor puede ser hasta 30 veces superior al recomendado para el hormigón convencional [21].

2.2.2. GEOMETRÍA, CONDICIONES DE BORDE Y PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS.

Las barras de refuerzo se modelan con la propiedad unidimensional correspondiente a un elemento perfectamente adherido al mortero (embedded truss), y las mallas con la propiedad de plano de tensiones (plane stress), como una lámina bidimensional de un espesor equivalente al área total de alambres, vinculada al mortero mediante la coincidencia de sus nodos. Entre las consideraciones asumidas para esta modelacion se simula la mitad de la losa canal por su simetría [22]. En representación de un ensayo por control de deformación, se induce un desplazamiento equivalente al último valor registrado en el ensayo como se muestra en la Figura 4. La interacción entre los suplementos y el espécimen fue considerada como contacto de soldadura, el cual garantiza una perfecta adherencia en el plano vertical y horizontal (Figura 5).

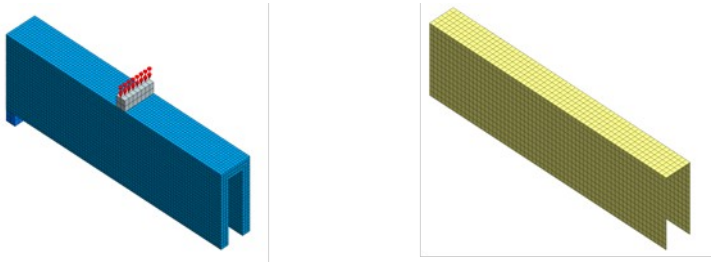


Fig. 4- Modelo del elemento, a) desplazamiento inducido en el espécimen, b) modelo de la malla de refuerzo.

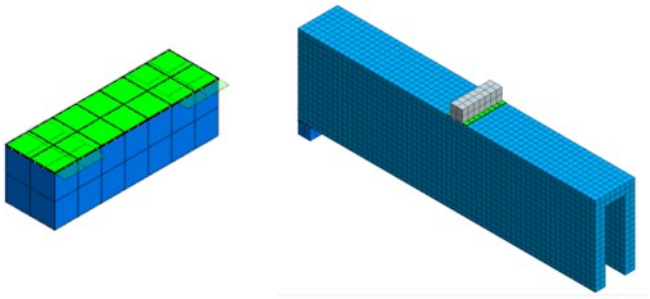


Fig. 5- Propiedad del contacto entre el elemento y los dispositivos de aplicación de carga y de apoyo.

2.2.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para el mortero se designan elementos finitos hexaédricos de ocho nodos, por su eficiencia probada en investigaciones similares, al ser el tipo de elemento que mejor se ajusta a la geometría. Del mismo modo, se define que el elemento rectangular es el indicado para subdividir la geometría de la malla de refuerzo. En la losa canal BII3 [15] utilizada como referencia para la calibración del modelo, se decide analizar las densidades de mallas de 14x14x14mm, 12x12x12mm, 10x10x10mm, y 8x8x8mm para los sólidos. Esta selección está condicionada por el vínculo entre el pequeño espesor de la losa y la relación de aspecto ideal del elemento finito elegido. Se considera para el refuerzo constituido por las mallas de alambres de acero un tamaño de elemento correspondiente a las dimensiones de las densidades anteriores, y para el refuerzo longitudinal un tamaño fijo de elemento finito de 16mm. Las curvas de comportamiento del cortante en función de los desplazamientos, obtenidas en las simulaciones, son presentadas en la Figura 6, y en la Tabla 3 se resumen los valores de cortante resistente de cada una, con su desplazamiento correspondiente.

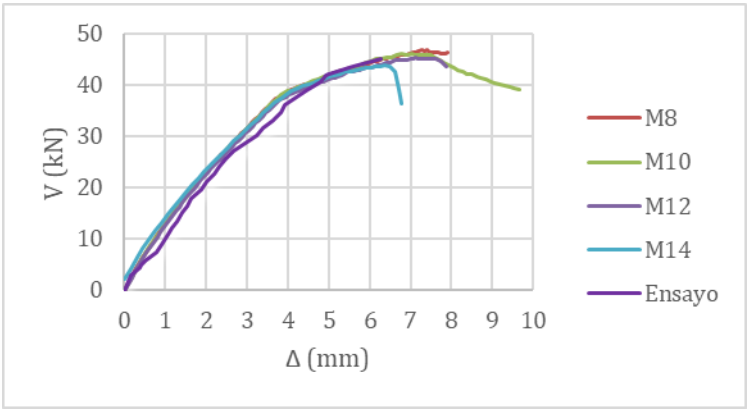


Fig. 6- Comparación de la curva de comportamiento cortante (V) vs deflexión (Δ) del ensayo BII3 [15] con su simulación para distintas densidades de mallado.

Tabla 3- Cortantes resistentes y desplazamientos obtenidos según el tipo de malla.

Densidad de la malla (mm)	Tiempo de procesamiento	Cantidad de elementos	Cortante resistente (kN)		Error absoluto (kN)	Desplazamiento (mm)		Error absoluto (mm)
			MIDAS	Ensayo		MIDAS	Ensayo	
14x14x14	1696sec	5576	43,79	45,17	1,38	6,5	6,29	0,21
12x12x12	2460sec	6956	45,26		0,09	7,13		0,84
10x10x10	4534sec	17921	46,2		1,03	4,01		0,72
8x8x8	5259sec	24536	46,81		1,64	7,27		0,98

Los resultados demuestran que con la disminución de las densidades de malla se evidencia una tendencia hacia la estabilidad de la curva de comportamiento, con lo que se identifica la convergencia y estabilidad del modelo. La malla 12x12x12mm se consideró optima en comparación de resultados a los de las mallas restantes. Dicha malla obtuvo un tiempo de procesamiento de 2460 segundos, por lo que su costo computacional fue reducido y preciso. Con la obtención de los valores de cortante y desplazamientos para dicha malla, se alcanzaron errores absolutos de 0,09kN y 0,84mm, respectivamente, correspondientes a errores relativos de 0,2% y 13,35%, lo cual constituye el factor principal para considerar el uso de esta malla como óptimo.

2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

En la Figura 7 se muestra la comparación entre las curvas de comportamiento resultantes de los ensayos físicos de los elementos U4 [16] y P2-2 [1] y de las simulaciones correspondientes, a partir del modelo matemático calibrado anteriormente.

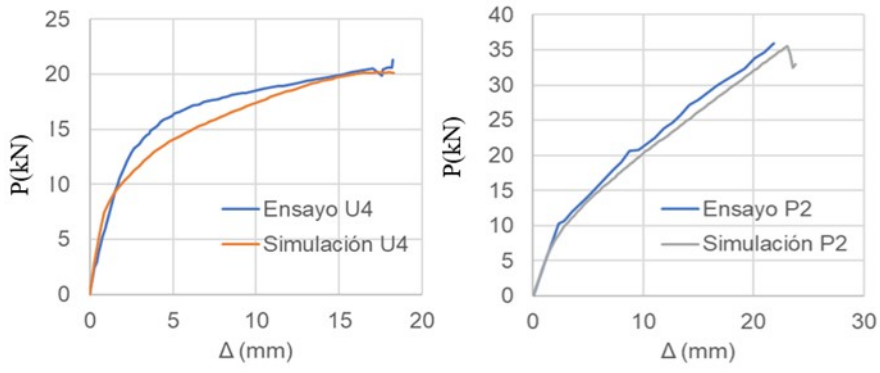


Fig. 7- Comparaciones entre las curvas de comportamiento carga (P) vs deflexión (Δ) de los ensayos U4 [16] y P2-2 [1] y sus respectivas simulaciones.

De los gráficos se observa una buena correspondencia entre los resultados de los ensayos experimentales y la simulación computacional para ambos elementos. En la Tabla 4 se resumen los valores de desplazamiento y de carga correspondiente al instante de fallo. Se obtiene una diferencia entre la predicción analítica y experimental de la resistencia a cortante, inferior al 5% en todos los casos analizados, por lo que se considera el modelo validado. En la Figura 8 se muestran los patrones de grietas obtenidos en el ensayo de Quang [1] y la simulación realizada, donde se destaca una correspondencia en los patrones de grietas.

Tabla 4- Valores de carga resistente de ensayos y simulaciones.

Ensayo	Pn_{ensayo} (kN)	Pn_{MEF} (kN)	$Vn(MEF)/Vn(Ensayo)$
Ahmad [15]	90,2	90,4	1,002
Tian [16]	21,5	20,9	0,972
Quang [1]	35,2	35,0	0,994

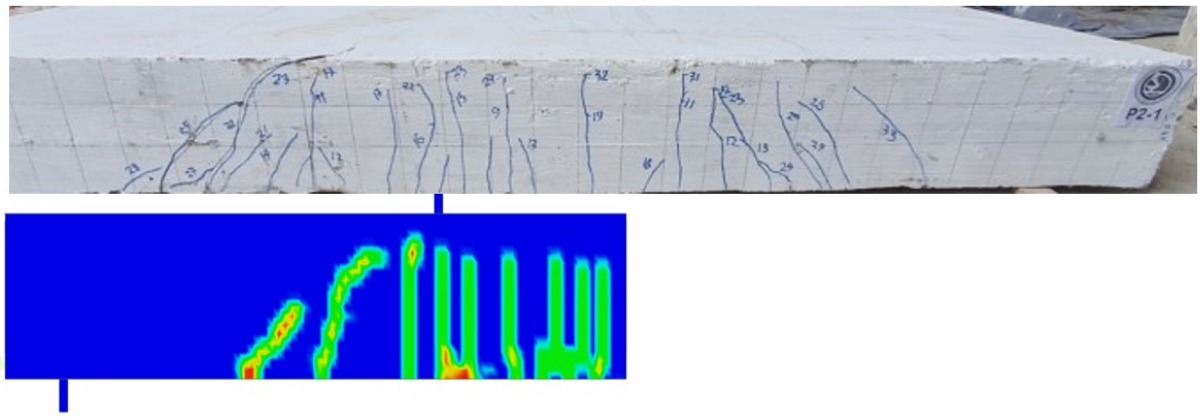


Fig.8-: Patrones de grietas del fallo a flexo-cortante producido en el ensayo [1] y la simulación realizada.

3. RESULTADOS

3.1. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN Y VARIABLES FIJAS DEL EXPERIMENTO. CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO DE ESTUDIO

Se plantea en esta investigación, un diseño de experimento unifactorial, para el estudio de la influencia de la relación entre la distancia de aplicación de la carga al apoyo y el peralto (parámetro a/h) en la resistencia a cortante de los elementos canales con refuerzo híbrido formado por mallas de alambres de acero y barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio PRFV. Se definen cuatro niveles, donde a/h toma valores de

$$\frac{a}{h} = 2, \frac{a}{h} = 2.5, \frac{a}{h} = 3, \text{ y } \frac{a}{h} = 3.5$$

con el objetivo de considerar la mayor cantidad de variantes en el rango correspondiente a una viga esbelta. Se considera una longitud de dos metros en el elemento para evitar la influencia del efecto arco [23].

El refuerzo de PRFV longitudinal usado presenta un diámetro $db=6mm$ vinculadas a mallas de alambre Cal.19 con diámetro 1mm y abertura cuadrada de 25x25mm empleada anteriormente como refuerzo de elementos similares al caso de estudio. La disposición del refuerzo y las dimensiones de la sección transversal del elemento objeto de estudio se muestran en la Figura 9. Se decide fijar una resistencia a compresión del mortero $f'c=30MPa$ recomendado en diseños prácticos con ferrocemento [21]. Los materiales usados para simulación son descritos en la Tabla 5.

Tabla 5: *Propiedades de los materiales del refuerzo usados en la simulación.*

Propiedades	Malla Alambres	Barras PRFV
Resistencia límite en tracción (MPa)	300	800
Módulo de elasticidad (MPa)	200 000	50 000

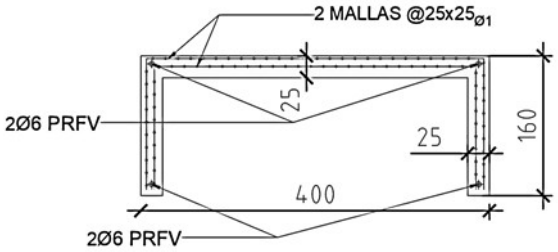


Fig. 9- Dimensiones y disposición del refuerzo del elemento canal.

3.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se realizaron cuatro simulaciones, correspondientes a cada valor de a/h considerado en la investigación. En la Figura 10 se muestran las curvas de cortante contra desplazamiento obtenidos en las simulaciones realizadas en el software MIDAS FEA NX.

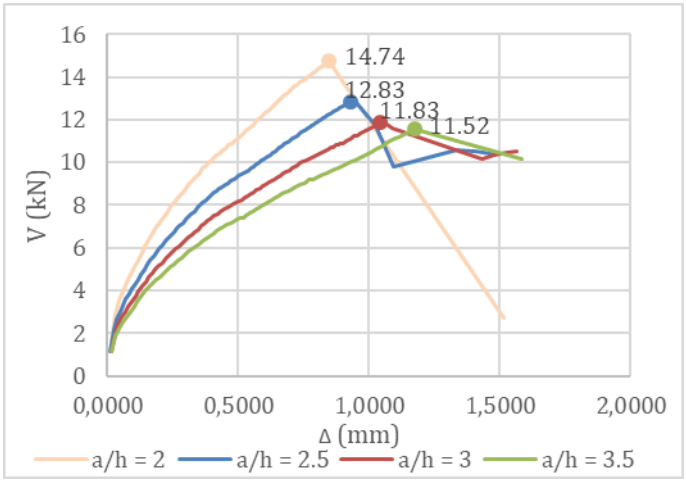


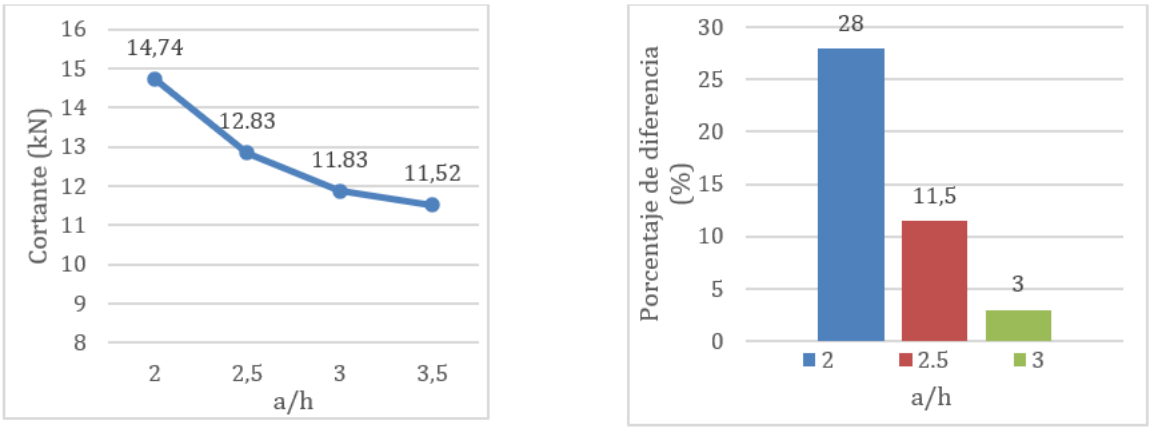
Fig. 10- Curva de comportamiento de cortante (V) vs deflexión (Δ) para los distintos valores de a/h.

Al analizar la curva de comportamiento del elemento en los distintos niveles de a/h, se detecta la caída súbita de la carga en el punto máximo de resistencia. En la Tabla 6 se registran los valores de tensiones axiales en las barras de PRFV para cada nivel de experimento.

Tabla 6- Tensión de las barras de PRFV en el instante de fallo

a/h	Tensión (MPa)
2	455
2,5	507
3	579
3,5	677

Teniendo en cuenta que los valores de tensiones máximos alcanzados para las barras de PRFV no exceden su resistencia limite a tracción de 800MPa, y que el tipo de fallo es frágil, se puede afirmar que se obtuvo un fallo por cortante en los elementos simulados. Se observa el descenso de valores de resistencia a cortante a razón del aumento de la distancia del apoyo al punto de carga, donde se obtuvo una reducción del 22% en el rango analizado. En la figura 11 se relacionan los valores de resistencia en función de los niveles de a/h.



a) b)

Fig. 11- a) Resistencia al cortante en función de la relación a/h b) Comparación porcentual de la resistencia con respecto a la correspondiente al nivel a/h=3,5.

Por otro lado, se observa una tendencia a converger a un valor de resistencia en la medida que aumenta la relación a/h, donde se destaca que la diferencia en el rango de $3 \leq a/h \leq 3{,}5$ no es superior al 3%, y por tanto se considera despreciable. En la Figura 12 se muestra la simulación de los patrones de daño de los elementos analizados. En estos se evidencia la formación de grietas inclinadas desde el extremo inferior hasta el punto de aplicación de carga, y adicionalmente se forman otras grietas y fisuras en zonas intermedias donde coexisten valores máximos de momento flector y cortante, lo cual resulta típico de un fallo por flexo-cortante. Con el incremento de a/h aumenta el número de grietas en la zona de máximo momento flector de la losa canal, causado por el aumento de la tensión de las barras de PRFV.

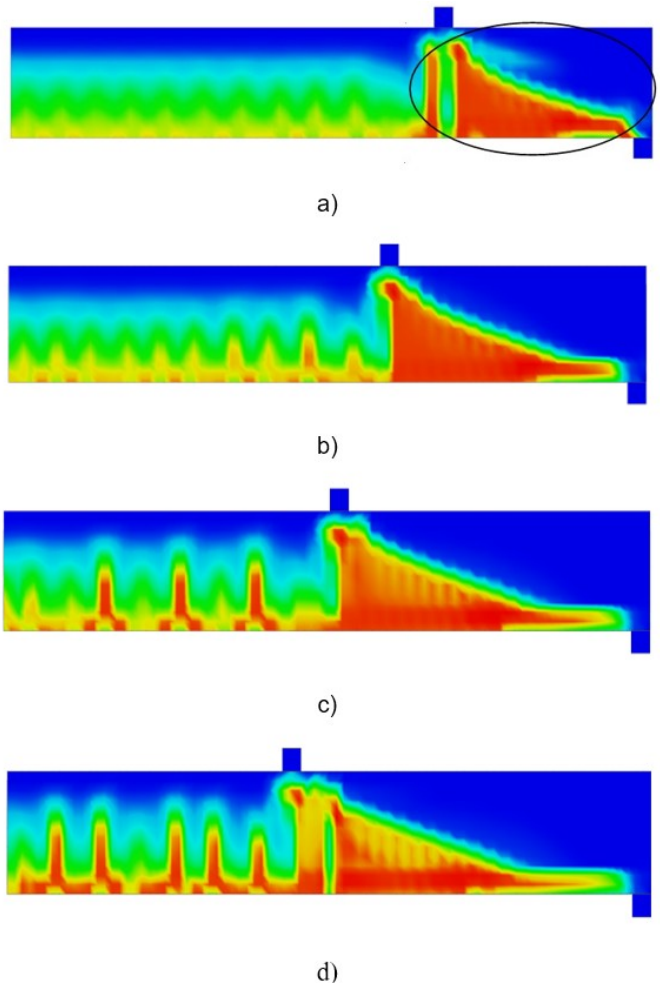


Fig. 12- Mapas de daño a flexo-cortante para las losas canal de a) $\frac{a}{h} = 2$, b) $\frac{a}{h} = 2.5$, c) $\frac{a}{h} = 3$, y d) $\frac{a}{h} = 3.5$ respectivamente.

3.3. COMPARACIÓN DE VALOR CRÍTICO DE RESISTENCIA A CORTANTE ENTRE LA SIMULACIÓN Y LA NORMATIVA ACI

Se muestra, a continuación, la comparación entre los valores de cortante resistente obtenidos por simulación y el método recomendado por el ACI [6, 12]. Se selecciona como referencia la relación a/h=2,5 por ser este el valor asumido en los experimentos para generar las expresiones normadas [6]. A través de la expresión (4) se obtiene el aporte del mortero en la resistencia al cortante.

$$V_{c1} = 0,42\lambda_s k_{cr}\sqrt{f'c}\,b_w d \tag{4}$$

Donde:

- Coeficiente de fisuración k_{cr}: es la relación entre la profundidad de la línea neutra de la sección agrietada y la profundidad efectiva. Se obtiene según la expresión (5)

$$k_{cr} = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \tag{5}$$

- Resistencia a compresión del mortero $f'c$: en este experimento 30MPa.
- b_w: Sumatoria del ancho de los nervios
- Peralto efectivo d
- ρ_f es la cuantía de PRF, determinada por $\frac{A_f}{bd}$.
- La relación entre los módulos de elasticidad del mortero y el PRF, n_f.

Se comprueba que la losa canal trabaja como una viga rectangular al cumplir la condición de que el valor del bloque de compresiones, coincidente en el servicio con la línea neutra (x), es menor que el espesor del alma (h_f) [6].

$$x = k_{cr}d = 13,05mm \leq h_f = 25mm \tag{6}$$

La resistencia a cortante que aporta la malla de alambres se obtiene de la expresión (7):

$$V_s = Á_{st}\frac{d}{s}Fy$$

- Para una viga rectangular, $Á_{st}$ es el área de refuerzo transversal.
- Peralto efectivo d: hallado por la ecuación ya conocida $d = h - \frac{ø}{2} - r_n$.
- Espaciamiento de la malla de alambres, s.
- Fy es la resistencia a fluencia del acero o límite elástico, en este caso 300MPa.

El aporte del mortero a la resistencia al cortante (V_c) es de 1,5kN, mientras que el aporte del refuerzo transversal (V_s), es 5,8kN, resultando en una resistencia estimada de 7,3kN, el cual resulta menor al obtenido en la modelación para el espécimen más crítico, $V_{FNX} = 12.8kN$, equivalente a una diferencia del 43% (Figura 13).

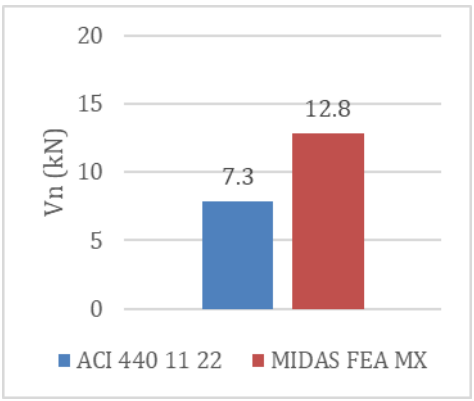


Fig. 13- Resistencia ACI y los resultados obtenidos en MIDAS FEA MX

Lo anterior evidencia el carácter conservador de la norma estadounidense basado en la ausencia de varias consideraciones como la inclinación de la grieta a cortante, a diferencia del modelo simulado en el software MIDAS FEA NX. Se destaca que, además de la simplificación realizada al aporte del ángulo de cizallamiento, las expresiones formuladas por el ACI presentan una naturaleza de diseño que resulta en valores característicos inferiores en un 95%. No obstante, por el grado de seguridad que ofrecen dichas expresiones, se considera que el método del ACI [6, 12] es aplicable en el diseño y revisión de la resistencia al cortante en elementos de sección tipo canal de mortero armado, con el refuerzo híbrido estudiado.

4 .CONCLUSIONES

Con el desarrollo de la presente investigación, se evidenció la influencia de la relación entre la distancia de la carga al apoyo y el peralto (a/h), en la resistencia a cortante de los elementos de mortero armado de sección tipo canal, con refuerzo híbrido formado por mallas de alambres de acero y barras de PRFV. Los resultados obtenidos muestran una disminución de 22% en los valores de cortante resistente con el aumento del valor de la relación entre la distancia de la carga al apoyo y el peralto (a/h) en un rango de valores correspondiente al de una viga esbelta ($2 \leq a/h \leq 3{,}5$). La razón de decrecimiento de la resistencia se redujo con el incremento de la distancia de la carga al apoyo, y se concluye que para un valor de $a/h > 3$ no es significativa la variación del factor de estudio. Los mapas de daño resultantes de la simulación permiten confirmar la ocurrencia del fallo por flexo-cortante en los elementos analizados. Se realizó una comparación directa entre el valor de resistencia resultante del modelo computacional MIDAS FEA NX y las expresiones brindadas por el ACI, y se obtuvo una diferencia del 43%, donde queda mostrado su alcance para diseños y chequeos del tipo de elemento analizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. D. Q. Ngo and H. C. Nguyen, "Experimental and numerical investigations of textile-reinforced concrete thin-wall panel bolted connections," Case Studies in Construction Materials, vol. 19, p. 16, 2023.2214-5095 http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

2. M. A. Mansur, K. L. Tan, and A. E. Naaman, "Strength of bolted moment connections in ferrocement construction," Cement & Concrete Composites, no. 32, p. 12, 2010.0958-9465 10.1016/j.cemconcomp.2010.04.001

3. A. Nanni, A. D. Luca, and H. J. Zadeh, L. Taylor & Francis Group, Ed. Reinforced concrete with FRP Bars. 2014. 978-0-203-87429-5 https://doi.org/10.1201/b16669

4. S. Dong, C. Li, and G. Xian, "Environmental Impacts of Glass- and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bar-Reinforced Seawater and Sea Sand Concrete Beams Used in Marine Environments: An LCA Case Study.," Polymers, vol. 13, no. 154, 2021.1301-0154 https://doi.org/10.3390/polym13010154

5. O. A. Mohamed, W. A. Hawat, and M. Keshawarz, "Durability and Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Bars: Towards Sustainable Infrastructure," Polymers 2021.1309 1402 https://doi.org/10.3390/polym13091402

6. ACI-440-22, Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass FiberReinforced Polymer (GFRP) Bars-Code and Commentary, 38800 Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331, 2022. https://doi.org/10.14359/51740691

7. Q. N. Abdullah, A. I. Abdulla, and M. Al-Mashaykhi, "Shear behaviour of hollow ferrocement beam reinforced by steel and fiberglass mesh," Journal of Engineering Sciences vol. 29, no. 4, 2022.2312-7589 http://doi.org/10.25130/tjes.29.4.4

8. E. G. Sherwood, E. C. Bentz, and M. P. Collins, "Effect of aggregate size on beam-shear strength of thick slabs," ACI Structural Journal, vol. 104, no. 2, 2007.1944-7361 https://doi.org/10.14359/18530

9. T. A. El-Sayed, A. M. Erfan, R. M. Abdelnaby, and M. K. Soliman, "Flexural behavior of HSC beams reinforced by hybrid GFRP bars with steel wires," Case Studies in Construction Materials, vol. 16, 2022.2214-5095 https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01054

10. W. Chen, H. Ma, K. Zhang, Z. Zou, Y. Zeng, and Z. Zhu, "Experimental Study and Numerical Analysis of Flexural Strength of BFRP Bar Concrete Beams Reinforced with Bamboo Fiber and Steel Wire Mesh," Applied Sciences, vol. 12, 2022.https://doi.org/10.3390/app12168001

11. A. E.-K. Shoeib, A. N. M. Arafa, R. A. E.-H. A. E. Rady, and W. M. F. Tawhed, "Experimental and analytical study on the behavior of hybrid GFRP/steel bars in reinforced concrete deep beams," Curved and Layer. Struct. , vol. 9, 2022.2353-7396 https://doi.org/10.1515/cls-2022-0012

12. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete 38800 Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331, 2019. https://doi.org/10.14359/51716937

13. CSA S806-12. Design and construction of building structures with fiber reinforced polymers. Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association., 2012. https://www.csagroup.org/store/product/2421834

14. G. M. Licea, I. D. Pérez, and H. W. Rivas, "Study of cracking in reinforced mortar channel slabs for use in residential floors.," Revista Cubana de Ingeniería, vol. XV, no. 2, 2024.2223-1781 https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/877/563

15. S. F. Ahmad, S. H. Lodi, and J. Qureshi, "Shear behavior of ferrocement thin webbed sections," Cement and Concrete Research, vol. 25, no. 5, pp. 969-979, 1995.0008-8846/9 https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00092-Q

16. S. Tian, "Shear behaviour of ferrocement deep beams," Phd, School of mechanical, aerospace and civil engineering, The University of Manchester, 2013. https://research.manchester.ac.uk/en/studentTheses/shear-behaviour-of-ferrocement-deep-beams/

17. CEB-FIP, Model code 2010—Volume 1, bulletin 6. International federation for structural concrete (fib), Lausanne (2012) ISBN 978-2-88394-105-2, 2010. https://www.fib-international.org/component/virtuemart/fib-bulletins/by,product_price/results,201-250.html?manage=0&Itemid=352

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

18. S. Oller, C. I. d. M. N. e. Ingeniería, Ed. Fractura mecánica. Un enfoque global, 1 ed. 2001. 84-89925-76-3 https://books.cimne.com/product/fractura-mecanica-un-enfoque-global/

19. A. Mathern and J. Yang, "A Practical Finite Element Modeling Strategy to Capture Cracking and Crushing Behavior of Reinforced Concrete Structures," Materials vol. 15, 2021.1403 0506 https://doi.org/10.3390/ma14030506

20. S. Popovics, "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete," Cement and Concrete Research, vol. 3, no. 5, pp. 583-599, 1973.0008-8846 https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3

21. A. Naaman, Ferrocement and laminated cementitious composites. Michigan (USA): Techno Press, 2000. 978-0-9674939-0-9 https://openlibrary.org/books/OL61551M/Ferrocement_and_laminated_cementitious_composites

22. H. Ahmad, A. Elnemr, N. Ali, Q. Hussain, K. Chaiyasarn, and P. Joyklad, "Finite Element Analysis of Glass Fiber-Reinforced Polymer-(GFRP) Reinforced Continuous Concrete Beams," Polymers vol. 13, no. 4468, 2021.1324 4468 https://doi.org/10.3390/polym13244468

23. S. T. Mau and T. T. C. Hsu, "Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement," ACI Structural Journal, vol. 84, p. 11, 1987.1944-7361 https://doi.org/10.14359/2739