

Evaluación comparativa de vigas reforzadas mediante armaduras electrosoldadas y varillas de PRFV

Comparative evaluation of concrete beams reinforced with welded
wire truss and GFRP bars

—

Juan Alberto Sánchez Hernández¹
juan-sanchez@proyesting.com proyest.ingenieria@gmail.com

Jorge Alfredo Aguilar Carboney²
jaguilar@unach.mx

1 COMISIÓN DE ESTRUCTURAS DEL COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE
CHIAPAS, MÉXICO

2 FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, MÉXICO



Para citar este artículo:

Sánchez Hernández, J. A. ., Arroyo Matus, R. ., & Aguilar Carboney, J. A. (2022). Evaluación comparativa de vigas reforzadas mediante armaduras electrosoldadas y varillas de PRFV. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 11(30). <https://doi.org/10.31644/IMASD.30.2022.a06>

RESUMEN

El presente estudio plantea el comparativo del comportamiento de vigas de concreto armadas mediante armaduras metálicas electrosoldadas de alta resistencia y el uso alternativo de armaduras elaboradas mediante varillas de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV). La finalidad del estudio es determinar el grado de seguridad que pudiera aportar el uso del PRFV comparado con el que aportaban las armaduras metálicas de alta resistencia cuya cuantía de refuerzo era aceptable en los términos de la Norma Técnica Complementaria de Mampostería (NTC M, 2004) del código mexicano.

Los resultados obtenidos en la comparación fueron favorables en cuanto a resistencia para el uso de armaduras de PRFV como alternativa de aplicación en viviendas, en sustitución de las metálicas. Los valores de las pruebas utilizadas para el estudio provinieron principalmente de los datos analizados por Sánchez Hernández (2019) de pruebas realizadas en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

Palabras clave:

Polímeros reforzados; fibras de vidrio; concreto reforzado; armaduras metálicas.

— Abstract—

This study analyzes and compare the behavior of concrete beams reinforced by welded wire truss and the alternative use of reinforcements made with glass fiber reinforced polymers (GFRP). The purpose of the research is to determine the level of safety using GFRP compared to that provided by high-resistance steel reinforcement whit the reinforcement ratio acceptable in terms of the Complementary Technical Standard for Masonry (NTC M, 2004) of the Mexican code.

The results shows that it is feasible in terms of resistance the use of GFRP, as an alternative for application in housing construction, replacing welded wire truss. The experimental data used in the study come from tests carried out at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) (Sánchez Hernández, 2019). (Sánchez Hernández, 2019).

Keywords:

Reinforced polymers; glass fibers; reinforced concrete; welded wire truss.

En América del Norte, el uso de las varillas de compuestos poliméricos como lo es el PRFV (GFRP en Inglés), ha tomado gran demanda como sustituto del tradicional refuerzo con acero del concreto estructural, al grado que su uso se esparce a estructuras de mayores dimensiones, como parece indicarlo la actualización de la Guía de Especificaciones de Diseño de Losas de Puentes y Parapetos de Concreto Reforzado con PRFV (AASHTO (GFRP), 2017), la cual se suma a la Guía de Diseño y Construcción Estructuras de Concreto Reforzados con varillas de FRP (Fiber-Reinforced Polymer) (ACI 440 1R , 2015), ya existente. Lo anterior debido al bajo costo de mantenimiento que se obtiene por su durabilidad y ausencia de corrosión ante los agentes que comúnmente dañan al acero, como lo reportan diversas investigaciones realizadas por: GangaRao, Taly y Vijay (2007); (R., Cousin, & Benmokrane, 2009); Nanni, Luca, y Jawahery (2014); (Gooranorimi, Gremel, Myers, & Antonio, 2015) y otros autores citados por Sánchez Hernández J. A. (2019).

México, con su amplio litoral expuesto a agentes corrosivos para el refuerzo tradicional con acero, especialmente en la zona del Golfo, debido a su baja sismicidad, pudiera representar un área de oportunidad para aprovechar el potencial de este tipo de refuerzos.

Las armaduras electrosoldadas fabricadas a base de acero trefilado tomaron gran auge en la autoconstrucción debido a su bajo costo y que, aunado a su alta resistencia, requiere bajos índices de refuerzo, los cuales eran permitidos por la norma 2004 (NTC M, 2004). En la actualidad, pese a la gran cantidad de detractores de su uso, el principal problema al utilizar estas armaduras en viviendas está en el rápido deterioro por corrosión.

Por esta razón, el refuerzo a base de varillas de PRFV resulta en una alternativa útil que pudiera superar en beneficios de resistencia y durabilidad a la actual tecnología, basada en acero, usada para estos desarrollos habitacionales.

En el presenta análisis se pudo observar que existe un desempeño aceptable de este material, especialmente con cuantías de refuerzo próximas a las mínimas solicitadas por la actual normativa (NTC M, 2017).

2. ESPECÍMENES Y DATOS

Los especímenes utilizados en el comparativo fueron vigas rectangulares de 15x20 cm de sección, cuyas dimensiones son acordes con las establecidas en la Normas Técnicas de Mampostería (NTC M, 2017) para las dalas de confinamiento de los muros y que suelen prolongarse entre los claros de ventanas y puertas.

El concreto usado posee una resistencia última a la compresión $f'_c > 150$ kg/cm², que cumple con la citada normativa de mamposterías en México y cuyas variaciones entre los especímenes se detallan en la Tabla 1.

El valor del esfuerzo último a tensión de la varilla de PRFV se fijó con $ff_u = 8000 \text{ kg/cm}^2$ similar esfuerzo límite último de tensión establecido por el fabricante; $ff_v = 1500 \text{ kg/cm}^2$ como el esfuerzo límite de corte establecido por el fabricante; y $E_f = 500000 \text{ kg/cm}^2$ como el módulo elástico establecido por el fabricante, para la evaluación de los elementos nominales resistentes. En tanto que el acero se tomó de referencia los valores de $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$, $E_y = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ y $f_{yv} = 1600 \text{ kg/cm}^2$ de acuerdo con las especificaciones del proveedor.

Los ensayos se realizaron en un marco de reacción con un gato hidráulico de 100t para transmitir la carga en cada elemento ensayado, la carga fue separada en dos cargas puntuales a través de una viga de distribución de carga lo suficientemente rígida para no deformarse. La viga fue colocada en un sistema de apoyos isostáticos, distantes 2.0m.

Los especímenes ensayados se describen a continuación, en la Tabla 1, definiendo los armados en lecho superior (LS) y lecho inferior (LI) de la siguiente forma: 2D4 que debe leerse como dos barras de 4mm de diámetro debido a que el material usado, de origen europeo, es milimétrico. En tanto que los estribos uniformes de 4mm solo se enunció su distribución espacial expresada en cm de separación (E@15). Los armados que fueron constituidos con ganchos en los extremos se designaron mediante una letra "G".

Estos armados se fijaron basados en una estrategia de competencia, con las tradicionales armaduras electrosoldadas, buscando la optimización costo-capacidad.

Tabla 1
Descripción de Especímenes

VIGA	ARMADO	f'c kg/cm ²	Af / As Total cm ²	Af cm ²	CUANTÍA		
					P _{FB}	P _{MÍN}	P _{REAL}
1 (V)	LS 2D4	250.00	0.50	0.25	0.0054	0.0037	0.0009
	LI 2D4 E@15						
2 (V1)	LS 2D4	218.50	0.50	0.25	0.0054	0.0037	0.0009
	LI 2D4 E@15						
3 (V2)	LS 2D4	279.80	0.50	0.25	0.0060	0.0037	0.0009
	LI 2D4+G E@15						
4 (V3)	LS 2D4	279.80	1.63	0.53	0.0060	0.0031	0.0020
	LI 2D4+1D6+G E@15						
5 (V4)	LS 2D6	218.50	2.07	1.51	0.0047	0.0031	0.0057
	LI 3D8+G E@10						
6 (ACERO)	LS 2D6	321.00	1.27	0.63	0.0245	0.0023	0.0023
	LI 2D6 E@15						

Fuente: Elaboración propia

Las áreas de refuerzo para el acero (A_s) y para las fibras (A_f) se obtuvieron geoméricamente considerando el área un círculo de similar diámetro al de la varilla. En tanto que la cuantía de refuerzo real se calculó como $\rho = A/(b d)$, siendo “A” el área del refuerzo en el lecho inferior calculado de la forma indicada y “b” la base de la sección transversal y “d” el peralte efectivo con un recubrimiento libre de 2.0 cm.

De acuerdo con las NTC M (2017), considerando el f_y de las armaduras electrosoldadas ($f_y=5000 \text{ kg/cm}^2$) y la resistencia mínima aceptable para el concreto ($f'c=150 \text{ kg/cm}^2$ en dalas) el refuerzo longitudinal total mínimo corresponde a:

$$A_s \text{ mín} = 0.2 (f'c/f_y) b h$$

Por lo que, para el caso del refuerzo de armaduras de acero, ese mínimo será de:

$$A_s \text{ mín} = 0.2 (150/5000) (15)(20) = 1.80 \text{ cm}^2 \dots (Q1)$$

En tanto que, para el PRFV, y aplicando similar criterio, el refuerzo mínimo es:

$$f_{fd} = CE f_{f*u} \quad (\text{ACI 440 1R, 2015}) \quad (6.2 a)$$

Donde: $f_{f*u} = 8,000 \text{ kg/cm}^2$ y $f_{fd} = CE f_{f*u} = 6,000 \text{ kg/cm}^2$

$$A_f \text{ mín} = 0.2 (150/6000) (15)(20) = 1.50 \text{ cm}^2 \dots (Q2)$$

CE corresponde al Coeficiente Ambiental, establecido por el ACI 440.1R para diferentes grados de exposición, el cual se fijó en un valor de 0.75.

Basado en estos cálculos las vigas reforzadas con PRFV, listadas en la Tabla 1, del 1 al 3 poseen armados (A_f) inferiores al mínimo calculado en Q2, en tanto que las vigas 4 y 5 serían aceptables para confinar de acuerdo con las NTC M (2017). No obstante, el presente trabajo se centra en comparar el comportamiento a flexión y corte a través de sus elementos mecánicos resistentes, entre las dalas (vigas de confinamiento) armadas con los materiales antes descritos. Por lo que todos estos elementos se compararán con la viga 6 reforzada con elementos metálicos y con área de armado (A_s) descrito en la misma tabla menores al mínimo normativo (Q2).

Las cuantías real, balanceada y mínima reflejadas en la Tabla 1, para el caso del refuerzo de acero, se calcularon mediante las siguientes expresiones representadas en las NTC CR (2017) (5.1.5).

$$\begin{aligned} \rho &= A_s / (b d) \\ \rho \text{ mín} &= 0.7 (f'c)^{1/2} / f_y \\ \rho_b &= (f'c/f_y) [(6000 \beta_1) / (f_y + 6000)] \end{aligned}$$

Donde “As”, es el refuerzo a flexión; “d”, es el peralte efectivo y $b=15$ cm, la base de la sección transversal; siendo $\beta_1=0.85$ y $f'_c=0.85f'_c$.

En tanto que la evaluación de las cuantías para el PRFV se realizó conforme al código de diseño del ACI (ACI 440 1R , 2015) utilizando unidades de kg y cm.

$$\rho = A_f / (b d)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 (f'_c / f_{fd}) [0.003 \cdot E_f / (0.003 \cdot E_f + f_{fd})]$$

$$\rho_{mín} = 1.31 (f'_c^{1/2}) / f_{fd} \geq 23.43 / f_{fu}$$

El historial de carga y las deflexiones fueron obtenidas mediante sensores electrónicos y digitales, de los reportes generados a partir de los ensayos realizados, excepto en la viga 1, cuya medición se realizó con micrómetro con el equipo y procedimiento de aplicación de la carga descritas por Sánchez Hernández (2019).

3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS MECÁNICOS

La determinación de los momentos nominales resistentes se realizó para el refuerzo con acero, de acuerdo con lo que establecen las NTC Ciudad de México (2017) para vigas de concreto reforzados con varillas de acero en su apartado (5.1.3) relativo a Resistencia a la flexión, así como el apartado (5.3.3) correspondiente a Resistencia a fuerza cortante. En tanto que los relativos a las vigas reforzadas con PRFV se utilizó lo enunciado en el ACI 440 1R (2015), capítulo 7.2 sobre Flexural strength (Resistencia a la flexión) y capítulo 8 referente a Shear (Corte). Las dudas de interpretación sobre el diseño con PRFV se resolvieron apoyados en el trabajo de Wainshtok Rivas, Hernández Caneiro y Díaz Pérez (2015).

4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Momento flector

La Figura 1 muestra la gráfica comparativa de momentos entre los ensayos correspondientes a las vigas armadas con PRFV (vigas 1 al 3) y la viga de armadura metálica (viga 6), todas ellas con cuantía (ρ) de refuerzo menor a la que normativa mexicana (NTC 2017 M) permite como refuerzo de estos elementos (ver Tabla 1).

En la gráfica 1, el progreso de la carga se pudo observar que tanto las vigas de PRFV, como las de refuerzo metálico presentaron deslizamiento por adherencia y redistribución de carga, hasta la falla. La viga 3, dentro de las que fueron armadas a base de PRFV, presentó un mejor comportamiento al

desarrollar con mayor uniformidad y menores deflexiones su resistencia, esto posiblemente atribuible a la existencia de ganchos en los extremos de su armado en el lecho inferior, lo cual evidencia la importancia de su uso. Así mismo en esta gráfica se representó con líneas horizontales, el momento resistente calculado mediante las expresiones de cada normativa, según se cita en el título 3 de este trabajo.

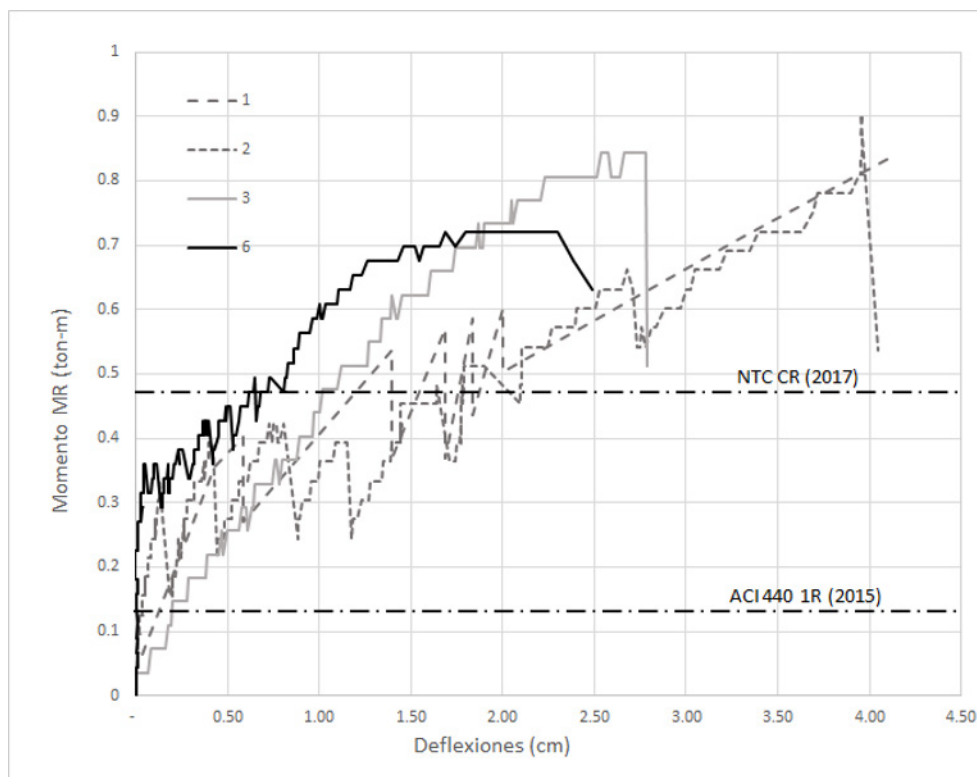


Figura 1. Gráfica comparativa de momentos entre vigas 1 a 3 de PRFV y viga 6 de acero.
Fuente: Elaboración propia

La gráfica 2, presenta vigas de PRFV cuyos armados son más apegados a los calculados como mínimo (Q1 y Q2) de acuerdo con las NTC M (2017) para el confinamiento de muros de mampostería. Estas vigas (4 y 5) mostraron un mejor rendimiento en cuanto al desarrollo de la resistencia a la flexión, siendo aun mayor a la resistencia alcanzada por la viga reforzada con acero trefilado. De forma específica, la viga 4, resulta muy próxima en cuantía real (de la Tabla 1, $\rho=0.0020$) que la usada en el refuerzo a flexión de la viga 6 ($\rho=0.0023$), sin embargo, su resistencia con PRFV a momento alcanza casi el doble del momento logrado por el refuerzo de acero. Aun con esto, ambos refuerzos alcanzaron valores a la falla superiores a los evaluados de acuerdo con sus normas aplicables.

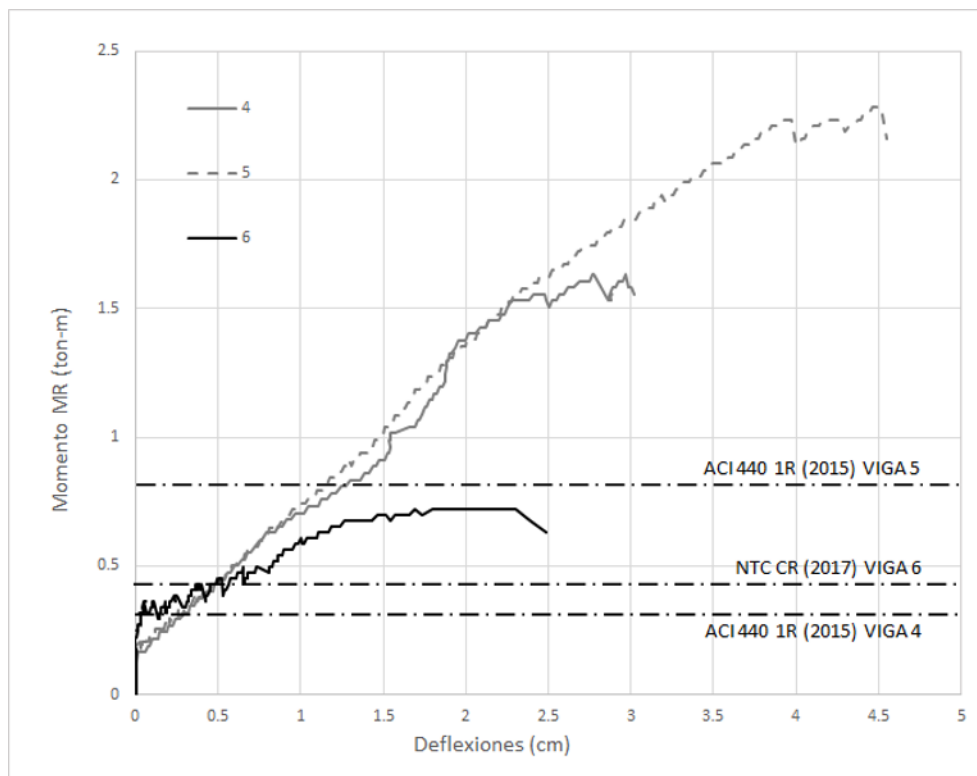


Figura 2. Gráfica comparativa de Momentos entre vigas 4 y 5 de PRFV y viga 6 de acero.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2, se puede observar que el momento nominal resistente (MR), calculado conforme al ACI 440 1R (2015), para las vigas armadas con PRFV, resulta en general con valores más conservadores que los referidos por las NTC CR (2017).

No obstante, para poder realizar un comparativo adecuado entre los valores que alcanza el diseño contra los valores experimentales, se recurrió a usar un factor de seguridad definido como $FS = M_{\text{máx}} / MR$, en el que se puede apreciar el amplio margen de seguridad en el diseño a flexión para estos elementos subreforzados con PRFV. Similar conclusión sobre la seguridad en el diseño con PRFV realiza Joaquín L. y Díaz Pérez (2017) en el trabajo recepcional denominado “Estructuras de hormigón armado con barras de Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV). Estado del arte.”, en el que menciona que “Las fórmulas propuestas por el ACI 440 ...fueron considerados demasiado conservadoras debido a que se basan en el dominio de compresión controlada (fallo por aplastamiento de hormigón)”.

Tabla 2
Factor de seguridad del diseño por momento flector

VIGA	FLEXION		
	MR _{CALC} Kg-m	MR _{REAL} Kg-m	FS
1 (V)	146.39	836.00	5.71
2 (V1)	146.39	806.67	5.51
3 (V2)	146.39	863.33	5.90
4 (V3)	302.44	1,596.67	5.28
5 (V4)	833.91	2,246.67	2.69
6 (ACERO)	487.79	836.00	1.71

Fuente: Elaboración propia

Fuerza cortante

En la evaluación comparativa de la fuerza cortante también se observa el mismo comportamiento en cuanto a los factores de seguridad ($FS = V_{\text{máx}} / VR$) obtenidos de los valores experimentales y los obtenidos mediante la metodología convencional de análisis según el código de diseño aplicable de acuerdo con el material de refuerzo. Los diseños de PRFV representan mayores índices de seguridad contra la evaluación de los armados de acero (ver tabla 3).

Es de observar la viga 4 reforzada con PRFV y la viga 6 reforzada con acero, cuya cuantía de refuerzo, pudimos notar, es muy similar. Sin embargo, la resistencia al corte de la viga reforzada con acero, contrario al resultado visto en la flexión, resultó mayor a la del PRFV (Figura 3). Es decir, la viga con refuerzo de armadura metálica al compararse con las de PRFV de similar cuantía (viga 6 con 4) presentó un mejor desempeño en resistencia al corte y desplazamiento, así como un FS muy similar al obtenido con la de PRFV.

Puede observarse que el desarrollo de la falla a corte en las vigas reforzada con estribos de PRFV fue lineal hasta el límite. Este comportamiento observado en estas vigas reforzadas con estribos de PRFV sugiere

poner atención en el adecuado diseño del refuerzo a cortante debido a la fragilidad de la falla y al menor margen de holgura obtenido en el FS, al compararlo con el obtenido a flexión por las mismas vigas.

Tabla 3
Factor de seguridad del diseño por fuerza cortante

VIGA	CORTANTE		
	VR _{CALC} Kg	VR _{REAL} Kg	FS
1 (V)	596.58	1,200.00	2.01
2 (V1)	664.48	1,210.00	1.82
3 (V2)	604.16	1,295.00	2.14
4 (V3)	704.88	2,395.00	3.40
5 (V4)	1,230.31	3,370.00	2.74
6 (ACERO)	1,491.31	2,660.00	1.78

Fuente: Elaboración propia

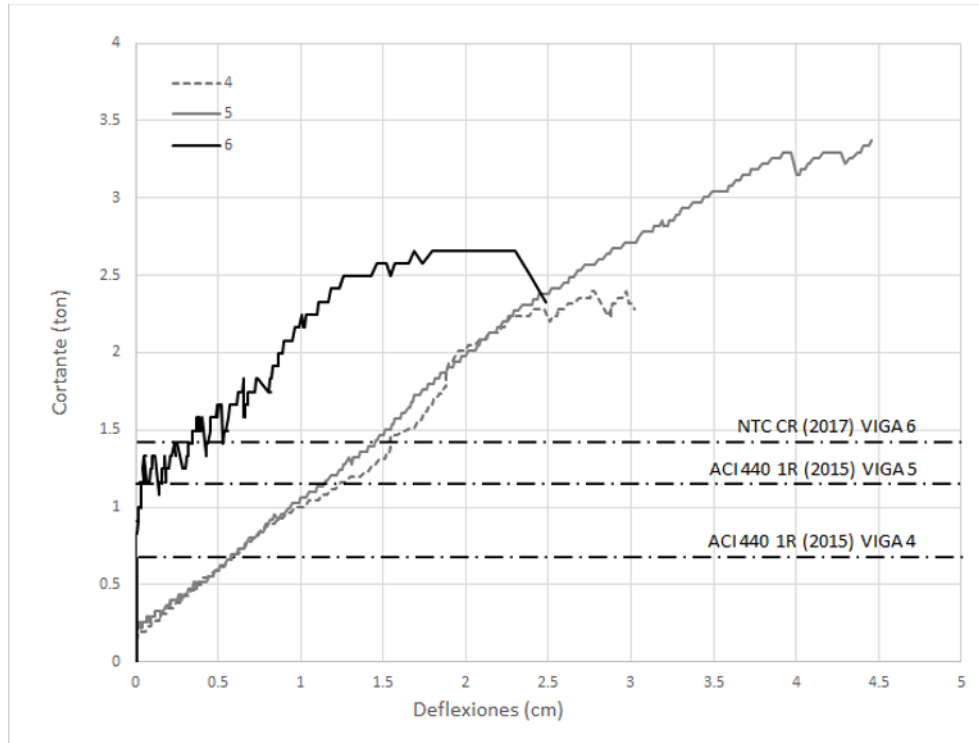


Figura 3. Gráfica comparativa de Cortantes entre vigas 4, 5 de PRFV y viga 6 de acero.
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Falla en vigas, colapso por cortante: viga 4. Fuente: Elaboración propia

Los FS obtenidos, que relacionan la resistencia empíricamente obtenida en los ensayos con la evaluada mediante los modelos teóricos normativos, parecen ser muy prometedores, sin embargo habrá de tomar en consideración que la

mayoría de los PRFV disponibles en el mercado aun no poseen capacidades estandarizadas, por lo que estas están sujetas a las fórmulas del fabricante y normalización de sus procesos de calidad, los cuales deben normativamente debería garantizar dos punto cinco veces el Coeficiente de Variación ($2.5Cv$) o tres desviaciones estándar de la muestra (3σ), para cada uno de los valores de resistencia que nos proporcionan, como lo menciona Sánchez (2020).

Queda pendiente el problema de la adherencia que se apreció en las variaciones de carga, las cuales, si bien fueron equiparables a los de las de la armadura metálica y no afectó el comparativo de la prueba, para vigas de mayor índice de carga y/o claro podrían ser representativos.

5. CONCLUSIÓN

El estudio comparado entre los materiales compuestos a base de PRFV muestran un comportamiento aceptable para su uso en edificaciones habitacionales basadas en mamposterías confinadas y hasta cierto punto seguros en la autoconstrucción, dentro de los mismos parámetros con que se han utilizado las armaduras electrosoldadas de alta resistencia como refuerzo ante cargas gravitacionales y claros relativamente cortos.

La resistencia a la flexión resulta en un mejor rendimiento que el acero dentro de los límites de esta prueba con altos márgenes de seguridad contra las condiciones de diseño. No obstante, la resistencia al corte se pudo notar en desventaja al comparar con el obtenido del acero trefilado de las armaduras metálicas, particularmente en las primeras vigas (1, 2 y 3), cuya capacidad fue excedida especialmente porque su índice de refuerzo era mucho menor al de la viga de acero (6). Así mismo se observó, que mejorar la cuantía de refuerzo longitudinal, en las vigas de PRFV también mejora su respuesta al corte (viga 4).

Lo anterior sugieren el diseño por corte podría ser crítico para su uso en claros mayores a los 2.0m, por lo que se requiere de una adecuada revisión y diseño estructural, con armados transversales robustos, a fin de salvar incluso claros de puentes como los que menciona el manual AASHTO (AASHTO (GFRP), 2017).

Agradecimiento

Los autores agradecen a la empresa POLIMEX distribuidor de las varillas de PRFV utilizadas en estos ensayos y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), por las facilidades otorgadas en la realización de esta investigación, así como de la disposición de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- AASHTO** (GFRP). (2017). *LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings*. Washington D.C.
- ACI 440 1R**. (2015). *American Concrete Institute, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Michigan: ACI.
- GangaRao**, H. V., Taly, N., & Vijay, P. V. (2007). *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. M. Florida, U.S.: CRC Press.
- Gooranorimi**, O., Gremel, D., Myers, J. J., & Antonio, N. (2015). Durabilidad a largo plazo del refuerzo interno de GFRP (PRFV) en estructuras de concreto. *ACI Journal*.
- Nanni**, A., Luca, A. d., & Jawahery, H. (2014). *Reinforced Concrete with FRP Bars, Mechanics and Design*. New York: CRC Press.
- NTC CR**. (2017). *Normas Técnicas Complementarias de Concreto*. Cd., de México, México.
- NTC M**. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Mampostería 2004. Gaceta oficial del Distrito Federal*. Distrito Federal, México.
- NTC M**. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Mampostería 2017. Gaceta Oficial de Cd., de México*. México.
- R.**, M., Cousin, P., & Benmokrane, B. (2009). Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete. *Journal of Composites for Construction*. doi:10.1061/ASCE1090-0268(2009)13:2(66)
- Sánchez Hernández**, J. A. (2019). Estructuras de Concreto en Zonas Costera usando Barras de Polímero Reforzados con Fibra de Vidrio. *Revista PAKBAL*(45), 26-32.
- Sánchez Hernández**, J. A. (2019). Evaluación de los Criterios de Diseño de Vigas de Concreto Subreforzadas con Varillas de PRFV. *Revista PAKBAL*(46), 5-11.
- Sanchez Hernández**, J. A. (2020). Resistencia Real, Última Garantizada y Resistencia de Diseño del Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV). *PAKBAL*(47).
- Wainshtok Rivas**, H., Hernández Caneiro, J. A., & Díaz Pérez, I. d. (2015). *Empleo de Barras y Telas de Mallas de PRF como refuerzo del hormigón y el ferrocemento*. (978-84-17098-39-1, Ed.) Habana, Cuba: Edita.me.