

EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO DE VIGAS DE CONCRETO SUBREFORZADAS CON VARILLAS DE PRFV

EVALUATION OF THE DESIGN CRITERIA OF SUBREFORZED CONCRETE BEAMS WITH GFRP RODS

Sánchez Hernández Juan Alberto ¹

RESUMEN

Esta investigación evalúa el comportamiento y el diseño de vigas de concreto reforzado mediante barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) con concretos de resistencia normal en México sometidas a flexión simple. El fin es verificar las expresiones y consideraciones expuestas en el código de diseño del (ACI 440 1R, 2015) para diseño subreforzado debido a que este mecanismo es de amplia aceptación en los elementos reforzados con acero. Se ensayaron tres vigas de concreto reforzada con 4 barras de PRFV de 4 mm de diámetro (inferior a las áreas mínimas preestablecidas por las normativas mexicanas y el ACI), para determinar su capacidad y comportamiento. Como resultado se encontró que la resistencia nominal obtenida hasta la falla resultó superior a la esperada según la metodología de análisis. Esto mejora la confianza en los diseños estructurales realizados con PRFV al considerar que el diseño es hasta cierto punto seguro.

Palabras clave: Polímeros reforzados, fibras de vidrio, diseño subreforzado, concreto reforzado.

ABSTRACT

This research evaluates the behavior and design of reinforced concrete beams using glass fiber reinforced polymer bars (GFRP) with normal strength concrete in Mexico subjected to simple bending. The purpose is

to verify the expressions and considerations set forth in the design code of (ACI 440 1R, 2015) for under-reinforced design because this mechanism is widely accepted in structural elements reinforced with steel. Three reinforced concrete beams were tested with 4 GFRP bars of 4 mm in diameter (well below the minimum areas pre-established by Mexican regulations and the ACI), to determine their capacity and behavior. As a result, it was found that the nominal resistance obtained up to the fault was higher than expected according to the analysis methodology studied. This improves confidence in the structural designs made with these materials by considering that the design is to some extent safe.

Keywords: Reinforced polymers, glass fibers, under-reinforced design, reinforced concrete.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años las barras de PRFV han sido una opción para el reforzamiento de elementos de concreto y han estado tomando auge en el mundo debido a su bajo peso por unidad de volumen y su resistencia a la corrosión. Sin embargo, al ser un material novedoso para América Latina, la resistencia real en condiciones de servicio de estos compuestos genera preocupación en la comunidad de ingenieros.

El principal problema que suelen tener los constructores, al intentar usar el PRFV, es la determinación de los armados adecuados para los miembros estructurales de sus edificaciones, siendo que el diseño mediante PRFV se aborda desde una filosofía distinta a la del acero donde se prefiere la falla en el concreto antes que la falla en fibra y que la sustitución de armados de acero por PRFV de forma directa no es recomendable, ya que se abordan desde diferentes filosofías, estableciendo la necesidad del diseño mediante el ACI 440.1R.

¹ Miembro de la Comisión de Estructuras del Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas.

Uno de los usos que está siendo promovido debido al bajo índice de refuerzo necesario para reforzar los elementos de confinamiento, se da en la construcción de desarrollos habitacionales de uno o dos niveles principalmente en las costas y litorales o cercanas a zonas altamente industriales, cuyos componentes químicos en el medio ambiente afectan al acero de refuerzo convencional y que los polímeros reforzados con fibras no padecen. Para la adopción de los PRFV en dichas zonas es necesario conocer el comportamiento de estos elementos estructurales típicos construidos principalmente con mamposterías de tabique y block confinados, por lo que este estudio, continuación del realizado por (Hidalgo Toxqui, Zepeda Morales, Sánchez Hdez., & et al., 2018), se enfoca en conocer el comportamiento de vigas armadas con PRFV que podrían ser empleadas en casas-habitación en dimensiones más comunes.

PRUEBA EXPERIMENTAL Descripción del espécimen

Con la intención de corroborar la resistencia y el comportamiento al colapso de las vigas comúnmente utilizadas como dalas en la construcción habitacional, pero subreforzadas mediante barras de PRFV; se ensayaron tres vigas de concreto armado con 4 barras longitudinales de PRFV de 4 mm de diámetro y estribos de igual diámetro a cada 15 cm de espaciamiento, la sección transversal fue rectangular de 15 cm por 20 cm, con un claro entre apoyos de 2 m.

Se eligió el diámetro de 4 mm debido a la aparente fragilidad que parece tener el material al someterse a flexión directa y por su similitud con los diámetros utilizados en armaduras electrosoldadas. No obstante, el fabricante sugiere para dalas y castillos como mínimo el uso de barras de 6 mm para mayor congruencia a la NTC Ciudad de México 2017, pero en este estudio se persigue evaluar el caso de vigas subreforzada, a fin de conocer su funcionamiento en condiciones similares con las del acero.

Si bien, la filosofía de diseño para elementos de concreto reforzado con PRFV enunciada por el ACI 440 1R es sobreforzada. El subrefuerzo es permitido hasta ciertos límites, por el ACI 440.1R 2015 regulando la capacidad mediante factores de reducción más estrictos.

Las barras de PRFV presentan el inconveniente

Tabla 1. Nomenclatura de Especímenes, armados y resistencias

VIGA	ARMADO	CONCRETO	AREA REF.	CUANTÍA		
		f'c kg/cm2	Af cm2	ρ_{fb}	ρ_{fMIN}	ρ_{fREAL}
1 (V)	LS	250.00	0.25	0.0054	0.0037	0.0009
	LI					
	2D4 E@15					
2 (V1)	LS	218.50	0.25	0.0054	0.0037	0.0009
	LI					
	2D4 E@15					
3 (V2)	LS	279.80	0.25	0.0060	0.0037	0.0009
	LI					
	2D4 + G E@15					

de no poderse doblar en obra, sino solo mediante curvas suaves (espiral), teniendo eso en cuenta se plantearon dos especímenes (V y V1) sin ganchos en los extremos, no obstante, el tercer espécimen (V2) se le colocaron ganchos en los extremos, adosados mediante alambre de amarre. Lo anterior para observar su comportamiento con relación a la posibilidad de que el constructor artesanal pudiera omitirlos por conveniencia económica.

Propiedad de los materiales

Las pruebas de cilindros de concreto a los 28 días arrojaron resultados de $f'c$ entre 200 kg/cm² y 280 kg/cm², etiquetándose cada viga en estudio. El valor del esfuerzo a tensión de la barra de refuerzo se fijó inicialmente con $f_f^*u = 8000$ kg/cm² (Esfuerzo límite último de tensión establecido por el fabricante), $Ffv = 1500$ kg/cm² (esfuerzo límite de corte establecido por el fabricante), $Ef = 500000$ kg/cm² (Módulo elástico establecido por el fabricante). No obstante, resultados de ensayos directos realizados a barras de PRFV del mismo proveedor en el Instituto Mexicano de Cemento y el Concreto, A.C. y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. 2016 acusaron resistencias promedio de hasta 13700 kg/cm² y módulo elástico de 669000 kg/cm².

Descripción del laboratorio

El ensaye del elemento de concreto reforzado se realizó en un marco de reacción descrito en la Figura 1, el cual funcionará como una prensa de dimensiones mayores para el ensaye de elementos estructurales.

Se empleó un gato hidráulico de 100 toneladas instalado en el marco de reacción para transmitir la carga en el elemento, la carga fue separada en dos cargas puntuales tal como se muestra en la Figura 1 a través de una viga de distribución de carga lo suficientemente robusta para no deformarse. La viga fue colocada en un sistema de apoyos isostáticos, estos constan de un apoyo simple y un apoyo articulado, de esta forma el análisis numérico pretende eliminar la incertidumbre de las condiciones de apoyo haciendo las condiciones de ensaye más apegadas al modelo matemático.

En el laboratorio se cuenta con el equipo para medir las deformaciones que presentan dichos elementos al ser ensayados, para esto se cuenta con el sistemas de adquisición de datos, estos están comprendidos de sensores de deformación unitaria a través de galgas de deformación o strain gauge, transductores de desplazamiento o LVDT (linear variable differential transformer), micrómetros, sensores de fuerza o celdas de carga las cuales nos medirán las fuerzas actuantes durante el experimento, colector de información o Datalogger, un sistema de cómputo y el software Visual Log para observar y archivar en tiempo real de los datos de deformación, desplazamiento y carga del ensaye.

Protocolo de carga

La prueba realizada al elemento fue monotónico creciente, se le sometió a fuerzas en aumento hasta alcanzar el colapso total. Durante el ensaye la aplicación de carga fue a una velocidad constante aplicada a un ritmo de 100 kg a cada 2.5 segundos, es decir 40 kg por segundo, lo que permite la observación del

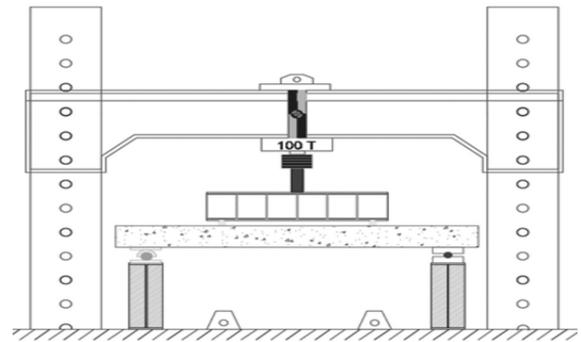


Figura 1. Vista general del ensaye a flexión

comportamiento del elemento en función del tiempo y la formación de las grietas por tensión.

En este estudio las lecturas de carga fueron: analógica para la viga denominada V y digital para las denominadas V1 y V2. Para la viga V, las lecturas en el micrómetro las deformaciones se leyeron eventualmente, construyéndose una curva de interpolación cuadrática para los puntos intermedios con un grado de fiabilidad de $R2 = 90\%$.

MARCO TEÓRICO

Para el cálculo de la resistencia a flexión de diseño se emplea el modelo de distribución de esfuerzos y deformaciones adoptado por (Wainshtok Rivas, Hernández Caneiro, & Díaz Pérez, 2015) el cual es similar al modelo del ACI-318, 2015 y el usado por las NTC Ciudad de México, 2017; para vigas de concreto reforzados con varillas de acero.

El objetivo de este análisis es encontrar la capacidad a momento último resistente teórico, así como el

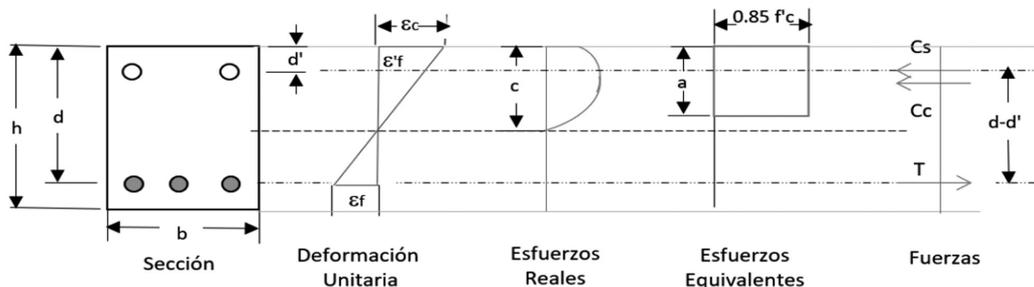


Figura 2: Diagramas en la sección transversal de la viga

cortante resistente teórico y las deflexiones estimadas.

En la Figura 2 se muestra en la sección transversal de la viga, su deformación unitaria con el modelo de distribución lineal y con sus respectivos esfuerzos real y equivalente. En este caso sólo se tomó en cuenta los esfuerzos reales a compresión y se considera que el concreto no resiste esfuerzos de tensión, de esta forma encontramos la profundidad "a" del bloque equivalente de refuerzo a compresión con la siguiente ecuación de equilibrio:

$$C = C_c + C_s = T$$

Por lo tanto, si consideramos el modelo expuesto en las NTCCR-2017 (Figura 2) y descartamos la participación del refuerzo superior, de acuerdo a las recomendaciones del ACI400.1R-2015 se tiene que: $a = (A_f \cdot f_f) / (0.85 f'_c \cdot b)$ (ACI 440 1.R ecuación 7.2.2b)

De la misma forma, usando el modelo de la Figura 2 podemos evaluar el valor de la deformación unitaria en la fibra "εf" (zona de tensión) y tomando en consideración el módulo elástico (Ef), determinar el esfuerzo en la fibra:

$$f_f = E_f \cdot 0.003 \cdot (\beta_1 \cdot d - a) / a \text{ (ACI 440 1.R ecuación 7.2.2c)}$$

Tal que:

$$f_f \leq f_{fd}$$

Donde: Af = área de refuerzo; ffd = Esfuerzo de diseño de las barras; ffd = CE*ffu y CE = Coeficiente Ambiental.

Y por tanto, el momento nominal:

$$M_n = A_f \cdot f_f \cdot (d - a / 2) \text{ (ACI 440 1.R ecuación 7.2.2a)}$$

En el caso de elementos subreforzados en los que, la cuantía de refuerzo $\rho_f < \rho_{fb}$ se manifiesta una falla controlada por el refuerzo, el momento puede ser evaluado, por:

$$M_n = A_f \cdot f_{fd} \cdot (d - \beta_1 \cdot c / 2) \text{ (ACI 440.1R 7.2.2e) (Ecuación 1)}$$

Donde: $\beta_1 = 0.85$

Y la cuantía balanceada puede ser evaluada por (ACI 440 1.R 7.2.1b):

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

La Figura 3 muestra el modelo matemático para la determinación del momento actuante durante el experimento y así como las condiciones para la aplicación de la carga 2P durante el ensaye.

El momento resistente se obtiene de la siguiente ecuación:

$$M = P \cdot (L/3) \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde: M = Momento actuante; P = Carga; L = Claro entre apoyos.

El comportamiento a flexión se evaluará median-

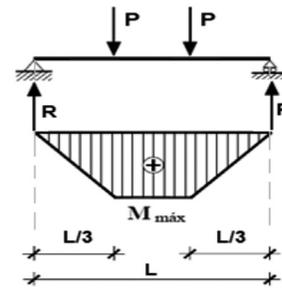


Figura 3. Modelo matemático para el cálculo de la resistencia a flexión

te la comparación de las ecuaciones que determinan tanto el momento actuante durante del experimento como el del momento teórico, es decir, mediante las ecuaciones 1 y 2.

La capacidad a cortante se obtuvo considerando la sección agrietada, de acuerdo a las indicaciones en las guías de diseño del ACI440.1R-15 y para el caso de la resistencia al corte actuante fue tomado directamente el valor de P.

RESULTADOS

La Figura 4 muestra las gráficas de carga 2P obtenida durante el experimento en función de las deflexiones centrales. En ella se puede observar caídas en la carga resistente, que puede ser explicada como corrimientos del refuerzo debido a adherencia entre la varilla de PRFV y el concreto. Sin embargo, es importante destacar que, aunque existe un posible corrimiento de la varilla, este no es el precursor de colapso, sino caso contrario, existe una redistribución de esfuerzos que le permiten al elemento continuar trabajando e incrementar su resistencia hasta la falla definitiva.

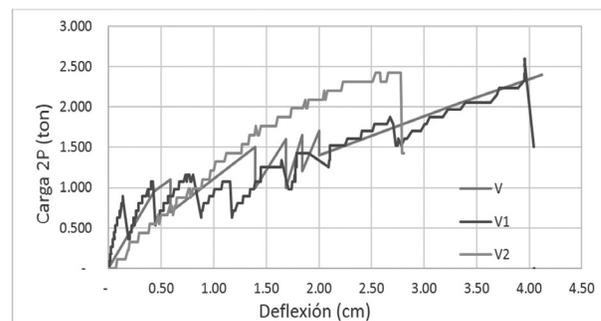


Figura 4. Gráfica de carga 2P x Δ

En las gráficas podemos observar que el hecho de usar ganchos en los extremos del armado (V2) permiten al elemento desarrollar su capacidad máxima con una menor deflexión del elemento estructural, así como un comportamiento ante la carga más gradual y uniforme; en tanto que el omitir dicho gancho (V y V1) origina que el corrimiento del armado genere una mayor elongación hasta la falla. No obstante, se pudo observar que la resistencia máxima de carga fue muy similar, siendo únicamente en el caso del uso de ganchos que el colapso se generó en la ruptura de una de las barras.



Figura 5. Ruptura de varilla de PRFV 4mm a la falla

Al evaluar el modelo utilizado en las hipótesis para la obtención de resistencias de diseño a flexión, carga axial y flexocompresión de las normas técnicas complementarias 2017 de Cd. de México (apartado 3.5) (NTC CR, 2017), se obtuvieron esfuerzos de registro mayores a los $f_f=16,300 \text{ kg/cm}^2$ en las barras de PRFV, muy superiores a $f_f^*u=8,000 \text{ kg/cm}^2$ indicados por el proveedor pero congruente con la caracterización realizada a barras del mismo diámetro por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción (ONNCCE, 2016).

Momento flexionante

El patrón de agrietamiento es congruente con un mecanismo de falla por flexión y de acuerdo con la figura 7 la ruptura se presentó próxima a las secciones transversales de aplicación de las cargas puntuales (P), sobre las grietas marcadas 3 y 5.

Al conciliar los momentos resistentes calculados mediante la ecuación Ecuación 2 a partir de las cargas de colapso, contra los momentos calculados

de acuerdo al modelo de estimación de resistencias últimas del ACI 440-1R/2015 (Ecuación 1), se encontraron cocientes de seguridad $FS= MR_{real}/MR_{calculado}>5$ (tabla 2). Lo que sugiere que el diseño por flexión puede considerarse seguro. No obstante el ACI utiliza un factor preventivo de degradación ambiental $0.70 < CE < 0.80$ que pudieran aplicársele al FS para estimar el grado de seguridad efectiva de los especímenes $FS=(0.75)(5.0) = 3.75$.

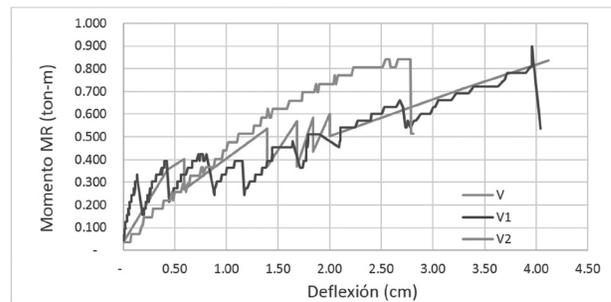


Figura 6. Gráfica M x Δ



Figura 7. Secuencia del agrietamiento



Figura 8. Fallas bajo los apoyos de los tres especímenes (a) V, (b) V1, (c) V2.

Tabla 2. Factor de seguridad del diseño por flexión

VIGA	ARMADO		FLEXION		
			MR _{CALC}	MR _{REAL}	FS
			Kg-m	Kg-m	
1 (V)	LS	2D4	146.39	836.00	5.71
	LI	2D4 E@15			
2 (V1)	LS	2D4	146.39	806.67	5.51
	LI	2D4 E@15			
3 (V2)	LS	2D4	146.39	863.33	5.90
	LI	2D4 + G E@15			

Fuerza cortante

La baja cuantía de refuerzo por flexión no permitió alcanzar el umbral de falla por corte, por ello resulta un tanto difícil establecer un parámetro de seguridad en cuanto a este tipo de demandas, sin embargo, el cortante nominal máximo que tolera la sección agrietada de concreto es de 795 kg acorde a la metodología de análisis aceptada para este material, por lo que debieron presentarse grietas por corte a partir de $2P = 1450$ kg de carga, sin embargo las cargas aplicadas no llegaron a este valor, al presentarse previamente la falla por flexión. Por esta razón, en una comparación simple de la resistencia alcanzada contra la evaluada podemos considerar también adecuado el diseño de cortante por sección agrietada, que establece el ACI 440.1R, para esta acción, con un margen entre el cortante nominal evaluado y el ensayado de 1.8 veces.

Tabla 3. Factor de seguridad del diseño por corte

VIGA	ARMADO		CORTANTE		
			VR _{CALC}	VR _{REAL}	FS
			Kg	Kg	
1 (V)	LS	2D4	596.58	1,200.00	2.01
	LI	2D4 E@15			
2 (V1)	LS	2D4	664.48	1,210.00	1.82
	LI	2D4 E@15			
3 (V2)	LS	2D4	604.16	1,295.00	2.14
	LI	2D4 + G E@15			

CONCLUSIÓN

- 1) Al comparar los resultados obtenidos en la prueba física con las restricciones que ofrece el código de diseño para preservar la seguridad estructural, considerando la filosofía de diseño en los PRFV con falla centrada en el concreto, se puede concluir que el diseño por flexión y corte usando el ACI440.1R en elementos subreforzados con PRFV, está del lado de la seguridad con márgenes conservadores.
- 2) Es importante tomar en cuenta, que la resistencia a la tensión caracterizada de las barras ensayadas está por encima de la especificación de diseño y esta resistencia juega un papel importante en los resultados obtenidos. Por lo que resulta importante asegurar la calidad de las varillas de PRFV empleadas.

Por tanto, aun con los márgenes de sobrerresistencia que nos procura la metodología de análisis sobre los resultados obtenidos en la prueba (la cual podemos considerar aceptablemente segura), no se justifica el uso de factores de reducción y carga diferentes a los preestablecidos en NTC Ciudad de México y el ACI 440.1R, ya que estos amortiguan el efecto de la variación de resistencia en estos materiales, que suele ser muy amplio, sin duda se requieren más pruebas para consolidar las deducciones aquí descritas pero nos permite tener una mejor apreciación del auge que dicho material está tomando por sus ventajas no estructurales.

RECONOCIMIENTOS

El autor desea agradecer a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), por su valiosa cooperación en la realización de este estudio, y así como a los estudiantes y prestadores de servicio social que ayudaron durante la prueba, al Dr. Ing. Juan Pablo Hidalgo Toxqui catedrático de la BUAP y coordinador de los ensayos, al Ing. Luis Enrique Zepeda Morales jefe técnico de la marca POLIMEX por facilitar el acceso a los resultados de los estudios que realiza a sus materiales.

REFERENCIAS

- 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.
- Hidalgo Toxqui, J. P., Zepeda Morales, L. E., Sánchez Hdez., J. A., & et al. (2018). Evaluación del comportamiento a flexión y de los criterios de diseño de vigas de concreto subreforzadas con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio. Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba: ISBN-978-959-261-585-4. doi:4CCI13
- NTC CR. (2017). Normas Técnicas Complementarias de Concreto. Cd., de México, México.
- ONNCCE. (2016). Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción. México: DiI/401.1/15.
- 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.