

Diseño de tanques de hormigón armado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio

Isel del Carmen Díaz Pérez

email: iselcarmen@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Habana.

Aylet Vega Aguilar

email: ayletva@cih.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Habana.

RESUMEN

Muchos de los depósitos existentes en Cuba superan sus años de vida útil y presentan un elevado grado de deterioro dado fundamentalmente por la fisuración y la corrosión de la armadura de acero. Varias soluciones se han dado a través de los años para evitar la corrosión, pero ninguna ha corregido el problema, concluyéndose que lo ideal es sustituir el acero por un material no corrosivo como son los polímeros reforzados con fibras (PRF). El presente trabajo propone el diseño de las paredes de dos depósitos casos de estudio, empleando barras de PRF como refuerzo del hormigón. Los resultados demuestran que aun cuando el diseño exige mayor área de PRF que un diseño similar con acero, para controlar la fisuración, el empleo de estas barras es una solución factible en términos de durabilidad y vida útil de la estructura.

Palabras clave: depósitos de agua, fibra de vidrio, hormigón armado, polímero.

Design of reinforced concrete tanks with glass fiber reinforced polymer bars

ABSTRACT

Many of the existing deposits in Cuba exceed their years of useful life and show a high degree of deterioration mainly due to the cracking and corrosion of the steel reinforcement. Several solutions have been given over the years to prevent corrosion, but none have solved the problem, concluding that the ideal is to replace steel with a non-corrosive material such as fiber reinforced polymers (FRP). This paper proposes the design of the walls of two case studies, using FRP bars as concrete reinforcement. The results show that even when the design requires a greater amount of FRP bars than in a similar design with steel, to cracking control, the use of these bars is a feasible solution in terms of durability and useful life of the structure.

Keywords: water tanks, fiberglass, reinforced concrete, polymer.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la ingeniería ha surgido la necesidad de construir obras resistentes y duraderas. Una de las principales causas del deterioro de las mismas es la corrosión del refuerzo; siempre que la estructura esté expuesta a ambientes especialmente agresivos, el acero de refuerzo es propenso a la oxidación y consecuentemente la durabilidad de la estructura es limitada. Es por ello que ingenieros e investigadores permanecen en una búsqueda constante de alternativas de refuerzo que permitan concebir estructuras con mayor resistencia a la corrosión.

Los depósitos constituyen obras de ingeniería que se requieren en no pocas inversiones sociales e industriales dirigidas a completar y desarrollar la infraestructura de cualquier región. Dentro de las muy diversas tipologías que se conocen, el depósito cilíndrico superficial ha representado tradicionalmente una buena alternativa para alcanzar estos objetivos (Hernández 2001). Su reiterado uso, así como el elevado grado de deterioro que pueden llegar a presentar debido a la agresividad que su propia función implica, y la falta de mantenimiento en muchos casos, sugiere pensar en nuevas formas de refuerzo.

Los polímeros reforzados con fibras (PRF) comienzan a emplearse en la construcción desde principios de la década de 1960 principalmente en los Estados Unidos y posteriormente en Japón y Europa (Rusia) en 1970 (Wainshtok et al. 2017), aprovechando fundamentalmente sus propiedades de no corrosión y elevada resistencia a tracción. Los mismos se pueden emplear propiamente como material de construcción, así como refuerzo del hormigón en forma de barras y mallas o como reforzamiento de estructuras ya construidas en forma de bandas.

Las primeras experiencias del empleo de este material en depósitos se asocian a los tanques de almacenamiento de plástico reforzado con fibra de vidrio, fabricados igualmente con polímeros, en este caso poliéster, el cual es combinado con fibra de vidrio, por lo que se combinan las propiedades de los plásticos y el vidrio (PRFV). Al ser un material compuesto tiene mejores propiedades químicas y mecánicas, en comparación con el polietileno, por lo que lo hacen un material superior y más resistente que otros (García y Frías 2001).

De igual forma, y en paralelo, se comenzó a utilizar como refuerzo en estructuras de hormigón con excelentes resultados, no solo desde el punto de vista resistente, sino también de durabilidad (ACI-440.1R, 2015). En Cuba, en el 2005, se construye la primera piscina de ferrocemento armado con telas de mallas de PRFV en el hotel Royalton, Varadero. La misma forma parte de un Complejo Hidráulico de más de 500m de longitud, formado por canales de forma trapezoidal de 3m de ancho, estanques y piscinas. Durante los años de explotación no ha sido necesario realizar ninguna intervención debido a que mantiene su buen estado técnico.

Las razones antes expuestas llevan a pensar en el empleo de las barras de PRFV como refuerzo en depósitos de agua de hormigón armado, lo cual constituye el objetivo fundamental del presente trabajo. Para ello se propone el diseño de dos tanques, de 2000 y 5000 m³, con el objetivo de evaluar la factibilidad del empleo de este material a partir de la comparación con tanques similares armados con acero, y sentar bases para el futuro uso en el país de los PRFV en este tipo de estructuras.

POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (PRF)

Las barras de polímeros reforzados con fibras (PRF) están formadas por fibras longitudinales embebidas y conformadas por una resina polimérica rígida. Las fibras proveen la resistencia mecánica y rigidez al compuesto que generalmente resiste más allá que las cargas que se le aplican, mientras la matriz sirve para vincular y proteger a las fibras (resistencia química) así como garantizar la transferencia de esfuerzos entre ellas (Wainshtok et al. 2017). Los PRF más utilizados como refuerzo del hormigón, se producen en base a fibras de carbono (PRFC), de aramida (PRFA), de vidrio (PRFV) y más recientemente, de basalto (PRFB).

La fibra más utilizada en la construcción es la de vidrio, principalmente por su relación costo-beneficio. Estas se comercializan del tipo E- vidrio (para uso general); S-vidrio (para alta resistencia mecánica); ECR –vidrio (para incrementar la resistencia a los ácidos); AR-vidrio (para incrementar la resistencia a los ácidos a los álcalis), siendo estas últimas las idóneas para su uso en la construcción (Wainshtok et al. 2017). Entre sus principales propiedades se destacan su elevada resistencia a tracción, su aceptable resistencia al impacto, su buena aptitud en cuanto al aislamiento térmico y acústico, bajo peso y su adecuada transparencia a las radiaciones electromagnéticas.

Las resinas son divididas en dos grandes grupos: termoestables y termoplásticas. Las resinas termoestables más comunes utilizadas en la industria de materiales compuestos son los poliésteres no saturados, los fenoles, las vinílicas y los epóxidos, siendo estas últimas utilizadas para producir compuestos de alto desempeño, con propiedades mecánicas superiores, resistencia a líquidos corrosivos o al medio ambiente, propiedades eléctricas también superiores, buen desempeño a elevadas temperaturas y excelente adherencia al sustrato (Wainshtok et al. 2017).

Ventajas y desventajas de los PRFV

El contenido de este epígrafe se basa en los trabajos de Almerich (2010) y Wainshtok et al. (2017). Las barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio PRFV, no son afectadas por la corrosión y son resistentes a la influencia de ambientes agresivos, en particular a las sustancias alcalinas disueltas en el medio ambiente, ácidos sulfúrico y clorhídrico y óxidos de nitrógeno. No se oxidan y, por consiguiente, no necesitan de protecciones adicionales.

A las ventajas evidentes del material, ya señaladas, se agregan la elevada resistencia a la tracción (de dos a tres veces la del acero), la resistencia a los grandes cambios de temperatura: - 70 °C a + 100 °C, y también su pequeño peso, de seis a ocho veces más ligero que su análogo de acero.

Todas las cualidades mencionadas, junto a los altos índices de resistencia y deformación, así como el asegurar una adherencia firme con el hormigón, permiten usar ampliamente las barras de PRFV en la construcción de objetos marítimos y portuarios, autopistas, cimientos, instalaciones de conservación térmica, torres de líneas de transmisión de energía eléctrica y traviesas, entre otras muchas aplicaciones.

Aun cuando posee ventajas reconocidas, no deben ser obviadas sus desventajas si se quiere asegurar un buen diseño. Dentro de las mismas pueden citarse su comportamiento elástico (no

alcanza la fluencia como el acero), incluso hasta el fallo del material (figura 1) y el bajo módulo de elasticidad (varía con el tipo de refuerzo de fibra). Además, es un material anisotrópico, lo que se traduce en menor resistencia a la compresión y baja resistencia al corte transversal. Debe destacarse que estas barras no pueden doblarse en obra, por lo que los dobleces deben garantizarse desde el propio proceso de fabricación.

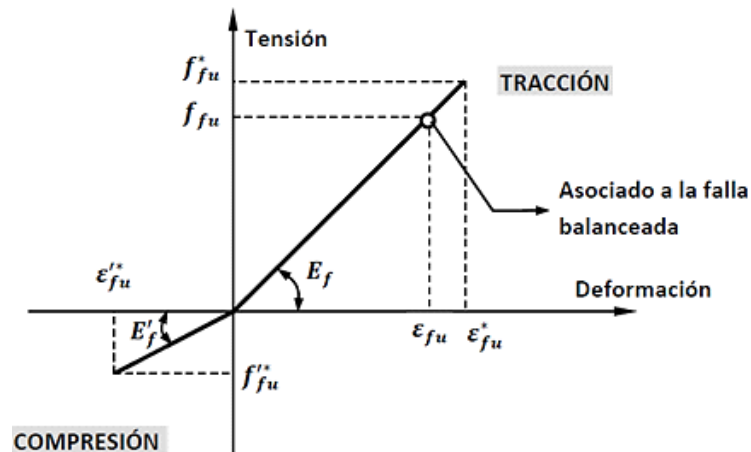


Figura 1. Leyes tensión - deformación de barras de PRFV a tracción y compresión
(Wainshtok et al. 2017).

Es un material susceptible al fuego, dependiendo del tipo de matriz y del espesor del recubrimiento del hormigón y, bajo la exposición continuada a la radiación ultravioleta, pueden sufrir daños las resinas poliméricas y las fibras.

Diseño de la pared de los depósitos

El análisis de los depósitos se realiza tomando como base el modelo físico propuesto por Hernández Caneiro en su tesis doctoral (Hernández 2001), el cual, a decir de sus autores “refleja mejor el comportamiento de sus sistemas estructurales, específicamente el referido a la pared”. Este propone discretizar la pared en dos sistemas idealizados, el primero constituido por anillos horizontales de una altura dada y el segundo por ménsulas verticales (dovelas) cuyos vínculos, superior e inferior, se corresponderán con los de la pared del depósito que se analice (figura 2). De esta manera se pueden analizar los empujes interiores como fuerzas que provocan tracción y flexión en la pared del tanque.

Diseño de elementos de hormigón armado con barras de PRF

El diseño de elementos de hormigón armado empleando como refuerzo barras de PRF se realiza utilizando los principios de los Estados Límites Últimos (ecuación 1), garantizando una resistencia suficiente, determinando el modo de fallo y verificando una adherencia adecuada entre los materiales.

$$S_u \leq \phi S_n \quad (1)$$

Siendo

S_u : sollicitación actuante factorizada

S_n : sollicitación nominal

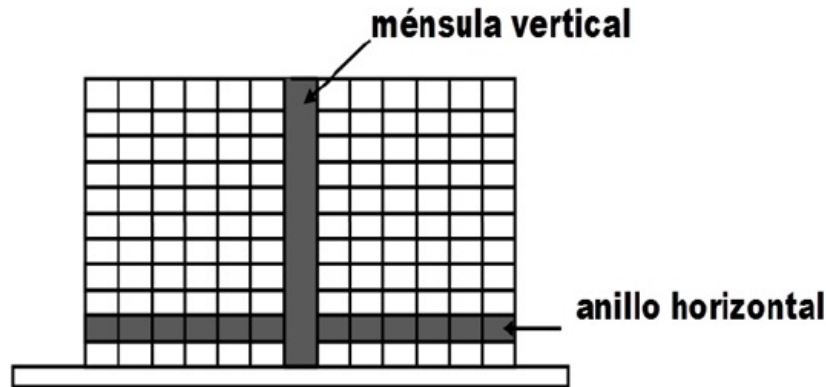


Figura 2. Modelo físico para el análisis de la pared del tanque (Hernández 2001)

Los modelos analíticos que se utilizan para definir las cuantías de refuerzo en el hormigón armado con PRF resultan análogos a aquellos empleados para el acero, destacando algunas singularidades como el carácter elástico y anisotrópico de las barras de PRF, que no deben obviarse si lo que se desea es generar un procedimiento propio para los casos en que se utilicen las barras de PRF longitudinales y transversales como refuerzo del hormigón.

Estado límite último

Flexión

El elemento reforzado con PRF no exhibe la ductilidad acostumbrada de aquellos reforzados con acero. Esto conduce a preferir en el caso de elementos trabajando a flexión, el fallo por compresión del hormigón (fallo menos frágil) antes que por el refuerzo cuando este se resuelve con barras de PRF. Por esta razón se recomienda diseñar para cuantías del refuerzo en tracción (ρ_f) superior a la cuantía balanceada (ρ_{fb}), definiéndose esta como aquella cantidad de refuerzo que asegura simultáneamente que el hormigón alcance su máxima deformación a compresión, y la barra de PRF alcance su tensión última de diseño (Wainshtok et al. 2017)

De cualquier manera, debido a la ausencia de ductilidad se requiere una mayor reserva de capacidad, siendo así, el factor de reducción de la resistencia (ϕ) es generalmente más bajo para el hormigón reforzado con PRF que para los reforzados con barras de acero (figura 3).

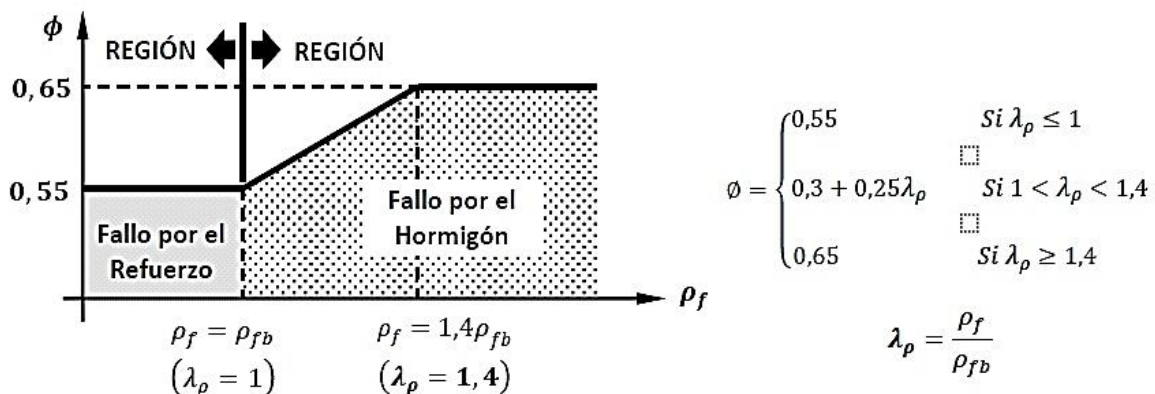


Figura 3. Representación gráfica del coeficiente reductor de la capacidad nominal para los PRF (Wainshtok et al. 2017).

Cortante

Durante la verificación del estado límite último de cortante la contribución del hormigón deberá ser evaluada en función de la profundidad de la línea neutra de la sección fisurada (k_s), a diferencia de como tradicionalmente se hace cuando se refuerza con acero. Dicha formulación está dada por la menor rigidez que exhibe este material. Para este estado se considerará, además, un factor de reducción de la resistencia (ϕ) igual a 0,75.

Estado límite de servicio

En la generalidad de los casos, al emplear barras de PRFV como refuerzo del hormigón, los estados límites de servicio gobiernan generalmente el diseño, en lugar de los estados límites de resistencia, de ahí la importancia de la verificación del mismo.

Para comprobar si el elemento cumple con este estado de servicio, se debe asegurar que la abertura máxima de fisura que se origina bajo las cargas de servicio (a_f), no llegue a sobrepasar el ancho admisible (a_{flim}) que proponen los reglamentos o que dicte la experiencia personal de los diseñadores:

$$a_f < a_{flim} \quad (2)$$

La necesidad de limitar la abertura de las fisuras obedece de manera general a diversas razones, entre las que sobresalen: estéticas, estanqueidad y los efectos sobre el mecanismo resistente a cortante. A falta de experiencia en Cuba con el empleo de esta tipología de refuerzo, se indican a manera de referencia, los valores que establecen en (ACI-440-1R, 2015).

$$w_{lim}: \begin{cases} 0,5mm & \text{Para elementos expuestos al ambiente exterior} \\ 0,7mm & \text{Para elementos interiores} \end{cases} \quad (3)$$

CASOS DE ESTUDIO

Se propone el diseño de dos depósitos cilíndricos apoyados sobre el terreno para almacenar agua potable de diferentes capacidades (2 000 m³ y 5 000 m³), utilizando PRFV como refuerzo del hormigón. Ambas estructuras presentan la misma sección transversal (figura 4) pero con alturas de 6 m y 10 m cada uno.

Los mismos fueron proyectados por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana para el abasto a la Universidad de Ciencias Informáticas y el abastecimiento al territorio comprendido desde Bocaciega hasta Brisas del Mar en el Municipio Habana del Este, en los años 2003 y 2007 respectivamente.

Para el análisis se consideraron las mismas condiciones de apoyo (empotrado-libre) del proyecto original para así garantizar una similitud en ambos casos y posteriormente realizar una comparación entre las nuevas propuestas y las existentes.

El hormigón a utilizar tendrá una resistencia a compresión (f'_c) de 25MPa y se considerará coeficiente de Poisson $\nu=0,20$, valor recomendado para el hormigón armado o pretensado (NC-207:19, 2019).

Para el refuerzo de PRFV se considerarán las propiedades de las barras producidas por la planta de materiales compuestos de Yaroslavl., Rusia (tabla 1), las cuales cuentan en la actualidad con una evaluación técnica favorable de idoneidad (DITEC) para su uso en la construcción en Cuba (DITEC 590, 2015).

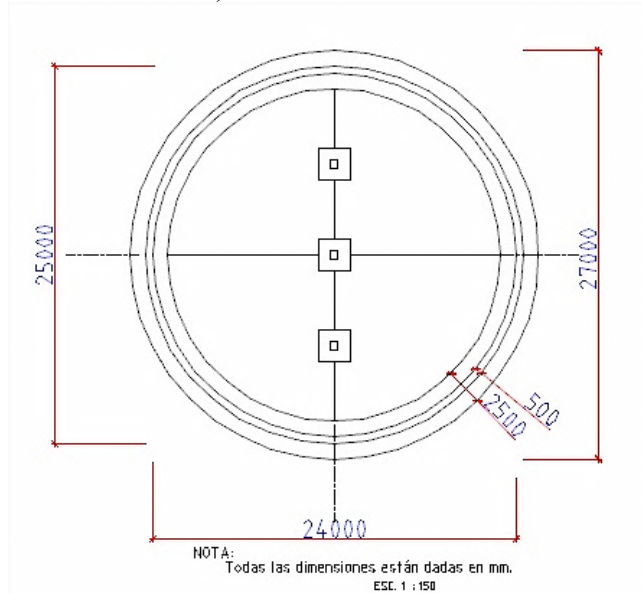


Figura 4. Vista en planta del depósito de 2 000 m³ y 5 000 m³.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las barras PRFV (DITEC 590, 2015).

Propiedad	Magnitud
Resistencia límite a tracción (f_{fu})	800MPa
Resistencia límite a compresión (f'_{fu})	300MPa
Módulo de Elasticidad a tracción (E_f)	50000MPa
Módulo de Elasticidad a compresión (E'_f)	40000MPa
Resistencia límite a cortante (f_{fv})	150MPa
Alargamiento relativo máximo (ϵ_{fu})	0,022

En el cálculo de las solicitaciones se consideraron solamente el peso del agua y el peso propio de las paredes, despreciando el peso de la cubierta pues esta apoya sobre columnas y vigas . Las solicitaciones obtenidas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Esfuerzos de diseño en las paredes de tanques

Depósitos	V_u (kN)	N_k (kN)	N_u (kN)	$M_{k\text{int}}$ (kN.m)	$M_{u\text{int}}$ (kN.m)	$M_{k\text{ext}}$ (kN.m)	$M_{u\text{ext}}$ (kN.m)
2 000 m ³	126,7	260,5	364,8	68,9	96,44	19,0	26,6
5 000 m ³	228,9	615,0	861,0	137,8	192,9	35,05	49,1

Diseño estructural

El diseño estructural se realizó siguiendo las metodologías propuestas en Wainshtok et al. (2017) en total cumplimiento de los estados límites últimos y de servicio.

Teniendo en cuenta que la armadura de PRFV no se corroe, se decide disminuir los recubrimientos a 25 mm, lo que permitió disminuir el espesor de la pared en ambos casos. Los resultados se muestran en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Espesor de las paredes ($e_a(m)$)

Depósitos	2 000 m ³	5 000 m ³
Refuerzo-barras de acero	0,50	0,70
Refuerzo-barras de PRFV	0,40	0,60

Tabla 4. Diseño estructural de los depósitos utilizando barras de PRFV

Depósitos	Malla	Armadura vertical				Armadura circunferencial			
		$\emptyset_{diseño}$	n_b	$A_{f real}(cm^2)$	@(mm)	$\emptyset_{diseño}$	n_b	$A_{f real}(cm^2)$	@(mm)
2 000 m ³	Interior	18	9	22,9	110	18	5	11,8	200
	Exterior	18	9	22,9	110	18	4	10,2	250
5 000 m ³	Interior	18	13	40,8	77	18	7	15,7	90
	Exterior	18	13	40,8	77	18	5	12,6	200

Nota: Cálculo de las armaduras verticales y horizontales de ambos depósitos con capacidades de 2 000 m³ y 5 000 m³

Aun cuando la disminución de recubrimiento permitía una disminución del espesor de la pared superior, este quedó determinado en los dos tanques por los criterios de cortante y fisuración, dado fundamentalmente por el menor módulo de deformación de estas barras en comparación con el acero, que le proporcionan una mejor rigidez al elemento.

Las cuantías de refuerzo a flexión se fijaron teniendo en cuenta la recomendación de procurar diseños hiperreforzados (ACI-440-1R, 2015) para evitar el fallo frágil por el refuerzo, lo que conllevó a que el refuerzo estuviera trabajando a un 65 y 67 por ciento de su máxima capacidad respectivamente.

Finalmente, teniendo en cuenta el número de barras necesarias, se decide colocar dicho refuerzo en una doble malla, ubicando las barras alternas tal como están en los proyectos originales.

En aras de establecer una comparación, en la tabla 5 se presentan los resultados del diseño de los tanques objeto de estudio empleando como armado el acero.

Tabla 5. Diseño estructural de los depósitos utilizando barras de acero

Depósitos	Malla	Armadura circunferencial				Armadura vertical			
		$\emptyset_{diseño}$	n_b	$A_{f real}(cm^2)$	@(mm)	$\emptyset_{diseño}$	n_b	$A_{f real}(cm^2)$	@(mm)
2 000 m ³	Interior	16	6	11,94	166	16	11	21,89	90
	Exterior	16	6	11,94	166	16	11	21,89	90
5 000 m ³	Interior	16	13	25,87	77	16	15	29,85	66
	Exterior	16	7	13,33	150	16	16	31,84	63

Nota: Cálculo de las armaduras verticales y horizontales de ambos depósitos con capacidades de 2 000 m³ y 5 000 m³

Comparación técnico-económica

Costos del hormigón

Los costos de hormigón estuvieron determinados por los espesores de pared considerados, teniendo en cuenta que el resto de las dimensiones eran las mismas en ambos proyectos. Los resultados se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Costos del volumen de hormigón. Variante acero.

Depósito	Calidad (MPa)	Radio (m)	Volumen (m ³)	Costo unitario (\$/m)	Costo total (\$)
2 000 m ³	25	12	226,2	72,62	16 425,9
5 000 m ³	25	12	527,8	72,62	38 327,9

Tabla 7. Costos del volumen de hormigón. Variante PRFV

Depósito	Calidad (MPa)	Radio (m)	Volumen (m ³)	Costo unitario (\$/m)	Costo total (\$)
2 000 m ³	25	12	180,9	72,62	13 134,3
5 000 m ³	25	12	452,2	72,62	32 835,9

Costos del refuerzo utilizando barras de acero

En el cálculo del costo del refuerzo de las estructuras se tomaron como indicadores los precios de venta en Cuba de las producciones de Antillana de Acero y de las producciones de las Tunas. Los mismos están dados por peso del material. En la tabla 8 se muestra como quedaron estos cálculos.

Tabla 8. Costo total del refuerzo. Variante acero.

Depósito	Diámetros Φ (mm)	Peso total (ton)	Costo unitario (\$)	Costo Total(\$)
2 000 m ³	16	24,35	740	18 022,0
5 000 m ³	16	54,20	740	40 107,3

Nota: Se utilizan como indicadores los precios de venta en Cuba de las producciones de Antillana de Acero y de las producciones de las Tunas.

Costos del refuerzo utilizando barras de PRFV

Para el cálculo del costo del refuerzo de las estructuras (tabla 9) se tomaron como indicadores los precios de venta para Cuba de las producciones de la fábrica de materiales compuestos de Yaroslavl, Rusia. En este caso, a diferencia del acero, los precios están dados por unidad de longitud, tal como aparece en la tabla.

Tabla 9. Costo total del refuerzo. Variante PRFV.

Depósito	Diámetros Φ (mm)	Longitud de barra (m)	Costo unitario (\$/m)	Costo total (\$)
2 000 m ³	18	12 621,6	1,52	19 184,8
5 000 m ³	18	28 543,2	1,52	43 385,7

Nota: Se utilizan como indicadores los precios de venta para Cuba de las producciones de la fábrica de materiales compuestos de Yaroslavl, Rusia.

Los resultados demuestran (tabla 10) que el diseño de los depósitos empleando barras de PRFV como refuerzo es menos costoso, aunque debe destacarse que las diferencias no son apreciables, representando un 6 y 3% en ambos tanques analizados respectivamente.

Tabla 10. Costo total por concepto de materiales

Depósito	Variante	Costo Total(\$)
2 000 m ³	Acero	34 447,9
	PRFV	32 319,1
5 000 m ³	Acero	78 435,2
	PRFV	76 221,6

A pesar de la disminución del ancho de la pared en la variante de hormigón armado con PRFV, lo que representa un ahorro en hormigón, las diferencias en costos hasta el momento existente por la importación de las barras de polímeros, conllevan a costos totales muy similares en ambas variantes analizadas. Debe destacarse, además, que de haberse realizado para la variante con PRFV un diseño hiporreforzado, aunque no recomendado, sí admitido por el comité 440 del ACI (ACI-440-1R, 2015), las diferencias en los costos por concepto de materiales entre ambas variantes hubieran sido más significativa a favor de esta.

El análisis presentado solo contempla los costos de material de construcción, no así los de pintura, impermeabilización, transportación de materiales, colocación de las barras, mano de obra, entre otros, que deben ser tenidos en cuenta al determinarse el costo total de una obra.

Debe destacarse además que en el caso de los tanques de hormigón armado con acero deberá concebirse como parte de su ejecución una impermeabilización interior mediante pinturas especiales, así como un mantenimiento periódico para garantizar la estanqueidad, protección y retrasar la corrosión de las barras, lo cual no es necesario cuando se decide reforzar con PRFV.

Por otro lado, el bajo peso de estas barras (de 7-10 veces menor que el acero) permite humanizar las labores de armado y montaje, así como una reducción de los tiempos de ejecución y transportación, lo cual se traduce en una disminución de los costos totales de la obra.

CONCLUSIONES

- En el trabajo se presenta una nueva tecnología aplicada a la Ingeniería Hidráulica donde se relaciona economía, diseño y construcción de obras hidráulicas.
- El diseño de los tanques objetos de estudio empleando como armado del hormigón barras de PRFV quedó determinado por los criterios de cortante y estados límites de servicio, lo cual está dado por la baja resistencia a cortante y menor módulo de deformación que presentan estas barras en comparación al refuerzo tradicional de acero.
- La comparación del diseño de ambos depósitos (reforzados con barras de acero y de PRFV) dio como resultado que, a pesar de exigir menores recubrimientos y permitir emplear menores espesores en las paredes, el diseño de las mismas con PRFV, para asegurar un diseño hiperreforzado, demanda mayor área de refuerzo que cuando se emplea acero.

- A partir de los resultados obtenidos en el diseño de la pared de los depósitos objetos de estudio, puede concluirse que el empleo de refuerzo de barras de PRFV como armado del hormigón es una solución válida y ventajosa a considerar para estas estructuras y otras obras hidráulicas de hormigón armado, permitiendo obtener estructuras resistentes, duraderas y competitivas en precio.

REFERENCIAS

- ACI-440.1R** (2015). "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymers (FRP) bars". ISBN: 9878-1-942727-10-1. Farmington Hills, USA. Reported by ACI Committee 440.
- Almerich A. I.** (2010). "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP", Tesis de doctorado, Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Politécnica De Valencia, España.
- García J. y Frías O.** (2002). "Cálculo de tanque de PRFV de 200 000 litros de capacidad", Ingeniería Mecánica, vol.1, pp. 49-54, ISSN 1915-5913, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- DITEC 590** (2015). "Barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio YAROSLAVL APV", Documento de idoneidad técnica para productos y sistemas de construcción no tradicionales. Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Construcción. La Habana, Cuba.
- Hernández J. A.** (2001). "Modelo físico mecánico para el análisis de paredes de directriz cilíndrica, utilizadas en depósitos apoyados y elevados para el almacenamiento de líquidos." Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Wainshtok H., Hernández J. A. y Díaz I. C.** (2017). "Calidad y durabilidad de las construcciones. El uso de los PRF como refuerzo del hormigón armado y el Ferrocemento", ISBN 978-84-17098-39-1. Universidad Politécnica De Valencia, España.
- NC-207:19** (2019). "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón", Norma Cubana, ICS: 91.080.40, Oficina Nacional de Normalización (NC). La Habana, Cuba.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Aylet Vega Aguilar

<https://orcid.org/0000-0003-1368-6788>

Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final. Realizó contribuciones en la interpretación de los datos.

Isel del Carmen Díaz Pérez

<https://orcid.org/0000-0001-9615-6197>

Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final. Realizó contribuciones en la interpretación de los datos.