

# ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN ZONAS COSTERAS USANDO BARRAS DE POLÍMERO REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO

CONCRETE STRUCTURES IN COASTAL AREAS USING REINFORCED POLYMER BARS WITH GLASS FIBER

..... Sánchez Hernández Juan A. <sup>1</sup>

## RESUMEN

*El principal proceso de degradación del concreto armado expuesto a ambiente marino es diferente a otro tipo de estructuras. La degradación en este tipo de estructuras ocurre principalmente por la corrosión de los armados de acero.*

*Las barras de Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) son un material que está siendo adoptado por Estados Unidos, especialmente en las zonas altamente expuestas a sales marinas, como es el área de Miami Florida y la zona del Golfo de México, ya que las pruebas parecen garantizar nula corrosión y poca degradación con el paso del tiempo (Gooranorimi, Gremel, Myers, & Antonio, 2015). El presente trabajo, incluyen un resumen de diversas investigaciones en torno a la durabilidad del material y un comparativo de costos de elementos estructurales comunes en edificaciones habitacionales (las dalas y castillos) que muestran sus beneficios y competitividad.*

**Palabras Claves:** Compuestos poliméricos, polímero reforzado, fibra de vidrio, corrosión, concreto reforzado.

## ABSTRACT

The main degradation process of reinforced concrete exposed to marine environment is different from other structures. The degradation in this type of structures occurs

mainly by the corrosion of the steel reinforcement.

Fiberglass Reinforced Polymer (GRP) bars are a material that is being adopted by the United States, especially in areas highly exposed to sea salts, such as the Miami Florida area and the Gulf of Mexico area, since The tests seem to guarantee zero corrosion and little degradation over time (Gooranorimi, Gremel, Myers, & Antonio, 2015). The present work includes a summary of various investigations regarding the durability of the material and a comparison of costs of common structural elements in residential buildings (horizontal and vertical confining elements) that show their benefits and competitiveness.

**Keywords:** Polymeric composites, reinforced polymer, fiberglass, corrosion, reinforced concrete.

## INTRODUCCIÓN

El litoral del Golfo de México de nuestro país se caracteriza por una gran actividad industrial y turística que ha generado el crecimiento de desarrollos habitacionales destinados a proveer de vivienda a las personas que laboran en dichos centros de trabajo. Estos desarrollos habitacionales representan la inversión de muchas horas de trabajo tanto de personas de bajos recursos como de clases más acomodadas. Inversiones cuya durabilidad no está asegurada debido a que son afectadas por la brisa marina e industrial que gradualmente penetra el concreto y daña el refuerzo de acero al corroerlo y el concreto mismo provocando su desprendimiento.

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, su resistencia adecuada para fines estructurales, la accesibilidad de su costo comparado con otros compuestos reforzados con fibra y su durabilidad por su resistencia a la corrosión (Bank, 2006). Sin embargo,

<sup>1</sup> Miembro de la Comisión de Estructuras del Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas.

al ser un material novedoso para América Latina, la falta de referencias en usos estructurales y el costo beneficio genera incertidumbre en la comunidad de ingenieros civiles para su adopción.

En Estados Unidos de América, la región Este y el Golfo han implementado el uso de PRFV para su uso en obra pública debido a su durabilidad y la Universidad de Miami realiza investigación continua de este material con fines estructurales y de durabilidad en puentes desde el año 2000. El Instituto Americano del Concreto a través de su código de diseño ACI-440-1R mantiene las recomendaciones de diseño actualizadas para este tipo de obras civiles y en particular la Asociación Americana de Carreteras y Transportes Oficiales del Estado AASHTO, también edita su correspondiente norma para el caso de puentes mediante el uso de PRFV (GFRP) y recientemente la ASTM publicó las normas de calidad ASTM D7205 aplicables a este tipo de materiales.

Los compuestos poliméricos han estado presentes en la construcción desde antes de los 90's, no obstante, el costo de estos materiales, como lo es la fibra de carbono (PRFC) y la de aramida (PRFA) resultaban inaccesibles en costo para el uso en la construcción común, siendo el PRFV el compuesto polimérico reforzado con fibra de vidrio el que ha mostrado el mejor costo beneficio al compararlo con las limitaciones del acero.

### INTERACCIONES QUE DAÑAN LAS ESTRUCTURAS (ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO)

Existen interacciones importantes con el medio ambiente a las que suelen estar expuestas las estructuras de concreto:

- Exposición a ambientes ácidos.
- Exposición a radiación ultravioleta.
- Exposición alcalina.
- Exposición a sales y ambientes marinos.

En el pasado lidiar con estos agentes ha llevado a buscar mejorar la resistencia del acero quien resulta el elemento más proclive a recibir el daño más significativo. Siendo que el concreto reforzado requiere precisamente de contar con un elemento capaz de soportar las tensiones a las que la estructura se somete, ha sido necesario mantener a salvo el acero mediante distintos tratamientos que lo preserven cuando menos durante la vida mínima considerada

al proyecto. Dentro de estos tratamientos podremos encontrar los galvanizados y el recubrimiento de epóxicos e incluso el uso de pilas galvánicas para mantener aislado el acero. No obstante, hoy día podemos considerar el uso de los compuestos poliméricos como una opción factible y competitiva.

No obstante, no todo es alentador con los materiales poliméricos, las barras de polímero reforzado con fibra (FRP) son susceptibles a variaciones en la intensidad y cambios de rigidez en presencia de entornos antes, durante y después de la construcción. Estos entornos pueden incluir agua, exposición a los rayos ultravioleta, temperatura elevada, soluciones alcalinas o ácidas y soluciones salinas. La resistencia y la rigidez pueden aumentar, disminuir o permanecer igual, dependiendo del material particular y las condiciones de exposición. Las propiedades de tracción y unión de las barras de FRP son los principales parámetros de interés para la construcción de concreto armado (ACI 440 1R , 2015).

Debido a lo anterior, diferentes investigadores han centrado su atención en determinar pruebas de deterioro acelerado que puedan garantizar su uso en todo tipo de ambientes. Los métodos de prueba para evaluar la durabilidad de las barras de FRP en soluciones alcalinas se presentan en ASTM D7705. Sin embargo, hasta el momento no existe evidencia de que los métodos acelerados para vidrio desnudo (donde solo una reacción química controla la degradación) se apliquen a compuestos PRFV, no obstante, existen diversos experimentos llevados a cabo en condiciones de campo que han mostrado resultados muy significativos en cuanto a la durabilidad en ambientes típicos como lo es la exposición a agua marina y el uso de sales para deshielo.

### Ácidos

En general las resinas epóxicas que constituyen muchas de las actuales matrices usadas en la fabricación de PRFV, suelen tener un adecuado comportamiento frente a ambientes ácidos, de ahí que el uso de las barras de PRFV se prefieran sobre el uso de las varillas de acero. Pero también las fibras de vidrio usadas en dichos compuestos pueden tener tipologías muy especializadas que proveen resistencia a ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico y fosfórico (Owen Corning, 2017). Es la razón por la que puede resultar complicado establecer la durabilidad de los

compuestos. El ACI 440.1R, no da referencia sobre este tipo de exposiciones, más si advierte sobre los efectos negativos que pudieran tener los agentes alcalinos sobre estas barras de PRFV.

### Radición Ultravioleta

La radiación ultravioleta, proveniente de la luz solar, ha resultado dañina para la mayoría de los polímeros expuestos, sin embargo, el daño suele circunscribirse a la película más superficial, ante exposiciones comunes y no suele ser progresivo una vez que el material se encuentra ahogado en el concreto. Lo anterior es consistente con el estudio realizado por Tomosawa y Nakatsuji (Tomosawa & Nakatsuji, 1997), en la que se expusieron barras con diferentes polímeros reforzados con fibras al aire libre y junto al océano para un lapso consistente con los procesos constructivos comunes, sin encontrar cambios significativos en la capacidad de tensión ni en el módulo elástico de las barras. No obstante, el ACI 440.1R, recomienda tomar las medidas necesarias en los procedimientos constructivos, para minimizar la exposición solar.

En general, podemos estimar que la pérdida de resistencia por exposición a los rayos U.V. solo serán perceptibles en exposiciones directas por periodos mayores a los 30 días y es posible que no alcancen el 1%, dato extrapolado de (Ortuño, 2008).

### Alcalinidad

Quizá el problema que mayor efecto puede tener sobre el PRFV no es ni el ácido ni la radiación solar, sino el efecto de los álcalis, este viejo problema del concreto al reaccionar con los agregados y el ambiente. Porter y Barnes (1998) (ACI 440.1R, 2015) evidencian el efecto nocivo de las soluciones acuosas con altos valores de alcalinidad ( $\text{PH}^2$  mayores a 12) sobre las barras de PRFV expuestas de forma directa en condiciones de laboratorio y que afectan principalmente su módulo elástico y resistencia a la tensión. Las temperaturas altas (mayores a  $40^\circ\text{C}$ ) en las soluciones intersticiales también parecen aumentar las afectaciones producidas por la alcalinidad ambiental. No obstante, la resina polimérica que protege las fibras de vidrio de la difusión de los perjudiciales iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) representa signi-

ficativamente la resistencia alcalina de las barras de PRFV, aun cuando, esta barrera puede no ser 100% segura (ACI 440 1R, 2015).

“Los efectos nocivos de las sustancias altamente alcalinas son capaces de provocar no solo la degradación de la matriz polimérica, sino también de desarmar la estructura de la fibra de vidrio hasta la lixiviación de estas” (Fergani, Benedetti, Guadagnini, Lynsdale, & Mias, 2017). Siendo que la temperatura y el medio acuoso juegan un papel importante en la reacción alcalina sobre el PRFV, es evidente que, durante el proceso de fraguado del concreto, cuyo PH oscila entre 12 y 13, puede ser capaz de generar deterioro en la superficie de las barras (Fergani, Benedetti, Guadagnini, Lynsdale, & Mias, 2017). Así mismo la porosidad y agrietamiento del concreto, faculta la posibilidad de una mayor interacción con estos agentes, durante la vida útil de los elementos.

No obstante lo anterior, estudios de campo realizados en 2010 y 2015 por (Gooranorimi, Gremel, Myers, & Antonio, 2015) y publicados en el ACI Journal y ResearchGate sobre puentes con 10 y 20 años de edad, donde se dejaron muestras testigo para poder evaluar el comportamiento del PRFV a través del tiempo, se encontró que la alcalinidad constante del concreto entre un PH de 12 y 13, “no tuvo efecto nocivo en resistencia de las barras y en la unión concreto-PRFV, presentándose intacta la matriz y la fibra”, lo cual a juicio de los investigadores, podría denunciar que las pruebas de intemperización acelerada, son demasiado conservadoras. Finalmente, aunque mucha investigación informó una pérdida significativa en la capacidad de tracción de las barras de PRFV (GFRP) expuestas a la solución de poros de concreto, un estudio de campo realizado por (Mufti, Onofrei, Benmokrane, & et al, 2007) et al, y (R., Cousin, & Benmokrane, 2009) et al, concluyeron que “el refuerzo de GFRP es duradero cuando está incrustado en concreto”.

Aún con los alentadores resultados de Gooranorimi y Nanni 2015, el ACI 440 considera basado en los resultados obtenidos en pruebas aceleradas una reducción del 20% al 25% para la resistencia de las barras expuestas mediante el uso de un Coeficiente ambiental (CE). La investigación que examina la durabilidad de diferentes productos basados en fibra de vidrio, incluidas las barras de refuerzo de PRFV (GFRP) de América del Norte, concluyen sobre re-

ducciones de la resistencia a la tracción en las barras de PRFV (GFRP) que van del 80 al 75 por ciento de los valores iniciales. Las reducciones de la rigidez a la tracción en las barras de GFRP estresadas y no sometidas a tensiones, también oscilan entre 0 y 20 por ciento en muchos casos (ACI 440 1R , 2015), por lo que los factores de diseño contemplados en el citado código, resultan al parecer adecuados para contemplar estas posibles pérdidas de capacidad.

Diversidad de estudios se continúan realizando para probar la durabilidad del PRFV expuesto a condiciones agresivas, siendo hasta el momento la que más preocupa las exposiciones directas a ambientes alcalinos con  $\text{PH} > 12\%$  y temperaturas por encima de los  $50^\circ\text{C}$ . Hasta el momento el uso del coeficiente ambiental (CE) parece funcionar muy bien para estimar la pérdida de resistencia dentro de la vida útil de la estructura y en condiciones de exposición típicas,  $7 < \text{PH} < 12$ ; sin embargo, algunos códigos pudieran sugerir coeficientes más conservadores a los que el ACI 440 propone.

### Salinidad Marina

La costumbre de trabajar con acero, nos ha llevado a pensar que la salinidad del agua puede constituir un problema para el concreto, sin embargo esto no necesariamente es así, la literatura técnica existente informa que la sal en el agua de mar pueden no tener efectos negativos significativos en las características del concreto endurecido y, si ocurren problemas de durabilidad, están relacionados principalmente con la corrosión del refuerzo de acero en lugar del efecto sobre las propiedades del concreto.

Una investigación realizada por (Usama & Nanni, 2017) informa sobre el comportamiento del concreto expuesto a agua marina indicando que mostró un aumento en la resistencia inicial y luego una disminución de 8% a 15% para el concreto de agua de mar. Así mismo menciona los resultados de otras investigaciones que acusan un aumento de capacidad no solo para edades tempranas sino también a largo plazo y el hecho que la resistencia a la compresión del concreto aumenta con el contenido de salinidad del agua de mezcla.

No obstante, lo halagüeño de lo anterior, la preocupación de algunos investigadores, entorno al uso de agua marina es su alcalinidad que suele presentarse con un PH en el rango de 8 a 10, y las tempe-

raturas marinas costeras, las cuales suelen fácilmente alcanzar más de  $40^\circ\text{C}$ . Aun cuando esta preocupación pudiera ser consistente con otras investigaciones orientadas a entornos alcalinos, el rango agresivo de alcalinidad parece presentarse sobre el PH de 12. Robert y Benmokrane sumergieron barras de PRFV (GFRP) envueltas en mortero en solución de NaCl al 3% a 23, 40, 50 y  $70^\circ\text{C}$  durante 365 días. Las barras se extrajeron del mortero y se probaron en términos de propiedades de tracción y degradación microestructural como una medida del rendimiento de durabilidad. Se demostró que la combinación del ambiente alcalino del concreto y la solución salina no tiene un efecto significativo en la durabilidad del refuerzo de GFRP incluso a altas temperaturas (Usama & Nanni, 2017)

Un programa de investigación realizado por la Universidad de Miami en Florida USA, encontró que el concreto de agua de mar (SEACON) mostró un rendimiento comparable e incluso mejor en términos de resistencia a la compresión contra el concreto convencional después de un año de curado en sala húmeda y agua de mar a  $60^\circ\text{C}$  como ambiente de acondicionamiento acelerado, respectivamente. Esto significa que las dos matrices de concreto que rodean las barras de PRFV (GFRP) presentaron casi las mismas propiedades mecánicas al término de la prueba. Así mismo, las propiedades de tracción de las barras incrustadas tanto en el concreto convencional como en el agua de mar son comparables después de un año de exposición a un acondicionamiento acelerado. Es mencionable, además, que el concreto de agua de mar parece proveer una mejora positiva en la resistencia al corte horizontal y transversal de las barras de PRFV (GFRP) incrustadas (Khatib & Nanni, 2017)

Con todo el ACI 440 (ACI 440 1R , 2015), menciona en su introducción y alcances que los compuestos poliméricos incluido el PRFV (GFRP) son no magnéticos y no se corroen.

De acuerdo con estos antecedentes, recientemente han sido aprobados diversos proyectos públicos utilizando PRFV como elementos de refuerzo, especialmente en obras expuestas a sales para deshielo, agua y brisa marina y en general zonas pantanosas y lagos (ACMA, 2018). Así mismo la Asociación de fabricantes de compuestos poliméricos de América (ACMA) dio un paso importante para abordar ese

problema durante un taller en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) que sentó las bases estratégicas que describe acciones que la industria, la academia y el Congreso pueden tomar para ayudar a los ingenieros y los diseñadores construyen con más confianza con los compuestos poliméricos (FRP). Algunas de las necesidades identificadas en el informe incluyen la agregación, la validación y la difusión de los estándares existentes, el desarrollo de pruebas avanzadas de durabilidad y modelos de desempeño, el aumento de la educación y la capacitación (NIST, 2017).

### COSTOS

Otro problema que suele surgir con la adquisición y uso de las nuevas tecnologías, especialmente aquellas que promueven algún beneficio técnico es el costo. En México la mayor parte de la obra de vivienda popular se desarrolla a base de muros de mampostería de tabiques confinados mediante castillos y dalas. Estos elementos estructurales suelen fabricarse a base de varillas de 3/8" y estribos de 1/4", sin embargo, existen otros sistemas electrosoldados que reúnen las características mínimas normativas que también suelen usarse de manera común para este tipo de obras. Las barras de PRFV, representan entre estos otra opción competitiva con la ventaja de su ligereza, resistencia a la corrosión y durabilidad.

Es importante mencionar que las barras de PRFV consideradas (Ilustración 1) garantizan una resistencia a la tensión de hasta 8,000 kg/cm<sup>2</sup>, poseen un peso específico menor a los 2,000 kg/m<sup>3</sup> lo que las hace pesar la cuarta parte de una barra de acero de similar diámetro y es magnéticamente inerte, además cumplen con las Normas de Construcción de la Administración Pública del Distrito Federal Libro 4 Tomo III Calidad de los materiales para Obra Civil. Materiales Compuestos, Capítulo 51 (Administración Pública del Distrito Federal CDMX, 2018).

Por la razón anterior, se consideró factible el comparativo del sistema constructivo tradicional contra el uso de barras de PRFV de una marca de recién ingreso a México.



Ilustración 1. Barras de PRFV con dibujo helicoidal

Características de las barras consideradas (Ilustración 2):

| Características   | Valor       |
|---|-------------|
| <b>MECÁNICAS</b>  |             |
| Límite de resistencia a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )           | 8,000       |
| Alargamiento relativo (%)                                       | 1.6-2.2     |
| Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )                     | 500,000     |
| Límite de resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )        | 4,000       |
| Límite de resistencia a corte transversal (kg/cm <sup>2</sup> ) | 1,500       |
| <b>FÍSICO - QUÍMICAS</b>  |             |
| Oxidación   | No presenta |
| Conducción térmica  | No presenta |
| Conducción eléctrica  | Dieléctrico |

Ilustración 2. Tabla de Propiedades del PRFV

En el análisis de costo se tomó en consideración el impacto de las operaciones de carga y descarga, que está altamente relacionado con el pre-habilitado y bajo peso del PRFV, dividiéndose las matrices de análisis de costos y rendimientos en habilitado y armado para facilitar su interpretación (Ilustración 3 y 4):

| ACERO                     |    |      |         |                 |
|---------------------------|----|------|---------|-----------------|
| CONCEPTO                  | U  | CANT | PU      | IMPORTE         |
| <b>MANO DE OBRA</b>       |    |      |         |                 |
| Descarga de acero         | Kg | 3.15 | \$ 1.65 | \$ 5.18         |
| Habilitado de Acero No. 2 | Kg | 0.92 | \$ 2.67 | \$ 2.46         |
| Habilitado de Acero No. 3 | Kg | 2.23 | \$ 2.23 | \$ 4.96         |
| Armado de Acero No. 2     | Kg | 0.92 | \$ 4.01 | \$ 3.69         |
| Armado de Acero No. 3     | Kg | 2.23 | \$ 3.34 | \$ 7.44         |
| <b>MATERIALES</b>         |    |      |         |                 |
| Acero No.2 (alambros)     | m  | 3.71 | \$ 3.47 | \$ 12.89        |
| Acero No.3                | m  | 4.00 | \$ 6.99 | \$ 27.96        |
| <b>Costo Total</b>        |    |      |         | <b>\$ 64.57</b> |

Ilustración 3. Análisis de costos de armaduras de acero

| ARMADURA DE PRFV           |     |      |         |                 |
|----------------------------|-----|------|---------|-----------------|
| CONCEPTO                   | U   | CANT | PU      | IMPORTE         |
| <b>MANO DE OBRA</b>        |     |      |         |                 |
| Descarga de PRFV           | Kg  | 0.31 | \$ 1.19 | \$ 0.36         |
| Armado de PRFV 4 a 12 mm   | Kg  | 0.31 | \$ 6.50 | \$ 2.00         |
| <b>MATERIALES</b>          |     |      |         |                 |
| Barra de 6 mm PRFV         | ml  | 4.00 | \$ 7.09 | \$ 28.37        |
| Estribo 11X16 de 4 mm PRFV | pza | 5.17 | \$ 4.50 | \$ 23.25        |
| <b>Costo Total</b>         |     |      |         | <b>\$ 53.98</b> |

Ilustración 4. Análisis de costos de armaduras de PRFV

De las citadas matrices de análisis podemos observar que el uso de estas armaduras de PRFV, son una opción que pueden representar una mejora en costos contra las armaduras de acero tradicionales, aunque no necesariamente lo son con relación a armaduras electrosoldadas existentes en el mercado. No obstante, las armaduras de PRFV presentan la ventaja de ser menos proclives a corroerse y pudieran significar un beneficio en el rendimiento de la inversión en el largo plazo.

## CONCLUSIÓN

Hemos podido constatar de acuerdo al (ACI 440 1R, 2015) y a la bibliografía citada en esta investigación documental y las referencias en ellas expuesta, que los compuestos poliméricos y particularmente el polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) representan una opción factible y competitiva para la construcción de edificaciones en zonas costeras, la cual para algunos casos no parezca atractivo en el gasto de inversión inicial pero al sumar los ahorros generados por el nulo mantenimiento que demanda su durabilidad tendremos un sistema rentable.

## 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.
- ACMA. (8 de 8 de 2018). AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. Obtenido de <https://acmanet.org/2018/08/landmark-legislation-will-drive-composite-infrastructure-solutions/>
- Bank, L. C. (2006). Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- CdMx (Ed.). (2018). Normas de Construcción de la Administración Pública del Distrito Federal Libro 4 Tomo III - Cap. 51. Obtenido de 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.
- ACMA. (8 de 8 de 2018). AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. Obtenido de <https://acmanet.org/2018/08/landmark-legislation-will-drive-composite-infrastructure-solutions/>
- Bank, L. C. (2006). Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- CdMx (Ed.). (2018). Normas de Construcción de la Administración Pública del Distrito Federal Libro 4 Tomo III - Cap. 51. Obtenido de [http://www3.contraloriadf.gob.mx/prontuario/index.php/normativas/Template/ver\\_mas/63006/39/1/0](http://www3.contraloriadf.gob.mx/prontuario/index.php/normativas/Template/ver_mas/63006/39/1/0)
- Ebead, U. A., & Antonio, N. (2017). Applicability of Using seawater accompanied by FRP Reinforcement in Concrete Structures. Miami Fl.: Universidad de Miami.
- Fergani, H., Benedetti, M. D., Guadagnini, M., Lynsdale, C., & Mias, C. (2017). Estudio de Caracterización y Durabilidad de barras de GFRP (PRFV) expuesta a entornos severos bajo cargas sostenidas. Journal Research Gate.
- 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.
- Gooranorimi, O., Myer, J. J., & Nanni, A. (2017). GFRP Reinforcements in Box Culvert Bridge: A Case Study After Two Decades of Service. West Conshohocken. doi:DOI: 10.1520/STP160120160119
- Khatib, M., & Nanni, A. (2017). Durability of GFRP Reinforcement in SEACON. CDCC 2017 - The Fifth International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation of Structures. Quebec, Canadá.
- Mufti, A., Onofrei, M., Benmokrane, B., & et al. (2007). Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete. Canadian Journal of Civil Engineering. doi:10.1139/l06-138
- Nanni, A., Luca, A. d., & Jawahery, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars, Mechanics and Design. New York: CRC Press.
- NIST. (20 de 12 de 2017). National Institute of Standards and Technology. Obtenido de <https://www.nist.gov/publica>

tions/road-mapping-workshop-report-overcoming-barriers-adoption-composites-sustainable?fbclid=IwAR2Hf8lmivMnp-9gGpMR\_bbV0U\_M2CffoT6bHS3VHBVdc-prpk7plCoJO96c

- Nolan, S., Rossini, M., & Nanni, A. (2017). Seawalls, SEACON, and Sustainability in the Sunshine State. Washinton D.C.: Conference: 97th Transportation Research Board Annual Meeting (TRB 2018).
- Ortuño, S. A. (2008). Tesis: Fibra de Vidrio, Pruebas y aplicaciones. México: IPN Culhuacán.
- Owen Corning. (2017). Owen Corning. Obtenido de <http://www.owenscorning.com.br/pdf/guia-corrosao-es.pdf>
- 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)
- Redaelli, E., Arrigoni, A., Nanni, A., & al, e. (2019). Culvert Prototype Made with Seawater Concrete: Materials Characterization, Monitoring, and Environmental Impact. *Politecnico de Milano*. doi:10.1520/ACEM20180114
- Tomosawa, & Nakatsuji. (1997). Evaluation of the ACM reinforcement durability by exposure test in proceedings. 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Sapporo Japón.