

FRP Reinforced Concrete Around the World, Part 1

Initiatives for acceptance and safe implementation: Brazil, Iran, Italy, and New Zealand

This two-part article provides a snapshot of activities taking place around the world intended to make the technology of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures available to the construction industry. The series is sponsored by NEx: An ACI Center of Excellence for Nonmetallic Building Materials (www.nonmetallic.org) and was coordinated by Antonio Nanni, University of Miami, Coral Gables, FL, USA. The authors represent the countries covered in each article. For Part 1, they include:

- **Brazil:** Daniel C.T. Cardoso, Nádia C.S. Forti, Roberto Christ, and Marco A. Carnio;
- **Iran:** Erfan Najaf and Amirhossein Mohammadi;
- **Italy:** Luigi Ascione; and
- **New Zealand:** Pete Renshaw.

Brazil

A single Brazilian producer has supplied FRP reinforcing bars over much of the last two decades, with main applications related to soft-eyes in tunnel construction. More recently, however, interest in FRP reinforcement has grown as the manufacturing costs for FRP products have been reduced, making FRP products competitive relative to conventional steel. Consequently, more producers have started operations in the country and have contributed to identifying and opening new market opportunities. Recent applications have included pavements, slabs-on-ground, bridges, and housing structures. The research volume has also increased significantly in recent years, and many universities and institutes are currently engaged in studies related to the topic, supported mainly by governmental funding agencies.

In 2015, the Brazilian Concrete Institute (IBRACON) and the Structural Engineering Brazilian Association (ABECE) set up Technical Committee 303 (CT-303), intended to promote and to integrate the stakeholders involved with the use of nonconventional reinforcement for concrete. CT-303 was divided into five working groups (WGs) to develop recommended practices with guidelines for characterization, quality assurance, and structural design related to fiber-reinforced concrete (FRC); ultra-high-performance concrete; and the use of FRP for internal and external reinforcement of concrete structures. Other global objectives of the committee

were assisting the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) with the development of Brazilian standards. These standards have spread knowledge about different materials and helped to keep structural engineers updated technically. It is also worth mentioning that public works and governmental funding for civil construction in Brazil usually refer to a national database for materials and services, which presently does not include FRP bars. The release of national technical documentation will also facilitate the inclusion of the material in the database and its consequent widespread adoption.

WG-3 was responsible for internal reinforcement of concrete structures with FRP bars and has recently concluded the elaboration of a recommended practice—hereafter called “Practice”—that is about to be released by IBRACON.¹ The document is divided into two parts: Structural Design of FRP Reinforced Concrete; and Specification, Classification, and Characterization of FRP Bars. Both parts accounted for recent advances reported in the literature and results obtained by Brazilian researchers, as well as procedures and guidelines included in codes and technical reports from other countries (CNR-DT 203/2006²; CAN/CSA S806-12³; ACI 440.1R-15⁴; and ASTM D7957/D7957M-17⁵). For ease of acceptance by the industry, the document structure and many equations and recommendations followed the current national standard for the Design and Construction of Reinforced and Prestressed Concrete Structures (NBR 6118:2014).⁶ This strategy will also allow the Practice to be incorporated into NBR 6118 in the future, leading to a single code related to the design of concrete structures.

The Practice considers solid round bars produced with a thermoset polymer matrix and reinforcement made with glass, basalt, carbon, or aramid fibers (GFRP, BFRP, CFRP, and AFRP, respectively), with a minimum of 75 wt%. Different surface configurations are allowed for primary structural applications—except smooth round—and the minimum characteristic properties (5% quantile) to be met by the bars are presented in Table 1. Higher values can be considered for design if correctly verified by standardized tests. These are defined in the document and generally follow international recommendations, with some modifications to allow the tests to be carried out using the equipment usually available

Table 1:
Minimum required properties for the FRP bars

Property	GFRP	BFRP	CFRP	AFRP
Tensile strength, MPa*	800		1400	
Compressive strength, MPa	300			
Shear strength, MPa	150		350	190
Modulus of elasticity, GPa	50		130	70
Bond strength, MPa*	12			
Glass transition temperature, T_g , °C	100			

*Maximum strength loss of 25% and 10%, respectively, for tensile and bond strength after accelerated aging test in alkaline media

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 GPa = 145 ksi; °F = 1.8 × °C + 32

countrywide. The document also provides guidance to define the bar nominal diameter (in mm) based on the measured cross-sectional area.

With respect to field acceptance, the Practice specifies that at least 10% of the material volume produced for each batch (less than 10 tonnes [11 tons]) must be visually inspected for imperfections and flaws. Each batch must also have main characteristic properties determined for a minimum of five samples, which shall meet the minimum properties listed in Table 1. Recommendations for identification, transportation, and storage are also provided.

In addition to the type of bars previously mentioned, the scope of the structural design includes:

- Nonprestressed reinforcement (“passive”);
- Structural concrete grades with strength ranging from 20 to 90 MPa (2900 to 13,000 psi);
- Use of FRC for crack control or the improvement of ductility through concrete confinement;
- Combination of nonmetallic and steel bars for ductility or other specific loading requirements; and
- Temperatures up to 60°C (140°F).

The Practice describes the mechanisms of degradation of FRP and presents specific requirements for the selection of minimum concrete grade and concrete cover based on the environmental conditions. However, due to the superior corrosion resistance of FRP, lower values for these parameters can also be adopted if verified by accelerated aging tests. WG-3 recognizes that the acceptance of the material by the community depends on the dissemination of the concept that FRP is not meant to be a direct substitute for conventional steel in terms of mechanical properties but when durability and maintenance criteria are dominant.

Another relevant issue discussed in the document is related to the structural analysis of FRP reinforced concrete (RC) structures. Due to the lack of ductility of the material, elastoplastic or elastic models with redistribution structural analyses cannot be used. Moreover, the importance of considering the appropriate distribution of cracked stiffness in the elastic analysis is highlighted for a more accurate distribution of internal forces along member length—load

model error increases if gross cross-sectional properties are adopted. Acknowledging that ductility may be a design requirement of major concern, the Practice presents some well-known strategies for ductility, such as the use of metallic bars (noncorrosive or coated) or confinement of concrete in compression zones with dispersed short fibers or stirrups—the latter is valid in the case of beams with compression-dominated failure.

Finally, guidelines are provided for structural verification of both ultimate limit state (ULS) and serviceability

limit state (SLS). For ULS, the document includes provisions for bending, combined bending and axial force, and shear and torsion. The use of bars in compression is allowed if appropriate restraint against bar buckling is ensured. To meet the current format of NBR 6118 (which resembles European standards), the partial factors for loading and for the concrete strength remained unchanged, while a single factor associated with the strength of FRP bars was obtained for a target reliability index of 3.5. For beam design in bending, the partial factors are applied directly over the material properties, regardless of the reinforcement ratio adopted with respect to the balanced ratio—this strategy is supported by the work of He and Qiu.⁷ Recommendations with respect to construction details, minimum reinforcement ratios, and design of regions with discontinuities are also presented in the document.

The release of the Practice will contribute to disseminating the knowledge, facilitating the acceptance of FRP by civil engineers, and raising relevant discussions on the topic. WG-3 is aware that the work must continue, such as the discussion of behavior under fire.

Iran

In Iran, application of FRP materials for strengthening purposes has drastically increased, and most of the community, including engineers, contractors, and owners, are familiar with the features of these materials. However, nonconventional bars made with FRP obtained their popularity only in recent years. FRP bars are currently being used in limited projects such as tunneling, foundations, and floors built in aggressive environments, offshore structures, and construction projects sensitive to electromagnetic waves such as magnetic resonance imaging (MRI) centers. The declining price of FRP bars on Iran’s market has helped accelerate the application of this reinforcement. There are at least three active local manufacturers producing sand-coated and ribbed FRP bars that were tested and qualified using international guidelines such as ACI 440.3R-12⁸ and ISO 10406-1.⁹

It should be noted that Iran has 2815 km (1750 miles) of coastline and 21 inhabited coastal islands with highly aggressive environments. Oil industries located in these

regions require construction with low maintenance costs and high longevity, which promises increasing demand for FRP bars within the country.

Community awareness for using FRP bars in RC structures is progressing and the real potential of this material in the construction industry has not been mobilized yet. The Iranian national code for RC structures (MMS9:2016¹⁰) allows restricted use of FRP bars; however, it fails to suggest the minimum required information for the design. To this end, practitioners in Iran are using international codes and guidelines, such as ACI 440.1R and *fib* bulletin 40,¹¹ technical reports, and other publications as a complement to their national code.

Italy

In Italy, attention to FRP reinforcement has been manifested for some time and the scientific and technical communities in the country helped to draft a technical document on the topic, CNR-DT 203/2006, published in 2007 by the National Research Council (CNR in Italian). However, the Technical Standards for Construction issued by the Ministry of Infrastructure and Transportation (MIT) have so far not allowed unrestricted use. The use is subject to approval by the Superior Council of Public Works on a case-by-case basis. In 2018, MIT set up working groups for the drafting of two guidelines: one on the identification, qualification, and acceptance of FRP bars (QGL) and another on the design of concrete structures reinforced with such bars (DGL).

The working groups have released two draft guidelines, which are currently being reviewed by a rapporteur commission and discussed by the Assembly of the Superior Council of Public Works before approval, with amendments, and subsequent publication. The contents of the two guidelines are summarized in Reference 12.

The purpose of the QGL is to provide the procedures for the identification, qualification, and acceptance of straight bars, bent bars, or bars with terminal anchorage. These products are produced with thermosetting resins and have at least a 50% volumetric fraction of continuous basalt, carbon, or glass fibers.

The production process is typically pultrusion, although the guideline does not exclude different production processes that can be proposed by the manufacturers. The definition of the production process includes the type of surface quality of the bar, provided by the individual manufacturer to improve its bond.

The cross sections of the longitudinal bars and stirrups can be circular or rectangular in shape. The nominal diameter of the circular sections shall vary from 5 to 32 mm (0.2 to 1.3 in.), including the two extreme values. The width of the rectangular cross sections, coinciding with the maximum size of the section, should not be larger than 40 mm (1.6 in.).

The manufacturers must provide:

- The production process in the plant, in terms of organization and quality control, ensured by appropriate production

control tests (FPC, Factory Production Control); and

- The physical-morphological and mechanical characteristics of the bars, determined through suitable type tests (TT, Type Testing).

In-place acceptance checks on the bars:

- Are mandatory and the responsibility of the construction manager; and
- Must be carried out within each batch and must cover all types of products supplied.

The sampling must be done by the construction manager or a delegate who must ensure, by means of appropriate acronyms and indelible labels, the traceability of the samples regarding the supply and location, and intended use on site.

FRP bars that can be used for the purposes of the DGL must meet the requirements in the QGL on identification, qualification, and acceptance and must also have:

- A characteristic value of the tensile strength of not less than 400 MPa (58,000 psi); and
- An average value of the tensile modulus in the longitudinal direction of not less than 100 GPa (14,500 ksi) for bars with carbon fibers and 35 GPa (5000 ksi) for those with glass or basalt fibers.

The design of RC structures with passive FRP bars must meet strength and operation requirements.

Special attention is required in structural analysis because the almost total absence of ductility of RC structures with FRP bars must be taken into due consideration. In particular, elastoplastic or elastic models with redistribution structural analyses cannot be adopted.

As a rule, specific fire resistance checks of the structural elements must be carried out, in accordance with current fire regulations. They shall take into account the value of the glass transition temperature, T_g .

Some structural types, such as bridge slabs and more generally those that do not bound closed volumes within which a fire can flare up, are affected to a limited extent by fire resistance problems and do not require specific checks.

The DGL provides design rules for bending stresses (both for ULS and SLS), axial and bending, punching, shear, and torsion. Construction details and minimum reinforcement ratios are also provided.

New Zealand

There has been limited use of GFRP reinforcing bars within New Zealand to date. The use of GFRP bars for temporary structures such as soft-eyes in tunnel construction is a normal practice, although it should be noted that the number of tunnels constructed in New Zealand is relatively low due to the small size and population of the country. However, the GFRP reinforcement has had very limited use in permanent structures.

There is no New Zealand standard or design code permitting the use of GFRP bars, nor is there a New Zealand specification for GFRP bars. This has likely been a limiting factor in adoption. The jobs that have used GFRP



Fig. 1: Precast FRP-RC retaining walls at Kaikoura, New Zealand

reinforcement have generally been designed based on ACI 440.1R-15. However, without the support of a national code, engineers are naturally reluctant to select GFRP as a reinforcement solution. It is predicted that New Zealand engineers who wish to make use of GFRP bars will continue to rely on ACI guides and codes for the design of GFRP RC structures for the foreseeable future.

University research projects

Canterbury University and the University of Auckland both have strong structural engineering departments with an interest in GFRP reinforcing bars and have undertaken research projects at both masters and PhD levels. With New Zealand's location on the Pacific rim and with earthquakes being a regular occurrence in the country, the universities also have significant experience in research related to seismic engineering design. It is anticipated that both universities will continue to support research projects for GFRP reinforcing bars, with a focus on seismic applications.

Recent project examples

For both, the Auckland Central Interceptor Tunnel and Auckland Central Rail Link Tunnel projects, GFRP reinforcing bars were selected for the soft-eye construction to allow a tunnel boring machine (TBM) to cut through the concrete wall without damage to the machine from cutting steel reinforcement.

Various recent electrical substations have been constructed using GFRP reinforcement in the ground slabs supporting electrical equipment with high electrical fields, thus taking advantage of the nonconductive and nonelectromagnetic properties of GFRP.

The Kaikoura State Highway and Rail Line had to be repaired after an earthquake of magnitude 7.8 struck the South Island of New Zealand, close to the town of Kaikoura in 2016. This caused major damage to the main North-South state highway and railway line. The highway and railway are in the coastal area. The reconstruction of these assets was the largest infrastructure repair project in the history of New Zealand (Fig. 1). Due to the coastal location and associated risk of corrosion, GFRP bars were selected to reinforce all precast retaining wall sections of the rebuild.

Many historic buildings damaged by earthquakes have

been reinforced using GFRP bars. Also, historic buildings identified to be at risk of damage in future earthquakes have been reinforced with either GFRP bars or a combination of GFRP and steel reinforcement. A historic wharf built in the 1940s is also under repair, using GFRP reinforcing bars to eliminate corrosion in the intertidal zone.

References

1. Cardoso, D.C.T.; Carnio, M.A.; Forti, N.C.S.; and Christ, R., "Recommended Practice IBRACON: Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforced Concrete Structures," first edition, IBRACON, São Paulo, Brazil, 2021. (in production)
2. "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars," CNR-DT 203/2006, CNR (National Research Council), Rome, Italy, 2007, 35 pp.
3. CAN/CSA S806-12, "Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers," CSA Group, Toronto, ON, Canada, 2012, 198 pp.
4. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 88 pp.
5. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 pp.
6. NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 6118:2014, "Projeto de estruturas de concreto—Procedimento (Design of Concrete Structures—Procedure)," Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2014, 256 pp. (in Portuguese)
7. He, Z., and Qiu, F., "Probabilistic Assessment on Flexural Capacity of GFRP-Reinforced Concrete Beams Designed by Guideline ACI 440.1 R-06," *Construction and Building Materials*, V. 25, No. 4, 2011, pp. 1663-1670.
8. ACI Committee 440, "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI 440.3R-12)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2012, 23 pp.
9. ISO 10406-1:2008, "Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement of Concrete—Test Methods—Part 1: FRP Bars and Grids," International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2008, 40 pp.
10. Iranian National Building Codes Compilation Office, MMS9:2016, "Iranian National Building Code, Part 9: Reinforced Concrete Buildings Design," Ministry of Housing and Urban Development (MHDU), Tehran, Iran, 2016.
11. *fib* Bulletin No. 40: "FRP Reinforcement in RC Structures," International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, Switzerland, 2007, 160 pp.
12. Aiello, M.A.; Ascione, L.; D'Antino, T.; Frassine, R.; Lignola, G.P.; Poggi, C.; and Prota, A., "Reinforced Concrete with FRP Bars: The Italian State of Technical Normative," *Structural*, No. 237, Sept.-Oct. 2021, www.structuralweb.it/cms/it4-magazine.asp?pag=articoli.asp&idCopertina=105.

Selected for reader interest by the editors.

Concreto reforzado con FRP alrededor del mundo, parte 1

Iniciativas para implementación segura y aceptación: Brasil, Irán, Italia, y Nueva Zelandia

Este artículo de dos partes, provee solo una muestra de las actividades que están ocurriendo alrededor del mundo con el fin de mostrar la tecnología de los refuerzos con fibras de polímeros (FRP por sus siglas en inglés) y su disponibilidad para el refuerzo de estructuras de concreto en la industria de la construcción. Esta serie esta auspiciada por NEx: Un Centro de Excelencia para los Materiales No-Metálicos de Construcción (www.nonmetallic.org) y coordinado por Antonio Nanni de la Universidad de Miami, Coral Gables, FL, EE. UU. Los autores representan los países presentes en cada artículo. Para la Parte 1 están incluidos:

- Brasil: Daniel C.T. Cardoso, Nádia C.S. Forti, Roberto Christ, y Marco A. Carnio;
- Irán: Erfan Najaf y Amirhossein Mohammadi;
- Italia: Luigi Ascione; y
- Nueva Zelandia: Pete Renshaw.

Brasil

Por las pasadas dos décadas un solo productor brasileño ha sido el proveedor de barras de refuerzos FRP, con la aplicación principal en la construcción de túneles. Sin embargo, en tiempos recientes, el interés por FRP ha ido en aumento a medida que el costo de manufactura de este producto ha disminuido, por lo que se ha convertido

en una competencia al refuerzo convencional que es el acero. Por consecuencia, los fabricantes han comenzado la producción y operaciones en el país, creando nuevas oportunidades en el mercado. Aplicaciones recientes incluyen pavimentos, losas, puentes y estructuras de vivienda. De igual manera el volumen de investigaciones ha incrementado significativamente en los pasados años y muchas universidades e instituciones están comprometidas en el estudio de temas relacionados, respaldados principalmente por fondos gubernamentales.

En el 2015, el Instituto Brasileño del Concreto (IBRACON) y la Asociación Brasileña de Ingenieros Estructurales (ABECE) constituyo el Comité Técnico 303 (CT-303), con la intención de promover la integración de los socios y su interés por el uso de materiales no convencionales como refuerzo en el concreto. El CT-303 fue dividido en 5 Grupos de Trabajo (GT) para desarrollar practicas recomendadas con guías de caracterización, control de calidad, y el diseño estructural que incorpore concreto reforzado por fibras (FRC por sus siglas en inglés); concreto con alto rendimiento; el uso interno y externo de FRP como refuerzo en estructuras de concreto. Otros objetivos globales del comité son la asistencia a la Asociación Brasileña de Estándares Técnicos (ABNT) con el desarrollo de estándares brasileño. Estos estándares han regado el conocimiento de los diferentes materiales y ha ayudado a los ingenieros estructurales a mantenerse actualizados técnicamente.

Vale la pena mencionar que usualmente las obras publicas y fondos gubernamentales para la construcción civil en Brasil usualmente se refieren a una base de datos nacional para los materiales y servicios, la que actualmente no incluye barras FRP. El comunicado nacional de documentación técnica también facilitará la inclusión de materiales en la base de datos y por consiguiente la adopción global del mismo.

El GT-3 represento el tema de refuerzo interno de FRP en estructuras de concreto y recientemente concluyo la elaboración de recomendaciones de prácticas – ahora en adelante llamado “Prácticas”- las cuales serán publicadas por IBRACON.¹ El documento esta dividido en 2 partes: Diseño Estructural de Concreto Reforzado por FRP; Especificación, Clasificación, y Caracterización de Barras de FRP. Ambas partes incluyen los avances recientes reportados por la literatura y resultados obtenidos por investigadores brasileño, al igual que procedimientos y guías incluidos en códigos y reportes técnicos de otros países (CNR-DT 203/2006²; CAN/CSA S806-12³; ACI 440.1R-15⁴; y ASTM D7957/D7957M-17⁵). Para la fácil aceptación en la industria, la estructura del documento y muchas de la ecuaciones y recomendaciones siguen los estándares actuales para el Diseño y construcción de Estructuras de Concreto Reforzadas y Pretensadas (NBR 6118:2014).⁶ Esta estrategia permitirá que la Practica se pueda incorporar en el NBR 6118 en algún futuro, llevando a que solo haya un código de diseño para estructuras de concreto.

La Practica considera barras solidas redondas producidas con una matriz de polímeros termoestables y refuerzo hecho con vidrio, basalto, carbón o fibras de aramida (GFRP, BFRP, CFRP, y AFRP, respectivamente), con un mínimo de 75wt%. Distintas configuraciones de superficies son permitidas para la aplicación primaria -con excepción de la redonda lisa- y las características mínimas de las propiedades (cuantil de 5%) para las barras son presentadas en la Tabla 1. Se pueden considerar valores mayores para diseño siempre y cuando se verifiquen correctamente por pruebas estandarizadas. Estas son definidas en el documento y generalmente siguen las

recomendaciones internacionales, con ciertas modificaciones para permitir que las pruebas se lleven a cabo utilizando equipos usualmente disponibles globalmente. El documento también provee guías para definir los diámetros nominales (en mm) basados en el área seccional.

Tabla 1: Propiedades mínimas para barras FRP

Propiedad	GFRP	BFRP	CFRP	AFRP
Esfuerzo en tensión, MPa	800		1400	
Esfuerzo en compresión, MPa	300			
Esfuerzo cortante, MPa	150		350	190
Módulo de elasticidad, GPa	50		130	70
Esfuerzo de adherencia, MPa	12			
Valores de transición de temperatura del vidrio T _g , °C	100			

Perdida máxima de esfuerzo de 25% y 10% respectivamente, para esfuerzo de tensión y adherencia después de prueba acelerada de envejecimiento en medio alcalino Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 GPa = 145 ksi; °F = 1.8 × °C + 32

Respecto a la aceptación en el campo, la Práctica especifica que por lo menos un 10% del volumen del material producido para cada lote (menos de 10 toneladas métricas [11 toneladas]) tienen que ser inspeccionadas visualmente de imperfecciones y defectos. Cada lote tendrá que cumplir con las principales propiedades de características determinadas por al menos 5 muestras, de las cuales tendrán que cumplir con las propiedades mínimas establecidas en la Tabla 1. Recomendaciones para la identificación, transportación, y almacenamiento también son previstas.

Adicional a los tipos de barras previamente mencionados, el alcance de diseño estructural incluye:

- Refuerzo no pretensado (“pasivo”);
- Grado de concreto estructural con rangos de 20 a 90 MPa (2900 a 13000 psi);
- El uso de FRC para el control de fisuras o el mejoramiento de ductilidad a través del confinamiento del concreto;
- La combinación de barras no-metálicas y metálicas para ductilidad u otros requisitos de cargas;
- Temperaturas hasta 60°C (140 °F)

Basado en las condiciones ambientales la Práctica describe los mecanismos de degradación del FRP y presenta los requisitos específicos para la selección mínima del grado del concreto y su cobertura. No obstante, debido a la resistencia superior del FRP a la corrosión, se pueden adoptar valores menores para estos parámetros, siempre y cuando se verifique por pruebas aceleradas de tiempo. GT-3 reconoce que la aceptación de este material por la comunidad depende en la diseminación del concepto que FRP no es la sustitución directa del acero convencional en términos de propiedades mecánicas, pero si cuando la durabilidad y mantenimiento son criterios dominantes.

Otro tema relevante en la discusión del documento es el análisis estructural de estructuras reforzadas por FRP. Debido a la falta de ductilidad del material, no se pueden utilizar modelos elastoplástico o elásticos para el análisis de redistribución estructural. Además, el análisis elástico es resaltado con la importancia de considerar la distribución apropiada de rigidez para una distribución precisa de las cargas internas a lo largo de los miembros, los errores en los modelos de cargas incrementan si se adoptan propiedades masivas de sección. Reconociendo que la ductilidad puede ser un requisito de diseño sumamente importante, la Práctica presenta algunas estrategias para ductilidad, tales como el uso de barras metálicas (no-corrosivas o recubiertas) o el confinamiento del concreto en zonas de compresión con fibras cortas o estribos – la última es valido en casos donde domine la falla por compresión.

Finalmente, se proveen guías para la verificación estructural del estado límite máximo (ULS por sus siglas en ingles) y del estado límite de utilidad (SLS por sus siglas en ingles). Para ULS, el documento incluye provisiones para el doblez, doblez combinado y fuerza axial, y cortante y torsión. El uso de barras en compresión es permitido si la restricción contra el pandeo de la barra es apropiada. Para cumplir con el formato actual del NBR 6118 (el cual se parece a los estándares europeos), los factores parciales para las cargas y la fuerza del concreto no se cambiaron, mientras que un solo factor asociado a la fuerza del FRP fue obtenido con un índice de confiabilidad de 3.5. Para el diseño de vigas en doblez, los factores parciales son aplicados directamente sobre las propiedades de los materiales, independientemente de las relaciones de refuerzo adoptadas respecto de la relación balanceada- esta estrategia es respaldada por el trabajo de He y Qiu.⁷ En el documento también se presentan recomendaciones respecto a los detalles de construcción, razones mínimas de refuerzos, y diseño de regiones discontinuadas.

La publicación de la Práctica contribuirá a la diseminación del conocimiento, aceptación del FRP por ingenieros civiles, y el alza en la discusión del tema. El GT-3 está consciente que el trabajo debe continuar, al igual que la discusión del comportamiento bajo fuego.

Irán

En Irán, la aplicación de materiales FRP para propósitos de fortalecimiento ha incrementado drásticamente, y la mayor parte de la comunidad, incluyendo ingenieros, contratistas, y dueños, están familiarizados con las características de estos materiales. No obstante, la popularidad de barras no-convencionales hechas con FRP fue alcanzada en los pasados años. Actualmente, el uso de las barras de FRP han sido limitadas para la construcción de túneles, fundaciones y pisos en ambientes agresivos, estructuras costa afuera, y en proyectos sensitivos a ondas electromagnéticas como lo son en centros de imágenes de resonancia magnética (MRI por sus siglas en ingles). La caída del precio del

FRP en Irán ha acelerado la aplicación de este tipo de refuerzo. Actualmente hay al menos tres fabricantes locales que producen barras FRP cubiertas de arena o corrugadas, y las cuales están probadas y cualificadas utilizando guías internacionales tales como ACI 440.3R-12⁸ e ISO 10406-1.⁹

Se debe tomar en cuenta que Irán tiene 2815 km (1750 millas) de costa y 21 islas habitadas con ambientes agresivos. Industria de petróleo en estas regiones exigen construcciones con bajos costos de mantenimiento y larga durabilidad, por lo que promete un incremento en la demanda de barras FRP dentro del país.

El conocimiento de la comunidad para utilizar barras FRP en estructuras RC esta progresando y el verdadero potencial de este material en la industria de la construcción aun no se ha alcanzado. El código nacional de Irán para estructuras RC (MMS9:2016¹⁰) restringe el uso de barras FRP; no obstante, falla en sugerir la información mínima requerida para su diseño. Con este fin, los practicantes en Irán están utilizando códigos internacionales y guías, tales como ACI 440.1R y *fib* boletín 40,¹¹ reportes técnicos, y otras publicaciones para complementar su código nacional.

Italia

En Italia, la atención al refuerzo FRP ha sido manifestado por un tiempo y la comunidad científica y técnica del país ha desarrollado un borrador técnico en el tema, CNR-DT 203/2006, publicado en el 2007 por el Consejo Nacional de Investigación (CNR por sus siglas en italiano). No obstante, el Estándar Técnico para la Construcción publicado por el Ministerio de Infraestructura y Traspotación (MIT) aún no han permitido el uso sin restricción. El uso está sujeto a aprobación por el Consejo Superior de Obras Publicas evaluando caso a caso. En el 2018, MIT configuró dos grupos de trabajo para: uno en la identificación, cualificación y aceptación de barras FRP (QGL) y otro en el diseño de estructuras de concreto reforzadas con dichas barras (DGL).

Actualmente los grupos de trabajo han publicado dos guías, las cuales están bajo

revisión por representantes de la comisión y son discutidos por la Asamblea Superior de Obras Publicas antes de ser aprobados, con enmiendas y publicaciones subsiguientes. El contenido de ambas publicaciones está resumido en la Referencia 12.

El propósito del QGL es proveer los procedimientos para la identificación, cualificación, y aceptación de barras rectas, barras dobladas, o barras con anclajes terminal. Estos productos son producidos con resina termoestable y tienen por lo menos un 50% en volumen de basalto, carbón o fibras de vidrio continuo.

Típicamente el proceso de producción es pultrusion, aunque la guía no excluye diferentes procesos de producción recomendados por el fabricante. La definición del proceso de producción incluye el tipo de superficie de la barra, incluido por el fabricante para el mejoramiento del enlace.

La sección típica de las barras longitudinales o los estribos pueden ser circulares o rectangulares. El diámetro nominal de las secciones circulares puede variar desde 5 a 32 mm (0.2 a 1.3 in), incluyendo los dos valores extremos. El ancho de las secciones rectangulares puede coincidir con el tamaño máximo de la sección, pero no deberá ser mayor de 40 mm (1.6 in).

El fabricante deberá proveer:

- El proceso de producción en la planta, en términos de organización control de calidad, asegurado por las debidas pruebas de control (CPF, Control de Producción de la Fábrica); y
- Las características mecánicas y física-morfológicas de las barras, determinado por distintos tipos de pruebas (PT, Pruebas de Tipo). Pruebas de aceptación en sitio para las barras:

- Son obligatorias y responsabilidad del gerente de construcción, y
- Se deberán llevar a cabo por cada lote y deberá cubrir todo tipo de productos suministros.

El muestreo se deberá llevar a cabo por el gerente de construcción o un delegado quien asegure con nomenclatura apropiada y permanente, el origen del producto con su

proveedor y localización y el uso que se le dará en sitio. Aquellas barras de FRP que serán utilizadas para DGL deberán cumplir con los requisitos de QGL de identificación, cualificación, y aceptación además de tener:

- Un valor característico de esfuerzo en tensión de no menos de 400 MPa (58,000 psi); y
- Un valor promedio del módulo de tensión en dirección longitudinal para barras con fibras de carbono no menor de 100 GPa (14,500 ksi) y 35 GPa (5,000 ksi) para barras con fibras de vidrio o basalto.

El diseño de estructuras RC con barras pasivas de FRP tienen que cumplir con los requisitos de esfuerzo y operación.

Se debe prestar suma atención y tomar en consideración al análisis estructural debido a la ausencia parcial de ductilidad para estructuras RC con barras FRP. Particularmente, los modelos elastoplásticos o elásticos con redistribución de análisis estructural no se pueden adoptar.

Como regla, se debe realizar pruebas específicas de resistencia de fuego para los elementos estructurales, de acuerdo con las regulaciones contra incendios. Se deberá considerar los valores de transición de temperatura del vidrio, T_g .

Algunos tipos de estructuras, como lo son losas de puentes y más genérico aquellos que no contienen volúmenes de espacios cerrados en donde el fuego pueda propagarse, son afectados hasta cierto punto y no requieren cotejos específicos.

El DGL provee unas reglas de diseño para esfuerzos en dobles (para ULS y SLS), axial y pandeo, puntal, cortante y torsión. También provee detalles de construcción y razones de refuerzo mínimo.

Nueva Zelanda

El uso de barras de refuerzo GFRP ha sido limitado a través de Nueva Zelanda. El uso de barras GFRP para estructuras temporales en la construcción de túneles es una práctica común, aunque se puede resaltar que el número



Figura 1: Paredes de retención RC-FRP en Kaikoura, Nueva Zelanda

de túneles construidos en Nueva Zelanda es relativamente mínimo debido al tamaño y población pequeña del país. Sin embargo, el uso de GFRP en estructuras permanentes es muy limitado.

No existe un estándar o código de diseño en Nueva Zelanda que permita el uso de barras GFRP ni tampoco especificaciones para barras GFRP. Este puede ser un posible factor que ha limitado la adopción de este material. Los proyectos que han utilizados refuerzo GFRP generalmente son diseñados a base de la ACI 440.1R-15. No obstante, sin el apoyo de un código nacional, los ingenieros naturalmente son reacios a utilizar GFRP como una solución de refuerzo. Se predice que aquellos ingenieros en Nueva Zelanda que quieran utilizar barras GFRP continuarán dependiendo de las guías y códigos de diseño de la ACI para estructuras RC GFRP por los próximos años.

Proyectos de investigación en universidades

La Universidad de Canterbury y la Universidad de Auckland tienen fuertes departamentos estructurales los cuales están interesados en barras de refuerzo GFRP y han emprendido proyectos de investigación a niveles de maestrías y doctorados. Con la ubicación de Nueva Zelanda en el anillo de fuego y sísmico del Pacífico y con la ocurrencia regular de terremotos en el país, las universidades tienen experiencia significativa en temas relacionados a los diseños en ingeniería sísmica. Se anticipa que ambas universidades continúen apoyando los proyectos investigativos en los refuerzos con barras GFRP, enfocados en aplicaciones sísmicas.

Ejemplos de proyectos recientes

Barras de refuerzo GFRP fueron seleccionadas para los proyectos de Auckland Central Interceptor Tunnel y Auckland Central Rail Link Tunnel, para permitir que la tuneladora (TBM por sus siglas en inglés) pudiese cortar a través de las paredes de concreto sin que fuera afectada por el refuerzo de acero.

Recientemente se han construido varias subestaciones eléctricas utilizando el refuerzo GFRP en las losas que sostienen equipos eléctricos con altos campos eléctricos, aprovechando las propiedades no-conductivas y no-electromagnéticas del GFRP.

La carretera estatal y la línea de riel de Kaikoura tuvieron que ser reparadas luego que un terremoto de 7.8 de magnitud azotara la Isla Sureña de Nueva Zelanda, cerca del pueblo de Kaikoura en el 2016. Esto ocasiono danos severos en la carretera estatal y la línea de riel. La carretera y la línea de riel están en una zona costera. La reconstrucción de estos activos fueron el proyecto de reparación de infraestructura mas grande en la historia de Nueva Zelanda (Fig. 1). Debido a la localización costera y riesgos asociados de corrosión, se seleccionó barras GFRP para el refuerzo de todas las paredes de retención de la reconstrucción. Muchos de las edificaciones históricas han sido reparadas utilizando barras GFRP. También, aquellos edificios históricos que han sido identificado con potencial de ser afectados por futuros terremotos han sido reforzados con barras GFRP o una combinación de acero con GFRP. De igual manera, un muelle histórico construido en los años 1940 está siendo reparada utilizando refuerzo GFRP para eliminar la corrosión.

Referencias

1. Cardoso, D.C.T.; Carnio, M.A.; Forti, N.C.S.; y Christ, R., "Recommended Practice IBRACON: Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforced Concrete Structures," primera edición, IBRACON, São Paulo, Brazil, 2021. (en producción)
2. "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars," CNR-DT 203/2006, CNR (National Research Council), Rome, Italy, 2007, 35 pp.

3. CAN/CSA S806-12, "Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers," CSA Group, Toronto, ON, Canada, 2012, 198 pp.

4. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 88 pp.

5. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 pp.

6. NORMA BRASILEÑA ABNT NBR 6118:2014, "Projeto de estruturas de concreto—Procedimiento (Design of Concrete Structures—Procedure)," Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2014, 256 pp. (en portugues)

7. He, Z., and Qiu, F., "Probabilistic Assessment on Flexural Capacity of GFRP-Reinforced Concrete Beams Designed by Guideline ACI 440.1 R-06," Construction and Building Materials, V. 25, No. 4, 2011, pp. 1663-1670.

8. ACI Committee 440, "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI 440.3R-12)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2012, 23 pp.

9. ISO 10406-1:2008, "Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement of Concrete—Test Methods—Part 1: FRP Bars and Grids," International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2008, 40 pp.

10. Iranian National Building Codes Compilation Office, MMS9:2016, "Iranian National Building Code, Part 9: Reinforced Concrete Buildings Design," Ministry of Housing and Urban Development (MHDU), Tehran, Iran, 2016.

11. fib Bulletin No. 40: "FRP Reinforcement in RC Structures," International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2007, 160 pp.

12. Aiello, M.A.; Ascione, L.; D'Antino, T.; Frassine, R.; Lignola, G.P.; Poggi, C.; y Prota, A., "Reinforced Concrete with FRP Bars: The Italian State of Technical Normative," Structural, No. 237, Sept.-Oct. 2021, www.structuralweb.it/cms/it4-magazine.asp?pag=articoli.asp&idCopertina=105.

La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo de
Puerto Rico

*Título: Concreto reforzado con FRP
alrededor del mundo, parte 1*



*Traductor y Revisor Técnico:
José M. Mejía Borrero*



24 HORAS DE

**CONOCIMIENTOS
DE CONCRETO**

AUSPICIADO POR EL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE • JULIO 12 Y 13 DE 2022

INSCRIBETE Y PARTICIPA

<https://www.concrete.org/events/24hours.aspx>