

# GFRP Reinforced Concrete Slabs under Restrained Shrinkage

by Bryan E. Barragan, Antonio Mudadu, Giuseppe Tiberti, and Giovanni A. Plizzari

**D**ue to mechanical and durability performance and its light weight, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforcement is increasingly becoming an alternative to steel in concrete flatwork projects in North America. The application of GFRP reinforcement in flatwork is in line with the overall growth of its use in bridge decks, sea walls, soft-eyes, and as pavement dowels in tolling stations.<sup>1-4</sup> On these projects, engineers take advantage, for example, of the electromagnetic transparency and intrinsic corrosion resistance of GFRP, leading to an extension of the service life of concrete structures.

This progress is also due to the development of related codes and standards during the past few years. ACI 440.1R-15 design guidelines<sup>5</sup> and ASTM D7957/D7957M-17<sup>6</sup> were key milestones that now help specifiers and assure contractors that they are working with a quality product. GFRP reinforcement is also being introduced in the upcoming *fib* Bulletin on Concrete Industrial Floors.

Because of practical advantages related to its light weight—namely, ease of transport, handling, and installation, leading to faster and more efficient construction—GFRP reinforcement is showing increased use in slabs-on-ground as temperature and shrinkage (T&S) reinforcement. However, there has been little, if any, research work dealing specifically with GFRP reinforcement for this application. One of the few studies that tried to address the subject was carried out by Koenigsfeld,<sup>7</sup> and that reference suggests the need for a higher reinforcing ratio when substituting steel bars with GFRP bars. However, within the tests carried out, cracking was not the result of drying shrinkage but was finally due to loading the specimens in direct tension.

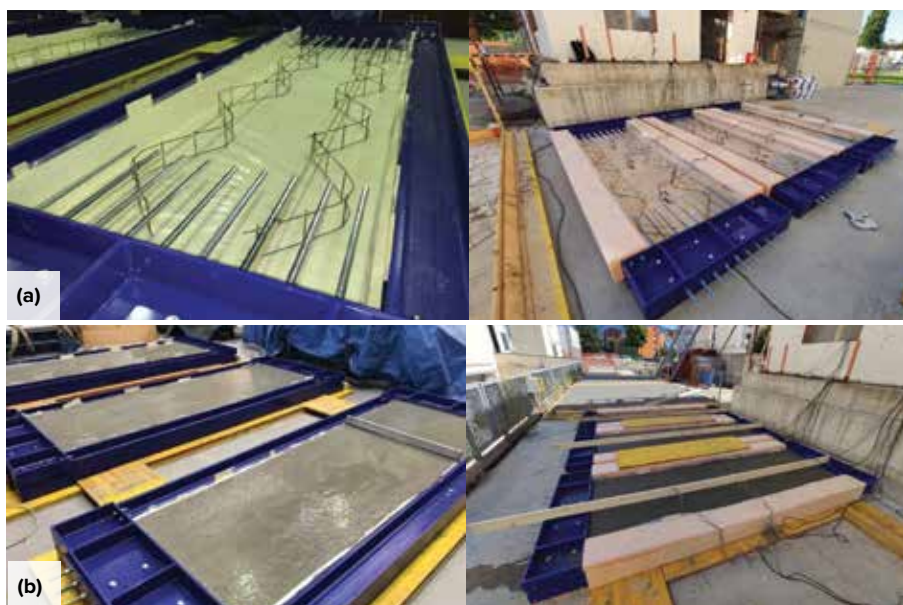
Often, the structural design of slabs-on-ground is done by the so-called “thickness design” method, where a minimum thickness of plain/unreinforced concrete is provided to resist loads (tensile stresses caused by loads remain well below the concrete tensile strength). In practical cases, tensile stresses arising from drying shrinkage are usually more demanding

than those caused by temperature variations. Therefore, even when joints are cut at recommended spacing for plain concrete slabs, it is a common practice to include T&S reinforcement. While the ratio between slab thickness and joint spacing usually meets ACI 360R-10<sup>8</sup> recommendations to control cracking due to T&S effects, practitioners prefer placing a light reinforcement in the upper half of the slab. Such reinforcement may provide additional crack control and, if not interrupted at joints, can enhance the load-transfer capacity by aggregate interlock and keep the joints tighter. In this case, care must be taken to avoid over-reinforcing the joint and, consequently, inducing out-of-joint cracking.<sup>9</sup> A typical solution for an average flatwork application involves a slab thickness of 4 to 6 in. (~100 to 150 mm) with joints at 12 to 16 ft (~4 to 5 m) and reinforced with No. 3 or No. 4 (~10 or 12 mm) steel reinforcing bars at 16 to 24 in. (~400 to 600 mm). Furthermore, the potential curling of the slab due to temperature gradients along the cross section is well controlled if the correct joint spacing is implemented.

This article presents results from an experimental study on the effectiveness of GFRP bars as shrinkage reinforcement for slabs-on-ground. Slabs reinforced with steel and GFRP reinforcing bars were cast inside steel frames, providing a high degree of restraint to shrinkage deformations (that is, providing severe conditions to produce shrinkage cracking); therefore, the effectiveness of the different reinforcement solutions could be better evaluated. Results show that No. 3 and 4 (9.5 and 12.7 mm) GFRP reinforcement outperformed No. 4 (12 mm) steel reinforcement in controlling drying shrinkage cracking.

## Experimental Program

To study the effectiveness of GFRP and steel reinforcing bars in controlling drying-shrinkage cracking, six slabs were constructed within structural steel frames that served as edge forms. Three slabs were cast indoors, and three slabs were cast outdoors. Slabs were 3.0 m long x 1.0 m wide x 150 mm



**Fig. 1: Slabs setup details: (a) steel forms with anti-friction plastic films, “snake”-type spacers or chairs, and threaded anchorage rods (from the left, indoor and outdoor exposure); and (b) specimens after casting (from the left, indoor and outdoor exposure)**

thick (10 ft x 3.3 ft x 6 in.). To provide end restraint, 0.75 m (2.5 ft) threaded rods were connected to the ends of each form and extended into the slab (Fig. 1(a)). To minimize friction over the length of the slab, a plastic sheet was placed over the lateral and bottom surfaces of each form. T&S reinforcement for each slab was supported in the upper third of the slab using serpentine bolsters (Fig. 1(a)). The T&S reinforcement extended over the full length of each slab and comprised:

- No. 4 (12 mm) steel bars at 18 in. (450 mm) on-center (o.c.);
- No. 4 (12.7 mm) GFRP bars at 18 in. o.c.; or
- No. 3 (9.5 mm) GFRP bars at 18 in. o.c.

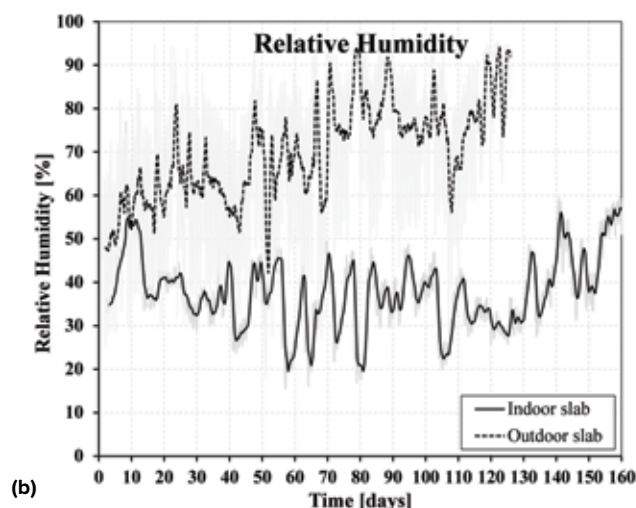
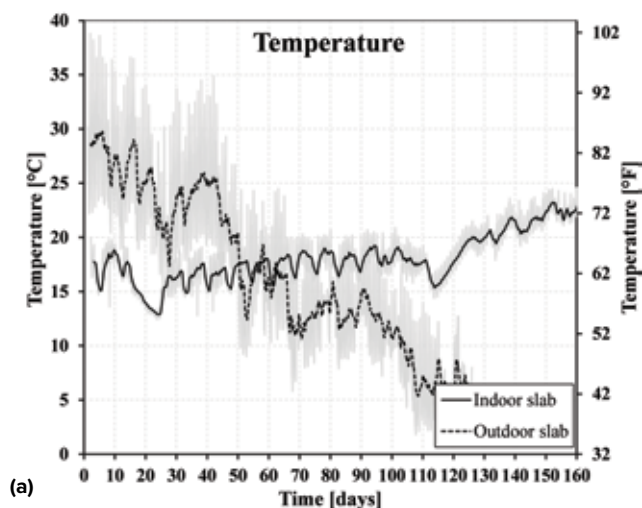
A C20/25 concrete (20 MPa [2900 psi] characteristic compressive strength when measured in 152 x 305 mm

[6 x 12 in.] cylinders and 25 MPa [3600 psi] when measured in 150 mm cubes) typically used in floor applications was supplied by a local ready mixed concrete company. Mixture proportions are presented in Table 1. Concrete was placed using a bucket for the internal slabs and pumped for the external slabs. For all slabs, concrete was evenly spread by screeding and consolidated using a needle vibrator. The slab top surface was troweled to achieve a smooth finish (Fig. 1(b)). To simulate a more severe condition, no curing was implemented on the surface of the slab; only the bleed water kept the surface wet during the initial hours after concrete placement. Ambient temperature and relative humidity were measured continuously for the duration of the tests (see Fig. 2).

**Table 1: Concrete mixture proportions**

Cement CEM I 32.5R, kg/m <sup>3</sup>	320
Water, L/m <sup>3</sup>	155
Water-cement ratio (w/c)	0.48
Sand (0/2 mm), kg/m <sup>3</sup>	183
Sand (0/6 mm), kg/m <sup>3</sup>	568
Gravel (6/14 mm), kg/m <sup>3</sup>	906
Gravel (15/30 mm), kg/m <sup>3</sup>	224
Maximum size aggregate, mm	22
High-range water-reducing admixture, L/m <sup>3</sup>	3.0

Note: 1 mm = 0.04 in.; 1 kg/m<sup>3</sup> = 1.7 lb/yd<sup>3</sup>; 1 L/m<sup>3</sup> = 0.2 gal./yd<sup>3</sup>



**Fig. 2: Exposure conditions for indoor and outdoor slabs: (a) temperature; and (b) relative humidity**

While indoor slabs were cast inside the laboratory for testing materials and structures at the University of Brescia, Brescia, Italy, in a relatively dry laboratory environment, outdoor slabs were cast under severe summer conditions (with temperatures higher than 35°C [95°F]) and remained exposed until the end of the following winter. As can be seen in Fig. 2(a), the average indoor temperature was 18°C (64°F), with a small overall daily variation of ±6°C (11°F), while the average outdoor temperature was 17°C (63°F), with an overall daily variation of ±15°C (27°F). The average relative humidity for the indoor slabs was 37% (ranging from 16 to 58%), whereas for the outdoor slabs it was 70% (ranging from 18 to 96%), as shown in Fig. 2(b). Indoor and outdoor slabs were exposed (not protected) during the entire duration of the test.

### Materials Properties

Figure 3 shows the steel and GFRP bars used in the study. The No. 4 steel bars were standard Grade B400S (Grade 60)



Fig. 3: Bar types used in the study, from left: No. 3 and No. 4 GFRP bars and No. 4 steel bar

with a yield strength of 400 MPa (58 ksi) and modulus of elasticity of 210 GPa (30,500 ksi). The No. 3 and No. 4 GFRP bars (PINKBAR® from Owens Corning®) met ASTM D7957/ D7957M-17,<sup>6</sup> with a tensile strength of 981 and 910 MPa (142 and 132 ksi), respectively, and a modulus of elasticity of 46.9 GPa (6800 ksi).

Concrete specimens for compressive strength, 150 mm cubes, and free shrinkage measurements, 75 x 75 x 250 mm (3 x 3 x 10 in.) prisms, were cast together with each set of slabs. All specimens, except for the indoor compressive strength cubes, were kept in the same environmental conditions as the slabs. The indoor cubes were kept in the moist room. Concrete compressive strength was measured according to EN 12390-3.<sup>10</sup> Free shrinkage of concrete was measured according to EN 12390-16.<sup>11</sup> Figure 4(a) shows the development of compressive strength with time for slabs in indoor and outdoor environments, respectively; the average concrete compressive strength at 28 days was 31 and 35 MPa (4500 and 5130 psi) for the indoor and outdoor specimens, respectively. The free shrinkage development was monitored for approximately 3 months for the indoor slabs and along the entire duration of the tests for the outdoor specimens. Free shrinkage measurements for indoor and outdoor conditions are plotted in Fig. 4(b). For the indoor specimens, a rapid shrinkage increase took place during the first 20 days after casting, beyond which the shrinkage rate decreased until reaching an almost asymptotic behavior at approximately 60 days. At about 90 days, the average shrinkage recorded was 665 microstrain, which is a typical value for the adopted concrete class. For the outdoor specimens, a rapid shrinkage increase took place for about 20 days after casting, beyond which the shrinkage rate decreased until reaching an almost asymptotic behavior at approximately 48 days. At 154 days, the average total shrinkage recorded was 457 microstrain. It should be noted that outdoor specimens were subjected to the weather conditions, including rainwater.

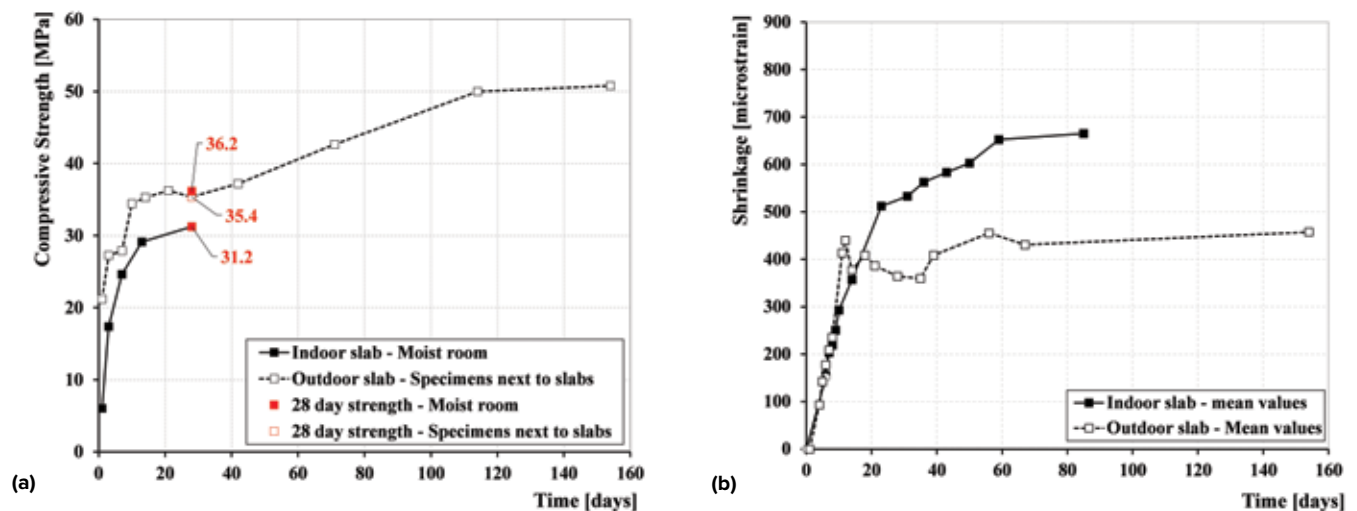


Fig. 4: Test results for indoor and outdoor slabs: (a) compressive strength; and (b) shrinkage (Note: 1 MPa = 145 psi)

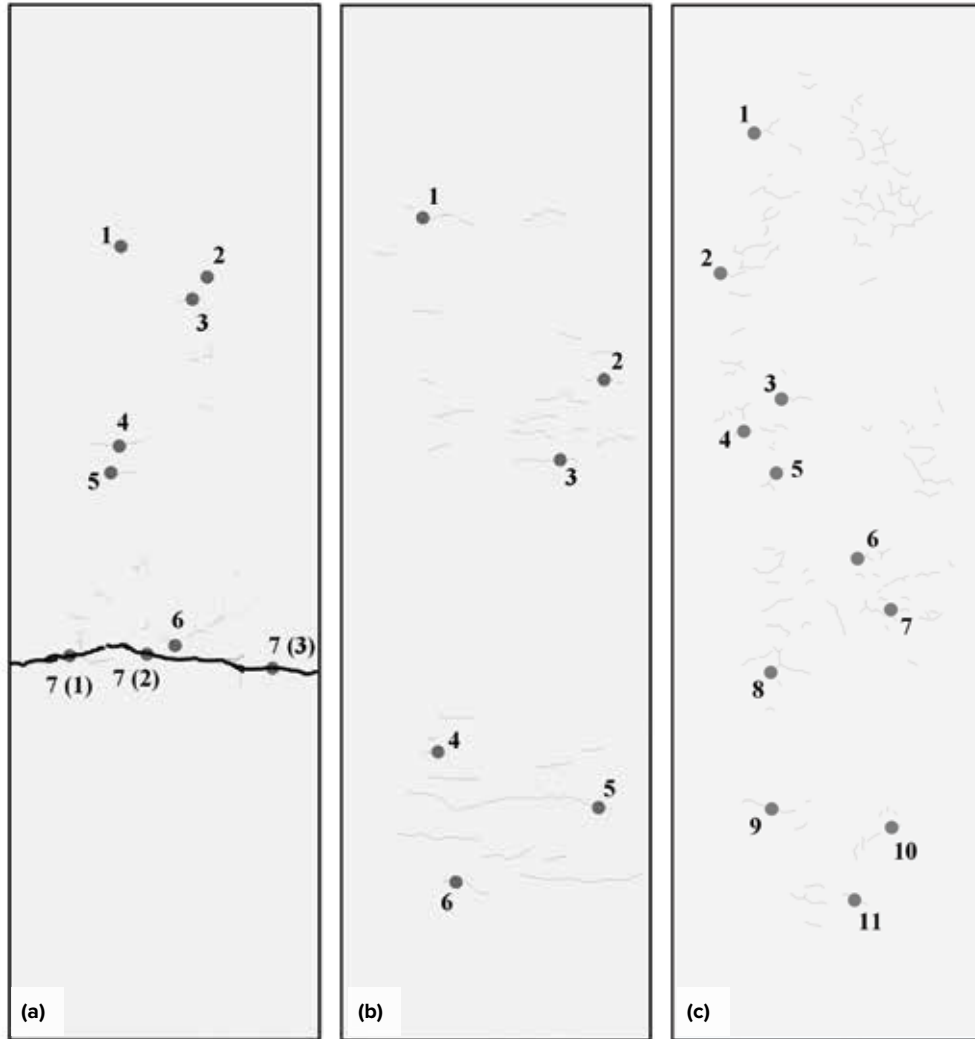


Fig. 5: Indoor slabs crack patterns after 209 days of exposure: (a) No. 4 steel bars at 18 in. (450 mm) o.c.; (b) No. 4 GFRP bars at 18 in. o.c.; and (c) No. 3 GFRP bars at 18 in. o.c. (Note: Thicker lines represent macrocracks; thin lines represent microcracks; and dots represent reference measuring points)

## Results and Discussion Indoor slabs

Once microcracks became visible on a slab surface (after 31 days), accurate mapping of the crack pattern was carried out, as well as measuring the crack lengths and widths with a digital microscope (Dino-Lite AM4113T) using a 200× magnification. Because the crack width may not be uniform along its length, specific measuring points were defined along the cracks to track their evolution over time, up to 210 days. Figure 5 shows the final crack patterns for the indoor specimens.

All indoor slabs exhibited similar microcrack patterns in the middle half of the slab, where higher stresses developed. As expected, due to the shrinkage deformation, these cracks appeared mainly along the transverse direction. It can be noticed that the slab reinforced with No. 3 GFRP bars showed a larger number of microcracks (not visible to the naked eye). Given the random pattern of these microcracks and the fact that they were not in the central half of the slab (the area of lower shrinkage stresses), most likely they were not

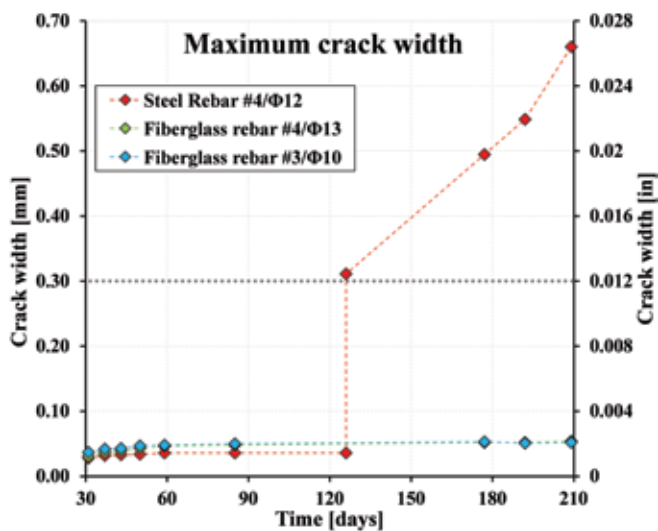


Fig. 6: Maximum crack widths for indoor slabs

restrained-shrinkage cracks but crazing cracks caused by a soft airflow from an outlet of the laboratory's heating system, located on the top part of the laboratory wall (approximately 3 m [10 ft] above that slab). When comparing slabs with No. 4 steel bars and No. 4 GFRP bars, a larger number of microcracks were observed in the latter (Fig. 5(b)).

As previously mentioned, once the microcracks occurred and the entire crack pattern was defined, the width of selected reference cracks was measured using a digital microscope. As can be seen in Fig. 5, seven, six, and 11 reference cracks were identified in slabs reinforced with No. 4 steel bars, No. 4 GFRP bars, and No. 3 GFRP bars, respectively.

Figure 6 shows the maximum crack widths observed for indoor slabs; it can be seen that the microcrack widths slowly increased up to 90 days in all slabs, after which the opening rate significantly decreased or stopped. Crack openings in GFRP-reinforced slabs were well below 0.1 mm (0.004 in.). The same behavior was observed for the steel-reinforced

slabs, until a macrocrack appeared in this slab after 126 days, reaching an opening of more than 0.65 mm (0.025 in.) at 209 days. Figure 6 also shows the 0.3 mm (0.01 in.) reference crack width line, because microcracks below that value are generally acceptable in floor construction.

### Outdoor slabs

As in the case of indoor slabs, once microcracks became visible on the outdoor slabs (observed at a close distance from the slab surface, approximately 250 mm), an accurate mapping of the crack pattern was carried out starting at 92 days of exposure, measuring the crack development and crack width with the digital microscope. Figure 7 shows the final crack patterns determined by a visual inspection.

As shown in Fig. 7, three and one cracks were identified in slabs reinforced with No. 4 steel bars and No. 4 GFRP bars, respectively. Also, the slab reinforced with No. 4 steel bars had a larger number of microcracks (not visible to the naked eye), whereas the slab reinforced with

No. 3 GFRP bars exhibited no microcracks (Fig. 7(c)). Slabs reinforced with the same amount of No. 4 steel and No. 4 GFRP bars developed surface microcracks, with a higher number of cracks observed in the steel-reinforced slab (Fig. 7(a) and (b)).

It should be noted that no crazing cracks appeared in the outdoor slabs, supporting the hypothesis that cracks exhibited in the anchorage zone of the indoor slab reinforced with No. 3 GFRP bars were caused by the airflow from an outlet of the laboratory's heating system.

Figure 8 shows the maximum crack widths observed for the outdoor slabs. It can be seen that slabs reinforced with No. 4 steel bars and No. 4 GFRP bars show a similar trend, with the steel-reinforced slab exhibiting larger crack widths. As a reference, Fig. 8 also includes the 0.3 mm reference line indicating a typical limit of acceptable crack widths in practice. It can be observed that the crack widths remain



Fig. 7: Outdoor slabs crack pattern after 210 days: (a) No. 4 steel bars at 18 in. o.c.; (b) No. 4 GFRP bars at 18 in. o.c.; and (c) No. 3 GFRP bars at 18 in. o.c. (Note: Thin lines represent microcracks; and dots represent reference measuring points)

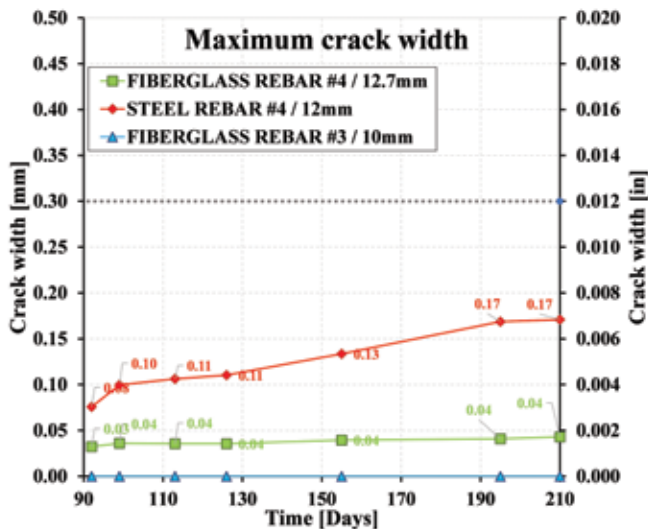


Fig. 8: Maximum crack width for outdoor slabs

below the “visible crack opening” of 0.3 mm in the three slabs.

Overall, while the fundamental understanding of the responses from steel- and GFRP-reinforced slabs cannot be accomplished with the experimental setup and number of specimens implemented in this study, a favorable influence of the GFRP bar bond behavior (especially at small slips) and its modulus of elasticity may be assumed. In fact, the chemical compatibility and specific surface characteristics of the GFRP bar may allow the development of a very efficient bond performance at very early microcracking stages, with minimum displacement (crack opening) needed to activate an effective bond strength. Furthermore, the embedded reinforcement in every reinforced concrete element provides restraint to shrinkage, with the concrete compressing the reinforcement as it shrinks and the reinforcement imposing an equal and opposite tensile force on the concrete at the level of the bars. This internal restraining force often causes cracking. This phenomenon would be more significant as the amount of

reinforcement increases or, at an equal amount of reinforcement, as the modulus of elasticity increases.

### Concluding Remarks

Concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars were cast inside steel forms designed to provide a high degree of restraint to shrinkage. Three slabs were cast and tested in indoor/laboratory conditions, and three slabs were cast outdoors in the middle of a hot summer. The slabs were exposed to their ambient environments during approximately 7 months. Slabs with GFRP bars exhibited little or no cracking, while slabs with steel reinforcement exhibited more extensive cracking. Further, although crack widths in all indoor slabs remained below 0.1 mm for up to 126 days, the slab with steel reinforcement developed a major crack that reached a width of 0.65 mm at 209 days. At all ages, outdoor slabs with steel reinforcement also showed larger crack widths than those reinforced with GFRP bars.

# MASONRY BUILDING CODE REQUIREMENTS

ACI Offers All Recent Editions of Masonry Building Code Requirements

The American Concrete Institute offers the 2016, 2013, and 2011 editions of Building Code Requirements for Masonry Structures. Available in both print and digital formats.



Learn more at [www.concrete.org](http://www.concrete.org)

In summary, although the number of tests was limited, the test slabs with GFRP bars exhibited less shrinkage cracking than slabs with steel bars. This may be explained by the low modulus of elasticity of GFRP (46.9 GPa) relative to that of steel (210 GPa).<sup>12</sup>

For more information on the research presented in this article, refer to Reference 13.

## Acknowledgments

The authors are grateful to Bruno Leporace Guimil for his valuable support during the experimental activities as well as to the technicians, Augusto Botturi and Andrea Delbarba, for their assistance in performing the experimental program.

## References

1. Nanni, A.; De Luca, A.; and Zadeh, H.J, *Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design*, first edition, CRC Press, London, UK, 2014, 418 pp.
2. Steputat, C.C.; Nolan, S.; Denty, L.; Kaminski, P.A.; and Nanni, A., "A Seawall Constructed with GFRP Bars as Structural Reinforcing," *Concrete International*, V. 41, No. 9, Sept. 2019, pp. 26-30.
3. Ekenel, M.; De Caso y Basalo, F.; and Nanni, A., "Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Members," *Concrete International*, V. 43, No. 2, Feb. 2021, pp. 18-22.
4. Villen Salan, E.A.; Rahman, M.K.; Al-Ghamdi, S.; Sakr, J.; Al-Zahrani, M.M.; and Nanni, A., "A Monumental Flood Mitigation Channel in Saudi Arabia," *Concrete International*, V. 43, No. 10, Oct. 2021, pp. 33-41.
5. ACI Committee 440, "Guide for 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.
6. 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.
7. Koenigsfeld, D., "Secondary Reinforcement for Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Panels," MS thesis, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, 2003, 135 pp.
8. ACI Committee 360, "Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 72 pp.
9. Walker, W.W., and Holland, J.A., "Stay Out of the Courthouse Zone," *SSI Engineering Bulletin*, 2016, 4 pp.
10. EN 12390-3:2019, "Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019, 20 pp.
11. EN 12390-16:2019, "Testing Hardened Concrete - Part 16: Determination of the Shrinkage of Concrete," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019, 16 pp.
12. Choi, J.-H., "Effects of GFRP Reinforcing Rebars on Shrinkage and Thermal Stresses in Concrete," *Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference*, E. Smith, ed., Columbia University, New York, NY, 2002.
13. Mudadu, A.; Tiberti, G.; Barragan, B.; and Plizzari, G., "Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiberglass Rebar Under Restrained

Shrinkage," Publication No. 10024750-A, Owens Corning Infrastructure Solutions, LLC, Toledo, OH, Mar. 2022, <https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/mdms/dms/CSB/10024750/10024750-University-of-Brescia-White-Paper.pdf?v=1620223174000>.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Bryan E. Barragan** is a Global Technical Leader-Concrete Solutions at Owens Corning, Chambéry, France. He has more than 25 years of experience in research, development, and innovation in advanced concrete technology, and alternative concrete reinforcements. He contributes to ACI, *fib*, and RILEM committees. He has held

positions in R&D, Product and Application Development, and Program Leader roles with regional and global scope.



**Antonio Mudadu** is a Postdoctoral Fellow in the Department of Civil, Architectural, Environmental and Land Planning Engineering of the University of Brescia, Brescia, Italy. He received his PhD in civil and environmental engineering in 2018. His research interests include fiber-reinforced concrete together with its structural applications, such as concrete pavements, precast segments, underwater slabs, and fiber-reinforced concrete caissons.



**Giuseppe Tiberti** is an Associate Professor of structural engineering in the Department of Civil, Architectural, Environmental and Land Planning Engineering of the University of Brescia. He received his MSc in 2004 and his PhD in materials for engineering in 2009, both from the University of Brescia. His research interests include precast tunnel linings made with fiber-reinforced

concrete, concrete pavements, and nonlinear analyses of reinforced concrete structures.



**Giovanni A. Plizzari**, FACI, is a Professor of structural engineering at the University of Brescia, where he is Chair of the Laboratory for Testing Materials and Structures. Plizzari is the author of more than 350 scientific publications, with more than 250 in international journals or proceedings of international conferences. He is also the Convenor of *fib* Task Group 1.8, Concrete Industrial Floors.

# Losas de concreto reforzadas con GFRP sometidas a contracción restringida

Por Bryan E. Barragán, Antonio Mudadu, Giuseppe Tiberti, y Giovanni A. Plizzari.

Debido a su comportamiento mecánico y durabilidad y a su ligereza, el refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) se convierte poco a poco en una alternativa del acero en los proyectos de elementos planos de concreto en Norteamérica. El uso del refuerzo de GFRP en elementos planos coincide con el crecimiento general de su utilización en plataformas de puentes, diques, tunelamiento (*soft-eyes*) y como pasajuntas de pavimentos en estaciones de peaje<sup>1-4</sup>. En estos proyectos, los ingenieros aprovechan, por ejemplo, la transparencia electromagnética y la resistencia intrínseca a la corrosión del GFRP para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto.

Este progreso también se debe al desarrollo en los últimos años de códigos y normas relacionados con este tema. Las guías de diseño ACI 440.1R-15<sup>5</sup> y la norma ASTM D7957/D7957M-17<sup>6</sup> fueron elementos clave que ahora ayudan a los especificadores y garantizan a los contratistas que están trabajando con un producto de calidad. El refuerzo con GFRP también se presentará en el próximo Boletín de la *fib* sobre Pisos Industriales de Concreto.

Debido a las ventajas prácticas relacionadas con su poco peso (es decir, su facilidad de transporte, manipulación e instalación, que permite una construcción más rápida y eficaz), el refuerzo con GFRP se utiliza cada vez más en losas sobre suelo como refuerzo contra la temperatura y la contracción (TyS). Sin embargo, se han realizado pocos trabajos de investigación, por no decir ninguno, que aborden específicamente el refuerzo con GFRP para esta aplicación. Uno de los pocos estudios que trató de abordar el tema fue el realizado por Koenigsfeld<sup>7</sup> y esa referencia

sugiere la necesidad de una mayor proporción de refuerzo cuando se sustituyen las varillas de acero por varillas de GFRP. Sin embargo, en los ensayos realizados, el agrietamiento no fue consecuencia de la contracción por secado, sino que finalmente se debió a la aplicación de cargas de tensión directa a los especímenes.

A menudo, el diseño estructural de las losas sobre suelo se realiza mediante el denominado método de “diseño de espesores”, en el que se prevé un espesor mínimo de concreto simple/sin refuerzo para resistir las cargas (los esfuerzos de tensión causados por las cargas permanecen muy por debajo de la resistencia a la tensión del concreto). En la práctica, los esfuerzos de tensión derivados de la contracción por secado suelen ser más exigentes que los provocados por las variaciones de temperatura. Por lo tanto, incluso cuando las juntas se cortan a la distancia recomendada para losas de concreto simple, es una práctica común incluir refuerzo de TyS. Aunque la relación entre el espesor de la losa y la separación de las juntas suele cumplir las recomendaciones del ACI 360R-10<sup>8</sup> para controlar el agrietamiento debido a los efectos de TyS, los profesionales prefieren colocar un refuerzo ligero en la mitad superior de la losa. Este refuerzo puede ofrecer un control adicional de las grietas y, si no se interrumpe en las juntas, puede aumentar la capacidad de transferencia de carga mediante la interconexión de los agregados y de mantener las juntas más estrechas. En este caso, hay que tener cuidado para evitar un refuerzo excesivo de la junta y, en consecuencia, la aparición de grietas fuera de la misma<sup>9</sup>. Una solución típica para proyectos de elementos planos promedio incluye una losa de entre 100 y 150 mm (4 y 5 pulg.) de



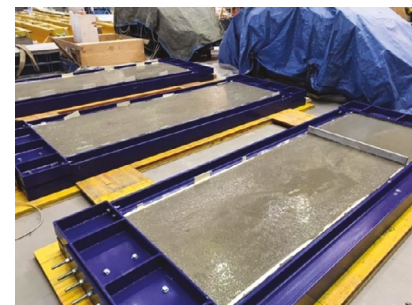
espesor, con juntas entre 4 y 5 m (12 y 16 pies) y reforzada con varillas de acero del #3 o 4 (10 o 12 mm) entre 400 y 600 mm (16 y 24 pulg.). Además, la posible curvatura de la losa debido a los cambios de temperatura a lo largo de la sección transversal se controla bien si se utiliza la separación correcta entre las juntas.

Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental sobre la eficacia de las varillas de GFRP como refuerzo contra la contracción para losas sobre suelo. Las losas reforzadas con acero y varillas de refuerzo de GFRP fueron coladas dentro de marcos de acero, con lo que se consiguió un alto grado de contención de las deformaciones por contracción (es decir, se crearon condiciones severas para producir grietas por contracción); por lo tanto, se pudo evaluar mejor la eficacia de las diferentes soluciones de refuerzo. Los resultados muestran que los refuerzos de GFRP #3 y 4 (9.5 y 12.7 mm) superaron a los refuerzos de acero #4 (12 mm) a la hora de controlar el agrietamiento por contracción por secado.

## Programa experimental

Para estudiar la eficacia del GFRP y de las varillas de acero de refuerzo en el control del agrietamiento por contracción por secado, se construyeron seis losas dentro de marcos de acero estructural que sirvieron como cimbras laterales. Se colaron tres losas en el interior y tres en el exterior. Las losas medían 3.0 m de largo x 1.0 m de ancho x 150 mm de espesor (10 pies x 3.3 pies x 6 pulg.). Para sujetar los extremos, se conectaron varillas roscadas de 0.75 m (2.5 pies) a los extremos de cada cimbra y se extendieron dentro de la losa (Fig. 1(a)). Para minimizar la fricción a lo largo de la losa, se colocó una película plástica sobre las superficies lateral e inferior de cada cimbra. El refuerzo de TyS para cada losa se apoyó en el tercio superior de la misma utilizando refuerzos en serpentina (Fig. 1(a)). El refuerzo de TyS se extendía sobre toda la longitud de cada losa y consistía en:

- Barras de acero #4 (12 mm) a 450 mm (18 pulg.) en el centro;
- Barras de GFRP #4 (12.7 mm) a 18 pulg. en el centro; o bien
- Barras de GFRP #3 (9.5 mm) a 18 pulg. en el centro.



**Fig. 1:** Detalles del montaje de las losas: (a) cimbras de acero con película plástica antifricción, separadores o silletas tipo "serpiente" y varillas de anclaje roscadas (desde la izquierda, en exposición interior y exterior); y (b) especímenes después del colado (desde la izquierda, en exposición interior y exterior).

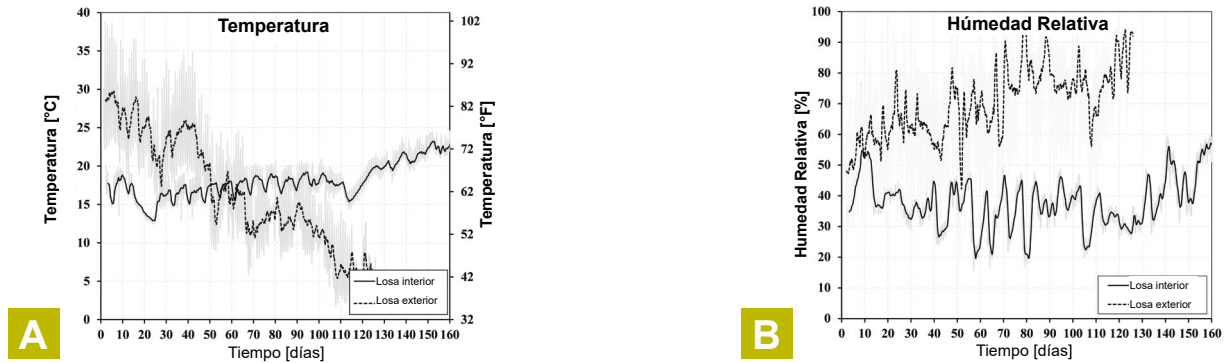


Fig. 2: Condiciones de exposición para losas de interior y de exterior: (a) temperatura; y (b) humedad relativa.

Una compañía local de concreto premezclado suministró un concreto C20/25 (resistencia a compresión característica de 20 MPa [2900 psi] cuando se mide en cilindros de 152 x 305 mm [6 x 12 in.] y de 25 MPa [3600 psi] cuando se mide en cubos de 150 mm) usualmente utilizado para pisos. Las proporciones de la mezcla se presentan en la Tabla 1. El concreto se colocó usando una cubeta para las losas internas y una bomba para las losas externas. En todas las losas, el concreto se esparció uniformemente con una regla y se compactó con un vibrador. La cara superior de la losa se allanó para conseguir un acabado liso (Fig. 1(b)). Para simular una condición más severa, no se realizó curado alguno en la superficie de la losa; sólo el agua de sangrado mantuvo húmeda la superficie durante las horas iniciales tras la colocación del concreto. La temperatura ambiente y la humedad relativa se midieron continuamente durante la realización de las pruebas (véase la Fig. 2).

Mientras que las losas de interior se colaron en el laboratorio de ensayo de materiales y estructuras de la Universidad de Brescia (Italia), en un entorno relativamente seco, las losas de exterior se colaron en verano (con temperaturas superiores a 35 °C) y permanecieron expuestas hasta el final del invierno siguiente. Como puede verse en la Fig. 2(a), la temperatura interior media era de 18 °C (64 °F), con una pequeña variación diaria total de  $\pm 6$  °C (11 °F), mientras que la temperatura exterior promedio era de 17°C (63 °F), con una variación diaria total de  $\pm 15$  °C (27 °F). La humedad relativa promedio para las losas de interior fue del 37% (oscilando entre el 16 y el 58%), mientras que para las losas de exterior fue del 70% (oscilando entre el 18 y el 96%), como se muestra en la Fig. 2(b). Las losas de interior y de exterior estuvieron expuestas (no protegidas) durante toda la prueba.

Cemento CEM I 32.5R, kg/m <sup>3</sup>	320
Agua, L/m <sup>3</sup>	155
Relación agua/cemento (a/c)	0.48
Arena (0-2 mm), kg/m <sup>3</sup>	183
Arena (0-6 mm), kg/m <sup>3</sup>	568
Grava (6-14 mm), kg/m <sup>3</sup>	906
Grava (15-30 mm), kg/m <sup>3</sup>	224
Tamaño máximo del agregado, mm	22
Aditivo super reductor de agua, L/m <sup>3</sup>	3.0

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla de concreto  
Nota: 1 mm = 0.04 pulg.; 1 kg/m<sup>3</sup> = 1.7 lb/yc<sup>3</sup>; 1 L/m<sup>3</sup> = 0.2 gal/yc<sup>3</sup>

## Propiedades de los materiales

La Figura 3 muestra las barras de acero y GFRP utilizadas en el estudio. Las barras de acero #4 eran de grado estándar B400S (Grado 60) con un límite elástico de 400 MPa (58 ksi) y un módulo de elasticidad de 210 MPa (30.5 ksi). Las barras de GFRP #3 y #4 (PINKBAR® de Owens Corning®) cumplían con ASTM D7957/ D7957M-17<sup>6</sup>, con una resistencia a la tensión de 981 y 910 MPa (142 y 132 ksi), respectivamente, y un módulo de elasticidad de 46.9 GPa (6.8 ksi).

Las muestras de concreto para resistencia a compresión, los cubos de 150 mm, y los prismas de 75 x 75 x 250 mm (3 x 3 x 10 pulg.) para las mediciones de la contracción libre, se colaron al mismo tiempo que cada lote de losas. Exceptuando a los cubos de interior de resistencia a la compresión, todos los especímenes se mantuvieron en las mismas condiciones ambientales que las losas. Los cubos de interior se mantuvieron en el cuarto con humedad. La resistencia a la compresión del concreto se midió según EN 12390-3<sup>10</sup>. La contracción libre del concreto se midió según EN 12390-16<sup>11</sup>. La Figura 4(a) muestra el desarrollo de la resistencia a la compresión para losas en ambientes de interior y de exterior, respectivamente; la resistencia a compresión del concreto promedio a los 28 días fue de 31 y 35 MPa (4500 y 5130 psi) para los especímenes de interior y de exterior, respectivamente. La evolución de la contracción libre fue monitoreada durante aproximadamente 3 meses para las losas de interior y a lo largo de toda la duración de los ensayos para los especímenes de exterior. En la Fig. 4(b) se representan las mediciones de la contracción libre en condiciones de interior y de exterior. Para los especímenes de interior, se produjo un rápido aumento de la contracción durante los primeros 20 días después del colado, a partir de los cuales el índice de contracción disminuyó hasta alcanzar un comportamiento casi asintótico aproximadamente a los 60 días. Aproximadamente a los 90 días, la contracción promedio registrada fue de 665 microdeformaciones, que es un valor típico para la clase de concreto adoptada. En el caso de los



*Fig. 3: Tipos de varillas utilizadas en el estudio, de izquierda a derecha: Varillas de GFRP #3 y #4 y varilla de acero #4.*

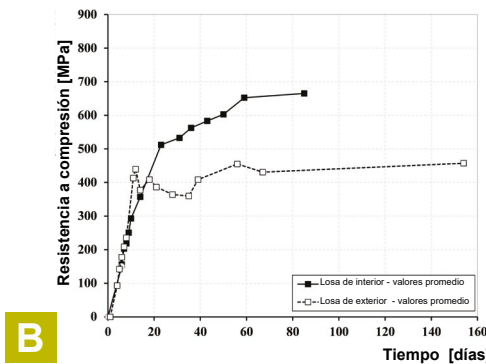
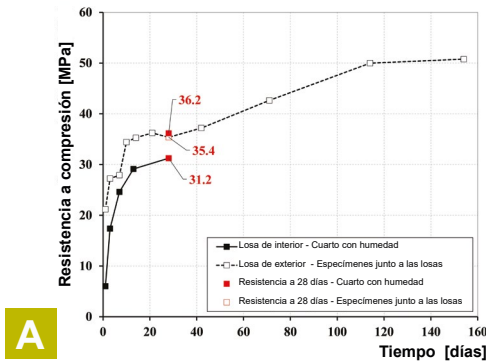
especímenes de exterior, se produjo un rápido aumento de la contracción durante unos 20 días después del colado, a partir del cual el índice de contracción disminuyó hasta alcanzar un comportamiento casi asintótico aproximadamente a los 48 días. A los 154 días, la contracción total promedio registrada fue de 457 microesfuerzos. Cabe señalar que los especímenes de exterior estuvieron sometidos a condiciones ambientales adversas, incluyendo el agua de lluvia.

## Resultados y discusión

### Losas de interior

Una vez que las microgrietas fueron visibles en la superficie de una losa (al cabo de 31 días), se llevó a cabo un mapeo preciso del patrón de grietas, así como la medición de las longitudes y anchos de éstas con un microscopio digital (Dino-Lite AM4113T) utilizando un aumento de 200×. Dado que el ancho de la grieta puede no ser uniforme en toda su longitud, se definieron puntos de medición específicos a lo largo de las grietas para seguir su evolución con el paso del tiempo, hasta 210 días. La Figura 5 muestra los patrones de grietas finales de las muestras de interior.

Todas las losas de interior presentaron patrones de microgrietas similares en la mitad



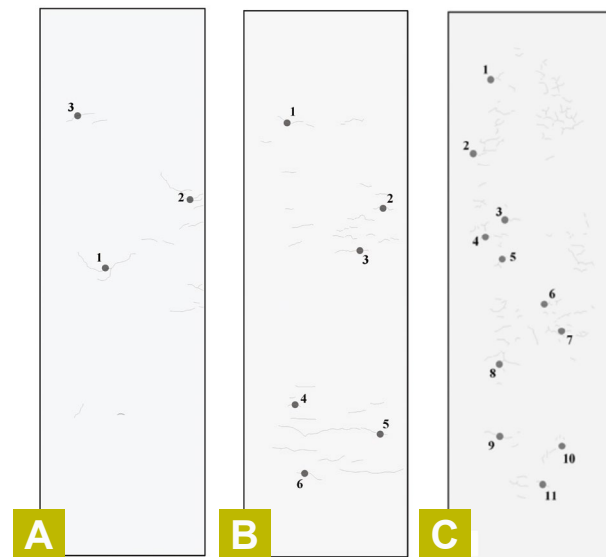
**Fig. 4: Resultados de las pruebas en losas de interior y exterior: (a) resistencia a compresión; y (b) contracción (Nota: 1 MPa = 145 psi).**

central de la losa, donde se desarrollaron mayores esfuerzos. Como era de esperar, debido a la deformación por contracción, estas grietas aparecieron principalmente a lo largo de la dirección transversal. Puede observarse que la losa reforzada con varillas de GFRP #3 presentaba un mayor número de microgrietas (no visibles a simple vista). Dado el patrón aleatorio de estas microgrietas y al hecho de que no se encontraban en la parte central de la losa (la zona con menores esfuerzos de contracción), lo más probable es que no se tratara de grietas de contracción contenida, sino de cuarteaduras causadas por un flujo de aire suave procedente de un desagüe del sistema de calefacción del laboratorio, situado en la parte superior de la pared (aproximadamente a 3 m [10 pies] por encima de la losa). Al comparar las losas con varillas de acero #4 y con varillas de GFRP #4, se observó un mayor número de microgrietas en las últimas (Fig. 5(b)).

Como se ha mencionado anteriormente, una vez que se produjeron las microgrietas y se

definió todo el patrón de agrietamiento, se midió el ancho de las grietas de referencia seleccionadas utilizando un microscopio digital. Como puede observarse en la Fig. 5, se identificaron siete, seis y once grietas de referencia en losas reforzadas con varillas de acero #4, varillas de GFRP #4 y varillas de GFRP #3, respectivamente.

La Figura 6 muestra el ancho máximo de las grietas observadas en losas de interior; puede apreciarse que el ancho de las microgrietas aumentó lentamente hasta los 90 días en todas las losas, tras lo cual el índice de apertura disminuyó significativamente o se detuvo. Las aberturas de grietas en las losas reforzadas con GFRP fueron muy inferiores a 0.1 mm (0.004 pulg.). El mismo comportamiento se observó para las losas reforzadas con acero, hasta que apareció una macrogrieta en esta losa a los 126 días, alcanzando una abertura de más de 0.65 mm (0.025 pulg.) a los 209 días. La Figura 6 muestra también la línea de referencia de 0.3 mm (0.01 pulg.) de ancho de la grieta, ya que generalmente se aceptan microgrietas por debajo de ese valor en la construcción de pisos.



**Fig. 5: Patrones de grietas en losas de interior tras 209 días de exposición: (a) barras de acero #4 a 450 mm (18 pulg.) en el centro; (b) barras de GFRP #4 a 450 mm (18 pulg.) en el centro; y (c) barras de GFRP #3 a 450 mm (18 pulg.) en el centro (Nota: Las líneas más gruesas representan macrogrietas; las líneas finas representan microgrietas; y los puntos representan puntos de medición de referencia).**

## Losas de exterior

Al igual que en el caso de las losas de interior, una vez que las microgrietas se hicieron visibles en las losas de exterior (observadas a una distancia cercana de la superficie de la losa, aproximadamente 250 mm), se llevó a cabo un mapeo preciso del patrón de grietas a partir de los 92 días de exposición, midiendo el desarrollo y el ancho de las grietas con el microscopio digital. La Figura 7 muestra los patrones finales de grietas determinados mediante una inspección visual.

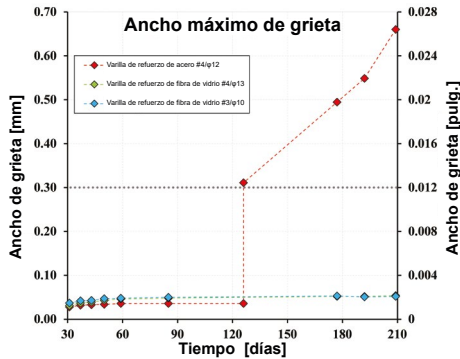


Fig. 6: Anchos máximos de grieta para losas de interior.

Como se muestra en la Fig. 7, se identificaron tres en las losas reforzadas con varillas de acero #4 y una grietas en las losas reforzadas con varillas de GFRP #4, respectivamente. Además, la losa reforzada con varillas de acero #4 presentaba un mayor número de microgrietas (no visibles a simple vista), mientras que la losa reforzada con barras de GFRP #3 no presentaba microgrietas (Fig. 7(c)). Las losas reforzadas con la misma cantidad de varillas de acero #4 y de varillas de GFRP #4 desarrollaron microgrietas superficiales, observándose un mayor número de grietas en la losa reforzada con acero (Fig. 7(a) y (b)).

Cabe señalar que no aparecieron grietas de cuarteadura en las losas de exterior, lo que apoya la hipótesis de que las grietas exhibidas en la zona de anclaje de la losa interior reforzada con varillas de GFRP #3 fueron causadas por el flujo de aire de un desagüe del sistema de calefacción del laboratorio.

La Figura 8 muestra el ancho máximo de las grietas observadas en las losas exteriores. Se puede observar que las losas reforzadas con varillas de acero #4 y con varillas de GFRP #4 muestran una tendencia similar, siendo la losa reforzada con acero la que presenta mayores

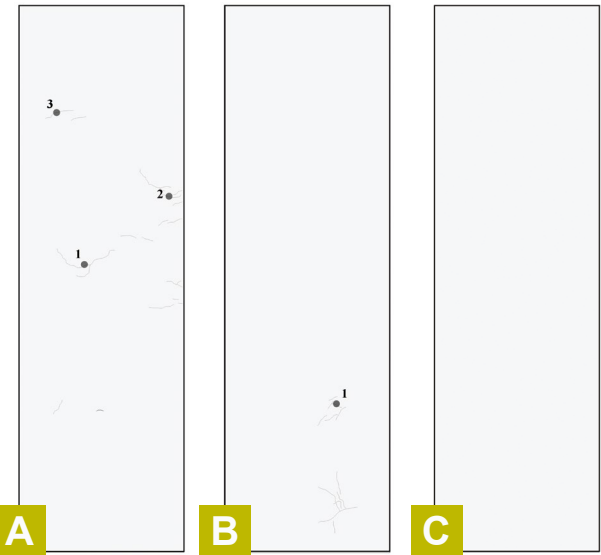


Fig. 7: Patrón de grietas en losas de exterior después de 210 días: (a) Varillas de acero #4 a 18 pulg. en el centro; (b) Varillas de GFRP #4 a 18 pulg. en el centro; y (c) Varillas de GFRP #3 a 18 pulg. en el centro (Nota: Las líneas delgadas representan microgrietas; y los puntos representan puntos de medición de referencia).

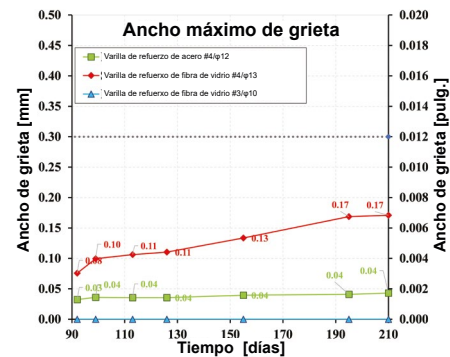


Fig. 8: Ancho máximo de grieta para losas de exterior.

anchos de grieta. Como referencia, la Fig. 8 también incluye la línea de referencia de 0.3 mm que indica un límite típico de anchos de grieta aceptables en la práctica. Puede observarse que los anchos de grieta permanecen por debajo de la “apertura de grieta visible” de 0.3 mm en las tres losas.

En general, aunque no es posible lograr una comprensión fundamental de las respuestas de las losas reforzadas con acero y con GFRP con la configuración experimental y el número de especímenes utilizados en este estudio, se puede suponer una influencia favorable

del comportamiento de adherencia de la barra de GFRP (especialmente en pequeños deslizamientos) y de su módulo de elasticidad. De hecho, la compatibilidad química y las características específicas de la superficie de la varilla de GFRP pueden permitir el desarrollo de un rendimiento de adherencia muy eficiente en etapas muy tempranas de microagrietamiento, con un desplazamiento mínimo (abertura de grieta) necesario para activar una resistencia de adherencia efectiva. Además, el refuerzo embebido en cada elemento de concreto reforzado proporciona una restricción a la contracción con el concreto comprimiendo el refuerzo a medida que se contrae y el refuerzo imponiendo una fuerza de tensión igual y opuesta en el concreto al nivel de las varillas. Esta fuerza de contención interna suele provocar agrietamientos. Este fenómeno sería más significativo a medida que aumenta la cantidad de refuerzo o, a igualdad de refuerzo, a medida que el módulo de elasticidad aumenta.

## Observaciones finales

Las losas de concreto reforzadas con barras de acero y GFRP se colaron en cimbras de acero diseñadas para proporcionar un alto grado de restricción a la contracción. Se colaron tres losas y se ensayaron en condiciones de interior/laboratorio, y tres losas se colaron al aire libre en medio de un caluroso verano. Las losas estuvieron expuestas al ambiente durante aproximadamente 7 meses. Las losas con varillas de GFRP mostraron poco o ningún agrietamiento, mientras que las losas con refuerzo de acero mostraron un agrietamiento más extenso. Además, aunque el ancho de las grietas en todas las losas de interior se mantuvo por debajo de 0.1 mm hasta los 126 días, la losa con refuerzo de acero desarrolló una grieta importante que alcanzó un ancho de 0.65 mm a los 209 días. En todas las edades, las losas de exterior con refuerzo de acero también mostraron anchos de grieta mayores que las reforzadas con varillas de GFRP.

En resumen, aunque el número de pruebas fue limitado, las losas de prueba con varillas de GFRP mostraron menos agrietamiento por contracción que las losas con varillas de acero. Esto puede explicarse por el bajo módulo de elasticidad del GFRP (46.9 GPa) en relación con el del acero (210 GPa\*)<sup>12</sup>. (\*Nota del Traductor y Revisor Técnico: En el original por error se reporta el módulo de elasticidad del acero a tensión en megapascales (MPa)).

Para más información sobre la investigación presentada en este artículo, consulte la Referencia 13.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Bruno Leporace Guimil su valioso apoyo durante las actividades experimentales, así como a los técnicos Augusto Botturi y Andrea Delbarba su ayuda en la realización del programa experimental.

## Referencias

1. Nanni, A.; De Luca, A.; and Zadeh, H.J, Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, first edition, CRC Press, London, UK, 2014, 418 pp.
2. Steputat, C.C.; Nolan, S.; Denty, L.; Kaminski, P.A.; and Nanni, A., "A Seawall Constructed with GFRP Bars as Structural Reinforcing," Concrete International, V. 41, No. 9, Sept. 2019, pp. 26-30.
3. Ekenel, M.; De Caso y Basalo, F.; and Nanni, A., "Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Members," Concrete International, V. 43, No. 2, Feb. 2021, pp. 18-22.
4. Villen Salan, E.A.; Rahman, M.K.; Al-Ghamdi, S.; Sakr, J.; Al-Zahrani, M.M.; and Nanni, A., "A Monumental Flood Mitigation Channel in Saudi Arabia," Concrete International, V. 43, No. 10, Oct. 2021, pp. 33-41.
5. ACI Committee 440, "Guide for 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.
6. 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.
7. Koenigsfeld, D., "Secondary Reinforcement for Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Panels," MS thesis, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, 2003, 135 pp.
8. ACI Committee 360, "Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 72 pp.
9. Walker, W.W., and Holland, J.A., "Stay Out of the Courthouse Zone," SSI Engineering Bulletin, 2016, 4 pp.
10. EN 12390-3:2019, "Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019, 20 pp.
11. EN 12390-16:2019, "Testing Hardened Concrete - Part 16: Determination of the Shrinkage of Concrete," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019, 16 pp.
12. Choi, J.-H., "Effects of GFRP Reinforcing Rebars on Shrinkage and Thermal Stresses in Concrete," Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, E. Smith, ed., Columbia University, New York, NY, 2002.
13. Mudadu, A.; Tiberti, G.; Barragan, B.; and Plizzari, G., "Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiberglass Rebar Under Restrained Shrinkage," Publication No. 10024750-A, Owens Corning Infrastructure Solutions, LLC, Toledo, OH, Mar. 2022, <https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/mdms/dms/CSB/10024750/10024750-University-of-Brescia-White-Paper.pdf?v=1620223174000>.



**Bryan E. Barragán**, miembro del ACI, es Líder Técnico Global de Soluciones para Concreto en Owens Corning, Chambéry, Francia. Cuenta con más de 25 años de experiencia en investigación, desarrollo e innovación en tecnología del concreto avanzada y refuerzos de concreto alternativos. Colabora en comités del ACI, fib y RILEM. Ha ocupado cargos en Investigación y Desarrollo, Desarrollo de Productos y Aplicaciones y Dirección de Programas con alcance regional y mundial.



**Antonio Mudadu** es becario posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura, Medio Ambiente y Urbanismo de la Universidad de Brescia, Brescia, Italia. Recibió su doctorado en ingeniería civil y ambiental en 2018. Sus intereses de investigación incluyen el concreto reforzado con fibra y sus aplicaciones estructurales, como pavimentos de concreto, segmentos prefabricados, losas subacuáticas y cajones de concreto reforzado con fibra.



**Giuseppe Tiberti** es profesor asociado de ingeniería estructural en el Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura, Medio Ambiente y Urbanismo de la Universidad de Brescia. Obtuvo su licenciatura en 2004 y su doctorado en materiales para ingeniería en 2009, ambos por la Universidad de Brescia. Sus intereses de investigación incluyen revestimientos prefabricados de túneles hechos con concreto reforzado con fibras, pavimentos de concreto y análisis no lineales de estructuras de concreto reforzado.



**Giovanni A. Plizzari**, FACI, es Catedrático de Ingeniería Estructural en la Universidad de Brescia, donde preside el Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras. Plizzari es autor de más de 350 publicaciones científicas, más de 250 de ellas en revistas internacionales o memorias de congresos internacionales. También es el Coordinador del Grupo de Trabajo de la fib 1.8, Pisos Industriales de Concreto.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

*Título: Losas de concreto reforzadas con GFRP sometidas a contracción restringida*



**Traductora:**  
Lic. Iliana Margarita  
Garza Gutierrez



**Revisor Técnico:**  
Dr. Jorge M.  
Rivera Torres