

Industrial Floors with Fiber-Reinforced Concrete: A Review of Knowledge and Experience

by Xavier Destrée and Barzin Mobasher

An article by Johan L. Silfwerbrand in the May 2021 issue of *Concrete International* discussed applications of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) in industrial floors.¹ Several statements warrant further discussion, particularly concerning the so-called Belgian/Continental (Belgian) and Swedish approaches for the design of SFRC slabs. In the interest of presenting an alternative perspective, it is appropriate to share several recently published works that point to a changing field; recent developments in structural design, practical experience, and testing; and the advancement of design calculations in this field in the past 15 years.

Many design procedures have been developed by international code bodies such as ACI, the International Federation for Structural Concrete (*fib*), or the Japan Concrete Institute (JCI), and these have been adopted nationally or regionally. For example, the Belgian approach for the design of SFRC industrial floors was used as a starting point for the significant amount of work accomplished by ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, over the past two decades. A key milestone in this effort was the publication of ACI 544.6R-15,² a document based on contributions and verifications provided by many international researchers. The

following discussions rely on this and other available knowledge and recent publications.

Design Approaches for SFRC Slabs

The Belgian approach was promoted for the use of steel fibers produced by one of the world's leading steel manufacturing firms and has been in use since 1993.² Owners and contractors have continually used the method, and the client base of this approach has expanded significantly as more applications are developed to meet the current construction requirements of industrial floors.³⁻⁵ It has been confirmed that this method meets the requirements of the ACI 544.6R report and provides reliable and economical designs. Approximately 20 million m² (215 million ft²) of completed slabs are in service in Europe, North America, and East Asia. These include highly visible projects, such as the 16,000 m³ (565,000 ft³) SFRC continuous slab-on-piles foundation for the 65,000-seat Friends Arena in Stockholm, Sweden (Fig. 1).

Both the Belgian and the Swedish design approaches are applied to slabs-on-piles as systems that are required due to a low soil bearing capacity that precludes taking the soil into account for support of the slab and imposed loads. In these systems, piles support the slab, and the slab thickness is a function of the size, number, and spacing of the piles as well as the role of any reinforcement used. The difference between the two methods is that the Swedish approach uses a reinforced concrete slab with a considerable combination of reinforcing bars and welded wire reinforcement, as shown in Fig. 2. Whereas the Belgian method relies on a “steel fiber only” reinforcement strategy, as shown in Fig. 3. The high dosage of fibers used in designs based on the latter method contributes to unique material properties, including a high residual tensile strength, resulting in tensile contributions from the concrete phase. These approaches are, therefore,

Additional ACI Online Technical Resources

On-Demand Course: Fiber-Reinforced Concrete—From Fresh Properties to Structural Design: New Tools, Guides, and Reports

On-Demand Course: Fiber-Reinforced Concrete: Design & Practice

On-Demand Course: Reinforcement for Concrete (Part 1 and 2)

Visit www.concrete.org/onlinecatalog.

fundamentally different from each other.

It has been argued that the primary factors that contribute to the slab strength include the arch effect, membrane effect, and the reduced probability of large-scale weak zones. However, we caution that it is essential to consider the range of deformations required to initiate arch or membrane effects in an ultimate limit-state strength condition. Furthermore, an ultimate limit state (ULS) of collapse is not a criterion that is usually applied to slabs-on-ground due to the redundancy of the load transmission.

The “Conservativeness” Argument

The argument for a method to be more conservative than others should not be based on a comparison of the final specifications or national or regional guidelines because the design process is not a binary choice. The choice should be based on an approach with a track record of field implementation and economic advantages, including life-cycle cost. The selection should be based on an approach that provides full customer satisfaction based on a multiparameter set of tangible and verifiable criteria.

The phrase “less conservative method” is hence troubling. If a method meets the intended design criteria, including strength, stiffness, deflection, creep, crack width, corrosion potential, and durability aspects, based on verifiable and valid test methods and calculations, it should be allowed to compete among the various options available. An arbitrary designation of a method’s conservativeness based on thickness or ultimate strength is not justified, especially when quantitative calculations are not presented.

Economics of SFRC Slab-on-Piles Construction Process

The economic justification for an SFRC slab-on-piles system is based on its competitiveness in terms of materials used (less concrete volume and no reinforcing bars or welded wire

reinforcement), durability, ductility, and strength. It is also important to consider that the elimination of the need to work around and with traditional reinforcing materials yields savings that, on

average, are about 200 person-hours per 1000 m² (10,700 ft²) of the constructed slab, as shown in Fig. 3. Using this approach, it is common to complete bay sizes of up to 3000 m² (32,300 ft²) per

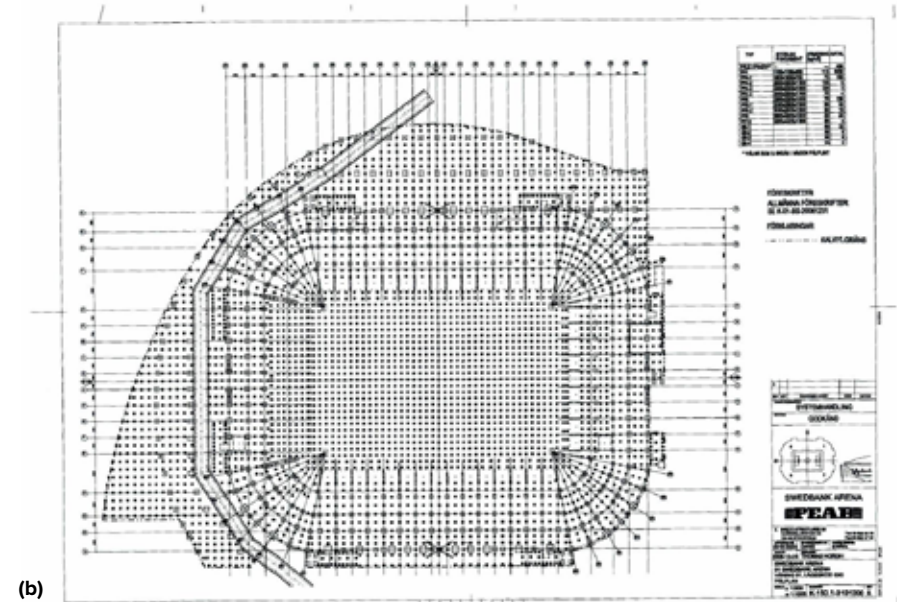


Fig. 1: Friends Arena: (a) a retractable roof, multipurpose stadium completed in Stockholm, Sweden, in 2011 (photo by Håkan Dahlström from Malmö, Sweden CC BY 2.0), source: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80643218>; (b) pile layout

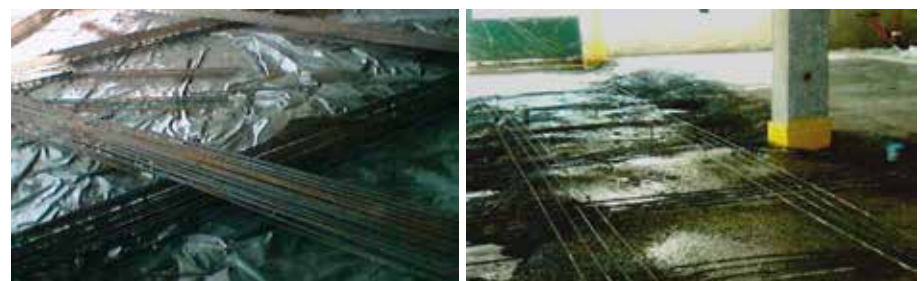


Fig. 2: Examples of the reinforcement required in pile-supported slabs designed using the Swedish design method

day between construction joints without any need for saw-cut contraction joints. Additional economic benefits accrue due to the simplification of construction operations, as shown in Fig. 4. When the ground is sufficiently stable to support the concrete truck weight and serve as the form beneath the slab, concrete can be directly discharged from the trucks, which leads to significant savings by eliminating the need for pumping concrete. Alternatively, 4 m³ (141 ft³) dumpers (concrete buggies) with low-pressure tires are often used, allowing for placement operations for large slabs. Elimination

of pumping also reduces the need for admixtures and fines as compared to a pumped mixture, and cement content can be reduced as well, resulting in less shrinkage, curling, and premature cracking.⁵

“Lessons Learned” in Sweden

We note that Silfwerbrand and Hedebratt summarized inspection data from 25 pile-supported slabs completed in SFRC together with reinforcing bars and/or welded wire reinforcement following the proposed Swedish method.⁶ The article shows that among all the slabs, 12 exhibited extensive cracking and joint problems, and among these 12 floors, five showed yield lines. We believe that such outcomes should be considered unacceptable. The recent article states: “In many cases, designs based on more venturesome methods result in well-performing, slender structures. However, they can also result in slabs with major cracking.”¹ The term “venturesome methods” is disparaging, and despite the claims made by the author, the “Belgian/Continental method” of design does not belong in that category.

In the 1990s, the Swedish Concrete Association published Concrete Report No. 4,⁷ which was considered to be at the international forefront. However, a significant amount of work has been conducted to date as the building codes allowed the development of a “design method assisted by the full-scale testing route.” More than 11 full-scale SFRC elevated continuous slabs have been tested and investigated in detail up to now, and several of them have been described in papers published in peer-reviewed journals and committee reports.²

Among the 11 full-scale tests of SFRC slabs, nine were performed in elevated continuous conditions so that there was no possibility of support by the ground. The slab thickness was not “thin,” as claimed by the author, but it was sufficient to withstand the loads at both service and ULS. The last two tests were SFRC slabs-on-piles, tested under the most critical service loading intensity. Due to the natural settlement of the ground between the piles, the ground was 10 to 60 mm (0.4 to 2.4 in.) below the bottom face of the slabs. The tests showed that under the service loading intensity, the slabs designed following the Belgian method exhibited deflections ranging between span/1000 and span/3000. Therefore, the slabs were quite stiff, as the standard service deflection is limited to span/500.

ACI 544.6R-15 Emerging Technology Report

ACI Committee 544 evaluated the method referred to as the Belgian method for more than 7 years, and the committee used it as the basis for recommendations in a new document. The objective was based on developing analysis and design tools to verify the design using available test results, materials tests, and structural analysis such that the full-scale testing would not be a necessary part of the validation procedures. Results of the effort culminated in the publication of ACI 544.6R-15. The report addresses the design and construction aspects of SFRC slabs-on-ground (G-SFRC) and elevated



Fig. 3: An SFRC slab-on-piles designed using the Belgian method (Montréal-Mirabel, 2001). Concrete was placed by direct discharge of concrete trucks. The piles are on a 4 x 4 m (13 x 13 ft) pile grid (four bent reinforcing bars can be seen at each pile)



Fig. 4: An SFRC elevated slab constructed with flowable concrete. Designed according to method described in the ACI 544.6R-15 report, this slab includes integrity reinforcement—bottom reinforcing bars extending from column to column—to prevent progressive collapse in the event of overload or damage

continuous slabs (E-SFRC). While this is not in the list of references in the discussed article, it addresses most of the author's questions and research needs statements.

The design process includes the checking of the ULS as well as the serviceability limit state (SLS) under variable and permanent loads. At the SLS level, the structure is checked under a combination of loads, using a conventionally acceptable model, safety factors, and assumed states of cracking such that the slab does not deflect more than the standard limit of span/500, and that the cracking remains under a practical limit depending on the nature of the environment and the assumed modes of behavior.

The ULS loading intensity is at most 1.5 to 1.6 times the SLS loading intensity; however, there are no specific limits placed on the deflection or the extent of cracking, making a quantitative evaluation of failure quite abstract because the nature of the damage at and beyond this stage is not well defined. It is intended that the structure remains stable at the ULS as the released loads are redistributed and catastrophic collapse is prevented. It is also clear that at the ULS point, the structure is not expected to remain serviceable due to the extent of cracks at the yield lines. The ULS stage is considered as a warning that the structure is narrowly close to complete loss of capacity, and immediate evacuation is needed to safeguard lives. Although not serviceable anymore at ULS, the test structure must be able to undergo a further increase of loading until the collapse.

The notion that a structure is more (or less) conservative at the ULS than another structure does not directly relate to the different design equations, modes of failure, or codes; it is a means of specifying that for the same mechanisms of failure, a structure that is thicker or has more reinforcement will carry more of the same loading, and in effect is less economical, resulting in a global waste of resources. Furthermore, the author states that: "slabs-on-ground and pile-supported slabs are not considered to be load-carrying structures."¹ This is far from the truth. Any industrial floor must be designed to carry the loads applied to it with sufficient factors of safety.

The Ductility of SFRC

The ductility of SFRC is its greatest advantage. The mechanical energy dissipated in the material is measured from the load and deflection response obtained using the ASTM C1609/C1609M-19a flexural beam test⁸ or the load versus crack opening data obtained in the BS EN 14651 standard notched beam test.⁹ The latter tests are conducted up to 3.5 mm (0.1 in.) crack mouth opening displacement (CMOD), or a similar level of deflection. Further, the residual flexural capacity is measured after the concrete has cracked, and the tensile load is primarily carried by the fibers that bridge the crack. The levels of deformation in SFRC under flexural tests are far beyond the elastic limit of concrete in flexure. It is the post-cracking resistance that helps support additional loads in flexure, especially if the slab is designed as structurally indeterminate.

We believe it is incorrect to assume that the BS EN 14651 test results provide an overestimated value of the tensile strength due to arch action. The BS EN 14651 beam is a simply supported notched beam, so the initial cracking and maximum loads are affected by the fracture process as well as localization. Furthermore, because the samples rest on a roller, no horizontal resistance force typical of the arching effect can develop. The nature of discrepancy with the tensile strength is related to the difference in flexural and tensile stress distribution as well as the preselection of the failure plane by placing a notch in the sample. These areas have been addressed in detail, and procedures such as the ACI 544.8R-16¹⁰ report provide sufficient detail on how to obtain an equivalent residual tensile strength from the flexural tests. Furthermore, the ACI 544.4R-18¹¹ guide allows for the structural calculations of FRC sections using these data.

As is discussed in ACI 544.6R-15, the overall ductility of a pile-supported slab is due to the combination of the material and the structural ductility, typical of the type of structure and its degree of structural indeterminacy. Like the small BS EN 14651 standard specimen or ASTM C1609/C1609M test specimen for flexural residual strength, a simply supported beam is a determinate structure and no structural ductility is available for load redistribution. However, a pile-supported slab has a very high level of structural indeterminacy because, at the ultimate state, multiple sets of yield lines develop. These result in cracks that initiate in two coordinate directions as well as both the top and bottom of the slab due to positive and negative bending moments. Multiple cracking mechanisms provide the added load-carrying capacity to the pile-supported slabs. Therefore, the continuity of the slabs and spacing of the piles become important design parameters.

SFRC is beneficial to the behavior of yield lines because of the high material ductility. The author cites no engineering calculation regarding arch action resulting from friction between the slab and the underlying soil. However, loads located close to a pile or other support will be resisted by an arch effect that will develop without horizontal restraint, much as loads close to the support are dealt with when designing concrete beams for shear.

The arch effect in concrete slabs was studied by Birke¹² and Nilsson,¹³ using conventionally reinforced concrete slabs and fiber-reinforced shotcrete anchored in rock, respectively. Both found substantial movement due to arch action. Figures 1 through 4 in the recent article¹ are schematic diagrams of the expected modes of failure. There is a significant amount of fundamental research that discusses these modes.^{6,12} Despite the claim that nobody has studied the arch effect in fiber concrete slabs-on-ground or slabs-on-piles, a series of excellent publications and full-scale tests have been published in this area by some of the leading researchers in the field, including Destrée and Mandl,³ Soranakom et al.,⁴ Mobasher and Destrée,⁵ di Prisco et al.,¹⁴ Nogales and de la

Fuente,¹⁵ Blanco et al.,¹⁶ Pujadas et al.,¹⁷ Barros and Figueiras,¹⁸ Balletti, et al.,¹⁹ Facconi et al.,²⁰ and Salehian and Barros.^{21,22}

The failure of SFRC in an indeterminate structure is governed by the formation of several yield lines before a mechanism takes place. Unlike the case of fracture mechanics, the weakest point does not govern the failure. There is very little contribution from a simply supported beam where the supports are free to rotate, and no net axial compressive force can develop. Therefore, the argument applied to the BS EN 14651 test is invalid. Regarding the statement “In a statically indeterminate beam...,” the beam will not collapse before the appearance of additional cracks. The risk of two weak zones is smaller than the risk of just one weak zone. While the materials may have a high scatter in the BS EN 14651 test results, the initial cracks in an indeterminate structure are not the determining failure points of the structure. By stating, “The Swedish design concept is an engineering way to solve the problem. More research to develop more detailed and accurate concepts would be welcomed,”²¹ the wealth of information that is available on this design approach was not acknowledged. The yield line theory has been the basis of testing and design for ACI 544.6R-15 and has served us well in this discipline. Facconi et al.²⁰ stated in 2018 that one of the most promising structural applications of SFRC is represented by elevated slabs due to the high degree of redundancy of these structures.

Areas of Research Need

We believe the statement concerning “research needs” does not acknowledge the efforts that led to the popularity of SFRC on pile-supported slabs over the past 15 years. The serviceability criteria are quite important in the context of design parameters because they govern the functionality of a floor system, and a serviceability level failure will always occur before the ULS. More focus should be placed on dimensional stability, crack width, deflection characteristics, and the potential formation of yield-line patterns, all of which lead to the ultimate mode of failure. The magnitude of the ULS as a multiplier of the serviceability criteria is not as important. The functionality of a slab-on-ground is expected to be exhausted long before the failure through a compressive membrane action or punching shear takes place.²⁰

Concluding Remarks

We do not agree that two safety methods with different safety levels are undesirable. Levels of conservatism computed based on assumed mechanisms that may not even take place under the real loading situations cannot be the basis for selecting a favorable design between the two. Furthermore, it is not clear why there would be a problem with two competing methods that are being validated and tested in the field. What would make such a process undesirable?

References

1. Silfwerbrand, J.L., “Industrial Fiber Concrete Floors,” *Concrete International*, V. 43, No. 5, May 2021, pp. 33-36.
2. ACI Committee 544, “Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs (ACI 544.6R-15),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 38 pp.
3. Destrée, X., and Mandl, J., “Steel Fibre Only Reinforced Concrete in Free Suspended Slabs,” *Concrete Engineering International*, V. 13, No. 1, Spring 2009.
4. Soranakom, C.; Mobasher, B.; and Destrée, X., “Numerical Simulation of FRC Round Panel Tests and Full-Scale Elevated Slabs,” *Deflection and Stiffness Issues in FRC and Thin Structural Elements*, SP-248, P. H. Bischoff and F. Malhas, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, pp. 31-39.
5. Mobasher, B., and Destrée, X., “Design and Construction Aspects of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs,” *Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete: Research and Applications*, SP-274, C.-M. Aldea and L. Ferrara, eds., 2010, pp. 95-107.
6. Hedebratt, J., and Silfwerbrand, J., “Lessons Learned – Swedish Design and Construction of Industrial Concrete Floors,” *Nordic Concrete Research*, Publication No. 45, June 2012, pp. 75-92.
7. Swedish Concrete Association, “Stålfiberbetong—rekommendationer för konstruktion, utförande och provning (Steel Fibre Concrete—Recommendations for Design, Construction and Testing),” Concrete Report No. 4, second edition, Swedish Concrete Association, Stockholm, Sweden, 1997, 135 pp. (in Swedish)
8. ASTM C1609/C1609M-19a, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading),” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 9 pp.
9. BS EN 14651:2007+A1:2008, “Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality [LOP], Residual),” BSI Group, London, UK, 2008, 20 pp.
10. ACI Committee 544, “Report on Indirect Method to Obtain Stress-Strain Response of Fiber-Reinforced Concrete (FRC) (ACI 544.8R-16),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 24 pp.
11. ACI Committee 544, “Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.4R-18),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 44 pp.
12. Birke, H., “Kupoleffekt vid betongplattor (Arch Action in Concrete Slabs),” Bulletin No. 108, Department of Structural Mechanics and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1975. (in Swedish)
13. Nilsson, U., “Structural Behaviour of Fibre Reinforced Sprayed Concrete Anchored in Rock,” PhD thesis, Bulletin No. 71, Department of Structural Engineering, KTH Concrete Structures, Stockholm, Sweden, 2003.
14. di Prisco, M.; Martinelli, P.; and Parmentier, B., “On the Reliability of the Design Approach for FRC Structures According to *fib* Model Code 2010: The Case of Elevated Slabs,” *Structural Concrete*, V. 17, No. 4, Dec. 2016, pp. 588-602.
15. Nogales, A., and de la Fuente, A., “Numerical-Aided Flexural-Based Design of Fibre Reinforced Concrete Column-Supported Flat Slabs,” *Engineering Structures*, V. 232, Apr. 2021.
16. Blanco, A.; Cavalaro, S.; de la Fuente, A.; Grünewald, S.; Blom,

C.B.M.; and Walraven, J.C., "Application of FRC Constitutive Models to Modelling of Slabs," *Materials and Structures*, V. 48, No. 9, Sept. 2015, pp. 2943-2959.

17. Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S.H.P.; Aguado, A.; Grünwald, S.; Blom, K.; and Walraven, J.C., "Plastic Fibres as the Only Reinforcement for Flat Suspended Slabs: Parametric Study and Design Considerations," *Construction and Building Materials*, V. 70, Nov. 2014, pp. 88-96.

18. Barros, J.A.O., and Figueiras, J.A., "Experimental Behaviour of Fibre Concrete Slabs on Soil," *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, V. 3, No. 3, July 1998, pp. 277-290.

19. Belletti, B.; Walraven, J.C.; and Trapani, F., "Evaluation of Compressive Membrane Action Effects on Punching Shear Resistance of Reinforced Concrete Slabs," *Engineering Structures*, V. 95, July 2015, pp. 25-39.

20. Facconi, L.; Plizzari, G.; and Minelli, F., "Elevated Slabs Made of Hybrid Reinforced Concrete: Proposal of a New Design Approach in Flexure," *Structural Concrete*, V. 20, No. 1, Feb. 2019, pp. 52-67.

21. Salehian, H., and Barros, J.A.O., "Prediction of the Load Carrying Capacity of Elevated Steel Fibre Reinforced Concrete Slabs," *Composite Structures*, V. 170, June 2017, pp. 169-191.

22. Salehian, H., and Barros, J.A.O., "Structural Response of the E-SFRSCC Slabs," BEFIB 2016—9th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Vancouver, BC, Canada, Sept. 19-21, 2016.

Selected for reader interest by the editors.



Xavier Destrée, FACI, is a Structural Engineer and Consultant to the ArcelorMittal company. He is a member of ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, and the author of patents for concrete steel fibers and applications such as steel fiber-reinforced concrete (SFRC) joint-free floors and continuous elevated SFRC slabs. Destrée has more than 40 years of experience in research and development in the design and applications of SFRC worldwide.



Barzin Mobasher, FACI and Fellow of RILEM, is a Professor of structural and materials engineering at the School of Sustainable Engineering and the Built Environment at Arizona State University, Tempe, AZ, USA. He has served as Chair of ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, and is currently serving on the Technical Activities Committees of both ACI and RILEM. His research contributions involve the fields of fiber- and textile-reinforced concrete materials, mechanics of toughening in ultra-high-performance concrete, cement-based systems durability modeling, and experimental mechanics.

Anyone. Anytime. Anywhere.

Instantly Verify
an individual's
ACI Certification.
Download the ACI
Certification Verify App now!



To learn more or download
the Verify App, visit
concrete.org/verify.



Pisos industriales de concreto reforzado con fibra: Una revisión de los conocimientos y la experiencia

por *Xavier Destrée y Barzin Mobasher*

En el número de mayo de 2021 de la revista *Concrete International*, un artículo de Johan L. Silfwerbrand analizaba las aplicaciones del concreto reforzado con fibras de acero (SFRC, por sus siglas en inglés) en pisos industriales.^{1 y 1A} Varias afirmaciones justifican un mayor análisis, en particular las relacionadas con los llamados enfoques belga/continental (belga) y sueco para el diseño de losas de SFRC. En aras de presentar una postura alternativa, es conveniente compartir varios trabajos publicados recientemente que apuntan hacia un sector cambiante; a los recientes desarrollos en el diseño estructural, la experiencia práctica y el ensayo; y al avance de los cálculos de diseño en este campo en los últimos 15 años.

Se han desarrollado muchos procedimientos de diseño por parte de organismos internacionales de normalización, como el ACI, la Federación Internacional del Concreto Estructural (fib) o el Instituto Japonés del Concreto (JCI), que han sido adoptados a nivel nacional o regional. Por ejemplo, el enfoque belga para el diseño de pisos industriales^{1 y 1A} de SFRC se utilizó como punto de partida de la gran cantidad de trabajo realizado por el Comité 544 del ACI, Concreto Reforzado con Fibras, durante las últimas dos décadas. Un hecho clave en este esfuerzo fue la publicación del reporte ACI 544.6R-15,² documento basado en las contribuciones

y verificaciones realizadas por numerosos investigadores internacionales. Las siguientes discusiones se basan en este y otros conocimientos disponibles y publicaciones recientes.

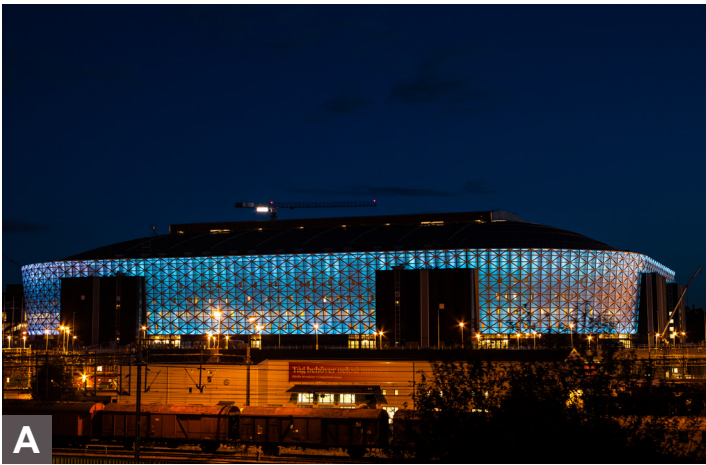
Recursos Técnicos Adicionales del ACI disponibles

Curso bajo pedido: Sistemas de polímeros reforzados con fibra (FRP) para reforzar estructuras (serie de tres partes)

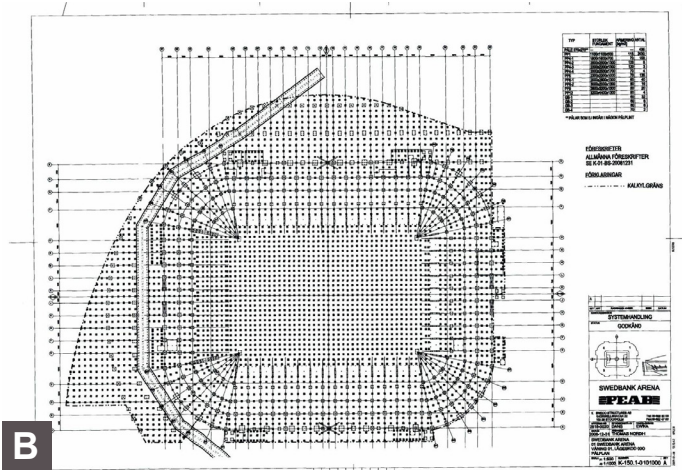
Curso bajo pedido: Diseño y construcción con Barra de polímero reforzado con fibra (FRP) (serie de dos partes)

Curso bajo pedido: Aplicaciones de campo de los métodos no convencionales de refuerzo y consolidación para puentes y estructuras

Visita: www.concrete.org/education/aciuniversity.aspx.



A



B

Figura. 1: Friends Arena: (a) Estadio polivalente con techo retráctil terminado en Estocolmo, Suecia, en 2011 (foto de Håkan Dahlström de Malmö, Suecia CC BY 2.0), fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80643218>; (b) disposición de las pilas

Planteamientos de diseño para losas de SFRC

El enfoque belga fue promovido para el uso de fibras de acero producidas por una de las principales empresas de fabricación de acero del mundo y se utiliza desde 1993.² Los propietarios y contratistas han usado continuamente el método, y el número de clientes de este enfoque se ha ampliado significativamente a medida que se desarrollan más aplicaciones para satisfacer los requisitos de construcción actuales de los pisos industriales.³⁻⁵ Se ha confirmado que este método cumple los requisitos del reporte ACI 544.6R y proporciona diseños confiables y económicos. Aproximadamente 20 millones de m² (215 millones de pies²) de losas terminadas están en servicio en Europa, Norteamérica y el Este de Asia. Entre ellos se encuentran proyectos de gran visibilidad, como la cimentación continua de losa sobre pilotes de SFRC de 16,000 m³ (565.000 ft³) para el Friends

Arena de Estocolmo, Suecia, con capacidad para 65,000 espectadores Fig. 1.

Tanto el enfoque de diseño belga como el sueco se aplican a losas sobre pilotes como sistemas necesarios debido a una baja capacidad de carga del suelo que impide tomar en cuenta el suelo para el soporte de la losa y las cargas impuestas. En estos sistemas, los pilotes soportan la losa, y el espesor de la losa está en función del tamaño, el número y la separación de los pilotes, así como de la función de cualquier refuerzo utilizado. La diferencia entre los dos métodos es que el enfoque sueco utiliza una losa de concreto reforzado con una combinación considerable de barras de refuerzo y refuerzo de alambre soldado, como se muestra en la Fig. 2. Mientras que el método belga se basa en una estrategia de refuerzo de “sólo fibra de acero”, como se muestra en la Fig. 3. La elevada dosis de fibras utilizada en los diseños basados en este último método contribuye a que las propiedades del material sean únicas, incluyendo una elevada resistencia a la tracción residual, que se traduce en contribuciones a la tracción desde la fase del concreto. Por lo tanto, estos enfoques son fundamentalmente diferentes entre sí.

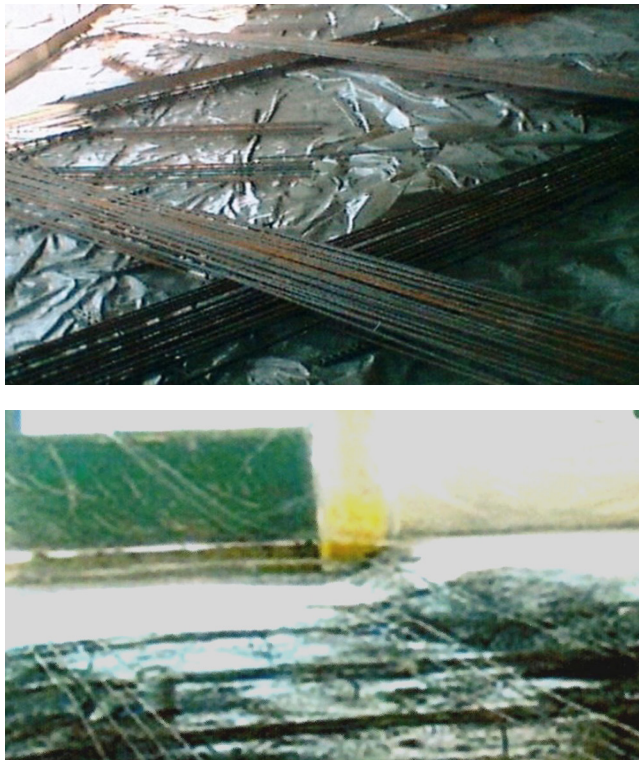


Figura. 2: Ejemplos del refuerzo requerido en losas apoyadas en pilotes diseñadas con el método de diseño sueco

Se ha argumentado que los principales factores que contribuyen a la resistencia de una losa son el efecto de arco, el efecto de membrana y la reducida probabilidad de zonas débiles a gran escala. Sin embargo, advertimos que es fundamental tener en cuenta el rango de deformaciones necesarias para iniciar los efectos de arco o de membrana en una condición de resistencia última de estado límite. Además, un estado límite último (ULS) de colapso no es un criterio que se aplique habitualmente a las losas sobre tierra debido a la redundancia de la transmisión de cargas.



Figura 3: Losa sobre pilotes de SFRC diseñada según el método belga (Montréal-Mirabel, 2001). El concreto se colocó por descarga directa de camiones de concreto. Los pilotes están sobre un enrejado de pilotes de unos 4 x 4 m (13 x 13 pies) (se pueden ver cuatro varillas de refuerzo dobladas en cada pilote)

El argumento del “conservacionismo”

El argumento para que un método sea más conservador que otro no debe basarse en una comparación de las especificaciones finales o de las directrices nacionales o regionales, porque el proceso de diseño no es una elección binaria. La elección debe basarse en un enfoque con antecedentes de aplicación en campo y ventajas económicas, incluido el costo de vida útil. La selección debe basarse en un enfoque que ofrezca la plena satisfacción del cliente a partir una serie de criterios tangibles y verificables.

La frase “método menos conservador” es, por tanto, preocupante. Si un método cumple con los criterios de diseño previstos, incluyendo la resistencia, la rigidez, la deflexión, la fluencia, el ancho de las grietas, el potencial de corrosión y los aspectos de durabilidad, basándose en métodos de prueba y cálculos verificables y válidos, debería poder competir entre las distintas opciones

disponibles. No se justifica una designación arbitraria como método conservacionista basada en el espesor o la resistencia última, especialmente cuando no se presentan cálculos cuantitativos.



Figura 4: Losa elevada de SFRC construida con concreto fluido. Diseñada según el método descrito en el reporte ACI 544.6R-15, esta losa incluye un refuerzo de integridad -varillas de refuerzo inferiores que se extienden de columna en columna- para evitar el colapso progresivo en caso de sobrecarga o daños

Economía del proceso de construcción de losas de SFRC sobre pilotes

La justificación económica de un sistema de losa de SFRC sobre pilotes radica en su competitividad en términos de materiales utilizados (menos volumen de concreto y sin barras de refuerzo o refuerzo de alambre soldado), durabilidad, ductilidad y resistencia. También es importante tener en cuenta que la eliminación de la necesidad de trabajo en torno a y con los materiales de refuerzo tradicionales supone un ahorro que, en promedio, ronda las 200 horas-hombre por cada 1,000 m² (10,700 ft²) de losa construida, como se muestra en la Fig. 3. Utilizando este enfoque, es común completar secciones de hasta 3,000 m² (32,300 pies²) por día entre las juntas de construcción sin necesidad de cortar con sierra dichas juntas. La simplificación de las operaciones de construcción aporta beneficios económicos adicionales, como se muestra en la Fig. 4. Cuando el suelo es lo suficientemente estable como para soportar el peso del camión de concreto y servir de cimbra debajo de la losa, el concreto puede descargarse

directamente de los camiones, lo que conlleva grandes ahorros al eliminar la necesidad de bombear el concreto. Como alternativa, se suelen utilizar dúmper de 4 m³ (141 ft³) (carritos de concreto) con neumáticos de baja presión, lo que permite operaciones de colocación de losas grandes. La eliminación del bombeo también reduce la necesidad de aditivos y finos en comparación con una mezcla bombeada, y el contenido de cemento también puede reducirse, lo que resulta en menos contracciones, alabeos y agrietamientos prematuros.⁵

“Lecciones aprendidas” en Suecia

Observamos que Silfwerbrand y Hedebratt resumieron los datos de inspección de 25 losas soportadas por pilotes terminadas con SFRC conjuntamente con barras de refuerzo y/o refuerzo de alambre soldado siguiendo el método sueco propuesto.⁶ El artículo muestra que, entre todas las losas, 12 mostraban grandes problemas de agrietamiento y de juntas, y entre estos 12 pisos, cinco mostraban líneas de fluencia. Creemos que estos resultados deben considerarse inaceptables. El reciente artículo afirma: “En muchos casos, los diseños basados en métodos más aventurados dan como resultado estructuras esbeltas con buen rendimiento. Sin embargo, también pueden dar lugar a losas con importantes agrietamientos”.¹ El término “métodos aventurados” es despectivo y, a pesar de las afirmaciones del autor, el “método belga/continental” de diseño se sale de esa categoría.

En los años 90, la Asociación Sueca del Concreto publicó el Reporte sobre Concreto No. 4,⁷ que se consideraba a la vanguardia internacional. Sin embargo, hoy en día se ha realizado una gran cantidad de trabajo, ya que los códigos de construcción permitieron el desarrollo de un “método de diseño asistido por la ruta de las pruebas a escala real”. Hasta ahora se han ensayado e investigado ampliamente más de 11 losas continuas elevadas de SFRC a escala real, y varias de ellas se han descrito en artículos publicados en revistas especializadas y reportes de comités.²

Entre las 11 pruebas a escala real de losas de SFRC, nueve se realizaron en condiciones elevadas y continuas, de modo que no había posibilidad de que se apoyaran en el suelo. El grosor de la losa no era “delgado”, como afirmaba el autor, pero era suficiente para soportar las cargas tanto de servicio como del ULS (Estado Límite Último). Las dos últimas pruebas eran losas de SFRC sobre pilotes, probadas a la intensidad de carga de servicio más crítica. Debido al asentamiento natural del suelo entre los pilotes, el suelo estaba entre 10 y 60 mm (0.4 a 2.4 pulg.) por debajo de la cara inferior de las losas. Los ensayos mostraron que, con la intensidad de carga de servicio, las losas diseñadas según el método belga presentaban deformaciones que oscilaban entre el claro/1000 y el claro/3000. Por lo tanto, las losas eran bastante rígidas, ya que la deflexión de servicio estándar es limitada al claro/500.

Reporte ACI 544.6R-15 sobre tecnologías emergentes

El Comité ACI 544 evaluó el método denominado belga durante más de 7 años, y el comité lo utilizó como base para las recomendaciones de un nuevo documento. El objetivo estaba basado en el desarrollo de herramientas de análisis y diseño para verificar el diseño utilizando los resultados de las pruebas disponibles, los ensayos de materiales y el análisis estructural, de manera que las pruebas a escala real no fueran una parte necesaria de los procedimientos de validación. Los resultados de este esfuerzo culminaron con la publicación del reporte ACI 544.6R-15. Éste aborda los aspectos de diseño y construcción de losas de SFRC sobre suelo (G-SFRC) y losas continuas elevadas (E-SFRC). Aunque no figura en la lista de referencias del artículo analizado, aborda la mayor parte de las preguntas del autor y las declaraciones sobre necesidades de investigación.

El proceso de diseño incluye la comprobación del ULS así como del estado límite de servicio (SLS) bajo cargas variables y permanentes. En el nivel del SLS, la estructura se revisa bajo una combinación de cargas, utilizando un

modelo convencionalmente aceptable, factores de seguridad y estados de agrietamiento supuestos, de manera que la losa no se desvíe más que el límite estándar del claro/500, y que el agrietamiento se mantenga por debajo de un límite práctico en función de la naturaleza del entorno y de los modelos de comportamiento supuestos.

La intensidad de carga del ULS es, como máximo, de 1.5 a 1.6 veces la intensidad de carga del SLS; no obstante, no existen límites específicos para la deflexión o la extensión del agrietamiento, lo que hace que la evaluación cuantitativa de la falla sea bastante abstracta, ya que la naturaleza del daño en esta etapa y después de ella no está bien definida. Se pretende que la estructura permanezca estable en el punto del ULS, ya que las cargas liberadas se redistribuyen y se evita el colapso catastrófico. También está claro que, en el punto de ULS, no se espera que la estructura siga siendo útil debido a la extensión de las grietas en las líneas de fluencia. La fase del ULS se considera una advertencia de que la estructura está muy cerca de la pérdida total de capacidad, y es necesario evacuar inmediatamente para salvaguardar vidas. Aunque ya no sea utilizable en el ULS, la estructura de prueba debe ser capaz de someterse a un nuevo aumento en la carga hasta el colapso.

La noción de que una estructura es más (o menos) conservadora en el ULS que otra estructura no se relaciona directamente con las diferentes ecuaciones de diseño, tipos de falla o códigos; es una forma de especificar que para los mismos mecanismos de falla, una estructura que es más gruesa o tiene más refuerzo soportará más de la misma carga, y en efecto es menos económica. Asimismo, el autor afirma que: “las losas sobre el suelo y las losas soportadas por pilotes no se consideran estructuras que soporten cargas”¹. Esto está muy lejos de la realidad. Cualquier piso industrial debe estar diseñado para soportar las cargas que se le apliquen con los suficientes factores de seguridad.

La ductilidad del SFRC

La ductilidad del SFRC es su mayor ventaja. La energía mecánica disipada en el material se mide a partir de la respuesta de carga y deflexión obtenida del ensayo de viga a flexión según ASTM C1609/C1609M-19a⁸ o los datos de carga frente a la apertura de grietas obtenidos del ensayo de viga con muesca conforme a BS EN 14651.⁹ Estas últimas pruebas se realizan hasta un desplazamiento de apertura de la boca de la grieta (CMOD) de 3.5 mm (0.1 pulgadas), o un nivel de deflexión similar. Además, la capacidad de flexión residual se mide después de que el concreto se haya agrietado y la carga de tracción es soportada principalmente por las fibras que forman un puente en la grieta. Los niveles de deformación de los SFRC en las pruebas de flexión están muy por encima del límite elástico del concreto en flexión. Es la resistencia posterior al agrietamiento la que ayuda a soportar las cargas adicionales en flexión, especialmente si la losa se diseña como estructuralmente indeterminada. Creemos que es incorrecto suponer que los resultados de los ensayos de la norma BS EN 14651 proporcionan un valor sobrestimado de la resistencia a la tracción debido a la acción del arco. La viga según BS EN 14651 es una viga con muesca apoyada simplemente, por lo que el agrietamiento inicial y las cargas máximas se ven afectados por el proceso de fractura, así como su localización. Además, como las muestras descansan sobre un rodillo, no puede desarrollarse ninguna fuerza de resistencia horizontal típica del efecto de arqueado. La naturaleza de la discrepancia con la resistencia a la tracción está relacionada con la diferencia en la distribución de los esfuerzos de flexión y de tracción, así como con la preselección del plano de fallo mediante la colocación de una muesca en la muestra. Estas áreas han sido tratadas a fondo, y los procedimientos como los del Reporte ACI 544.8R-16¹⁰ proporcionan suficientes detalles sobre cómo obtener una resistencia a la tracción residual equivalente a partir de los ensayos a flexión. Asimismo, la guía ACI 544.4R-18¹¹ permite realizar cálculos estructurales de secciones de FRC utilizando estos datos.

Como señala el reporte ACI 544.6R-15, la ductilidad global de una losa soportada por pilotes se debe a la combinación del material y la ductilidad estructural, propia del tipo de estructura y su grado de indeterminación estructural. Al igual que el pequeño espécimen estándar según BS EN 14651 o el espécimen de prueba según ASTM C1609/C1609M para la resistencia residual a la flexión, una viga simplemente apoyada es una estructura determinada y no se dispone de ductilidad estructural para la redistribución de la carga. Sin embargo, una losa soportada por pilotes tiene un nivel muy alto de indeterminación estructural porque, en el estado final, se desarrollan múltiples conjuntos de líneas de fluencia. Esto da lugar a grietas que se inician en dos direcciones coordinadas, así como en la parte superior e inferior de la losa, debido a los momentos de flexión positivos y negativos. Los múltiples mecanismos de agrietamiento proporcionan la capacidad de carga añadida a las losas soportadas por pilotes. Por lo tanto, la continuidad de las losas y la separación de los pilotes se convierten en importantes parámetros de diseño.

El SFRC es favorable al comportamiento de las líneas de fluencia debido a la alta ductilidad del material. El autor no cita cálculos de ingeniería sobre la acción del arco resultante de la fricción entre la losa y el suelo subyacente. Sin embargo, las cargas situadas cerca de un pilote u otro apoyo resistirán por un efecto de arco que se desarrollará sin restricción horizontal, de forma parecida a como se tratan las cargas cercanas al apoyo cuando se diseñan vigas de concreto a cortante.

El efecto de arco en las losas de concreto fue estudiado por Birke¹² y Nilsson,¹³ utilizando losas de concreto reforzadas convencionalmente y concreto lanzado reforzado con fibra anclado en roca, respectivamente. En ambos casos se constató un movimiento sustancial debido a la acción del arco. Las Figuras de la 1 a la 4 del reciente artículo^{1 y 1A} son diagramas esquemáticos de los tipos de fallas esperados. Hay una gran cantidad de investigación básica que discute estos tipos.^{6,12} A pesar de la afirmación de que nadie ha estudiado el efecto de arco en losas de concreto con fibras sobre suelo o losas sobre

pilotes, se han editado una serie de excelentes publicaciones y pruebas a escala real en esta área por parte de algunos de los principales investigadores en la materia, incluyendo a Destrée y Mandl,³ Soranakom et al.,⁴ Mobasher y Destrée,⁵ di Prisco et al.,¹⁴ Nogales y de la Fuente,¹⁵ Blanco et al.,¹⁶ Pujadas et al.,¹⁷ Barros y Figueiras,¹⁸ Balletti, et al.,¹⁹ Facconi et al.,²⁰ y Salehian y Barros.^{21, 22}

La falla del SFRC en una estructura indeterminada se rige por la formación de varias líneas de fluencia antes de que un mecanismo tenga lugar. Contrariamente en el caso de la mecánica de la fractura, el punto más débil no rige la falla. La contribución de una viga apoyada de forma sencilla, en la que los apoyos pueden girar libremente, es muy escasa y no puede desarrollarse ninguna fuerza de compresión axial neta. Por lo tanto, el argumento aplicado al ensayo BS EN 14651 no es válido. En cuanto a la afirmación “En una viga estáticamente indeterminada...”, la viga no se derrumbará antes de la aparición de grietas adicionales. El riesgo de dos zonas débiles es menor que el riesgo de una sola zona débil. Aunque los materiales pueden tener una gran dispersión en los resultados de las pruebas según la BS EN 14651, las grietas iniciales en una estructura indeterminada no son los puntos de falla determinantes de la estructura. Al afirmar que “el concepto de diseño sueco es una forma de ingeniería para resolver el problema. Se agradecerían más investigaciones para desarrollar conceptos más detallados y precisos”¹, no se reconoció la gran cantidad de información disponible sobre este enfoque de diseño. La teoría de la línea de fluencia ha sido la base de las pruebas y el diseño del ACI 544.6R-15 y nos ha servido bien en esta disciplina. En 2018, Facconi et al.²⁰ afirmaron que una de las aplicaciones estructurales más prometedoras del SFRC está representada por las losas elevadas debido al alto grado de redundancia de estas estructuras.

Áreas que necesitan investigación

Creemos que la afirmación relativa a las “necesidades de investigación” no reconoce los esfuerzos que llevaron a la popularidad del SFRC en losas apoyadas en pilotes durante los últimos 15 años. Los criterios de servicio son muy importantes en el contexto de los parámetros de diseño porque rigen la funcionalidad de un sistema para pisos, y una falla al nivel de servicio siempre ocurrirá antes que el ULS. Debe prestarse más atención a la estabilidad dimensional, al ancho de la grieta, a las características de la deflexión y a la potencial formación de patrones de líneas de rendimiento, ya que todo ello conduce al tipo último de falla. La magnitud del ULS como multiplicador de los criterios de utilidad no es tan importante. Se espera que la funcionalidad de una losa sobre suelo se agote mucho antes de que se produzca la falla mediante una acción de compresión de la membrana o a cortante por punzonamiento.²⁰

Observaciones finales

No estamos de acuerdo en que dos métodos de seguridad con diferentes niveles de seguridad no sean deseables. Los niveles de conservacionismo calculados sobre la base de mecanismos supuestos que pueden incluso no tener lugar en las situaciones de carga reales no pueden ser la base para seleccionar un diseño favorable entre ambos. Por otro lado, no está claro por qué habría un problema con dos métodos que compiten entre sí y que están siendo validados y probados en el campo. ¿Qué es lo que haría que este proceso no fuera deseable?

Referencias

1. Silfwerbrand, J.L., “Industrial Fiber Concrete Floors,” *Concrete International*, V. 43, No. 5, May 2021, pp. 33-36.
- 1A. Silfwerbrand, J.L., “Pisos Industriales de Concreto con Fibras” *Concreto Latinoamérica*, Volumen 2, Número 5, Mayo 2021 pág 20-25.
2. ACI Committee 544, “Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs (ACI 544.6R-15),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 38 pp.

3. Destrée, X., and Mandl, J., “Steel Fibre Only Reinforced Concrete in Free Suspended Slabs,” *Concrete Engineering International*, V. 13, No. 1, Spring 2009.
4. Soranakom, C.; Mobasher, B.; and Destrée, X., “Numerical Simulation of FRC Round Panel Tests and Full-Scale Elevated Slabs,” *Deflection and Stiffness Issues in FRC and Thin Structural Elements*, SP-248, P. H. Bischoff and F. Malhas, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, pp. 31-39.
5. Mobasher, B., and Destrée, X., “Design and Construction Aspects of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs,” *Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete: Research and Applications*, SP-274, C.-M. Aldea and L. Ferrara, eds., 2010, pp. 95-107.
6. Hedebratt, J., and Silfwerbrand, J., “Lessons Learned – Swedish Design and Construction of Industrial Concrete Floors,” *Nordic Concrete Research*, Publication No. 45, June 2012, pp. 75-92.
7. Swedish Concrete Association, “Stålfiberbetong—rekommendationer för konstruktion, utförande och provning (Steel Fibre Concrete—Recommendations for Design, Construction and Testing),” *Concrete Report No. 4*, second edition, Swedish Concrete Association, Stockholm, Sweden, 1997, 135 pp. (in Swedish)
8. ASTM C1609/C1609M-19a, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading),” *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2019, 9 pp.
9. BS EN 14651:2007+A1:2008, “Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality [LOP], Residual),” *BSI Group*, London, UK, 2008, 20 pp.
10. ACI Committee 544, “Report on Indirect Method to Obtain Stress-Strain Response of Fiber-Reinforced Concrete (FRC) (ACI 544.8R-16),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 24 pp.
11. ACI Committee 544, “Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.4R-18),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2018, 44 pp.
12. Birke, H., “Kupoleffekt vid betongplattor (Arch Action in Concrete Slabs),” *Bulletin No. 108*, Department of Structural Mechanics and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1975. (in Swedish)
13. Nilsson, U., “Structural Behaviour of Fibre Reinforced Sprayed Concrete Anchored in Rock,” PhD thesis, *Bulletin No. 71*, Department of Structural Engineering, KTH Concrete Structures, Stockholm, Sweden, 2003.
14. di Prisco, M.; Martinelli, P.; and Parmentier, B., “On the Reliability of the Design Approach for FRC Structures According to fib Model Code 2010: The Case of Elevated Slabs,” *Structural Concrete*, V. 17, No. 4, Dec. 2016, pp. 588-602.

15. Nogales, A., and de la Fuente, A., "Numerical-Aided Flexural-Based Design of Fibre Reinforced Concrete Column-Supported Flat Slabs," *Engineering Structures*, V. 232, Apr. 2021.

16. Blanco, A.; Cavalaro, S.; de la Fuente, A; Grünwald, S.; Blom, C.B.M.; and Walraven, J.C., "Application of FRC Constitutive Models to Modelling of Slabs," *Materials and Structures*, V. 48, No. 9, Sept. 2015, pp. 2943-2959.

17. Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S.H.P.; Aguado, A.; Grünwald, S.; Blom, K.; and Walraven, J.C., "Plastic Fibres as the Only Reinforcement for Flat Suspended Slabs: Parametric Study and Design Considerations," *Construction and Building Materials*, V. 70, Nov. 2014, pp. 88-96.

18. Barros, J.A.O., and Figueiras, J.A., "Experimental Behaviour of Fibre Concrete Slabs on Soil," *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, V. 3, No. 3, July 1998, pp. 277-290.

19. Belletti, B.; Walraven, J.C.; and Trapani, F., "Evaluation of Compressive Membrane Action Effects on Punching Shear Resistance of Reinforced Concrete Slabs," *Engineering Structures*, V. 95, July 2015, pp. 25-39.

20. Facconi, L.; Plizzari, G.; and Minelli, F., "Elevated Slabs Made of Hybrid Reinforced Concrete: Proposal of a New Design Approach in Flexure," *Structural Concrete*, V. 20, No. 1, Feb. 2019, pp. 52-67.

21. Salehian, H., and Barros, J.A.O., "Prediction of the Load Carrying Capacity of Elevated Steel Fibre Reinforced Concrete Slabs," *Composite Structures*, V. 170, June 2017, pp. 169-191.

22. Salehian, H, and Barros, J.A.O., "Structural Response of the E-SFRSCC Slabs," BEFIB 2016—9th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Vancouver, BC, Canada, Sept. 19-21, 2016.



La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

Título: Pisos industriales de concreto reforzado con fibra: Una revisión de los conocimientos y la experiencia



Traductor:
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez



Revisor Técnico:
M.A. Erick Villanueva Rodríguez