

Structural Plain Concrete Gets a Fresh Look

by Luke R. Pinkerton

Since ACI Committee 322, Structural Plain Concrete, was discharged in 1974, the concrete industry has seen significant developments in materials and analysis methods. To build on this progress, engineers, material suppliers, contractors, and code officials need concise, up-to-date guidance for safely implementing structural plain concrete. In response, ACI recently created a new committee, ACI Committee 380, Structural Plain Concrete. This move is timely because it coincides with the Portland Cement Association's recently announced initiative to develop a roadmap "to facilitate its member companies achieving carbon neutrality across the concrete value chain by 2050."¹ This ambitious goal will require innovation throughout the concrete industry and construction sector, including optimization of design standards.

Background

Structural plain concrete is used within structural elements including arches, pedestals, and soil-supported structures such as foundations (Fig. 1). Design requirements are currently provided in Chapter 14 of ACI 318-19² and Section 6.5 of ACI 332-14.³ Further, Chapter 12 of ACI 360R-10⁴ lists slab-on-ground applications that should be designed in accordance with the provisions in the ACI 318 Code.

Work Products

The provisions in current ACI committee documents can be sourced to the work of ACI Committee 322, which was active from the 1940s into the 1970s. The committee's final work products included a report, published in 1967,⁵ and the ACI 322 code,⁶ published in 1972 as a supplement to ACI 318-71⁷ (Fig. 2). The design approaches provided in the ACI 322 code were based on linear elastic principles. Tensile and flexural capacities were based on both direct measurement of flexural strength and a conservative relationship between the compressive strength and tensile strength of concrete. Furthermore, large factors of safety were employed to prevent failure.

After the committee was discharged, many of the members of ACI Committee 322 joined ACI Committee 318, Structural Concrete Building Code. ACI Committee 318 published at least one separate guide for structural plain concrete in 1989⁸

before incorporating the requirements into Chapter 12 of ACI 318-89 (Revised 1992).⁹

Since then, no major changes have been made to the relevant ACI 318 Code provisions. Further, parallel provisions in codes published in Canada,¹⁰ Australia,¹¹ and the European



Fig. 1: Continuous and pad footings

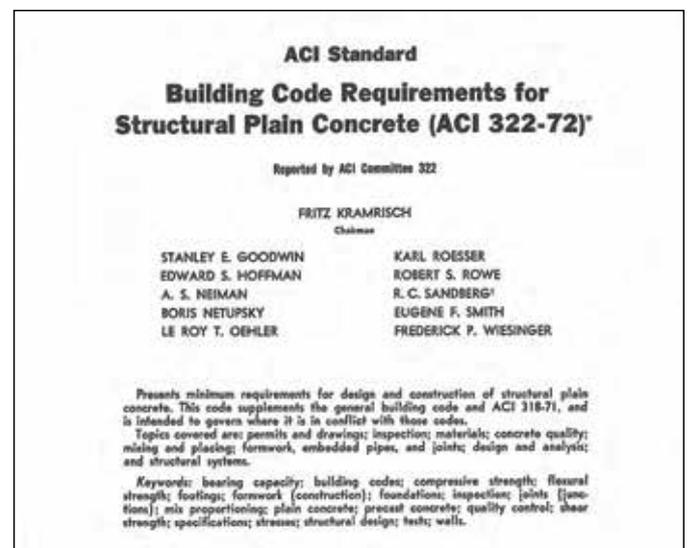


Fig. 2: The title page from the ACI 322-72 code⁶

Union¹² follow many of the same general principles present in the ACI 322 code.

Summary of U.S. Code Requirements

ACI 318 Code

Structural plain concrete is addressed in Chapter 14 of ACI 318-19. Section 14.1.3 permits structural plain concrete for the following members:

- Members that are continuously supported by soil or supported by other structural members capable of providing continuous vertical support;
- Members for which arch action provides compression under all conditions of loading;
- Walls; and
- Pedestals.

Additional restrictions and guidelines are provided for each member type, including requirements for contraction joints. Nominal flexural strength is limited by $5\lambda\sqrt{f'_c}S_m$, where λ is a modification factor to reflect the reduced mechanical properties of lightweight concrete relative to normalweight concrete of the same compressive strength f'_c , and S_m is the elastic section modulus. Section 21.2 specifies a resistance factor ϕ of 0.60 for plain concrete. It is noteworthy that calibrations of ϕ were based on compressive strength rather

than the actual limiting property, flexural strength.¹³

ACI 332 Code

Structural plain concrete applications in walls, footings, and ground-supported slabs are addressed in Chapter 6 of ACI 332-20.¹⁴ Section 6.2.1.2 specifies that modulus of rupture f_r is $7.5\lambda\sqrt{f'_c}$ in psi ($0.63\lambda\sqrt{f'_c}$ in MPa), although this section also allows performance-based design as an alternative system per Section 1.2 of the ACI 332 code. The latter section provides that an alternative system shall be of the same force and effect as the provisions of the code if the building code official has approved and promulgated that adequacy has been shown by successful use, analysis, or test. ACI Committee 380 is expected to play a role in assisting ACI Committee 332, Residential Concrete Work, in providing such information to engineers and code officials.

A New Committee on Structural Plain Concrete

In 2017, I asked ACI staff about updating the provisions for plain concrete because they affect residential construction, and my firm is active in that market. Jim Baty, Executive Director of the Concrete Foundations Association, also recognized the need for updates, so we worked with ACI staff to develop a committee with representation from a balanced

FREE Educational Resources

Online Education Presentations

Browse from a large selection of recorded presentations from ACI Concrete Conventions and other concrete industry events available for viewing online.

Presentations are also available on ACI's YouTube Concrete Channel.

www.concrete.org/education



Documents

Visit the ACI Store at www.concrete.org/store and download free documents from ACI's Educational Committees.

These documents, available in digital editions, cover:

- Materials
- Design examples for concrete structures
- Repair application procedure



www.ACIUniversity.com

group of stakeholders. Two years later, the ACI Technical Activities Committee (TAC) created ACI Committee 380, Structural Plain Concrete, and the committee held its first meeting at the ACI Concrete Convention – Fall 2019 in Cincinnati, OH, USA. Currently, Baty is the Chair, I am the Secretary, and Barzin Mobasher is the TAC Liaison.

The committee’s mission is to advance the design and application of structural plain concrete to improve its performance and recognition as a reliable construction material. So far, the committee has identified several key areas to investigate:

- Origins of current resistance models;
- Strength versus deflection criteria;
- Ductility;
- Failure and life safety;
- Areas of application;
- Analysis methods;
- Performance-based design;
- Quality control; and
- Constructability.

The committee’s first order of business is to conduct a review of structural plain concrete research and codes. To revive innovation in plain concrete applications with an eye to safety and affordability, the committee will review performance-based design using flexural testing to establish design strengths instead of approximating them from compressive strengths. Equally important, the committee will review the weaknesses, limitations, and safety of designs made with brittle materials.

While there is little research targeted on the design of plain concrete structures, the committee plans to leverage related publications and research. One notable example is a paper by Légeron and Paultre,¹⁵ which presents a discussion of modulus of rupture testing and application. The committee is planning sessions on topics related to or impacted by plain concrete, and it hopes to spark new research into areas it identifies as needing further study.

Performance-Based Design

One of the key statements made by ACI Committee 322 was: “Attempts to improve the overall quality and safety of the material ought to be given credit.”²⁵ In that light, and to continue the vision of the original committee on plain concrete, the new committee will investigate performance-based design.

There are precedents for performance-based design based on flexural strength. For example, in the tilt-up concrete industry, panels are designed using elastic principles. The number of lifting points and thickness limits are generally based on the flexural strength of the concrete, with the goal that the section will remain uncracked (Fig. 3)

during erection. Figure 4 illustrates panel stress limits based on measured modulus of rupture, allowable lifting stress based on f_r from Chapter 19 of the ACI 318 Code, and strength design based on Chapter 14 of the ACI 318 Code.

ACI Committee 322 also provided a simple form of performance-based design (Fig. 5), as the ACI 332 code allowed the engineer to specify the flexural strength of the



Fig. 3: A 4.5 in. (114 mm) thick tilt-up concrete panel designed using performance-based design principles is lifted (from Reference 16)

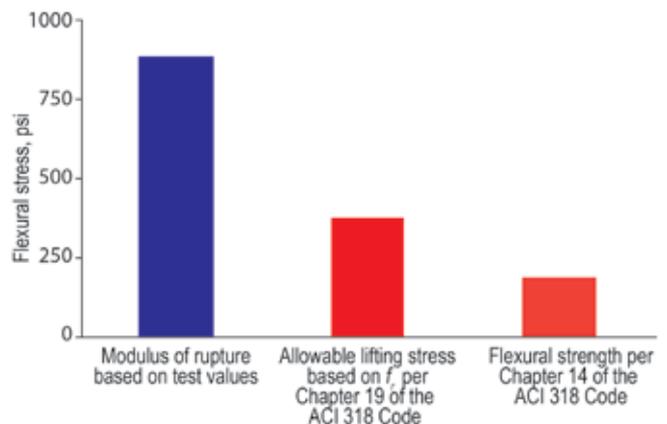


Fig. 4: Example comparison of flexural stresses

TABLE 7.1—PERMISSIBLE STRESS VALUES AND ALLOWABLE WORKING STRESSES IN STRUCTURAL PLAIN CONCRETE

Description	Reference to section in this code	TABLE 7.1 (a) Permissible stress values in structural plain concrete where strength design method is used Note: Capacity reduction factor ϕ has been included (see Section 7.2.2)		TABLE 7.1 (b) Allowable working stresses in structural plain concrete where alternate design method is used	
		f_{cs}	$0.65 f_c'$ or $4.55 f_r$	f_c	$0.24 f_c'$ or $2.4 f_r$
Flexure	Compression	f_{cs}	$0.65 f_c'$ or $4.55 f_r$	f_c	$0.24 f_c'$ or $2.4 f_r$
	Tension	f_{ct}	$3.25 \sqrt{f_c'}$ or $0.42 f_r$	f_t	$1.00 \sqrt{f_c'}$ or $0.21 f_r$
Axial compression or bearing	On full area	f_{ca}	$0.60 f_c'$ or $4.2 f_r$	f_{ca}	$0.20 f_c'$ or $2.10 f_r$
	On part area	f_{cp}	$f_{cp} \sqrt{A_2/A_1}$ but not more than $2 f_{ca}$	f_{cp}	$f_{cp} \sqrt{A_2/A_1}$ but not more than $2 f_{ca}$
Shear	One-way (beam) action	v_{cs}	$1.70 \sqrt{f_c'}$ or $0.23 f_r$	v_{cs}	$1.10 \sqrt{f_c'}$ or $0.15 f_r$
	Two-way (slab) action	v_{cs}	$3.40 \sqrt{f_c'}$ or $0.46 f_r$	v_{cs}	$2.00 \sqrt{f_c'}$ or $0.27 f_r$

Fig. 5: Table 7.1 in ACI 322-72 allowed the engineer to specify the flexural strength as the basis for the permissible tensile stress in the concrete



Fig. 6: Typical flexural test setup per ASTM C78/C78M

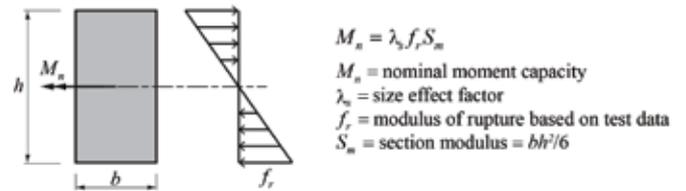


Fig. 7: Flexural design of structural plain concrete could, for example, be based on a linear elastic stress distribution and using f_r established for specific mixtures and adjusted for variability and size effects



Fig. 8: The Mars Canopy was constructed without reinforcing bars²⁰

mixture used in a structure. Design for flexure was accomplished by multiplying the specified flexural strength by 0.42. One possible consideration would be to update this concept to allow the market to develop concrete mixtures that are designed specifically for use in plain concrete applications.

Chapter 14 in the current ACI 318 Code, however, lacks an approach for measuring flexural performance of plain concrete and using it in design. A performance-based model for linear elastic design is necessary to characterize concrete performance through standard testing methods such as ASTM C78/C78M, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)” (Fig. 6).

Similarly, a performance-based design approach based on simple linear elastic design principles (Fig. 7) could be provided as an alternative to the compressive strength-based equations in the current codes. While the ACI 322 code used a simple multiplier to obtain the working strength, a modern approach might also include adjustment for the size effect.^{15,17}

To ensure a safe design, the ϕ factor specified in the design standards would require calibration based on the requirements of ASCE 7-10, Section 1.3,¹⁸ using the design point method.¹⁹ The lack of ductility; building risk category; variability in modulus of rupture; other variabilities inherent to the system,

including loads, member width, and depth; and in-place variation would be considered in the resistance factor calibration. The approach would also need to consider factors such as settlement, temperature strains, shrinkage, creep, and environmental degradation (such as damage due to cyclic freezing and thawing) that could affect the ability of the concrete to provide adequate resistance throughout its service life.

Impact of Performance-Based Design

Updating the code to allow performance-based linear elastic design is expected to encourage the development of high-performance concrete, potentially resulting in safe and reliable structures that can be constructed in less time, with reduced labor demand, and with smaller embodied energy and carbon footprints than currently allowed.

Thus, ACI’s reinstatement of a committee on structural plain concrete shows a significant commitment to advance the state-of-the-art, expanding the design possibilities for customers, builders, and engineers. The addition of performance-based design could prompt the development of new and improved material technologies specifically designed for use in plain concrete structures. Further development in analysis methods and quality control can provide opportunities in enhanced efficiency and safety, eventually enabling robotic construction based on additive manufacturing methods (Fig. 8).

While the potential is great, ACI Committee 380 must also

be aware of the limitations associated with structural plain concrete. Even if concrete mixtures are engineered for higher and more consistent performance, long-term behavior and the potential brittle failure modes must be considered when establishing limits on applications and setting appropriate resistance factors.

Reinforcing bars are still needed to make up for concrete's shortcomings in terms of ductility and tensile strength. I hope the committee's work will incentivize the industry to develop advanced materials and methods that could dramatically change our perception of concrete as a building material and secure its future as the preferred method of construction due to its safety, longevity, performance, efficiency, and sustainability.

Acknowledgments

Jim Baty and members of ACI Committee 380 provided valuable feedback and reviews.

References

1. "Portland Cement Association to Further Sustainability Goals by Creating Carbon Neutrality Roadmap for the Cement and Concrete Industry," Press release, Portland Cement Association, Skokie, IL, Nov. 17, 2020. www.cement.org/newsroom/2020/11/17/portland-cement-association-to-further-sustainability-goals-by-creating-carbon-neutrality-roadmap-for-the-cement-and-concrete-industry.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
3. ACI Committee 332, "Residential Code Requirements for Structural Concrete (ACI 332-14) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 54 pp.
4. ACI Committee 360, "Guide to Design of Slabs-on-Ground (ACI 360R-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 72 pp.
5. ACI Committee 322, "Structural Plain Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 64, No. 4, Apr. 1967, pp. 186-189.
6. ACI Committee 322, "Building Code Requirements for Structural Plain Concrete (ACI 322-72)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1972, 7 pp.
7. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1971, 78 pp.
8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Plain Concrete (ACI 318.1-89) and Commentary (ACI 318.1R-89)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 14 pp.
9. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) (Revised 1992) and Commentary (ACI 318R-89) (Revised 1992)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 347 pp.
10. CAN/CSA-A23.3-04, "Design of Concrete Structures," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 2004, 232 pp.
11. AS3600:2018, "Concrete Structures," fifth edition, Standards Australia, Sydney, Australia, 2018, 256 pp.
12. EN1992-1-1:2004, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures—

Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004, 225 pp.

13. Szerszen, M.M., and Nowak, A.S., "Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2—Reliability Analysis and Resistance Factors," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 3, May-June 2003, pp. 383-391.

14. ACI Committee 332, "Code Requirements for Residential Concrete and Commentary (ACI 332-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 74 pp.

15. Légeron, F., and Paultre, P., "Prediction of Modulus of Rupture of Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 97, No. 2, Mar.-Apr. 2000, pp. 193-200.

16. Pinkerton, L., and Foster-Goodman, S., "Bringing Mars to Earth," *Tilt-Up Today*, Tilt-Up Concrete Association, Nov. 2018. www.tilt-up.org/tilt-up-today/2018/11/01/bringing-mars-to-earth.

17. "CEB-FIP Model Code 1990: Design Code," *fib* (International Federation for Structural Concrete), Lausanne, Switzerland, 1990, 437 pp.

18. ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," American Society for Civil Engineers, Reston, VA, 2011, 656 pp.

19. Nowak, A.S., and Collins, K.R., *Reliability of Structures*, second edition, CRC Press, 2012, 407 pp.

20. Sarafian, J.; Culver, R.; and Lewis, T.S., "Robotic Formwork in the MARS Pavilion," *Acadia 2017: Disciplines and Disruption Conference Proceedings*, Cambridge, MA, Nov. 2-4, 2017, pp. 522-533.

Note: Additional information on the ASTM standard discussed in this article can be found at www.astm.org.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Luke R. Pinkerton** is President, Chief Technology Officer, and Founder of Helix Steel, Ann Arbor, MI, USA. He is Secretary of ACI Committee 380, Structural Plain Concrete, and ACI Subcommittee 332-D, Residential Concrete—Footings & Foundation Walls. He is a member of ACI Committees 332, Residential Concrete Work; 360,

Design of Slabs on Ground; 544, Fiber Reinforced Concrete; and 551, Tilt-up Concrete Construction. He is also a member of ASTM Committee C09, Concrete and Concrete Aggregates, and Chair of that committee's Direct Tension Test Task Group. He has employed alternative flexural strength performance-based design approaches in thousands of structures since 2002, and because of this work, he was awarded the 2018 Tilt-Up Concrete Association's Robert Aiken Award for Innovation. He received his BS in engineering physics from Hope College, Holland, MI; his MS in structural engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, MI; and his MBA from Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA. He is a licensed professional engineer in Maine.

El Concreto Simple Estructural Adquiere un Aspecto Renovado

by Luke R. Pinkerton

Desde el Comité 322 de ACI, Concreto Simple Estructural, fue dado de alta en 1974, la industria del concreto ha visto desarrollos significativos en materiales y métodos de análisis. Para aprovechar este progreso, los ingenieros, proveedores de materiales, contratistas y funcionarios del código necesitan una guía concisa y actualizada para implementar de manera segura el concreto simple estructural. En respuesta, ACI creó recientemente un nuevo comité, el Comité 380 de ACI, Concreto Simple Estructural. Esta medida es oportuna porque coincide con la iniciativa recientemente anunciada de la Portland Cement Association de desarrollar un mapa vial “para facilitar que sus empresas afiliadas logren la neutralidad de carbono en toda la cadena de valor del concreto para el 2050.”¹ Este ambicioso objetivo requerirá innovación en toda la industria del concreto y el sector de la construcción, incluida la optimización de los estándares de diseño.

Antecedentes

El concreto simple estructural se usa dentro de elementos estructurales que incluyen arcos, pedestales y estructuras sostenidas por el suelo como cimientos (Fig. 1). Los requisitos de diseño se proporcionan actualmente en el Capítulo 14 de ACI 318-19² y la Sección 6.5 de ACI 332-14.³ Además, el Capítulo 12 de ACI 360R-10⁴ enumera las aplicaciones de losas en el suelo que deben diseñarse de acuerdo con las disposiciones de código ACI 318.

Productos del trabajo

Las disposiciones de los documentos actuales del comité ACI pueden derivarse del trabajo del Comité ACI 322, que estuvo activo desde la década de 1940 hasta la de 1970. Los productos finales del

trabajo del comité incluyeron un informe, publicado en 1967,⁵ y el código ACI 322,⁶ publicado en 1972 como un suplemento de ACI 318-71⁷ (Fig. 2). Los enfoques de diseño proporcionados en el código ACI 322 se basaron en principios elásticos lineales. Las capacidades de tracción y flexión se basaron tanto en la medición directa de la resistencia a la flexión como en una relación conservadora entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tensión del concreto.



Fig. 1: Zapata de cimentación continua

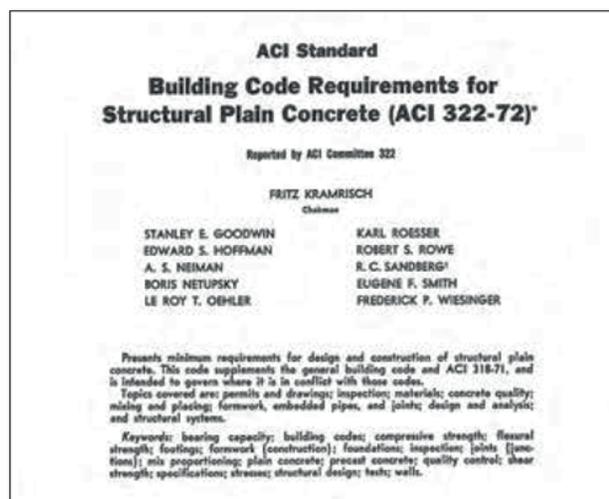


Fig. 2: La página de título del código⁶ ACI 322-72

Además, se emplearon grandes factores de seguridad para evitar fallas.

Después de que el comité fue despedido, muchos de los miembros del Comité ACI 322 se unieron al Comité ACI 318, Código de Construcción de Concreto Estructural. El Comité 318 de ACI publicó al menos una guía separada para concreto simple estructural en 1989⁸ antes de incorporar los requisitos en el Capítulo 12 de ACI 318-89 (revisada en 1992).⁹

Desde entonces, no se han realizado cambios importantes en las disposiciones pertinentes del Código ACI 318. Además, las disposiciones paralelas en los códigos publicados en Canadá,¹⁰ Australia,¹¹ y la Unión Europea¹² siguen muchos de los mismos principios generales presentes en el código ACI 322.

Resumen de los requisitos del Código EE. UU. Código ACI 318.

El concreto simple estructural se trata en el Capítulo 14 de ACI 318-19. La Sección 14.1.3 permite el concreto simple estructural para los siguientes elementos:

- Elementos que están sostenidos continuamente por suelo o apoyados por otros elementos estructurales capaces de proporcionar un soporte vertical continuo;
- Elementos para los que la acción del arco proporciona compresión en todas las condiciones de carga;
- Paredes;
- Pedestales.

Se proporcionan restricciones y pautas adicionales para cada tipo de elemento, incluidos los requisitos para las juntas de contracción. La resistencia nominal a la flexión está limitada por $5\lambda\sqrt{f'_c}S_m$, donde λ es un factor de modificación para reflejar las propiedades mecánicas reducidas del concreto ligero en relación con el concreto de peso normal de la misma resistencia a la compresión f'_c y S_m es el módulo de sección elástica. La sección 21.2 especifica un factor de resistencia ϕ de 0.60 para concreto simple. Cabe señalar que las calibraciones de ϕ se basaron en la resistencia a la compresión en lugar de la propiedad limitante real, la resistencia a la flexión.¹³

Código ACI 332

Las aplicaciones de concreto simple estructural en muros, zapatas y losas apoyadas en el suelo se tratan en el Capítulo 6 de ACI 332-20.¹⁴ La Sección 6.2.1.2 especifica que el módulo de ruptura f_r es $7.5\lambda\sqrt{f'_c}$ en psi ($0.63\lambda\sqrt{f'_c}$ en MPa), aunque esta sección también permite el diseño basado en el rendimiento como un sistema alternativo según la Sección 1.2 del código ACI 332. La última sección establece que un sistema alternativo tendrá la misma fuerza y efecto que las disposiciones del código si el funcionario del código de construcción ha aprobado y promulgado que se ha demostrado su idoneidad mediante un uso, análisis o prueba satisfactoria. Se espera que el Comité 380 de ACI desempeñe un papel en la asistencia al Comité 332 de ACI, Trabajo de concreto residencial, en el suministro de dicha información a los ingenieros y funcionarios del código.

Un nuevo Comité sobre Concreto Simple Estructural

En 2017, le pregunté al personal de ACI sobre la actualización de las disposiciones para el concreto simple porque afectan la construcción residencial, y mi empresa está activa en ese mercado. Jim Baty, director ejecutivo de Concrete Foundations Association, también reconoció la necesidad de actualizaciones, por lo que trabajamos con el personal de ACI para desarrollar un comité con representación de un grupo equilibrado de partes interesadas. Dos años después, el Comité de Actividades Técnicas (TAC) de ACI creó el Comité 380 de ACI, Concreto Simple Estructural, el comité celebró su primera reunión en la Convención de Concreto ACI - Otoño de 2019 en Cincinnati, OH, EE. UU. Actualmente, Baty es el presidente, yo soy el secretario y Barzin Mobasher es el enlace de TAC.

La misión del comité es promover el diseño y la aplicación de concreto simple estructural para mejorar su desempeño y reconocimiento como material de construcción confiable. Hasta ahora, el comité ha identificado varias áreas clave para investigar:

- Orígenes de los modelos de resistencia actuales;
- Criterios de fuerza versus deflexión;
- Ductilidad;
- Fallo y seguridad de la vida;
- Áreas de aplicación;
- Métodos de análisis;
- Diseño basado en desempeño;
- Control de calidad y
- Constructibilidad.

La primera orden del día del comité es llevar a cabo una revisión de la investigación y los códigos de concreto simple estructural. Para reactivar la innovación en aplicaciones de concreto simple con miras a la seguridad y la asequibilidad, el comité revisará el diseño basado en el desempeño utilizando pruebas de flexión para establecer las resistencias del diseño en lugar de aproximarlas a las resistencias a la compresión. De igual importancia, el comité revisará las debilidades, limitaciones y seguridad de los diseños hechos con materiales frágiles.

Si bien hay poca investigación dirigida al diseño de estructuras de concreto simple, el comité planea aprovechar las publicaciones e investigaciones relacionadas. Un ejemplo notable es un artículo de Légeron y Paultre,¹⁵ que presenta una discusión sobre el módulo de prueba de ruptura y su aplicación. El comité está planeando sesiones sobre temas relacionados o afectados por el concreto simple, y espera iniciar nuevas investigaciones en áreas que identifica que necesitan más estudio.

Diseño basado en el desempeño

Una de las declaraciones clave hechas por el Comité ACI 322 fue: “Los intentos de mejorar la calidad general y la seguridad del material, deben recibir crédito”.⁵ En ese sentido, y para continuar la visión del comité original sobre concreto simple, el nuevo comité investigará el diseño basado en el desempeño.

Hay precedentes de diseños basados en el desempeño basados en la resistencia a la flexión. Por ejemplo, en la industria del concreto Tilt-Up, los paneles se

diseñan utilizando principios elásticos. El número de puntos de elevación y los límites de espesor se basan generalmente en la resistencia a la flexión del concreto, con el objetivo de que la sección no se agriete (Fig. 3) durante el montaje. La Figura 4 ilustra los límites de tensión del panel basados en el módulo de ruptura medido, la tensión de elevación permisible basada en f_r del Capítulo 19 del Código ACI 318 y el diseño de resistencia basado en el Capítulo 14 del Código ACI 318.

El Comité ACI 322 también proporcionó una forma simple de diseño basado en el desempeño (Fig. 5), ya que el código ACI 332 permitió al ingeniero especificar la resistencia a la flexión de la mezcla utilizada en una



Fig. 3: Tilt-Up de 114 mm (4.5 pulg.) de espesor diseñado con principios de diseño basados en el desempeño (de la Referencia ¹⁶).

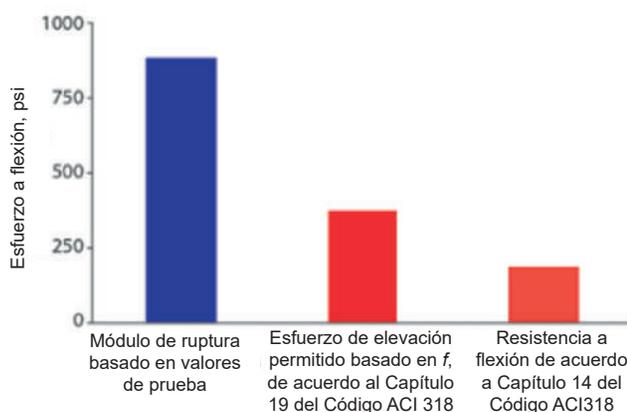


Fig. 4: Ejemplo de comparación de esfuerzos de flexión estructura.

El diseño para flexión se logró multiplicando la resistencia a flexión especificada por 0.42. Una posible consideración sería actualizar este concepto

Descripción		Sección del Código a que se refiere:	Tabla 7.1 (a) Valores permitidos de esfuerzo en concreto simple estructural donde se utiliza el método de diseño por esfuerzo. Nota. Factor de reducción de capacidad ϕ está incluido (Ver sección 7.2.2)		Tabla 7.1 (b) Esfuerzo de trabajo permitido en concreto simple estructural donde se usa el método alternativo de diseño	
Flexión	Compresión	7.6 y 7.8	f_{cu}	$0.65 f'_c$ ó $4.55 f_r$	f_c	$0.34 f'_c$ ó $2.4 f_r$
	Tensión		f_{tu}	$3.25 \sqrt{f'_c}$ ó $0.42 f_r$	f_t	$1.60 \sqrt{f'_c}$ ó $0.21 f_r$
Compresión	En toda el área	7.7 y 7.10	f_{c1u}	$0.60 f'_c$ ó $4.2 f_r$	f_{c1}	$0.30 f'_c$ ó $2.10 f_r$
	En parte del área	7.10	f_{c2u}	$f_{c1u} \sqrt{A_2 / A_1}$ Pero no más de $2 f_{c1u}$	f_{c2}	$f_{c1} \sqrt{A_2 A_1}$ Pero no más de $2 f_{c1}$
Cortante	Un sentido (Acción de viga)	7.9	V_{c1u}	$1.70 \sqrt{f'_c}$ ó $0.23 f_r$	V_{c1}	$1.10 \sqrt{f'_c}$ ó $0.15 f_r$
	Dos sentidos (acción de losa)		V_{c2u}	$3.40 \sqrt{f'_c}$ ó $0.46 f_r$	V_{c2}	$2.00 \sqrt{f'_c}$ ó $0.27 f_r$

Fig. 5: La tabla 7.1 en ACI 322-72 permitió al ingeniero especificar la resistencia a la flexión como base para la tensión de tracción permisible en el concreto.

para permitir que el mercado desarrolle mezclas de concreto diseñadas específicamente para su uso en aplicaciones de concreto simple.

Sin embargo, el Capítulo 14 del Código ACI 318 actual carece de un enfoque para medir el rendimiento de flexión del concreto simple y usarlo en el diseño. Es necesario un modelo basado en el desempeño para el diseño elástico lineal para caracterizar el desempeño del concreto a través de métodos de prueba estándar como ASTM C78 / C78M, "Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto (usando viga simple con carga de tercer punto)" (Fig. 6).

De manera similar, un enfoque de diseño basado en el desempeño apoyado en principios de diseño elástico lineal simple (Fig. 7) podría proporcionarse como una alternativa a las ecuaciones basadas en la resistencia a la compresión en los códigos actuales. Si bien el código ACI 322 usaba un multiplicador simple para obtener la fuerza de trabajo, un enfoque moderno también podría incluir un ajuste para el efecto de tamaño.^{15,17}



Fig.6: Configuración típica de la prueba de flexión según ASTM C78 / C78M

Para garantizar un diseño seguro, el factor ϕ especificado en los estándares de diseño requeriría una calibración basada en los requisitos de ASCE 7-10, Sección 1.3,¹⁸ utilizando el método de punto de diseño.¹⁹ La falta de ductilidad; categoría de riesgo de construcción; variabilidad en el módulo de ruptura; otras variabilidades inherentes al sistema, incluidas las cargas, el ancho y la profundidad de los elementos; y la variación in situ se consideraría en la calibración del factor de resistencia. El enfoque también debería

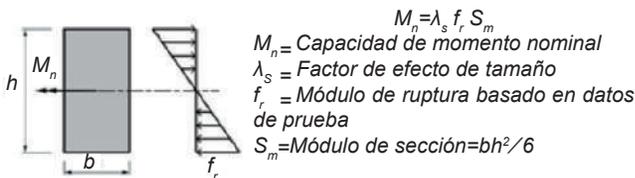


Fig. 7: El diseño a flexión de concreto simple estructural podría, por ejemplo, basarse en una distribución de tensión elástica lineal y el uso de f_r establecido para mezclas específicas y ajustado por variabilidad y tamaño.

considerar factores como el asentamiento, las deformaciones por temperatura, la contracción, la fluencia y la degradación ambiental (como el daño debido a la congelación y descongelación cíclicas) que podrían afectar la capacidad del concreto para proporcionar una resistencia adecuada a lo largo de su vida útil.

Impacto del Diseño basado en Desempeño

Se espera que la actualización del código para permitir el diseño elástico lineal basado en el desempeño fomente el desarrollo de concreto de alto desempeño, lo que potencialmente resultará en estructuras seguras y confiables que se pueden construir en menos tiempo, con menor demanda de mano de obra y con menor energía incorporada y huella de carbono de las permitidas actualmente.

Por lo tanto, el restablecimiento de ACI de un comité sobre concreto simple estructural muestra un compromiso significativo para avanzar en la técnica, expandiendo las posibilidades de diseño para clientes, constructores e ingenieros. La adición de un diseño basado en el rendimiento podría impulsar el desarrollo

de tecnologías de materiales nuevas y mejoradas diseñadas específicamente para su uso en estructuras de concreto simple. Un mayor desarrollo en los métodos de análisis y control de calidad puede brindar oportunidades para mejorar la eficiencia y la seguridad, lo que eventualmente permitirá la construcción robótica



Fig. 8: El Mars Canopy se construyó sin barras de refuerzo²⁰

basada en métodos de fabricación aditiva (Fig. 8). Si bien el potencial es grande, el Comité 380 de ACI también debe ser consciente de las limitaciones asociadas con el concreto simple estructural. Incluso si las mezclas de concreto están diseñadas para un desempeño más alto y más consistente, el comportamiento a largo plazo y los posibles modos de falla frágil deben considerarse al establecer límites en las aplicaciones y establecer factores de resistencia apropiados.

Todavía se necesitan barras de refuerzo para compensar las deficiencias del concreto en términos de ductilidad y resistencia a tensión. Espero que el trabajo del comité incentive a la industria a desarrollar materiales y métodos avanzados que podrían cambiar drásticamente nuestra percepción del concreto como material de construcción y asegurar su futuro como el método de construcción preferido debido a su seguridad, longevidad, rendimiento, eficiencia y sostenibilidad.

Agradecimientos

Jim Baty y los miembros del Comité 380 de ACI proporcionaron valiosos comentarios y reseñas.

Referencias

1. “Portland Cement Association to Further Sustainability Goals by Creating Carbon Neutrality Roadmap for the Cement and Concrete Industry,” Comunicado de prensa, Portland Cement Association, Skokie, IL, 17 de noviembre de 2020.
www.cement.org/newsroom/2020/11/17/portland-cementassociation-to-further-sustainability-goals-by-creating-carbon-neutralityroadmap-for-the-cement-and-concrete-industry.
2. Comité 318 de ACI, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 págs.
3. Comité 332 de ACI, “Residential Code Requirements for Structural Concrete (ACI 332-14) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 54 págs.
4. Comité 332 de ACI, “Residential Code Requirements for Structural Concrete (ACI 332-14) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 54 págs.
5. Comité 322 de ACI, “Structural Plain Concrete,” ACI Journal Proceedings, V. 64, No. 4, abril de 1967, págs. 186-189.
6. Comité 322 de ACI, “Building Code Requirements for Structural Plain Concrete (ACI 322-72),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1972, 7 pp.
7. Comité 318 de ACI, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1971, 78 págs.
8. Comité 318 de ACI, “Building Code Requirements for Structural Plain Concrete (ACI 318.1-89) and Commentary (ACI 318.1R-89),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 14 págs.
9. Comité 318 de ACI, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) (Revised 1992) and Commentary (ACI 318R-89) (Revised 1992),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 347 págs.
10. CAN/CSA-A23.3-04, “Design of Concrete Structures,” Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 2004, 232 págs.
11. AS3600:2018, “Concrete Structures,” fifth edition, Standards Australia, Sydney, Australia, 2018, 256 págs.
12. EN1992-1-1:2004, “Eurocode 2: Design of Concrete Structures— Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings,” European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004, 225 págs.
13. Szerszen, M.M., and Nowak, A.S., “Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2—Reliability Analysis and Resistance Factors,” ACI Structural Journal, V. 100, No. 3, mayo - junio de 2003, págs. 383-391.
14. Comité 332 de ACI, “Code Requirements for Residential Concrete and Commentary (ACI 332-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 74 págs.
15. Légeron, F., and Paultre, P., “Prediction of Modulus of Rupture of Concrete,” ACI Materials Journal, V. 97, No. 2, marzo – abril de 2000, págs. 193-200.
16. Pinkerton, L., and Foster-Goodman, S., “Bringing Mars to Earth,” Tilt-Up Today, Tilt-Up Concrete Association, noviembre de 2018. www.tilt-up.org/tilt-up-today/2018/11/01/bringing-mars-to-earth.
17. “CEB-FIP Model Code 1990: Design Code,” fib (International Federation for Structural Concrete), Lausanne, Switzerland, 1990, 437 págs.
18. ASCE/SEI 7-10, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures,” American Society for Civil Engineers, Reston, VA, 2011, 656 págs.
19. Nowak, A.S., and Collins, K.R., Reliability of Structures, segunda edición, prensa CRC, 2012, 407 págs.
20. Sarafian, J.; Culver, R.; and Lewis, T.S., “Robotic Formwork in the MARS Pavilion,” Acadia 2017: Disciplines and Disruption Conference Proceedings, Cambridge, MA, 2 al 4 de noviembre de 2017, págs. 522-533.

Nota: Puede encontrar información adicional sobre la norma ASTM discutida en este artículo en www.astm.org.

Seleccionado para el interés del lector por los editores.



Luke R. Pinkerton, miembro de ACI, es presidente, director de tecnología y fundador de Helix Steel, Ann Arbor, MI, EE. UU. Es secretario del Comité ACI 380, Concreto Simple Estructural, y del Subcomité ACI 332-D, Concreto

Residencial: zapatas y muros de cimentación. Es miembro de los Comités 332 de ACI, Trabajos de Concreto residencial; 360, Diseño de losas sobre suelo; 544, Concreto Reforzado con fibra; y 551, Construcción de Concreto Tilt-Up. También es miembro del Comité C09 de ASTM, Concreto y Agregados de concreto, y Presidente del Grupo de tareas de prueba de tensión directa de ese comité. Ha empleado enfoques de diseño alternativos basados en el rendimiento de la resistencia a la flexión en miles de estructuras desde 2002 y, debido a este trabajo, recibió el Premio a la Innovación Robert Aiken de la Asociación de Concreto Tilt-Up 2018. Recibió su licenciatura en ingeniería física de Hope College, Holland, MI; su maestría en Ingeniería Estructural de la Universidad de Michigan, Ann Arbor, MI; y su MBA del Instituto de Tecnología de Georgia, Atlanta, GA, EE. UU. Es un ingeniero profesional con licencia en Maine.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Noroeste de México

El Concreto Simple Estructural Adquiere un Aspecto Renovado



Traductor: Cristian Silva



Revisor Técnico: Ing. Genaro Salinas