

“Reasonable Safety” of Existing Structures, Part 2

Limitations: Buildings and their evaluation

by David G. Tepke, Liying Jiang, Keith E. Kesner, and Stephen S. Szoke

Part 1 of this series examined some key aspects and considerations when evaluating the safety of existing reinforced concrete structures. Parts 2 and 3 of the series will discuss limitations in evaluating structures and some of the complications presented by the structures themselves. In Part 1, the safety of an existing structure was described as a qualitative concept that only becomes quantitative when viewed probabilistically against predetermined norms or expectations established by a governing body. Effective communication to owners and the public about what licensed design professionals (LDPs) *do* and *do not* know, or more correctly, what they *can* and *cannot* know, is important. Given the complexity of existing structures and our evolving understanding of material performance, material variability, and variability in construction, stating that a structure is safe or unsafe without additional context oversimplifies the issue. Still, it is important to communicate to the public accurate information that is useful and understandable. The following sections describe some of the key concepts and limitations impacting our understanding and ability to make statements regarding safety, with an emphasis on how limited documentation of existing structures and changes in building codes influence our ability to assess existing structures.

Discoverable Documentation

A critical step in evaluating an existing structure is the examination of available information from initial construction and from renovations, maintenance, and repair programs. For public structures and structures with institutional or professional management, documentation may be extensive. For many older structures, especially structures that have changed ownership or management, documentation may be limited due to loss or ineffective record keeping. This can lead to a significant gap of knowledge that is difficult or costly to overcome, and one that may present significant uncertainties in the structural evaluation.

The quality of original construction documents can also vary widely, influenced by governing codes and local

practices at the time of construction. In some cases, the construction documents can contain meticulous descriptions of as-built construction, including project specifications, responses to requests for information (RFIs), shop drawings, and construction materials testing records. In other cases, only schematic descriptions of existing construction may be available. When shop drawings, project specifications, and material test reports are not available, it is difficult to ascertain how much change was implemented during construction. Even when as-built or record drawings are available, there can be questions regarding the completeness and accuracy of these documents.

Information associated with repairs or maintenance sometimes can also be difficult to obtain, as these actions may not be well documented. This includes property condition assessments and structural condition assessment reports that may or may not be preserved, as well as maintenance scopes and repair design documents. Depending on the authority having jurisdiction (AHJ), repair programs may not require permits, which may limit the extent of repair documentation.

When available, documentation and anecdotal information can provide important information for use as a basis, but a level of confirmation commensurate with acceptable risk is necessary when evaluating structures for safety. This is clearly indicated in documents prepared by ACI (that is, ACI Committees 364, Rehabilitation; and 562, Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Structures) and ASCE/SEI (for example, ASCE/SEI 41-17¹, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings). The process of verification may result in the identification of conditions that impact safety, including misplaced reinforcing steel, improper design, materials-related distress, or other issues.

Variation in dimensions beyond tolerances permitted in codes and standards may be encountered. This includes improper placement of reinforcing steel resulting in either too little cover, making the structure potentially more susceptible to deterioration, reduced fire rating, or in extreme cases, compromised composite behavior, or too much cover, reducing structural capacity (Fig. 1). Documentation from

previous construction litigations, such as complaints and rulings, if available, can provide information regarding defects, particularly cracking (Fig. 2), which is a common topic of dispute. Other conditions that may be encountered include undocumented or unsubstantiated previous removal, addition or alteration of structural elements that could require analysis, or investigation to determine implications. These conditions impact how one may evaluate safety and may be difficult to ascertain from a visual review.

Evolution of Building Codes and the State of Practice

Building codes and standards evolve over time to incorporate knowledge gained through research and practice to provide safer, more durable, and more sustainable structures. Structures constructed to earlier codes inherently lack features identified by newer codes as being important for the intended use. However, it is recognized that there is

not an expectation of equivalency to new construction. When limited amounts of damage or defects are present, building codes applicable to existing buildings, such as International Existing Building Code (IEBC), International Property Maintenance Code (IPMC), and ACI CODE-562, allow continued use of existing structures. In special cases where an industry-wide issue has been identified that significantly impacts safety, retrofit of existing structures may be required by an AHJ.

ACI CODE-562-21² provides options for using data from original construction drawings, data obtained through sampling and testing, and historical default values provided in the standard as a basis for evaluating concrete and reinforcing steel strength. Default values in ACI CODE-562-21 are based on conservative estimates of materials typically in use contemporary to their historical periods. This provides an initial check for properties if drawings

or test reports are not available.

However, sampling and testing may be necessary or justified to estimate actual in-place properties if adequate capacity cannot be confirmed through use of the conservative default values.

Tepke³ provides a discussion on the evolution of industry standards and building codes with respect to strength and durability considerations that may impact the performance of existing structures. Knowledge and control of corrosion, alkali-silica reactivity, sulfate attack (internal and external), chemical attack, freezing and thawing, and other deterioration mechanisms have evolved considerably (Fig. 3).

Initiatives such as the durability code being developed by ACI Committee 321, Concrete Durability Code, and the incorporation of global warming potential (GWP) provisions into specifications will modify the way structures are viewed and designed in the future. Structures that predate identification or comprehensive control of a deterioration mechanism may be susceptible to associated damage or deterioration. This must be considered during the assessment stage and factored into consideration for potential safety implications.

Understanding how code provisions have evolved is important in understanding the safety of an existing structure. The LDP examining existing structures needs to consider both the mechanisms contributing to damage and the susceptibility of the structure as a function of its time of construction.

The LDP must also consider that industry knowledge predates incorporation into industry-standard codes (such as ACI CODE-318⁴). For example, requirements for the use of air-entraining admixtures to provide resistance to cyclic freezing-and-thawing distress were not implemented until ACI 318-63,⁵ and comprehensive provisions for air content were not included until ACI 318-71,⁶ although the need for air entrainment for mitigating freezing-and-thawing damage became understood in the late 1930s. The Bureau of Reclamation required

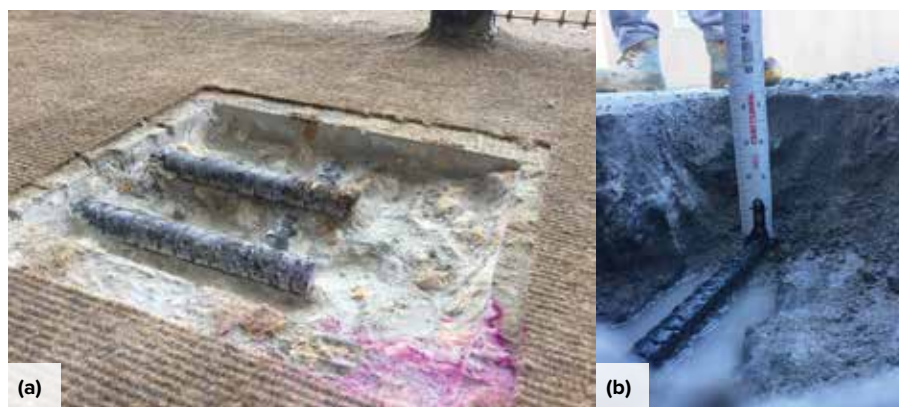


Fig. 1: Examples of improper placement of reinforcing bars: (a) inadequate cover; and (b) excessive cover



Fig. 2: Evidence of changes in the extent of cracking can impact conclusions developed during an investigation

entrained air in concrete as early as the 1940s,⁷ indicating possible implementation of it in other structures in those early periods. Significant research on corrosion of embedded steel in concrete has been conducted since the 1950s; however, chloride limits for new construction limiting susceptibility to corrosion were not included in the ACI Code until ACI 318-83.⁸ While delayed ettringite formation (DEF) resulting from excessive curing temperatures was first widely understood in the 1990s,⁹ DEF was not addressed in ACI 301 specifications until 2010.¹⁰ Other examples of these types of provisions are included in Reference 3.

Other code topics related to safety include the incorporation of structural integrity provisions for collapse resistance that appeared in ACI 318-89¹¹ and the changes to corrosion protection of prestressing steel that evolved over the last half of the twentieth century.

Further, the LDP should be aware that there is a time lag for incorporation of industry standards into codes adopted by the AHJ, particularly for new codes that require precedence or familiarity prior to inclusion. For example, ACI 562, first published in 2013,¹² will be referenced as the revised 2021 version in the 2024 edition of the IEBC, an 11-year lag. There are other situations where there have been lags of 20 years or more of ACI 318 Code requirements being enforced by state or local AHJs. While codes relevant to many older buildings were probably updated less frequently than codes affecting more recent structures, it is important to attempt to track the lineage of codes on existing drawings if available.

Structural systems and their influence on the approach to evaluation

The design of structural systems has evolved over time, with changes made to improve performance and resilience. The evolution of design means some structural systems are inherently more redundant or are less vulnerable to damage from inadvertent loads, deterioration, design errors, or construction deficiencies. Some considerations for different systems and failure modes are presented in the following sections. However, it is beyond the scope of this article for comprehensive treatment of the systems. ACI PRC-377-21¹³ provides discussion on collapse prevention of concrete floor systems. Nowak and Szerszen¹⁴ and Szerszen and Nowak¹⁵ provide discussion on reliability indices for a variety of structural systems, failure modes, and loads for new structures. The application of reliability for determining potentially unsafe conditions in existing structures is discussed by Stevens et al.¹⁶ The following paragraphs discuss some potential vulnerabilities of common structural systems and how industry guides and codes evolved to address them.

Flat plate concrete slabs

Owing to structural efficiency, flat-plate slabs are of relatively thin construction. These systems may include drop panels and capitals at columns to limit deflections and provide additional negative moment capacity and two-way shear

capacity. Due to their thin nature, the placement of reinforcing steel becomes a critical parameter that significantly affects both flexural and two-way (punching) shear capacity. Punching shear capacity is critical due to its brittle failure mechanism, and thus, conditions that suggest it may be a possible mechanism should be investigated (Fig. 4). The depth of the top reinforcing steel is of critical importance as small variations in steel location can induce large reductions in calculated capacity (for deeper steel) or higher susceptibility to deterioration in corrosive environments (for shallower steel). This is particularly important for structures constructed prior to implementation of provisions for structural integrity.

Load capacity in the vicinity of the column is critical due to possible failures that may initiate sudden collapse. As indicated in ACI PRC-377-21, collapse may be initiated in flat-plate slabs from two-way shear failure of the slab around a column, failure of a column, or flexural failure of the slab. Settlement or failure of a column effectively sheds loads to



Fig. 3: Freezing-and-thawing/scaling damage in structural slabs from a stadium constructed circa mid 1920s, prior to the use of air-entrainment in concrete



Fig. 4: Cracking at column perimeter that is cause for further investigation (photo courtesy of Structural Technologies)

the slab connection and to other column/slab connections. As explained in ACI PRC-377-21, progressive or disproportionate collapse can occur from subsequent punching shear failures at surrounding columns, from detachment of slabs that create impact loads on floors below that result in pancaking, and from column failures resulting in additional floor loads. To enhance the resilience of two-way construction, significant changes have been made in design code requirements to provide continuous reinforcement across two-way construction in ACI 318-89.

Unbonded post-tensioned concrete

Unbonded post-tensioned concrete members include tendons that typically extend multiple spans and, therefore, a local failure of a tendon can affect large area in a structure. The strands are concealed, so it can be difficult to determine the extent of deterioration from corrosion by visual inspection. Grease stains in slab soffits or deteriorated end anchorage pockets can be indicators of distress, but these conditions may not be prevalent. Additionally, failure of strands can result in

violent concrete rupture at floors or soffits in occupied space or at slab edges that may create potentially dangerous conditions. Design or construction deficiencies promoting overstress can lead to cracking that impacts overall durability or structural performance (Fig. 5).

Post-tensioned concrete construction requirements and design practices have improved dramatically over the past 70 years, with numerous changes being incrementally added to codes to improve corrosion protection. Post-tensioning used in structures today is required to be sheathed in plastic with corrosion protection and have protected anchorages. Older post-tensioned systems included button head systems, and tendons sheathed in kraft paper. Those systems lacked corrosion protection in the areas behind anchorages and were sensitive to damage. Changes in post-tensioned construction include the development of fully encapsulated strands and more durable sheathing, as described in ACI 423.4-14.¹⁷

Prestressed precast concrete

Prestressed concrete components are generally reliant on external connections for connectivity; some that are bearing allow for a moderate amount of movement and others provide restraint. The performance of bearing connections was identified as an issue during the 1994 Northridge earthquake. Significant changes in design practice were subsequently made to improve diaphragm performance and connections between members.¹⁸ The connection between precast double-tee members has also been identified as being susceptible to fatigue and corrosion damage¹⁹ (Fig. 6). Improved connection designs are expected to address these issues.

Accessibility, Site Survey Selection, and Subjectivity During Assessment

Evaluation of an existing structure implies some level of examination of the structure to locate possible defects. Some structure types, such as parking structures or Brutalist buildings, provide an open expanse of concrete to examine. More typical are structures with only limited extents of visible structure due to façades and interior finishes. Removal of finishes, whether interior or exterior, inherently increases the cost and difficulty of a survey. Limitations on accessibility will result in the need for extrapolation of results from the survey locations to the full structure.

In the preceding sections, locations where damage is expected to have a greater effect on the performance of an existing structure are described. Accordingly, when planning an evaluation, these locations are critical spots for probes or other focused investigations. However, these locations may represent only a small fraction of the structure, which introduces sampling subjectivity into the evaluation process. Consideration of structure globally and particularly sensitive areas locally are important and will be addressed in Part 3 of this series.

Evaluation and analysis of existing structures relies on engineering principles and mechanics. However, conditions



Fig. 5: Cracking and efflorescence in post-tensioned concrete



Fig. 6: A view of a damaged slab soffit at a flange-to-flange connection of precast double tees

encountered in practice often invoke a level of subjectivity. In cases where components of an existing structure are sound and intact, similar methods as those used for new structures can be used to calculate capacity. For example, objective analysis is possible where characteristic strength is different from design, reinforcing steel is improperly located (Fig. 7), or support conditions vary. Conditions of materials-related distress of concrete (Fig. 8) or corrosion of embedded steel (Fig. 9) can result in more uncertainty in the analysis. Bond of reinforcing steel to concrete for supporting conditions of composite action; incremental damage from inherent deterioration from alkali-silica reactivity, DEF, or other mechanisms; impact of corrosion and delamination on bond and development length; and other conditions may not be easily quantifiable due to evaluation or analysis constraints. The experience of the LDP plays a crucial role in making judgments regarding safety. In some situations, shoring and then implementation of load tests may be prudent; however, where future progressive deterioration is possible from materials-related distress (for example, corrosion), consideration of future or imminent conditions is necessary in interpretation of load testing result and associated future reduction of capacity from deterioration. Mitigation of the deterioration mechanism through preservation methods and structural health monitoring might be necessary if the structure or component remains in service.

Closing

Part 2 describes some conditions that may impact the evaluation of “safety.” Assessment of existing structures requires an understanding of the expected performance of the structure and how the performance is affected by the requirements of the building codes in place at the time of construction. The assessment will also be affected by the availability and quality of documentation from original design and building performance over time. The structural system and assessment constraints add additional complexity to the process. Consideration of these parameters in combination with existing conditions may make it difficult to ascertain the overall performance of the structure.

Part 3 of this article series will continue to examine limitations in the evaluation process including historical exposure and use, visual assessment of deterioration and distress, quantification and significance of observed deterioration, and consideration of the remaining service life.

References

1. ASCE/SEI 41-17, “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings,” American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2017, 623 pp.
2. ACI Committee 562, “Assessment, Repair and Rehabilitation of Existing Concrete Structures Code and Commentary (ACI CODE-562-21),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.
3. Tepke, D.G., “Looking Back to See Ahead—Using Historical Knowledge of Durability to Provide Clues for Concrete Repair,”



Fig. 7: Ground penetrating radar survey showing locations of stirrups for evaluation of shear capacity



Fig. 8: Horizontal cracking in a beam found to be a manifestation of internal sulfate attack



Fig. 9: Corrosion of embedded reinforcing steel resulting in compromised composite action and development length

Concrete Repair Bulletin, Jan.-Feb. 2023, pp. 10-21.

4. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI CODE-318-19) (Reapproved 2022),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
5. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963, 144 pp.
6. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced

Concrete (ACI 318-71)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1971, 78 pp.

7. Dolen, T.D., "Historical Development of Durable Concrete for the Bureau of Reclamation," *The Bureau of Reclamation: History Essays from the Centennial Symposium*, V. I and II, Bureau of Reclamation, Denver, CO, 2008, pp. 135-151.

8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1983, 112 pp.

9. ACI Committee 201, "Durable Concrete—Guide (ACI PRC-201.2-16) (Updated 2023)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 95 pp.

10. ACI Committee 301, "Specifications for Structural Concrete (ACI 301-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 64 pp.

11. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary—ACI 318R-89," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 353 pp.

12. ACI Committee 562, "Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562-13) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 59 pp.

13. ACI Committee 377, "Integrity and Collapse Resistance of

Structural Concrete Floor Systems—Report (ACI PRC-377-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 24 pp.

14. Nowak, A.S., and Szerszen, M.M., "Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 1—Statistical Models for Resistance," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 3, May 2003, pp. 377-382.

15. 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 2003, pp. 383-391.

16. Stevens, G.R.; Bartlett, F.M.; Liu, M.; Kesner, K.E.; and Johnson, G., "Evolution of the 562 Code: Quantification of Reliability for Concrete Elements with Demand-Capacity Ratios Greater than One," *Concrete International*, V. 41, No. 4, Apr. 2019, pp. 55-61.

17. Joint ACI-ASCE Committee 423, "Report on Corrosion and Repair of Unbonded Single-Strand Tendons (ACI 423.4R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 22 pp.

18. Gould, N.C.; Kallros, M.K.; and Dowty, S.M., "Concrete Parking Structures and the Northridge Earthquake," *Structure Magazine*, Oct. 2019, pp. 48-54.

19. Keenan, L.E., "What's Wrong with My Precast Concrete Garage?" *The Construction Specifier*, June 1, 2015, <https://www.constructionspecifier.com/whats-wrong-with-my-precast-concrete-garage/>.

Selected for reader interest by the editors.



David G. Tepke, FACI, is a Principal Engineer with SKA Consulting Engineers, Inc., in Charleston, SC, USA. He specializes in structural and materials evaluation, troubleshooting, repair, and service-life extension. He is a NACE/AMPP Certified Corrosion Specialist and Protective Coating Specialist. Tepke is Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and a member of the

ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach; and Committees 201, Durability of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 321, Durability Code; and 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete. He is a licensed professional engineer.



ACI member **Liying Jiang** is an Engineering Manager with Structural Technologies. She specializes in evaluations of existing structures, assessment of concrete materials, design of repair and rehabilitation measures, and development of management strategies for structures affected by alkali-silica reaction (ASR), corrosion, and other materials-related distress. She is Chair of

ACI Subcommittee 364-C, TechNote Subcommittee, and Secretary of ACI Subcommittee 228-B, Visual Condition Survey of Concrete. She is also a member of ACI Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; and 364, Rehabilitation.



Keith E. Kesner, FACI, is a Project Director with Simpson Gumpertz & Heger, Inc. He specializes in the evaluation and rehabilitation of existing structures. He is Chair of the ACI TAC Repair and Rehabilitation Committee, and ACI Subcommittee 562-E, Seismic. He is also a member of the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach;

Technical Activities Committee; and Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; 364, Rehabilitation; 562, Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings; and ACI Subcommittees 318-C, Safety, Serviceability, and Analysis; and various state initiatives collaboration groups. He was a co-recipient of the 1998 ACI Construction Practice Award and received the 2005 ACI Young Member Award. Kesner received his BS from the University of Connecticut, Storrs, CT, USA, and his MS and PhD from Cornell University, Ithaca, NY, USA. He is a licensed professional engineer in several states and a licensed structural engineer in Hawaii and Illinois.



Stephen S. Szoke, FACI, ACI Distinguished Staff, is a Code Advocacy Engineer at ACI. He actively participates in the development of model building codes, referenced standards, rules, and regulations. Szoke is a Staff Liaison for the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach. He is a licensed professional engineer.

"Seguridad Razonable" para las Estructuras Existentes, Parte 2

Limitaciones: los edificios y su evaluación

por David G. Tepke, Liying Jiang, Keith E. Kesner, y Stephen S. Szoke

En la Parte 1 de esta serie se examinaron algunos aspectos y consideraciones clave a la hora de evaluar la seguridad de las estructuras existentes de concreto armado. Las partes 2 y 3 de la serie tratarán sobre las limitaciones en la evaluación de estructuras y algunas de las complicaciones que presentan las propias estructuras. En la Parte 1, se describió la seguridad de una estructura existente, como un concepto cualitativo que sólo se convierte en cuantitativo cuando se compara probabilísticamente con normas predeterminadas o expectativas establecidas por un organismo rector. Es importante la comunicación efectiva hacia los propietarios y al público, sobre lo que saben y lo que no saben los profesionales del diseño autorizados (LDPs por sus siglas en inglés), o más correctamente, lo que pueden y no pueden saber. Dada la complejidad de las estructuras existentes y nuestra creciente comprensión sobre el desempeño de los materiales, la diversidad de materiales y la variabilidad en la construcción, afirmar que una estructura es segura o insegura sin un contexto adicional, simplifica en exceso la cuestión. Aun así, es importante comunicar al público información precisa que sea útil y comprensible. Las siguientes secciones describen algunos de los conceptos clave y las limitaciones que afectan a nuestra comprensión y a nuestra capacidad para hacer afirmaciones sobre la seguridad, haciendo hincapié sobre lo limitada que es la documentación de las estructuras existentes y en que los cambios en los códigos de construcción influyen en nuestra capacidad para evaluar las estructuras existentes.

Documentación identificable

Un paso fundamental en la evaluación de una estructura existente es el examen de la información disponible sobre la construcción inicial y los programas de renovación, mantenimiento y reparación. En el caso de estructuras públicas y estructuras con gestión institucional o profesional, la documentación puede ser extensa. En el caso de muchas estructuras antiguas, especialmente las que han cambiado de propietario o de gestión, la documentación puede ser limitada debido a pérdidas o a un mantenimiento ineficaz de los registros. Esto puede dar lugar a una importante laguna de conocimiento que resultara difícil o costosa de superar, y que puede presentar importantes incertidumbres en la evaluación estructural.

Al momento de la construcción, la calidad de los documentos de construcción originales también puede variar mucho en función de los códigos vigentes y las prácticas locales. En algunos casos, los documentos de construcción pueden contener descripciones meticulosas de la construcción tal y como se realizó, incluidas las especificaciones del proyecto, las respuestas a las solicitudes de información (RFIs por sus siglas en inglés), los planos de taller y los registros de pruebas de materiales de construcción. En otros casos, sólo se dispone de descripciones esquemáticas de la construcción existente. Cuando no se dispone de los planos de taller, las especificaciones del proyecto y los informes de pruebas de materiales, es difícil determinar qué cambios se introdujeron durante la construcción. Incluso cuando se dispone de planos de construcción o de registro, pueden surgir dudas sobre la integridad y la exactitud de estos documentos.

A veces también puede ser difícil obtener la información asociada a las reparaciones o al mantenimiento, ya que estas acciones pueden no estar bien documentadas. Esto incluye las evaluaciones del estado de la propiedad y los informes de evaluación del estado estructural que pueden o no conservarse, así como los alcances del mantenimiento y los documentos de diseño de las reparaciones. Dependiendo de la autoridad que tenga jurisdicción (AHJ por sus siglas en inglés), los programas de reparación pueden no requerir permisos, lo que puede limitar el alcance de la documentación de las reparaciones.

Cuando está disponible, la documentación y la información anecdótica pueden proporcionar información importante para utilizarla como base, pero cuando se evalúan las estructuras en cuanto a su seguridad es necesario un nivel de confirmación acorde con un riesgo aceptable. Esto se indica claramente en los documentos elaborados por el ACI (es decir, los Comités ACI 364, Rehabilitación; y 562, Evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto) y ASCE/SEI (por ejemplo, ASCE/SEI 41-17¹, Evaluación sísmica y rehabilitación de edificios existentes). El proceso de verificación puede dar lugar a la identificación de condiciones que afecten a la seguridad, como acero de refuerzo mal colocado, diseño inadecuado, problemas relacionados con los materiales u otras cuestiones.

Pueden encontrarse variaciones en las dimensiones más allá de las tolerancias permitidas en los códigos y normas. Esto incluye la colocación incorrecta del acero de refuerzo, lo que puede dar lugar a un recubrimiento insuficiente que haga que la estructura sea potencialmente más susceptible al deterioro, reducir la resistencia al fuego o, en casos extremos, comprometa el desempeño del material compuesto, o que un recubrimiento excesivo reduzca la capacidad estructural (Fig. 1). La documentación de litigios de construcción anteriores, como denuncias y sentencias, si está disponible, puede proporcionar información sobre los defectos, en particular sobre el agrietamiento (Fig. 2), el cual es un tema habitual de disputa. Otras condiciones que pueden encontrarse incluyen la eliminación previa no documentada o no demostrada, la adición o alteración de elementos estructurales que podrían requerir un análisis o una investigación para determinar las implicaciones. Estas condiciones influyen en la forma de evaluar la seguridad y pueden ser difíciles de determinar a partir de una inspección visual.

Evolución de los códigos de construcción y el estado de la práctica

Los códigos y normas de construcción evolucionan con el tiempo para incorporar los conocimientos adquiridos a través de la investigación y la práctica, con el fin de proporcionar estructuras más seguras, duraderas y sostenibles. Las estructuras construidas conforme a códigos anteriores carecen inherentemente de las características identificadas por los códigos más recientes, lo cual es importante para el uso previsto. Sin embargo, se reconoce que no existe una expectativa de equivalencia con las nuevas construcciones. Cuando los daños o defectos son limitados, los códigos de construcción aplicables a los edificios existentes, como el Código Internacional de Edificios Existentes (IEBC por sus siglas en inglés), el Código Internacional de Mantenimiento de Propiedades (IPMC por sus siglas en inglés) y el ACI CODE-562, permiten seguir utilizando las estructuras existentes. En casos especiales, en los que se haya identificado un problema en un amplio sector de la industria,

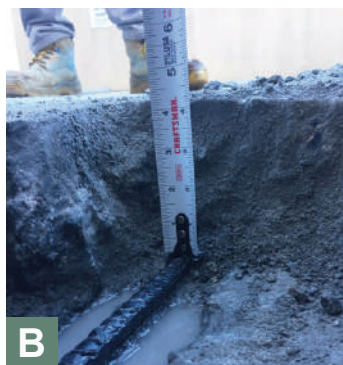


Fig. 1: Ejemplos de barras de refuerzo colocadas de manera incorrecta: (a) recubrimiento inadecuado; y (b) recubrimiento excesivo.



Fig. 2: La evidencia de cambios en la extensión de las grietas puede influir en las conclusiones que surjan durante una investigación.

que afecte significativamente a la seguridad, el AHJ puede exigir el reacondicionamiento de las estructuras existentes.

El código ACI-562-21² proporciona opciones para utilizar información de los planos de construcción originales, información obtenida mediante muestreo y ensayos, y valores predeterminados históricos proporcionados en la norma como base para evaluar la resistencia del concreto y del acero de refuerzo. Los valores predeterminados en el código ACI-562-21 se basan en estimaciones conservadoras para materiales típicamente en uso contemporáneo, con relación a sus períodos históricos. Esto sirve como comprobación inicial de las propiedades, en caso de que no se disponga de planos o informes de ensayos. Sin embargo, si no puede confirmarse una capacidad adecuada mediante el uso de los valores conservadores predeterminados, puede ser necesario o justificar el realizar muestreos y ensayos para estimar las propiedades reales en el lugar.

En lo que respecta a las consideraciones de resistencia y durabilidad que pueden afectar al desempeño de las estructuras existentes, Tepke³ proporciona un análisis de la evolución de las normas industriales y los códigos de construcción. El conocimiento y el control de la corrosión, la reactividad álcali-sílice, el ataque por sulfatos (interno y externo), el ataque químico, el congelamiento-descongelamiento y otros mecanismos de deterioro han evolucionado considerablemente (Fig. 3).



Iniciativas como el código de durabilidad que está desarrollando el Comité 321 del ACI, Código de Durabilidad del Concreto, y la incorporación de disposiciones sobre el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) en las especificaciones, modificarán la forma de ver y diseñar las estructuras en el futuro. Las estructuras anteriores a la identificación o el control exhaustivo de un mecanismo de deterioro, pueden ser susceptibles de sufrir daños o deterioros asociados. Esto debe tenerse en cuenta en la fase de evaluación y al considerar las posibles implicaciones para la seguridad.

Comprender cómo han evolucionado las disposiciones del código es importante para entender la seguridad de una estructura existente. El LDP que examina las estructuras existentes, debe tener en cuenta tanto los mecanismos que contribuyen a los daños, como la susceptibilidad de la estructura en función de la época en la que se construyó.



Fig. 3: Descascaramiento por congelamiento-descongelamiento en losas estructurales de un estadio construido a mediados de la década de 1920, antes de la utilización de los inclusores de aire en el concreto.

El LDP también debe tener en cuenta que los conocimientos de la industria son anteriores a la incorporación en los códigos estándar de la industria (como el código ACI-318⁴). Por ejemplo, los requisitos para el uso de aditivos inclusores de aire para proporcionar resistencia a los ciclos de congelamiento-descongelamiento no se implementaron hasta que el ACI 318-63⁵, y las disposiciones integrales para el contenido de aire no se incluyeron hasta que se publicó el ACI 318-71⁶, a pesar de que la necesidad de incluir aire para mitigar los daños por congelamiento-descongelamiento se comprendió hasta finales de 1930. En la década de 1940⁷, el Departamento de Recuperación (Bureau of Reclamation) especificó la inclusión de aire en el concreto, indicando también su posible aplicación en otras estructuras en esos primeros periodos. Desde la década de 1950 se han llevado a cabo importantes investigaciones sobre la corrosión del acero embebido en el concreto; sin embargo, los límites de cloruro para las nuevas construcciones que limitan la susceptibilidad a la corrosión no se incluyeron en el Código ACI hasta el ACI 318-83⁸. Aunque la formación retardada de etringita (DEF por sus siglas en inglés) resultante de temperaturas de curado excesivas se comprendió ampliamente por primera vez en la década de 1990⁹, la DEF no se abordó en las especificaciones del ACI 301 hasta 2010¹⁰. En la Referencia 3 se incluyen otros ejemplos de este tipo de disposiciones.

Otros temas del código relacionados con la seguridad, incluyen la incorporación de disposiciones de integridad estructural para la resistencia al colapso, que aparecieron en ACI 318-89¹¹ y los cambios en la protección contra la corrosión del acero pretensado que evolucionaron a lo largo de la última mitad del siglo XX.

Además, el LDP debe ser consciente de que existe un desfase temporal para la incorporación de las normas industriales en los códigos adoptados por el AHJ, en particular para los nuevos códigos que requieren precedencia o familiaridad antes de su inclusión. Por ejemplo, la norma ACI 562, publicada por primera vez en 2013¹², será referenciada como la versión revisada de 2021 en la edición de 2024 del IEBC, lo que supone un desfase de 11 años. Hay otras situaciones en las que se han producido retrasos de 20 años o más en la aplicación de los requisitos del Código

ACI 318 por parte de los AHJ locales o estatales. Aunque los códigos relevantes para muchos edificios antiguos probablemente se actualizaron con menos frecuencia que los códigos que afectan a estructuras más recientes, es importante intentar rastrear el linaje de los códigos en los planos existentes si se dispone de ellos.

Los sistemas estructurales y su influencia en el enfoque de la evaluación

El diseño de los sistemas estructurales ha evolucionado con el tiempo, con cambios introducidos para mejorar el rendimiento y la resistencia. La evolución del diseño significa que algunos sistemas estructurales son intrínsecamente más redundantes o menos vulnerables a los daños provocados por cargas inadvertidas, deterioro, errores de diseño o deficiencias de construcción. En las siguientes secciones se presentan algunas consideraciones para diferentes sistemas y modos de fallo. Sin embargo, queda fuera del alcance de este artículo el tratamiento exhaustivo de los sistemas. El ACI PRC-377-21¹³ proporciona una discusión sobre la prevención del colapso de los sistemas de pisos de concreto. Nowak y Szerszen¹⁴ y Szerszen y Nowak¹⁵ proporcionan información sobre los índices de confianza para una variedad de sistemas estructurales, modos de fallo y cargas para estructuras nuevas. La aplicación de la confiabilidad para determinar condiciones potencialmente inseguras en estructuras existentes es analizada por Stevens et al¹⁶. Los siguientes párrafos analizan algunas vulnerabilidades potenciales de sistemas estructurales comunes y cómo las guías y códigos de la industria evolucionaron para abordarlas.

Losas planas de concreto

Debido a la eficiencia estructural, las losas planas son de construcción relativamente delgada. Estos sistemas pueden incluir paneles ábacos y capiteles sobre las columnas para limitar las deformaciones y proporcionar capacidad adicional de momento negativo y de cortante bidireccional. Por ser de poco espesor, la colocación del acero de refuerzo resulta un parámetro crítico que



Fig. 4: Fisuración en el perímetro de la columna que requiere una investigación más detallada (foto cortesía de Structural Technologies).

afecta significativamente tanto a la capacidad de flexión, como a la capacidad de corte bidireccional (punzonamiento/penetración). La capacidad de corte por punzonamiento es crítica debido a que su mecanismo de falla es frágil, si las condiciones sugieren que este mecanismo de falla es posible, esto debe ser investigado (Fig. 4). La profundidad del acero de refuerzo superior es de importancia crítica ya que pequeñas variaciones en la ubicación del acero pueden inducir grandes reducciones en la capacidad calculada (para acero más profundo) o una mayor susceptibilidad al deterioro en ambientes corrosivos (para acero menos profundo). Esto es especialmente importante para las estructuras construidas antes de la aplicación de las disposiciones relativas a la

integridad estructural.

La capacidad de carga en las proximidades de una columna es crítica debido a las posibles fallas que pueden iniciar un colapso repentino. Tal y como se indica en el ACI PRC-377-21, el colapso puede iniciarse en losas planas por el fallo por cortante bidireccional de la losa alrededor de una columna, el fallo de una columna o el fallo por flexión de la losa. El asentamiento o el fallo de una columna transfiere cargas a la conexión de la losa y a otras conexiones columna/losa. Como se explica en ACI PRC-377-21, puede producirse un colapso progresivo o desproporcionado debido a fallos de punzonamiento subsiguientes en las columnas circundantes, al desprendimiento de losas que crean cargas de impacto en los pisos inferiores que dan lugar a pancakes, y a fallos en columnas que dan lugar a cargas adicionales en los pisos. Para mejorar la resistencia de la construcción bidireccional, se han introducido cambios significativos en los requisitos del código de diseño ACI 318-89, para proporcionar un refuerzo continuo a través de la construcción bidireccional.

Concreto postensado con torones no adheridos

Los elementos de concreto postensado no adheridos incluyen tendones que normalmente se extienden por varios claros y, por lo tanto, un fallo local de un tendón puede afectar a una gran área de una estructura. Los tendones están ocultos, por lo que puede ser difícil determinar mediante una inspección visual el alcance del deterioro por corrosión. Las manchas de grasa en los fondos de las losas o el deterioro de las cavidades de anclaje de los extremos pueden ser indicadores de deterioro, pero estas condiciones pueden no ser frecuentes. Además, el fallo de los torones puede provocar la rotura violenta del concreto en pisos o plafones en espacios ocupados o en los bordes de las losas, lo que puede crear condiciones potencialmente peligrosas. Las deficiencias de diseño o construcción que promueven el sobreesfuerzo pueden provocar fisuras que afecten a la durabilidad general o al desempeño estructural (Fig. 5).

Los requisitos de construcción y las prácticas de diseño del concreto postensado han mejorado drásticamente en los últimos 70 años, con numerosos cambios añadidos progresivamente a los códigos para mejorar la protección contra la corrosión. Hoy en día, el postensado que se utiliza en las estructuras debe estar revestido de plástico con protección anticorrosiva y tener anclajes protegidos. Los sistemas de postensado más antiguos incluían sistemas de cabeza de botón y tendones revestidos con papel kraft. Estos sistemas carecían de protección contra la corrosión en las zonas situadas detrás de los anclajes y eran sensibles a los daños. Los cambios en la construcción postensada incluyen el desarrollo de torones totalmente encapsulados y revestimientos más duraderos, tal y como se describe en el ACI 423.4-14¹⁷.



Fig. 5: Fisuración y eflorescencia en concreto postensado.



Fig. 6: Vista de un plafón dañado en una conexión entre dos doble T prefabricadas.

Prefabricados de concreto pretensado

Los componentes del concreto pretensado generalmente dependen de conexiones externas para su conectividad; algunas que son portantes permiten una cantidad moderada de movimiento y otras proporcionan restricción. El comportamiento de las conexiones portantes se identificó como un problema durante el terremoto de Northridge de 1994. Posteriormente se introdujeron cambios significativos en las prácticas de diseño para mejorar el comportamiento de los diafragmas y las conexiones entre los elementos¹⁸. La conexión entre los elementos prefabricados de doble T también se ha identificado como susceptible de sufrir daños por fatiga y corrosión¹⁹ (Fig. 6). Se espera una mejora en el diseño de las conexiones para solucionar estos problemas.

Accesibilidad, selección de encuestas sobre el terreno y Subjetividad durante la evaluación

La evaluación de una estructura existente implica cierto nivel de estudio de la estructura para localizar posibles defectos. Algunos tipos de estructuras, como los estacionamientos o los edificios de concreto expuesto, ofrecen una extensión abierta de concreto por examinar. Son más típicas las estructuras con una extensión limitada de estructura visible, debido a las fachadas y a los acabados interiores. La eliminación de los acabados, ya sean interiores o exteriores, aumenta intrínsecamente el costo y la dificultad del estudio. Las limitaciones de accesibilidad obligan a extrapolar los resultados de los lugares inspeccionados a toda la estructura.

En los apartados anteriores se han descrito los lugares en los que se espera que los daños afecten más el desempeño de una estructura existente. En consecuencia, al planificar una evaluación, estos lugares son puntos críticos para realizar sondeos u otras investigaciones específicas. Sin embargo, estos lugares pueden representar sólo una pequeña fracción de la estructura, lo que introduce subjetividad de muestreo en el proceso de evaluación. La consideración de la estructura en su conjunto y de las zonas especialmente sensibles a nivel local es importante y se abordará en la Parte 3 de esta serie.

La evaluación y el análisis de las estructuras existentes se basan en principios de ingeniería y mecánica. Sin embargo, las condiciones que se dan en la práctica suelen conllevar un cierto grado de subjetividad. En los casos en que los componentes de una estructura existente son sólidos y están intactos, para calcular la capacidad se pueden utilizar métodos similares a los empleados para las



Fig. 7: Estudio con radar de penetración mostrando la ubicación de los estribos para la evaluación de la capacidad de corte.



Fig. 8: Agrietamiento horizontal en una viga como una manifestación de un ataque interno de sulfato.



Fig. 9: Corrosión del acero de refuerzo embebido que compromete el servicio del material compuesto y la longitud de desarrollo del acero.

estructuras nuevas. Por ejemplo, es posible realizar un análisis objetivo cuando la resistencia característica difiere de la de diseño, el acero de refuerzo está mal situado (Fig. 7) o varían las condiciones de apoyo. Las condiciones de deterioro del concreto relacionadas con los materiales (Fig. 8) o la corrosión del acero embebido (Fig. 9), pueden dar lugar a una mayor incertidumbre en el análisis. La adherencia del acero de refuerzo al concreto para soportar condiciones de acción compuesta; daño incremental por deterioro inherente por reactividad álcali-sílice, DEF, u otros mecanismos; impacto de la corrosión y delaminación en la adherencia y longitud de desarrollo; y otras condiciones pueden no ser fácilmente cuantificables debido a restricciones de evaluación o análisis. La experiencia del LDP juega un papel crucial a la hora de emitir juicios sobre la seguridad. En algunas situaciones, el apuntalamiento y la posterior realización de pruebas de carga puede ser razonable; sin embargo, cuando es posible un futuro deterioro progresivo debido a un deterioro relacionado con los materiales (por ejemplo, corrosión), es necesario tener en cuenta las condiciones futuras o inminentes a la hora de interpretar el resultado de las pruebas de carga y la futura reducción de la capacidad asociada al deterioro. Si la estructura o el componente permanecen en servicio, puede ser necesario mitigar el mecanismo de deterioro mediante métodos de conservación y vigilancia de la salud estructural.

Cierre

En la Parte 2 se describen algunas condiciones que pueden influir en la evaluación de la "seguridad". La evaluación de las estructuras existentes requiere una comprensión del comportamiento esperado para la estructura y de cómo este comportamiento se ve afectado por los requisitos de los códigos de construcción vigentes en el momento de la construcción. La evaluación también se verá afectada por la disponibilidad y la calidad de la documentación del diseño original y el comportamiento del edificio a lo largo del tiempo. El sistema estructural y las limitaciones de la evaluación añaden complejidad al proceso. La consideración de estos parámetros en combinación con las condiciones existentes pueden dificultar la

determinación del comportamiento global de la estructura.

La parte 3 de esta serie de artículos seguirá examinando las limitaciones del proceso de evaluación, incluyendo la historia de su exposición y su uso, la evaluación visual del deterioro, la cuantificación e importancia del deterioro observado y la consideración de la vida útil restante.

Referencias

1. ASCE/SEI 41-17, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2017, 623 pp.
2. ACI Committee 562, "Assessment, Repair and Rehabilitation of Existing Concrete Structures Code and Commentary (ACI CODE-562- 21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.
3. Tepke, D.G., "Looking Back to See Ahead—Using Historical Knowledge of Durability to Provide Clues for Concrete Repair," Concrete Repair Bulletin, Jan.-Feb. 2023, pp. 10-21.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI CODE-318-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1963, 144 pp.
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1971, 78 pp.
7. Dolen, T.D., "Historical Development of Durable Concrete for the Bureau of Reclamation," The Bureau of Reclamation: History Essays from the Centennial Symposium, V. I and II, Bureau of Reclamation, Denver, CO, 2008, pp. 135-151.
8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1983, 112 pp.
9. ACI Committee 201, "Durable Concrete—Guide (ACI PRC-201.2-16) (Updated 2023)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016, 95 pp.
10. ACI Committee 301, "Specifications for Structural Concrete (ACI 301-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 64 pp.
11. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary—ACI 318R-89," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 353 pp.
12. ACI Committee 562, "Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562-13) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 59 pp.
13. ACI Committee 377, "Integrity and Collapse Resistance of Structural Concrete Floor Systems—Report (ACI PRC-377-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 24 pp.
14. Nowak, A.S., and Szerszen, M.M., "Calibration of Design

Code for Buildings (ACI 318): Part 1—Statistical Models for Resistance," ACI Structural Journal, V. 100, No. 3, May 2003, pp. 377-382.

15. 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 2003, pp. 383-391.
16. Stevens, G.R.; Bartlett, F.M.; Liu, M.; Kesner, K.E.; and Johnson, G., "Evolution of the 562 Code: Quantification of Reliability for Concrete Elements with Demand-Capacity Ratios Greater than One," Concrete International, V. 41, No. 4, Apr. 2019, pp. 55-61.
17. Joint ACI-ASCE Committee 423, "Report on Corrosion and Repair of Unbonded Single-Strand Tendons (ACI 423.4R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 22 pp.
18. Gould, N.C.; Kallros, M.K.; and Dowty, S.M., "Concrete Parking Structures and the Northridge Earthquake," Structure Magazine, Oct. 2019, pp. 48-54.
19. Keenan, L.E., "What's Wrong with My Precast Concrete Garage?" The Construction Specifier, June 1, 2015, <https://www.constructionspecifier.com/whats-wrong-with-my-precast-concrete-garage/>.

Seleccionados por los editores por su interés para el lector.



Keith E. Kesner, F.ACI, es Director de Proyectos de Simpson Gumpertz & Heger, Inc. Está especializado en la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes. Es presidente del Comité de Reparación y Rehabilitación del ACI TAC y del Subcomité 562-E, Sísmico, del ACI. También es miembro del Comité de Promoción y Divulgación de Códigos y Normas del ACI; del Comité de Actividades Técnicas; y de los Comités 228, Ensayos No Destructivos del Concreto; 364, Rehabilitación; 562, Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto; y de los Subcomités 318-C, Seguridad, Capacidad de Servicio y Análisis del ACI; y de varios grupos de colaboración de iniciativas estatales. Fue uno de los galardonados con el Premio a la Práctica de la Construcción de ACI en 1998 y recibió el Premio al Miembro Joven de ACI en 2005. Kesner obtuvo su licenciatura en la Universidad de Connecticut, Storrs, CT, EE.UU., y su máster y doctorado en la Universidad de Cornell, Ithaca, NY, EE.UU. Está colegiado como ingeniero profesional en varios estados y como ingeniero de estructuras en Hawai e Illinois.



Liying Jiang, Miembro del ACI y Directora de Ingeniería de Structural Technologies. Está especializada en evaluaciones de estructuras existentes, valoración de materiales de concreto, diseño de medidas de reparación y rehabilitación, y desarrollo de estrategias de gestión para estructuras afectadas por reacción álcali-silice (ASR por sus siglas en inglés), corrosión y otros problemas relacionados con los materiales. Es presidenta del Subcomité 364-C del ACI, Subcomité TechNote, y Secretaria del Subcomité 228-B del ACI, Visual Condition Survey of Concrete. También es miembro de los Comités 228 (Ensayos no destructivos del hormigón) y 364 (Rehabilitación) del ACI.



Stephen S. Szoke, FACI, Personal Distinguido de ACI, es Ingeniero de Defensa del Código en ACI. Participa activamente en el desarrollo de modelos de códigos de construcción, normas de referencia, reglas y reglamentos. Szoke es miembro del personal de enlace del Comité de promoción y divulgación de códigos y normas de ACI. Es ingeniero profesional licenciado.



David G. Tepke, FACI, es ingeniero principal de SKA Consulting Engineers, Inc. en Charleston, SC (EE.UU.). Está especializado en evaluación estructural y de materiales, resolución de problemas, reparación y prolongación de la vida útil. Es especialista en corrosión y especialista en revestimientos protectores certificado por NACE/AMPP. Tepke es presidente del Comité 222 del ACI, Corrosión de Metales en el Concreto, y miembro del Comité del ACI sobre Promoción y Divulgación de Códigos y Normas; y de los Comités 201, Durabilidad del Concreto; 301, Especificaciones para la Construcción de Concreto; 321, Código de Durabilidad; y 329, Criterios de Desempeño para Concreto Premezclado. Es ingeniero profesional licenciado.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Perú

Título: "Seguridad Razonable" para las Estructuras Existentes, Parte 2



*Traducción y Revisión
Técnica:
Julio Antonio
Higashi Luy*