

“Reasonable Safety” of Existing Structures, Part 4: A New Hope

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

The first three parts of this series examined the question of what constitutes “reasonable safety” of an existing structure and the limitations associated with the assessment of safety. This final part will provide some parting words on evaluating “reasonable safety” through condition assessments, discuss the impact of paradigm shifts in construction, and explore advancing trends and technologies that will carry the industry into the future, providing “a new (or continued) hope.” The rapid rate of advancement makes it an exciting time to be in the industry!

“Reasonable Safety” or “Likely Unsafe” through Condition Assessments

It should be apparent that the concepts of “reasonable safety” and “likely unsafe” are conditions that invoke uncertainty and subjectiveness in most situations. Consider the schematic cases in Fig. 1 in combination with the continuum of conditions described in Table 2 in Part 1¹ of this series: from increasing certainty of “reasonable safety” (toward the right in the figures) compared to decreasing certainty of “reasonable safety” (or alternatively increasing

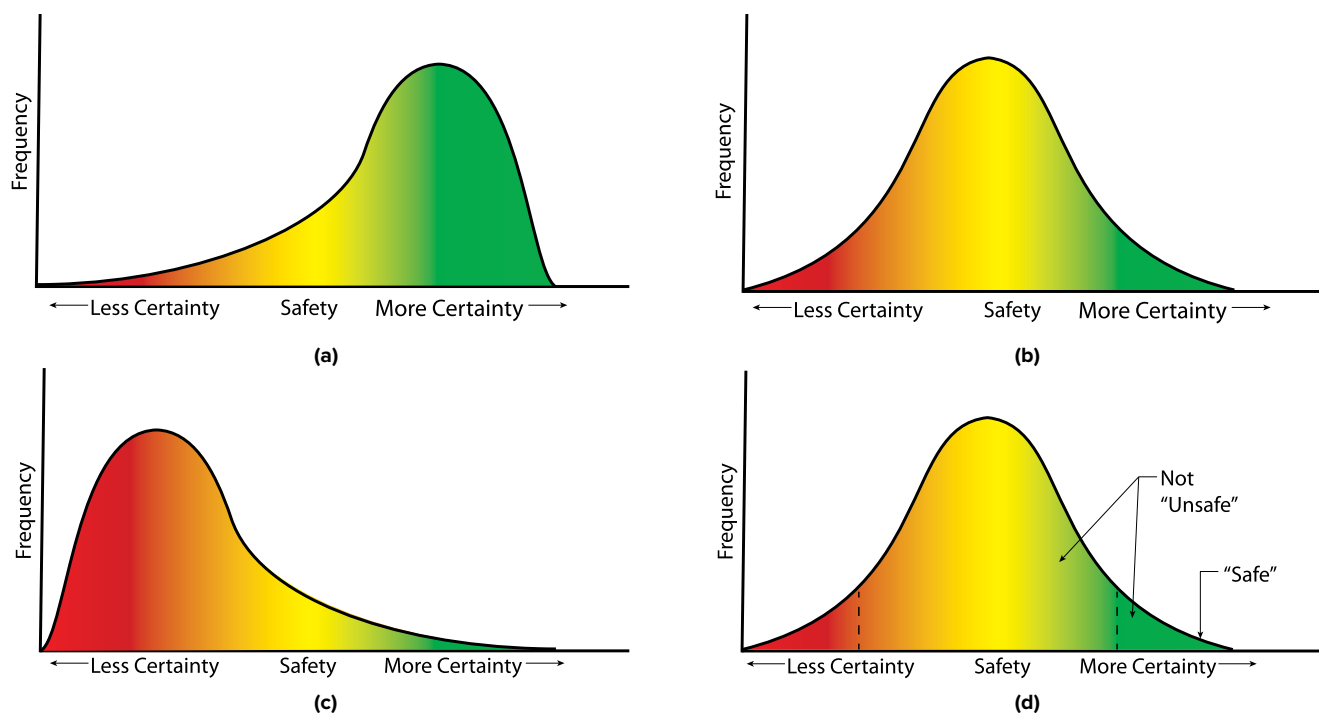


Fig. 1: Conceptual schematics showing certainty of safety based on visual surveys: (a) typical structures with no apparent damage or reason to believe there are deficiencies; (b) older structures with moderate damage; (c) structures with widespread or apparent critical damage; (d) difference in certainty required to conclude a structure or component is “safe” compared to that required to conclude that there is no visual evidence to suggest that a structure is “unsafe”

certainty of “unsafe” conditions) (toward the left in the figures). As shown in Fig. 1(a), new structures or typical structures relatively free of known defects provide a higher level of confidence of safety, represented by the “safe” skew. This is due to greater confidence that the structure was constructed in accordance with contemporary codes and special inspection procedures and has not been exposed to long-term service conditions that may have increased the likelihood of deterioration, the possibility of extreme events, or overload conditions.

For older structures or those with some moderate apparent damage (Fig. 1(b)), one may be less able to conclude safe conditions based on a visual survey until more information is gathered from a comprehensive assessment. Older structures with widespread or known critical damage (Fig. 1(c)) may lead to relatively high confidence that the structure is unsafe and relatively low confidence that one can conclude it is reasonably safe based on a visual survey. This is a shift to an “unsafe skew.” In some cases, it may be possible to conclude with reasonable certainty that the structure or components are unsafe based on a visual inspection. This may be the case where there is concrete at significant risk of detachment in overhead areas accessible to the public, there is a partial collapse, structural elements are excessively damaged, or other similar conditions are present. However, there remains some small probability of “reasonable safety” due to possible redundancies or exceedances of expected strength that visual survey may not capture. Figure 1(d) schematically shows the difference between having sufficient evidence to conclude that a structure or component is “safe” compared to not having evidence that suggests the structure or component is “unsafe” based on a visual survey for a typical older building with some moderate damage or deterioration.

The burden of concluding relative certainty of safety is greater than that of concluding that there isn’t evidence of “unsafe” conditions (as represented by the areas under the

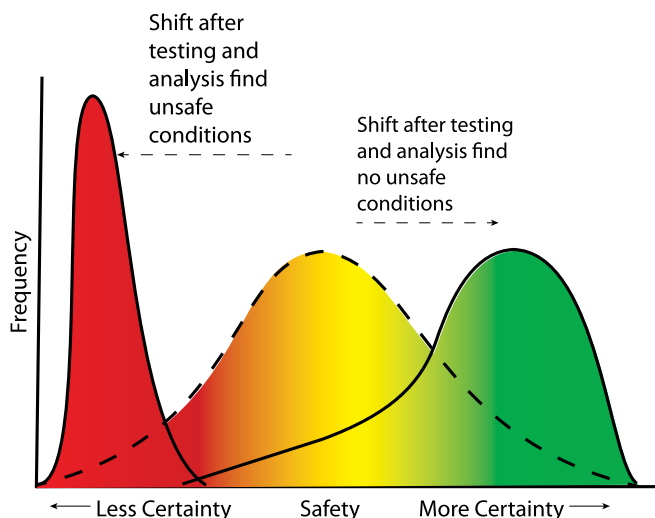


Fig. 2: Shift in certainty of safety after testing and analysis

curves in Fig. 1(d)). With additional testing and evaluation, relative certainty of the condition can be sharpened, thereby improving the confidence that a structure is “reasonably safe” or “likely unsafe.” Figure 2 schematically shows the shifts comparing the certainty of visual surveys and the certainty once tests and more thorough evaluations are performed. Note that the shift to “likely unsafe” may be highly acute if a definitive condition is found representing a hazardous condition, whereas a shift to a “reasonable safety” skew through favorable testing and evaluation will still generally have some variability associated with the inability to conclusively evaluate all properties and conditions of the structure that may contain unfavorable hidden conditions.

Impact of Paradigm Shifts in Construction

Trends and technologies for designing new structures, investigating and maintaining existing structures, and repairing and extending the service life of damaged structures change over time. These changes lead to different expectations of norms associated with existing conditions and structural performance. For example, unless there is a construction deficiency, it is not common today for external sulfate attack to be a concern within a reasonable service life, provided that surrounding soil or water was adequately evaluated to establish the exposure condition and the concrete mixture was designed and produced for addressing the exposure. However, unless they are vigilant in studying historical and contemporary trends, practitioners may miss subtle nuances that are contrary to their experiences. A practitioner might conclude that certain types of structures are not prone to damage or certain types of distress because they haven’t experienced such damage or distress in their practice.

Paradigm shifts in industry practices require vigilance and receptiveness to changing the way one thinks about or approaches the investigation and repair of existing structures. Table 1 gives examples of paradigm shifts in the industry, the potential assessment bias that can occur, and how each shift may impact the industry in the future.

Paradigms of new construction and the associated implications for subsequent service of existing structures change, and so too must the paradigms of assessing existing structures change to take advantage of technologies and developments. The remainder of Part 4 will discuss some of these expected paradigm changes for evaluating structures and safety.

Recent Trends Codes, standards, and inspections

Since the 1960s, provisions have been added to building codes to help ensure that buildings are constructed in accordance with construction documents (refer to Special Inspection in Table 1). The need for continuous or periodic special inspection is listed as requirements in Chapter 17 of 2021 IBC.⁴ For reinforced structural cast-in-place concrete, the 2021 IBC special inspection provisions include:

verification of the mixture design; fabrication of test specimens; determination of slump, air content, and temperature of concrete; curing techniques and temperatures; and inspection of formwork for shape, location, and dimensions. For reinforcement, placement must be verified. If welded, weldability must be verified and welding inspected. Anchors must also be inspected. There are additional requirements for precast and post-tensioned concrete and shotcrete.

The extent of inspection and special inspection required during the original construction should be considered when establishing a program to investigate the structural integrity of buildings, and where available, special inspection reports may aid assessment efforts. Buildings designed and constructed to recent building codes that include provisions such as those in Chapter 17 of the IBC are less likely to have deviations from construction documents, but structural deficiencies due to

Table 1:
Examples of paradigm shifts, implications, and associated assessment bias

Paradigm shift	Implications for existing structures	Possible assessment bias	Possible future implications
Use of air entrainment in concrete	Prior to the 1960s, ACI's standards and codes did not require air entrainment in new concrete exposed to freezing-and-thawing conditions. Air-entraining additives and testing protocols have advanced over time. Older structures may lack intentional resistance to freezing-and-thawing damage.	Limited: Most practitioners understand the issues and implications of air entrainment and freezing-and-thawing damage in concrete from historical evidence.	Limited
Special inspections	Since the 1960s, provisions have been added to building codes to help ensure that buildings are constructed in accordance with construction documents. In 1967, a few requirements for special inspection appeared in the Uniform Building Code, followed by the first appearance in the 1987 National Building Code. ² The latter is largely attributed to a report submitted to the U.S. House of Representatives. ¹	Substantial: Inspection requirements for new construction are an integral part of current building codes. Code requirements without a means of enforcement through inspections would do little to satisfy the purpose of the building code, generally understood to include: "...establish the minimum requirements to provide a reasonable level of safety, health, and general welfare through structural strength..." ³	Limited
Coastal construction	Many coastal condominiums in vacation destinations were built in the 1970s, 1980s, and 1990s. These structures are now 30, 40, or 50 years old and, unless well-maintained, may be at the end or nearing the end of the expected service life without extensive preservation measures.	While it is widely known that coastal structures are susceptible to corrosion and require maintenance and repair, practitioner experience with end of service considerations may be limited, and some practitioners may be less accustomed to considering end of service.	Coastal structures will require extensive preservation, or an increasing number will become structurally deficient or unsafe toward the end of service conditions.
Use of structural integrity steel	Prior to structures governed by ACI 318-89, ⁴ structural integrity steel was not required. Structures built more than 30 years ago may lack steel intentionally installed for enhanced collapse resistance.	It may be perceived by those who design new structures that older structures have inherent capabilities provided by integrity steel because many design professionals began careers in the 1980s or after.	Some types of older structures in corrosive or aggressive environments may increasingly become susceptible to critical conditions and safety concerns.
Corrosion protection of post-tensioned steel systems	Mid 1950s to 1960s, kraft paper and exposed tendons were used; prior to the late 1990s, less extensive corrosion resistance was required compared to requirements of today. Structures built more than 30 years ago may lack adequate corrosion protection by contemporary standards.	Earlier post-tensioned structures are approaching 50 years old or more, and those with protection less than that of today are approaching 30 years old or more. Perceptions for typical practitioners might be that they have performed well and would continue to do so. However, older structures may not be as durable as they might expect.	Post-tensioned structures in corrosive environments with deficient corrosion protection may become increasingly structurally unsafe unless well maintained during service, protected from deleterious conditions, or rehabilitated and preserved when conditions are identified.

¹Committee on Science and Technology, "Structural Failures in Public Facilities (House Report 98-621)," U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., Mar. 15, 1984, 156 pp. The report discusses the findings and recommendations from an investigation prompted by high-profile failures, including the 1973 Skyline Plaza collapse in Virginia, the 1979 Rosemont Horizon Arena roof collapse in Illinois, and the 1981 Hyatt Regency Hotel walkway collapse in Missouri

Table 2:
A decade of resource development

Year	Designation	Title	Status
2013	228.2R-13	Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures	Revision
	440.8-13	Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Materials Made by Wet Layup for External Strengthening of Concrete and Masonry Structures	First edition
	562-13	Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings and Commentary	First edition
2014	222.2R-14	Report on Corrosion of Prestressing Steels	Revision
	364.10T-14	Rehabilitation of Structure with Reinforcement Section Loss	First edition
	546.3R-14	Guide to Materials Selection for Concrete Repair	Revision
2015	364.11T-15	Managing Alkali-Aggregate Reaction Expansion in Mass Concrete	First edition
	364.12T-15	Repair of Leaking Cracks in Walls of Liquid Containment Structures	First edition
	364.13T-15	Repairs for Reinforcement with Shallow Cover	First edition
	440.1R-15	Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars	First edition
	440.9R-15	Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment of Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement	First edition
2016	562-16	Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary	Revision
2017	364.14T-17	Section Loss Determination of Damaged or Corroded Reinforcing Steel Bars	First edition
2018	364.15T-18	Significance of the Shrinkage-Compensating and Nonshrink Labels on Packaged Repair Materials	First edition
	364.16T-18	Physical Properties and Characteristics Affecting the Sensitivity to Cracking of Cementitious Repair Materials	First edition
	364.17T-18	How to Measure pH of a Concrete Surface Prior to Installation of a Floor Covering	First edition
	563-18	Specifications for Repair of Concrete in Buildings	First edition
2019	222R-19	Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete Against Corrosion	Revision
	228.1R-19	Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength	Revision
	364.1R-19	Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation	Revision
	562-19	Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary	Revision
2020	546.2R-20	Guide to Underwater Repair of Concrete	Revision
	546.4R-20	Guide for Jobsite Quality Control and Quality Assurance of Cementitious Packaged Materials	First edition

damage, deterioration, inappropriate modifications during renovations, and other causes may still be present and need to be considered during the investigation for evaluating safety.

Paradigm shifts also include new concrete technologies and systems. These shifts create a need for new codes and standards. Table 2 provides an indication of the development of new codes and the revision of existing codes over the last decade to better ensure that design professionals and contractors have the appropriate resources, and owners have a better understanding for appropriately evaluating and repairing structures. Some specific examples of new code development include:

- Structural concrete internally reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforcement is gaining popularity, especially for elements in corrosive environments. ACI CODE-440.11-22⁵ was recently

published and is referenced in the 2024 International Building Code.⁶ The new code is expected to facilitate construction with GFRP reinforcement. ACI Committee 440S, Fiber-Reinforced Polymer Repair and Rehabilitation Concrete Code, is developing a code for repair and rehabilitation using external FRP systems;

- Additive manufacturing using cementitious materials (three-dimensional [3-D] printed concrete) is also gaining popularity. ACI has formed Innovation Task Group ITG-12 on Code Requirements for Construction of Additively Constructed Walls to develop minimum design and construction requirements to aid in the acceptance and use of 3-D printed concrete;
- There is a trend to change the ingredients of concrete to lower its global warming potential and carbon footprint. ACI Committee 323, Low-Carbon Concrete Code, is

Table 2: Continued

2021	PRC-364.2-21	Increased Shear Capacity within Existing Reinforced Concrete Structures—TechNote	Revision
	PRC-364.4-21	Determining the Load Capacity of a Structure When Structural Drawings are Unavailable—TechNote	Revision
	PRC-364.5-21	Importance of Modulus of Elasticity in Surface Repair Materials—TechNote	First edition
	PRC-364.7-21	Evaluation and Minimization of Bruising in Concrete Repair—TechNote	First edition
	PRC-364.9-21	Cracks in a Concrete Repair—TechNote	First edition
	PRC-440.10-21	Fire Resistance of FRP-Strengthened Concrete Members—TechNote	First edition
	CODE-562-21	Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code and Commentary	Revision
2022	PRC-364.3-22	Cementitious Repair Material Data Sheet—Guide	Revision
	PRC-364.6-22	Concrete Removal in Repairs Involving Corroded Reinforcing Steel—TechNote	Revision
	PRC-364.8-22	Hydrodemolition for Concrete Removal in Unbonded Post-Tensioned Systems—TechNote	Revision
	CODE-440.11-22	Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary	First edition
	SPEC-440.12-22	Strengthening of Concrete Structures with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Materials Using the Wet Layup Method—Specification	First edition
	SPEC-440.5-22	Construction with Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars—Specification	Revision
	SPEC-440.6-08(17)(22)	Specification for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Bar Material for Concrete Reinforcement	Reapproved
	PRC-440.7-22	Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems Design and Construction for Strengthening Masonry Structures—Guide	Revision
2023	SPEC-440.8-13(22)	Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Materials Made by Wet Layup for External Strengthening of Concrete and Masonry Structures—Specification	Reapproved
	PRC-228.3-23	What an Owner Should Know about Nondestructive Testing—TechNote	First edition
	PRC-228.4-23	Visual Condition Survey of Concrete—Guide	Revision
	PRC-440.2-23	Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures—Guide	Revision
	PRC-546-23	Concrete Repair—Guide	Revision

Note: Additional information on documents listed in this table can be found at www.concrete.org

developing a standard that may impact mixture designs to achieve low-carbon concrete; and

- A need has been identified for formalizing durability and maintenance requirements to supplement code-required structural requirements for structures where extended service life is needed, the structure is in severe conditions, or both. It is anticipated that this need will be addressed in a durability code being developed by ACI Committee 321, Concrete Durability Code.

These are but a few examples of how codes and standards will facilitate further paradigm shifts as concrete and concrete technology are always advancing to meet ever-changing demands.

Durability in design

When properly designed and maintained to resist deterioration from prevailing exposure conditions, concrete structures are very durable and resilient. U.S. building codes traditionally have not explicitly considered service life as part of the design. Durability provisions included in design requirements coupled with good construction practices have been used to achieve a reasonable design life and level of resistance against materials-related distress. As discussed in Tepke⁷ and Part 2 of this series,⁸ industry knowledge changes

over time, and improved durability requirements are included to address newly discovered issues or better address known ones. Many reinforced concrete buildings built throughout the twentieth century that used older codes are still in service. Maintenance, routine assessments, and where warranted, more in-depth assessments and repairs with service-life extension measures can continue to extend the useful life of these existing concrete buildings, even when the codes and industry norms at the time of construction are not as advanced as more contemporary ones.

The current version of ACI CODE-318-19(22)⁹ includes standard durability provisions. While some provisions are in general accordance with state of the practice for addressing particular durability concerns, some are not as enhanced or are less comprehensive for structures where there is a desire for longer-term service life or conditions are severe. For example, ACI CODE-318-19(22) has relatively comprehensive provisions for air entrainment to provide resistance to freezing-and-thawing damage and the use of sulfate-resistant cement to provide resistance to sulfate attack. However, provisions for addressing corrosion of embedded reinforcement in the Code are related to chloride contents in the concrete, water-cementitious materials ratio (*w/cm*), compressive strength, and a more generalized statement of

increased protection (Section 20.5.1.4.1):

“In corrosive environments or other severe exposure conditions, the specified concrete cover shall be increased as deemed necessary. The applicable requirements for concrete based on exposure categories in 19.3 shall be satisfied, or other protection shall be provided.”

These provisions generally provide “reasonable durability” for most structures and requirements that can generally be accommodated on most projects (including proportioning water, measuring strength as a surrogate for corrosion protection, and measuring admixed chloride levels), and thus are useful for many situations (as is evidenced by the long-term serviceability of many structures). However, some structures in more severe environments, or those requiring longer-than-normal service life may require additional direction, enhanced provisions, more flexibility for using alternative approaches, increased ability to use performance testing, specific consideration for service life, or more comprehensive treatment. It is expected that initiatives such as a more formal presentation of service-life prediction from ACI Committee 365, Service Life Prediction, and the formation of ACI Committee 321, Concrete Durability Code, will provide supplemental direction for increased durability or service life, when levels beyond those in ACI CODE-318 are required.

Durability is also a concept that can be applied to the continued use of structures that might otherwise have been removed from service due to deterioration or an extreme event. Using engineering assessments and proper repairs permits existing buildings to remain functional or even be salvaged after being subjected to extreme distress. ACI CODE-562-21¹⁰ is an example of an industry standard that considers durability and service-life extension of repairs and represents the current formalization of industry information. Provisions for documenting conditions, considering service life, and providing maintenance plans after repairs are included to address durability. Durability is also intimately linked to sustainability, as discussed in the next section.

Sustainability

There has been considerable focus on reducing the global warming potential of new construction. The movement toward the use of more sustainable materials has resulted in alternatives to concrete mixtures with proven track records based on decades of development and use. The long-term durability and serviceability of these innovative concrete mixtures will need to be closely followed as the use of alternative materials in new construction may lead to differences in expected performance and required nuances in assessment or repair of existing structures. This increased scrutiny should provide valuable information to better understand the long-term performance of concrete produced with alternative materials.

While initiatives for reducing embodied carbon and global warming potential have been focused on new construction,

there is also a realization that a similar focus is needed on maintaining and extending the life of existing structures.¹¹⁻¹³ The service life of buildings can be extended through appropriate building assessments and execution of repairs, service-life extension measures, and maintenance plans. This is often a more sustainable approach than demolition or deconstruction and replacement. Though the costs of assessments and repairs may at times be extensive and may involve partial or temporary relocation of occupants, they will generally be lower than permanent relocation, demolition or deconstruction, and replacement. Generally, assessment combined with repairs, if necessary, is more environmentally and economically sustainable.

The Winecoff Hotel in Atlanta, GA, USA, is an excellent example of a structure that has been repurposed for extended use through rational application of evaluation, repairs, and renovations. Originally built in 1913, the hotel was completely gutted by fire in 1946. With appropriate assessment and repairs, it reopened as the Peachtree Hotel in 1951, and in 1967, it became housing for the elderly. The Winecoff was left vacant for 20 years and then again, with appropriate assessments and repairs, it reopened as the luxurious Ellis Hotel in 2007.

Advancing Technologies

Recent developments in testing and evaluation

Several technologies and enhancements to existing technologies have been introduced to the industry in the late twentieth and early twenty-first century to aid in condition assessments of existing buildings. Many such advancements are influenced by enhanced processing speed, improved user interfaces, and graphical presentation of data. The multi-array dry point contact low frequency ultrasonic shear wave technique developed in the 1990s (ACI 228.3-2013¹⁴) has been made commercially available in the past 20 years by multiple manufacturers. The technology, also referred to as ultrasonic tomography, can produce two-dimensional (2-D) or 3-D images for detecting internal flaws (Fig. 3). User-friendly ground-penetrating radar (GPR) systems have also been developed with post-processing algorithms that convert traditional data into more intuitive visual representations for ready interpretation or reinforcing steel location (Fig. 4). Examples of some recent advancements in corrosion testing devices that show promise include contactless corrosion rate testing,¹⁵ use of a flying robot for corrosion potential testing,¹⁶ and electrochemical tomography

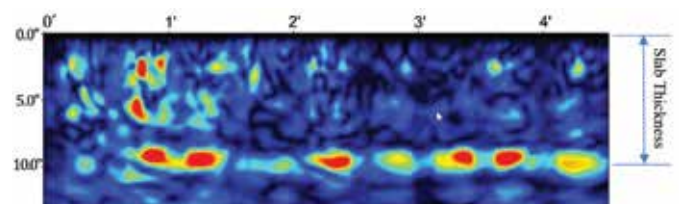


Fig. 3: Ultrasonic tomography of a concrete slab

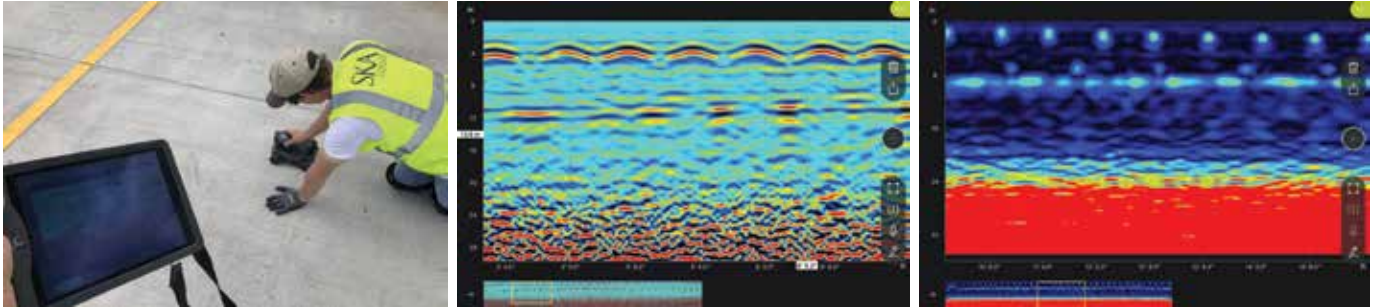


Fig. 4: Representation of reinforcing steel by ground penetrating radar: data collection (left), standard visual representation (center), and processed image showing reinforcing steel location (blue dots) and slab depth (blue line) (right)

for the detection of localized corrosion.¹⁷ Newer advancements include the integration of machine learning and structural health monitoring, as discussed next. While not comprehensive, the listed advancements demonstrate continued progress and a promising outlook for the future.

Building information modeling

Building information modeling (BIM) has become the foundation of digital transformation in the architecture, engineering, and construction industry. BIM helps to optimize design, improve accuracy, and connect design to fabrication, thereby holistically improving the construction quality. BIM software is widely used to create 3-D models that extensively document structural components, connections, and materials for the entire building or structure.

On many projects, BIM is being employed for structural elements. The use of BIM continues to grow, especially for larger projects. Where BIM is used for new construction, the data (3-D model and outputs, including construction drawings) could be a great resource to assist in the assessment of the building when it ages and requires an assessment for structural safety (Fig. 5).

Lidar and photogrammetry

Lidar (light detection and ranging) scanning systems involve laser scanning to produce detailed 3-D images of complex environments and geometries in only a few minutes per scan. The resulting images comprise assemblies of millions of 3-D measurement points combined with photographs. The scan data is processed and registered with a computer to create a point cloud. The point cloud can be shared for viewing, planning, measuring, adding notes, or importing into computer-aided design (CAD) software. When imported into CAD software, a BIM model and drawings can be created from the point cloud of the as-built condition.

Line of sight to the object of interest is the most important factor in capturing scan data. Multiple scans must be taken to work around obstructions. Depending on what is being scanned, it may be necessary to raise or lower the tripod so that areas below and above objects are captured.

Lidar scanning is very useful for producing a 3-D model

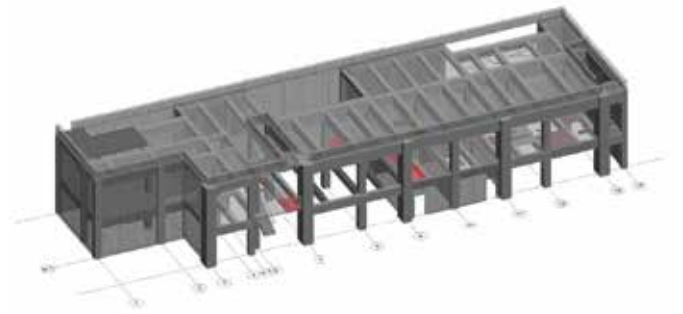


Fig. 5: Three-dimensional model of a building with indicated concrete delamination (shown in red highlighted areas)

that reflects the existing condition/geometries from the interior of the building structure, including structural components, equipment, pipes, and any other obstructions. This is extremely helpful for old, existing complex buildings/structures where structural drawings are not available, the structural system is not apparently recognizable, or there is a significant number of obstructions that prevent access to specific hidden areas (Fig. 6). In addition, lidar scanning can also be effective in repair construction planning in terms of correlating the required repair locations, shoring and formwork locations, and obstruction identification/relocations.

With the integrated high-resolution camera, the collected photogrammetric data can also be overlaid on the 3-D model or BIM model, allowing a digital inspection of the existing condition of the structure. This also allows all inspection data to be collected at a sufficient rate so that the inspection could be more frequent while less expensive; alternatively, providing a more in-depth understanding of a structure's overall health, both immediately and over time.¹⁸

Structural health monitoring

A variety of technologies are available for monitoring structural response, environmental conditions, and deterioration initiation or propagation, with the goal of aiding owners and consultants in determining when actions should be taken to address safety concerns, maintenance issues, or deterioration. ACI PRC-444.2-21¹⁹ lists several technologies currently available, including acoustic monitoring systems for post-tensioned structures, displacement strain and deflection



Fig. 6: Using lidar scanning to capture the condition of an inaccessible area: (a) mounting; and (b) an output

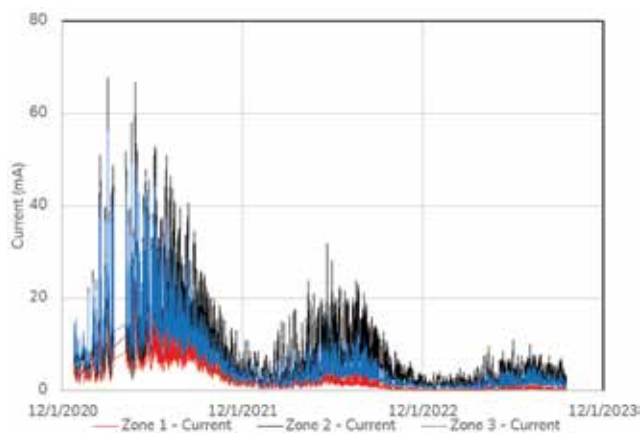


Fig. 7: Current recorded by SHM system in repaired stadium

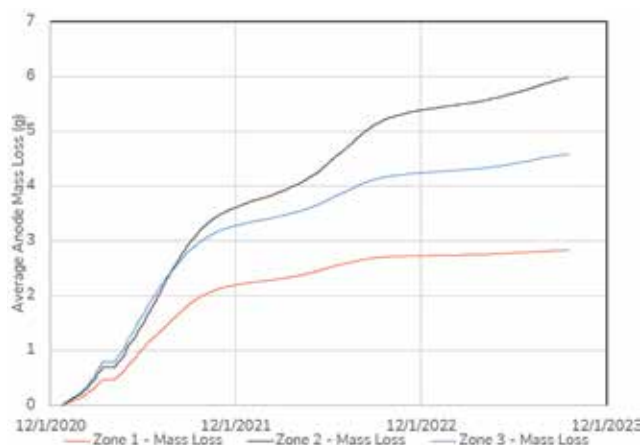


Fig. 8: Anode mass loss calculated from current generation

monitors for evaluating movement in key structural components, and corrosion monitoring for structures in susceptible environments, all components and conditions that can impact structural safety.

Results from structural health monitoring (SHM) can be used to monitor changes in performance or to predict the need for future repairs. Figures 7 and 8 show results from the monitoring of galvanic anodes installed in a stadium structure that was recently repaired. The current generated by the anodes in discrete was recorded by a data logger (Fig. 7). The current generated was then converted into the mass loss in the anodes using Faraday's Law. The anode mass loss over time (Fig. 8) will be used to predict the remaining anode service life. Additional embedded sensors are employed to monitor temperature and relative humidity in the grandstands to examine the expected service life of the applied coating.

Key considerations include selecting the number and locations of sensors to adequately describe the structure. While sensors can be installed in areas of perceived interest for evaluating the structure, there is an inherent risk to relying on sensors for complete information because whole structure monitoring can be difficult or cost-prohibitive. Thus, at present, there is a general need for site inspections. When site inspections indicate a potential issue and more traditional evaluation is done, SHM systems can be used to either augment the existing evaluations or initiate new ones. Significant advancements have been made in recent years with respect to user interfacing, data collection, data management and sharing, for example, in clouds, and minimizing tethering. It is expected that more advancements will follow in these aspects, but also in the applications of artificial intelligence and machine learning for selecting test sites and interpreting data.

Drones

Drones are unmanned aerial vehicles (UAV) that use propellers to fly to a desired position in the air while being controlled by a pilot on the ground. Drones are typically equipped with specialized high-resolution cameras to provide enhanced photographs of places and structures that are expensive, costly, and dangerous to inspect by human access, such as mid- to high-rise buildings or tall industrial structures, such as cooling towers and bridges. UAVs can be used to comprehensively scan exposed surfaces, and the resulting data can be processed to create precision high-resolution imagery and 3-D digital models.

The detailed imagery can be used to identify and measure visual defects, record the results for future use and comparison, determine the overall condition of the structure, and serve as a basis to select areas for detailed field investigation or assessment. It should be noted that an experienced inspector is required to do the digital surveys, as tasks include reviewing the 3-D model and images to identify and categorize defects. Although inspection results such as those shown in Fig. 9 cannot provide comprehensive data suitable for immediate

confirmation of reasonable safety of a structure, they can:

- Allow holistic collection of the defects immediately and over time at a relatively low cost (as compared to by human access);
- Provide comprehensive information on the overall health of a structure; and
- Allow further evaluation on whether an in-depth condition assessment is required to determine the reasonable safety of the structure.

Industrial rope access

Industrial rope access (IRA) refers to techniques by which access is gained to the exterior walls of buildings or other structures by means of ropes. The primary purpose of rope access is to enable access to difficult-to-reach locations of tall buildings or structures without scaffolding, swing stage, or drone that may be restricted to use per Federal Aviation Administration (FAA) regulations.

Rope access first came into use for industrial work in the 1980s. Since then, trade associations such as the Industrial Rope Access Trade Association (IRATA) and Society of Professional Rope Access Technicians (SPRAT) have codified it and made it into a tested, reliable method for getting people into hard-to-reach places to do work. Currently, rope access is typically a means for hands-on inspection on high-rise buildings or tall structures where scaffolding or swing stages are not practical or cost-prohibitive (Fig. 10). In addition to visual survey, additional nondestructive testing, such as acoustic impact survey, GPR survey, or corrosion survey, if considered as part of the evaluation to determine the structural safety, can be performed through rope access.

Machine learning

Machine learning (ML) is the study of computer algorithms that can learn and develop on their own with experience and historical data. ML is used in a broad range of applications, and there has been a recent exponential rise in the use of concrete technology based on a number of pertinent publications.²⁰ The earliest article identified in connection with concrete and ML was published in 1992.²¹

ML has been used in different fields of concrete technology, and the findings showed that ML techniques can predict the output based on historical data and are deemed to be acceptable to evaluate, model, and predict concrete properties from its fresh state to its hardening, and its hardened state to service life.

From the perspective of the safety of the structure, both durability and service life are necessary parameters that may be forecasted using ML technologies. For example, researchers used data recorded on carbonation for recycled aggregate concrete.²⁰ The model developed by ML captured the parameters that influenced the carbonation depth and opted to run a specific process that demonstrated exceptional performance in predicting the depth of carbonation, which is a great tool for predicting the durability of concrete that

addresses carbonation-related corrosion issues.

ML is being developed for concrete cracking detection, which is one of the important and time-consuming tasks for condition assessment or periodical inspection that may be required for some existing structures. Current research indicates that algorithms can be used to detect cracks in concrete structures. For example, different ML algorithms are being adopted to monitor the concrete structural elements based on real-time sensor acquired data and color image detection to detect usual cracks in the concrete surface, algorithms were being trained to recognize the patterns of the cracks and identify them accurately, and a deep-learning method is being used to develop an automatic detector of cracks in concrete. In addition, crack propagation in concrete structures can also be predicted using ML and is being studied currently.

The applications of ML in concrete technologies are still in their infancy and challenging; however, the research has been continuously developing. Similar to other advancing technologies, such as drone and lidar technologies, the advancements of ML provide a promising outlook for assisting in the assessment of the safety of the structures.



Fig. 9: Exterior damage can be highlighted on a 3-D model created using UAV photogrammetry



Fig. 10: Industrial rope access from the top of a tall structure

Summary

Design professionals are routinely being asked to evaluate the safety of existing structures, often based upon limited information and with limited access to the structure. This article series examined some of the challenges associated with condition assessments and the need for results to be presented within the context of the assessment limitations.

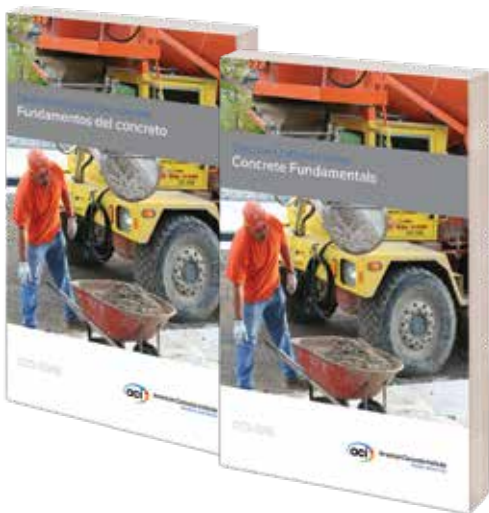
Since the first applications of structural concrete and subsequently the first design and construction standards, significant changes to concrete and concrete technology have occurred. In the last 50 years, there have been more substantial changes to better ensure new buildings are properly designed and constructed to satisfy the serviceability requirements and reasonable levels of safety, as well as assessment and evaluation of existing buildings and design and execution of repairs. This article discussed the continual advances in concrete and concrete technology for both new construction and extending the service life of existing structures as they pertain to the assessment and evaluation of existing structures.

A better understanding of concrete performance in existing structures, paradigm shifts, revision of existing codes and standards and development of new ones, and acceptance of new technologies all demonstrate that there is new hope to further ensure that structures designed and constructed using structural concrete will continue to reasonably provide for the health, safety, and general welfare of the public for their intended service life and beyond.

References

1. Kesner, K.E.; Tepke, D.G.; Jiang, L.; and Szoke, S.S., “‘Reasonable Safety’ of Existing Structures, Part 1,” *Concrete International*, V. 45, No. 11, Nov. 2023, pp. 43-48.
2. Matthews, M.A., “Special Inspections as Originally Intended,” *The Construction Specifier*, Feb. 10, 2015.
3. 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.
4. “2021 International Building Code (IBC),” International Code Council, Washington, DC, Dec. 2020.
5. ACI Committee 440, “Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.11-22),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.
6. “2024 International Building Code (IBC),” International Code Council, Washington, DC, Dec. 2023.
7. Tepke, D.G., and Isgor, O.B., “Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?” *Concrete International*, V. 45, No. 8, Aug. 2023, pp. 31-36.
8. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., “‘Reasonable Safety’ of Existing Structures, Part 2,” *Concrete International*, V. 45, No. 12, Dec. 2023, pp. 51-56.
9. 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.
10. ACI Committee 562, “Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete structures—Code and Commentary (ACI CODE-

Affordable Resource for Concrete Contractors



Concrete Fundamentals is an easy-to-use book and valuable starting point for someone in the concrete industry.

- Offered in full color and dual units;
- Ideal as a required course textbook or company onboarding tool;
- Available in English and Spanish; and
- Available as a book or downloadable PDF.

Pricing as low as \$19

Visit concrete.org/store for more information



American Concrete Institute
Always advancing



562-21),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 88 pp.

11. ICRI Committee 160, “Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings,” International Concrete Repair Institute, St. Paul, MN, 2014, 13 pp.

12. Renne, N.; Kara De Maeijer, P.; Craeye, B.; Buyle, M.; and Audenaert, A., “Sustainability Assessment of Concrete Repairs through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA),” *Infrastructures*, V. 7, No. 10, Sept. 2022.

13. Vittoch, L.; Buyle, M.; Audenaert, A.; Seuntjens, O.; Renne, N.; and Craeye, B., “Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods,” *Journal of Building Engineering*, V. 52, July 2022.

14. ACI Committee 228, “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure (ACI 228.2R-13),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.

15. Fahim, A.; Ghods, P.; Isgor, O.B.; and Thomas, M.D.A., “A Critical Examination of Corrosion Rate Measurement Techniques Applied to Reinforcing Steel in Concrete,” *Materials and Corrosion*, V. 69, No. 12, July 2018, pp. 1784-1799.

16. Pfändler, P.; Bodie, K.; Crotta, G.; Pantic, M.; Siegart, R.; and Angst, U., “Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced

Concrete Structures Using an Autonomous Flying Robot,” *Automation in Construction*, V. 158, Feb. 2024.

17. Van Ede, M.C.; Fichtner, A.; and Angst, U., “Nondestructive Detection and Quantification of Localized Corrosion Rates by Electrochemical Tomography,” *NDT & E International*, V. 142, Mar. 2024.

18. D’Amico, N., and Yu, T., “Photogrammetric Analysis of Concrete Specimens and Structures for Condition Assessment,” *Conference: SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Apr. 2016.

19. ACI Committee 444, “Structural Health Monitoring Technologies for Concrete Structures—Report (ACI PRC-444.2-21),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 110 pp.

20. Gamil, Y., “Machine Learning in Concrete Technology: A Review of Current Researches, Trends, and Applications,” *Frontiers in Built Environment*, V. 9, Feb. 2023.

21. Li, Z.; Yoon, J.; Zhang, R.; Rajabipour, F.; Srubar III, W.V.; Dabo, I.; and Radlinska, A., “Machine Learning in Concrete Science: Applications, Challenges, and Best Practices,” *Computational Materials*, V. 8, June 2022.

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 an 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 a member of ACI Committees 201, Durability of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 321, Concrete 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; the

ACI Technical Activities Committee; and ACI Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; 364, Rehabilitation; and 562, Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings; and ACI Subcommittee 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" de las estructuras existentes, Parte 4: Una nueva esperanza

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

En las tres primeras partes de esta serie se examinó la pregunta acerca de qué constituye la "seguridad razonable" de una estructura existente y las limitaciones asociadas a la evaluación de la seguridad. Esta última parte brindará algunas conclusiones sobre la evaluación de la "seguridad razonable" a través de la valoración del estado, debatirá el impacto de los cambios de paradigma en la construcción y explorará tendencias y tecnologías avanzadas que llevarán al sector hacia el futuro, proporcionando "una nueva (o continuada) esperanza". El rápido ritmo de avance hace que sea una época apasionante para el sector.

"Seguridad razonable" o "Posiblemente inseguro" mediante evaluaciones del estado

Debería ser aparente que los conceptos de "seguridad razonable" y "posiblemente inseguro" son condiciones que invocan incertidumbre y subjetividad en la mayoría de las situaciones. Consideremos los casos esquemáticos de la Fig. 1 en combinación con el continuo de condiciones descritas en la Tabla 2 de la Parte 1¹ de esta serie: desde una certeza creciente de "seguridad razonable" (hacia la derecha en las figuras) frente a una certeza decreciente de "seguridad razonable" (o alternativamente una certeza creciente de condiciones "inseguras") (hacia la izquierda en las figuras). Como se muestra en la Fig. 1(a), las estructuras nuevas o las estructuras típicas relativamente libres de defectos conocidos proporcionan un mayor nivel de confianza en la seguridad, representado por la tendencia a "segura". Esto se debe a una mayor confianza en que la estructura se construyó de acuerdo con los códigos contemporáneos y los procedimientos de inspección especiales y no ha estado expuesta a condiciones de servicio a largo plazo que puedan haber aumentado la probabilidad de deterioro, la posibilidad de eventos extremos o las condiciones de sobrecarga.

En el caso de las estructuras más antiguas o con daños aparentes moderados, Fig. 1(b), es menos probable que se pueda concluir que las condiciones son seguras basándose en una inspección visual hasta que se obtenga más información de una evaluación completa. Las estructuras más antiguas con daños críticos generalizados o conocidos, Fig. 1(c), pueden llevar a una confianza relativamente alta en que la estructura es insegura y a una confianza relativamente baja en que se puede concluir que es razonablemente segura basándose en una inspección visual. Esto es un cambio a un "sesgo inseguro". En algunos casos, puede ser posible concluir con certeza razonable que la estructura o los componentes son inseguros basándose en una inspección visual. Este puede ser el caso cuando hay concreto con riesgo significativo de desprendimiento en zonas elevadas accesibles al público, hay un derrumbe parcial, los elementos estructurales están excesivamente dañados, u otras condiciones similares están presentes. Sin embargo, sigue existiendo una pequeña probabilidad de "seguridad razonable" debido a posibles redundancias o superaciones de la resistencia esperada que la inspección visual puede no captar. La Fig. 1(d) muestra esquemáticamente la diferencia entre tener pruebas suficientes para concluir que una estructura o un componente es "seguro" y no tener pruebas que sugieran que la estructura o el componente es "inseguro" basándose en una inspección visual de un edificio antiguo típico con daños o deterioro moderados.

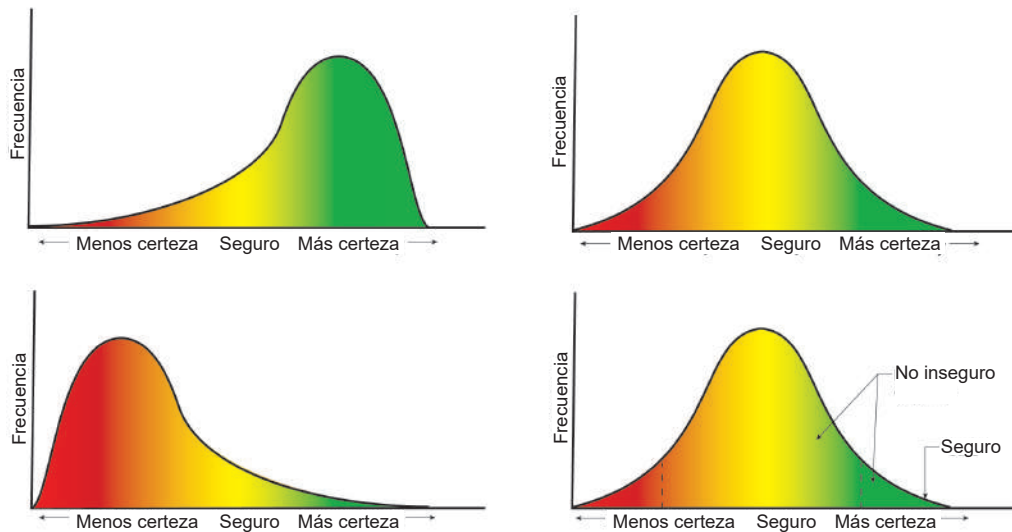


Fig. 1: Esquemas conceptuales que muestran la certeza de la seguridad basada en inspecciones visuales: (a) estructuras típicas sin daños aparentes o razones para creer que hay deficiencias; (b) estructuras antiguas con daños moderados; (c) estructuras con daños críticos generalizados o aparentes; (d) diferencia en la certeza requerida para concluir que una estructura o componente es "seguro" comparada con la requerida para concluir que no hay pruebas visuales que sugieran que una estructura es "insegura".

La responsabilidad de concluir la certeza relativa de la seguridad es mayor que la de concluir que no hay pruebas de condiciones "inseguras" (como representan las áreas bajo las curvas de la Fig. 1(d)). Con pruebas y evaluaciones adicionales, la certeza relativa de la condición puede afinarse, mejorando así la confianza en que una estructura es "razonablemente segura" o "probablemente insegura". La Fig. 2 muestra esquemáticamente los cambios que se producen al comparar la certeza de las inspecciones visuales y la certeza una vez que se realizan pruebas y evaluaciones más exhaustivas. Obsérvese que el cambio a "probablemente insegura" puede ser muy agudo si se encuentra una condición definitiva que represente una condición peligrosa, mientras que un cambio a un sesgo de "seguridad razonable" mediante pruebas y evaluaciones favorables seguirá teniendo generalmente cierta variabilidad asociada a la incapacidad de evaluar de forma concluyente todas las propiedades y condición de la estructura que puedan contener escenarios ocultos desfavorables.

Impacto del cambio de paradigma en la construcción

Las tendencias y tecnologías de diseño de nuevas estructuras, la investigación y mantenimiento de estructuras existentes y la reparación y extensión de la vida útil de estructuras deterioradas, cambian con el tiempo. Estos cambios conducen a diferentes expectativas de normativas asociadas a las condiciones existentes y al desempeño estructural. Por ejemplo, a menos que exista una deficiencia en la construcción, hoy en día no es habitual que el ataque externo por sulfatos sea motivo de preocupación dentro de una vida útil razonable, siempre que el suelo o el agua circundantes se hayan evaluado adecuadamente para establecer la condición de exposición y que la mezcla de concreto se haya diseñado y producido para hacer frente a la exposición. Sin embargo, a menos que estén atentos al estudio de las tendencias históricas y contemporáneas, los profesionales pueden pasar por alto matices sutiles que son contrarios a sus experiencias. Un profesional puede llegar a la conclusión de que ciertos tipos de estructuras no son propensas a sufrir daños o ciertos tipos de deterioro porque no ha experimentado tales daños o deterioros en su práctica.

Los cambios de paradigma en las prácticas de la industria requieren vigilancia y receptividad para cambiar la forma de pensar o abordar la investigación y reparación de las estructuras existentes. En la Tabla 1 se dan ejemplos de cambios de paradigma en el sector, el posible sesgo de evaluación que puede producirse y cómo cada cambio puede afectar al sector en el futuro.

Los paradigmas de la nueva construcción y las implicaciones asociadas para el servicio posterior de las estructuras existentes cambian, y también deben cambiar los paradigmas de la evaluación de las estructuras existentes para aprovechar las tecnologías y los avances. En lo que queda de la Parte 4 se analizarán algunos de estos cambios de paradigma previstos para la evaluación de las estructuras y la seguridad.

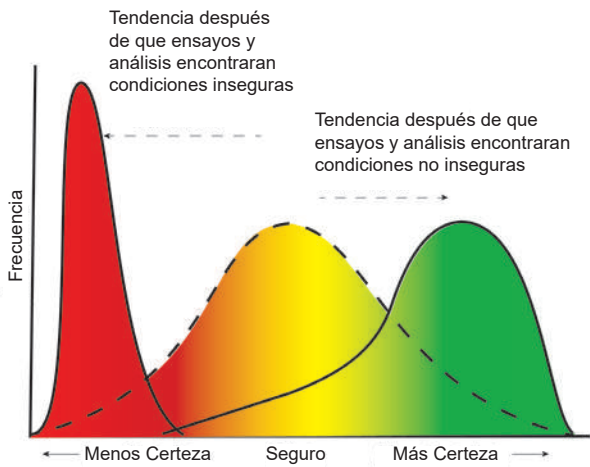


Fig. 2: Cambio en la certeza de la seguridad después de ensayos y análisis.

Tendencias recientes Códigos, normativa e inspecciones

Desde la década de 1960, se han añadido disposiciones a los códigos de construcción para ayudar a garantizar que los edificios se construyan de acuerdo con los documentos de construcción (consulte Inspección especial en la Tabla 1). La necesidad de inspecciones especiales continuas o periódicas se enumera como requisito en el Capítulo 17 del IBC 2021⁴. Para el concreto estructural reforzado colado en sitio, las disposiciones de inspección especial del IBC 2021 incluyen: verificación del diseño de la mezcla; fabricación de muestras de ensayo; determinación del asentamiento, contenido de aire y temperatura del concreto; técnicas y temperaturas de curado; e inspección de la forma, ubicación y dimensiones del encofrado. En el caso de armaduras, debe verificarse su colocación. Si está soldada, se comprobará su soldabilidad y se inspeccionará la soldadura. También deben inspeccionarse los anclajes. Existen requisitos adicionales para el concreto prefabricado y postensado, y para el concreto lanzado.

A la hora de establecer un programa para investigar la integridad estructural de los edificios, debe tenerse en cuenta el alcance de la inspección y de las inspecciones especiales requeridas durante la construcción original y, cuando se disponga de ellos, los informes de inspecciones especiales pueden ayudar en los esfuerzos de evaluación. Los edificios diseñados y construidos de acuerdo con códigos de construcción recientes que incluyen disposiciones como las del capítulo 17

del IBC tienen menos probabilidades de presentar desviaciones con respecto a los documentos de construcción, pero las deficiencias estructurales debidas a daños, deterioro, modificaciones inadecuadas durante las renovaciones y otras causas pueden seguir estando presentes y deben tenerse en cuenta durante la investigación para evaluar la seguridad.

Los cambios de paradigma también incluyen nuevas tecnologías y sistemas de concreto. Estos cambios hacen necesarios nuevos códigos y normas. La Tabla 2 muestra el desarrollo de nuevos códigos y la revisión de los existentes en la última década para garantizar que los profesionales del diseño y los contratistas dispongan de los recursos adecuados y que los propietarios comprendan mejor cómo evaluar y reparar adecuadamente las estructuras. Algunos ejemplos concretos de nuevos códigos son los siguientes:

- El concreto estructural reforzado internamente con polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) está ganando popularidad, especialmente para elementos en ambientes corrosivos. Recientemente se ha publicado el ACI CODE-440.11-22⁵, al que se hace referencia en el Código Internacional de la Edificación de 2024⁶. Se espera que el nuevo código facilite la construcción con refuerzo de GFRP. El Comité 440S del ACI, Código de reparación y rehabilitación del concreto con polímeros reforzados con fibras, está desarrollando un código para la reparación y rehabilitación mediante sistemas FRP externos;
- La fabricación aditiva con materiales cementantes (concreto impreso en tres dimensiones [3-D]) también está ganando popularidad. ACI ha formado el Grupo de Trabajo de Innovación ITG-12 sobre Requisitos de Código para la Construcción de Muros Construidos Aditivamente para desarrollar requisitos mínimos de diseño y construcción para ayudar en la aceptación y el uso de concreto impreso en 3-D;
- Existe una tendencia a cambiar los ingredientes del concreto para reducir su impacto en el calentamiento global y su huella

de carbono. El Comité 323 del ACI, Código del Concreto Bajo en Carbono, está desarrollando un estándar que puede impactar en los diseños de mezclas para lograr un concreto bajo en carbono;

- y
- Se ha identificado la necesidad de formalizar los requisitos de durabilidad y mantenimiento para complementar los requisitos estructurales exigidos por el código para las estructuras en las que se necesita una vida útil prolongada, la estructura se encuentra en condiciones severas, o ambas condiciones. Se prevé que esta necesidad se aborde en un código de durabilidad que está elaborando el Comité 321 del ACI, Código de Durabilidad del Concreto.

Estos son sólo algunos ejemplos de cómo los códigos y las normas facilitarán nuevos cambios de paradigma, ya que el concreto y la tecnología del concreto siempre están avanzando para satisfacer demandas siempre cambiantes.

Tabla 1:
Ejemplos de cambios de paradigma, implicaciones y sesgos de evaluación asociados

Cambio de paradigma	Implicaciones para las estructuras existentes	Posible sesgo en la evaluación	Posibles implicaciones futuras
Uso de aire incorporado en el concreto	Antes de la década de 1960, las normas y códigos del ACI no exigían el aire incorporado en el concreto nuevo expuesto a condiciones de congelación y descongelación. Los aditivos inclusores de aire y los protocolos de prueba han avanzado con el tiempo. Las estructuras más antiguas pueden carecer de resistencia a los daños por congelación y descongelación.	Limitado: La mayoría de los profesionales entienden los problemas y las implicaciones del aire incorporado y los daños por congelación y descongelación en el concreto a partir de la evidencia histórica.	Limitadas
Inspecciones especiales	Desde la década de 1960, se han ido añadiendo disposiciones a los códigos de edificación para ayudar a garantizar que los edificios se construyan de acuerdo con los documentos de construcción. En 1967, aparecieron algunos requisitos de inspección especial en el Código Uniforme de la Edificación, a los que siguió la primera aparición en el Código Nacional de la Edificación de 1987 ² . Este último se atribuye en gran medida a un informe presentado a la Cámara de Representantes de EE.UU.*	Sustancial: Los requisitos de inspección para las nuevas construcciones son una parte integral de los códigos de construcción actuales. Los requisitos del código sin un medio de aplicación a través de inspecciones harían poco para satisfacer el propósito del código de construcción, generalmente entendido como: "...establecer los requisitos mínimos para proporcionar un nivel razonable de seguridad, salud y bienestar general a través de la resistencia estructural..." ³	Limitadas
Construcción costera	Muchos condominios costeros en destinos vacacionales se construyeron en las décadas de 1970, 1980 y 1990. Estas estructuras tienen ahora 30, 40 o 50 años y, a menos que reciban un buen mantenimiento, pueden estar al final o cerca del final de la vida útil prevista si no se toman medidas de preservación exhaustivas.	Aunque es bien sabido que las estructuras costeras son susceptibles a la corrosión y requieren mantenimiento y reparación, la experiencia de los profesionales con las consideraciones sobre el final de vida de servicio puede ser limitada, y algunos profesionales pueden estar menos acostumbrados a considerar la vida última.	Las estructuras costeras requerirán una amplia preservación, o un número cada vez mayor se convertirá en estructuralmente deficiente o insegura hacia el final de las condiciones de servicio.
Uso de acero de integridad estructural	Antes de que las estructuras se rigieran por la norma ACI 318-89, ⁴ no se exigía acero de integridad estructural. Las estructuras construidas hacen más de 30 años pueden carecer de acero instalado intencionadamente para mejorar la resistencia al colapso.	Quienes diseñan estructuras nuevas pueden tener la percepción de que las estructuras más antiguas tienen capacidades inherentes proporcionadas por la integridad del acero porque muchos profesionales del diseño empezaron sus carreras en los años 1980 o después.	Algunos tipos de estructuras antiguas en entornos corrosivos o agresivos pueden volverse cada vez más susceptibles a condiciones críticas y problemas de seguridad.

Protección contra la corrosión de los sistemas de acero postensado	Entre mediados de los años 50 y 60, se utilizaba papel kraft y tendones expuestos; antes de finales de los 90, se exigía una resistencia a la corrosión menos amplia que la actual. Las estructuras construidas hacen más de 30 años pueden carecer de una protección adecuada contra la corrosión según los estándares contemporáneos.	Las estructuras postensadas más antiguas se acercan a los 50 años o más, y las que tienen una protección inferior a la actual se acercan a los 30 años o más. Los profesionales suelen pensar que han funcionado bien y que seguirán haciéndolo. Sin embargo, es posible que las estructuras más antiguas no sean tan duraderas como se podría esperar.	Las estructuras postensadas en ambientes corrosivos con una protección deficiente contra la corrosión pueden volverse cada vez más inseguras desde el punto de vista estructural, a menos que se mantengan en buen estado durante el servicio, se protejan de las condiciones nocivas o se rehabiliten y conserven cuando se identifiquen dichas condiciones.
--	---	---	---

*Comité de Ciencia y Tecnología, "Structural Failures in Public Facilities (House Report 98-621)", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 15 de marzo de 1984, 156 pp. El informe expone las conclusiones y recomendaciones de una investigación llevada a cabo a raíz de graves accidentes, como el colapso del Skyline Plaza en Virginia en 1973, el del tejado del Rosemont Horizon Arena en Illinois en 1979 y el de la pasarela del Hotel Hyatt Regency en Missouri en 1981.

Tabla 2:
Una década de desarrollo de recursos

Año	Designación	Título	Estado
2013	228.2R-13	Informe sobre métodos de ensayo no destructivos para la evaluación del concreto en estructuras	Revisión
	440.8-13	Especificación para materiales de polímero reforzado con fibra de carbono y de vidrio (FRP) fabricados por laminación húmeda para refuerzo externo de estructuras de concreto y mampostería	Primera edición
	562-13	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto y Comentarios	Primera edición
2014	222.2R-14	Informe sobre Corrosión en Acero de preesfuerzo	Revisión
	364.10T-14	Rehabilitación de Estructura con Pérdida de Sección de Refuerzo	Primera edición
	546.3R-14	Guía para la selección de materiales para reparación de concreto	Revisión
2015	364.11T-15	Gestión de la expansión de la reacción álcali-agregado en el concreto masivo	Primera edición
	364.12T-15	Reparación de grietas con fugas en paredes de estructuras de contención de líquidos	Primera edición
	364.13T-15	Reparaciones para refuerzo con cubierta poco profunda	Primera edición
	440.1R-15	Guía para el diseño y la construcción de concreto estructural reforzado con barras de polímero reforzado con fibra (FRP)	Primera edición
	440.9R-15	Guía de protocolos de acondicionamiento acelerado para la evaluación de la durabilidad del refuerzo interno y externo de polímero reforzado con fibra (FRP)	Primera edición
2016	562-16	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Existentes y Comentario	Revisión
2017	364.14T-17	Determinación de la pérdida de sección de barras de acero de refuerzo dañadas o corroídas	Primera edición
2018	364.15T-18	Importancia de que las etiquetas informativas de materiales de reparación empaquetados, informen sobre si compensan o no el encogimiento o la contracción	Primera edición
	364.16T-18	Propiedades físicas y características que afectan a la sensibilidad al agrietamiento de los materiales cementantes de reparación	Primera edición
	364.17T-18	Cómo medir el pH de una superficie de concreto antes de instalar un revestimiento de suelo	Primera edición
	563-18	Especificaciones para la reparación de concreto en edificios	Primera edición
2019	222R-19	Guía para la protección contra la corrosión del acero de refuerzo en el concreto	Revisión
	228.1R-19	Informe sobre métodos para estimar la resistencia del concreto en sitio	Revisión
	364.1R-19	Guía para la evaluación de estructuras de concreto antes de su rehabilitación	Revisión
	562-19	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Existentes y Comentario	Revisión
2020	546.2R-20	Guía para la reparación subacuática del concreto	Revisión
	546.4R-20	Guía para el control de calidad en la obra y la garantía de calidad de los materiales cementantes empaquetados	Primera edición

2021	PRC-364.2-21	Aumento de la capacidad de corte de las estructuras de concreto armado existentes - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.4-21	Determinación de la capacidad de carga de una estructura cuando no se dispone de planos estructurales - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.5-21	Importancia del módulo de elasticidad en los materiales de reparación de superficies - Nota técnica	Primera edición
	PRC-364.7-21	Evaluación y minimización de las microgrietas en la reparación del concreto - Nota técnica	Primera edición
	PRC-364.9-21	Grietas en una reparación de concreto - Nota técnica	Primera edición
	PRC-440.10-21	Resistencia al fuego de elementos de concreto reforzados con FRP - Nota técnica	Primera edición
	CODE-562-21	Evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto existentes - Código y comentarios	Revisión
2022	PRC-364.3-22	Ficha sobre materiales cementantes de reparación-Guía	Revisión
	PRC-364.6-22	Remoción del concreto en reparaciones con acero de refuerzo corroído - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.8-22	Nota técnica sobre hidrodemolición para la retirada de concreto en sistemas postensados no adheridos	Revisión
	CODE-440.11-22	Requisitos del Código de la Edificación para el Concreto Estructural Reforzado con Barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) - Código y comentarios	Primera edición
	SPEC-440.12-22	Refuerzo de estructuras de concreto con materiales de polímero reforzado con fibra (FRP) adheridos externamente mediante el método de colocación en húmedo - Especificación	Primera edición
	SPEC-440.5-22	Construcción con barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio-Especificaciones	Revisión
	SPEC-440.6-08(17)(22)	Especificaciones de las barras de polímero reforzado con fibra de carbono para el refuerzo del concreto	Re aprobado
	PRC-440.7-22	Guía de diseño y construcción de sistemas de polímeros reforzados con fibra de vidrio para el refuerzo de estructuras de albañilería.	Revisión
SPEC-440.8-13(22)	Materiales de polímero reforzado con fibra de carbono y de vidrio (FRP) fabricados por laminación húmeda para el refuerzo externo de estructuras de concreto y albañilería - Especificación	Re aprobado	
2023	PRC-228.3-23	Lo que un propietario debe saber sobre los ensayos no destructivos-Nota técnica	Primera edición
	PRC-228.4-23	Guía de inspección visual del concreto	Revisión
	PRC-440.2-23	Diseño y construcción de sistemas de polímero reforzado con fibra (FRP) adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de concreto - Guía	Revisión
	PRC-546-23	Guía de reparación del concreto	Revisión

Nota: Puede encontrar información adicional sobre los documentos enumerados en este cuadro en www.concrete.org.

Durabilidad en el diseño

Cuando se diseñan y mantienen adecuadamente para resistir el deterioro provocado por las condiciones de exposición imperantes, las estructuras de concreto son muy duraderas y resistentes. Tradicionalmente, los códigos de construcción estadounidenses no han considerado explícitamente la vida útil como parte del diseño. Las disposiciones de durabilidad incluidas en los requisitos de diseño, junto con las buenas prácticas de construcción, se han utilizado para lograr una vida de diseño razonable y un nivel de resistencia contra el deterioro relacionado con los materiales. Como se explica en Tepke⁷ y en la Parte 2 de esta serie⁸, los conocimientos de la industria cambian con el tiempo, y se incluyen requisitos de durabilidad mejorados para abordar problemas recién descubiertos o abordar mejor los conocidos. Muchos edificios de concreto armado construidos a lo largo del siglo XX que utilizaban códigos más antiguos todavía están en servicio. El mantenimiento, las evaluaciones rutinarias y, cuando se justifique, las evaluaciones más exhaustivas y las reparaciones con medidas de extensión de la vida útil pueden seguir prolongando la vida útil de estos edificios de concreto existentes, incluso cuando los códigos y las normas de la industria en el momento de la construcción no sean tan avanzados como los más contemporáneos.

La versión actual de ACI CODE-318-19(22)⁹ incluye disposiciones estándar sobre durabilidad. Mientras que algunas disposiciones están en consonancia general con el estado de la práctica para abordar problemas particulares de durabilidad, algunas no están tan mejoradas o son menos completas para estructuras en las que se desea una vida útil más larga o las condiciones son severas. Por ejemplo, ACI CODE-318-19(22) tiene disposiciones relativamente completas para el aire incorporado para proporcionar resistencia al daño por congelación y descongelación y el uso de cemento resistente al sulfato para proporcionar resistencia al ataque del sulfato. Sin embargo, las disposiciones para abordar la corrosión de la armadura embebida en el Código están relacionadas con el contenido de cloruros en el concreto, la relación agua-materiales cementantes (w/cm), la resistencia a la compresión y una declaración más generalizada de mayor protección (Sección 20.5.1.4.1):

"En ambientes corrosivos u otras condiciones de exposición severas, el recubrimiento de concreto especificado deberá incrementarse según se considere necesario. Deberán cumplirse los requisitos aplicables para el concreto basados en las categorías de exposición de 19.3, o deberá proporcionarse otro tipo de protección."

En general, estas disposiciones proporcionan una "durabilidad razonable" para la mayoría de las estructuras y requisitos que se pueden cumplir en la mayoría de los proyectos (incluida la dosificación del agua, la medición de la resistencia como sustituto de la protección contra la corrosión y la medición de los niveles de cloruros combinados) y, por tanto, son útiles para muchas situaciones (como demuestra la capacidad de servicio a largo plazo de muchas estructuras). Sin embargo, algunas estructuras en entornos más severos, o aquellas que requieren una vida útil más larga de lo normal, pueden requerir una dirección adicional, disposiciones mejoradas, más flexibilidad para utilizar enfoques alternativos, mayor capacidad para utilizar pruebas de desempeño, consideración específica de la vida útil o un tratamiento más exhaustivo. Se espera que iniciativas tales como una presentación más formal de la predicción de la vida útil por parte del Comité 365 de ACI, Predicción de la Vida Útil, y la formación del Comité 321 de ACI, Código de Durabilidad del Concreto, proporcionen una dirección suplementaria para aumentar la durabilidad o la vida útil, cuando se requieran niveles superiores a los de ACI CODE-318.

La durabilidad es también un concepto que puede aplicarse al uso continuado de estructuras que, de otro modo, podrían haber sido retiradas del servicio debido a su deterioro o a un suceso extremo. El uso de evaluaciones de ingeniería y reparaciones adecuadas permite que los edificios existentes sigan siendo funcionales o incluso que se recuperen después de haber sido sometidos a situaciones extremas. ACI CODE-562-21¹⁰ es un ejemplo de norma industrial que tiene en cuenta la durabilidad y la prolongación de la vida útil de las reparaciones y representa la formalización actual de la información del sector. Se incluyen disposiciones para documentar las condiciones, considerar la vida útil y proporcionar planes de mantenimiento después de las reparaciones para abordar la durabilidad. La durabilidad también está íntimamente ligada a la sostenibilidad, como se analiza en la siguiente sección.

Sostenibilidad

Se ha prestado mucha atención a la reducción del potencial de calentamiento global de las nuevas construcciones. El movimiento hacia el uso de materiales más sostenibles ha dado lugar a alternativas a las mezclas de concreto con un historial probado basado en décadas de desarrollo y uso. Habrá que seguir de cerca la durabilidad y capacidad de servicio a largo plazo de estas innovadoras mezclas de concreto, ya que el uso de materiales alternativos en la nueva construcción puede dar lugar a diferencias en el desempeño esperado y a matices necesarios en la evaluación o reparación de estructuras existentes. Este mayor escrutinio debería proporcionar información valiosa para comprender mejor el rendimiento a largo plazo del concreto producido con materiales alternativos.

Si bien las iniciativas para reducir el carbono incorporado y el impacto en el calentamiento global se han centrado en las nuevas construcciones, también se ha llegado a la conclusión de que es necesario prestar la misma atención al mantenimiento y la prolongación de la vida útil de las estructuras existentes¹¹⁻¹³. La vida útil de los edificios puede prolongarse mediante una evaluación adecuada

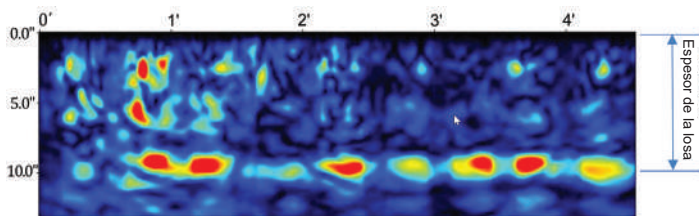


Fig. 3: Tomografía ultrasónica de una losa de concreto.

de los mismos y la ejecución de reparaciones, medidas de prolongación de la vida útil y planes de mantenimiento. A menudo se trata de un enfoque más sostenible que la demolición o la deconstrucción y sustitución. Aunque los costes de las evaluaciones y las reparaciones pueden ser a veces elevados e implicar la reubicación parcial o temporal de los ocupantes, generalmente serán inferiores a los de la reubicación permanente, la demolición o deconstrucción y la sustitución. Por lo general, la evaluación combinada con reparaciones, en caso necesario, es más sostenible desde el punto de vista medioambiental y económico.

El Hotel Winecoff de Atlanta (GA, EE.UU.) es un excelente ejemplo de estructura reconvertida para un uso prolongado mediante la aplicación racional de evaluaciones, reparaciones y renovaciones. El hotel, construido en 1913, fue completamente destruido por un incendio en 1946. Tras una evaluación y unas reparaciones adecuadas, reabrió sus puertas como Hotel Peachtree en 1951 y, en 1967, se convirtió en una residencia para ancianos. El Winecoff permaneció desocupado durante 20 años y, una vez más, con las evaluaciones y reparaciones adecuadas, reabrió como el lujoso Ellis Hotel en 2007.

Tecnologías avanzadas Últimos avances en pruebas y evaluación

A finales del siglo XX y principios del XXI se introdujeron en el sector varias tecnologías y mejoras de las existentes para ayudar a evaluar el estado de los edificios existentes. En muchos de estos avances influyen la mayor velocidad de procesamiento, la mejora de las interfaces de usuario y la presentación gráfica de los datos. La técnica de ondas de corte ultrasónicas de baja frecuencia y contacto en seco de matriz múltiple desarrollada en la década de 1990 (ACI 228.3-2013¹⁴) ha sido comercializada en los últimos 20 años por múltiples fabricantes. Esta tecnología, también conocida como tomografía ultrasónica,

puede producir imágenes bidimensionales (2-D) o 3-D para detectar defectos internos (Fig. 3). También se han desarrollado sistemas de radar de penetración en el suelo (GPR, por sus siglas en inglés) fáciles de usar, con algoritmos de postprocesado que convierten los datos tradicionales en representaciones visuales más intuitivas para su fácil interpretación o la localización del acero de refuerzo (Fig. 4). Ejemplos de algunos avances recientes en dispositivos de ensayo de corrosión que resultan prometedores son los ensayos de velocidad de corrosión sin contacto¹⁵, el uso de un robot volador para ensayos de potencial de corrosión¹⁶ y la tomografía electroquímica para la detección de corrosión localizada¹⁷. Aunque no son exhaustivos, los avances enumerados demuestran un progreso continuo y unas perspectivas de futuro prometedoras.

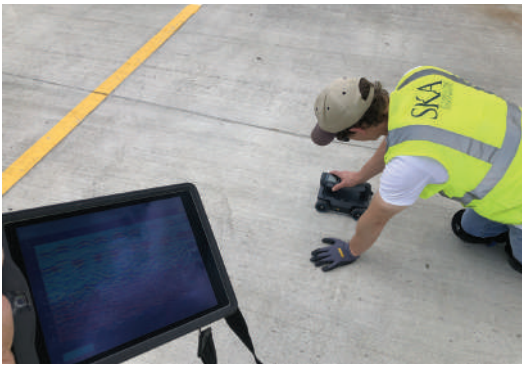
Modelización de la información para la construcción

El modelado de información para la construcción (BIM, por sus siglas en inglés) se ha convertido en la base de la transformación digital en los sectores de la arquitectura, la ingeniería y la construcción. El BIM ayuda a optimizar el diseño, mejorar la precisión y conectar el diseño con la fabricación, mejorando así de forma integral la calidad de la construcción. El software BIM se utiliza ampliamente para crear modelos tridimensionales que documentan exhaustivamente los componentes estructurales, las conexiones y los materiales de todo el edificio o estructura.

En muchos proyectos, el BIM se emplea para los elementos estructurales. El uso de BIM sigue creciendo, especialmente en proyectos de mayor envergadura. Cuando el BIM se utiliza para nuevas construcciones, los datos (modelo 3D y resultados, incluidos los planos de construcción) pueden ser un gran recurso para ayudar en la evaluación del edificio cuando envejece y requiere una evaluación de la seguridad estructural (Fig. 5).

Lidar y fotogrametría

Los sistemas de escaneado Lidar (light detection and ranging en inglés) utilizan el escaneado láser para producir imágenes tridimensionales detalladas de entornos y geometrías complejas en sólo unos minutos por escaneado. Las imágenes



resultantes son conjuntos de millones de puntos de medición tridimensionales combinados con fotografías. Los datos escaneados se procesan y registran en un ordenador para crear una nube de puntos. La nube de puntos puede compartirse para visualizarla, planificarla, medirla, añadir notas o importarla a un software de diseño asistido por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés). Cuando se importa en un software CAD, se puede crear un modelo BIM y dibujos a partir de la nube de puntos del estado de construcción.

La línea de visión del objeto de interés es el factor más importante en la captura de datos de escaneado. Deben realizarse varios escaneados para evitar obstáculos. Dependiendo de lo que se esté escaneando, puede ser necesario subir o bajar el trípode para capturar las áreas por debajo y por encima de los objetos.

El escaneado Lidar es muy útil para producir un modelo tridimensional que refleje el estado/geometrías existentes del interior de la estructura del edificio, incluidos los componentes estructurales, equipos, tuberías y cualquier otra obstrucción. Esto es extremadamente útil para edificios/estructuras antiguas y complejos existentes en los que no se dispone de planos estructurales, el sistema estructural no es aparentemente reconocible o existe un número significativo de obstrucciones que impiden el acceso a zonas ocultas específicas (Fig. 6). Además, el escaneado lidar también puede ser eficaz en la planificación de la construcción de reparaciones en términos de correlación de las ubicaciones de reparación necesarias, las ubicaciones de apuntalamiento y encofrado, y la identificación/ubicación de obstrucciones.

Con la cámara de alta resolución integrada, los datos fotogramétricos recopilados también pueden superponerse al modelo tridimensional o al modelo BIM, lo que permite una inspección digital del estado existente de la estructura. Esto también permite recopilar todos los datos de inspección a un ritmo suficiente para que la inspección pueda ser más frecuente a la vez que menos costosa; alternatively, proporciona una comprensión más profunda de la salud general de una estructura, tanto de forma inmediata como a lo largo del tiempo¹⁸.

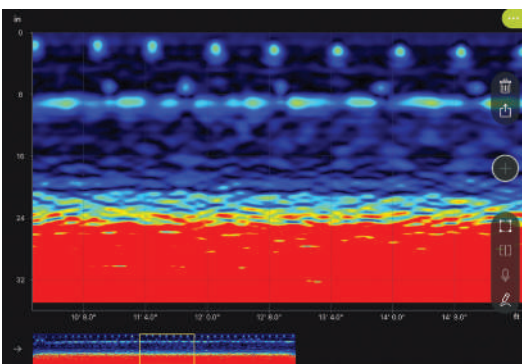
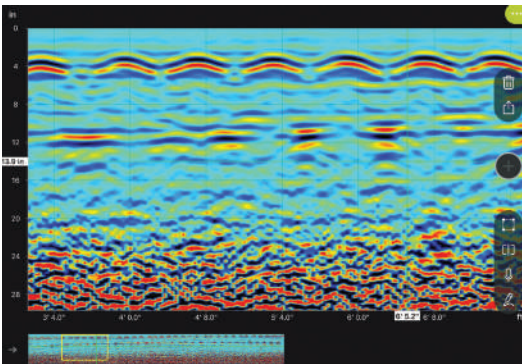


Fig. 4: Representación del acero de refuerzo mediante radar de penetración en el suelo: captura de datos (arriba), representación visual estándar (centro) e imagen procesada que muestra la ubicación del acero de refuerzo (puntos azules) y la profundidad de la losa (línea azul) (abajo).

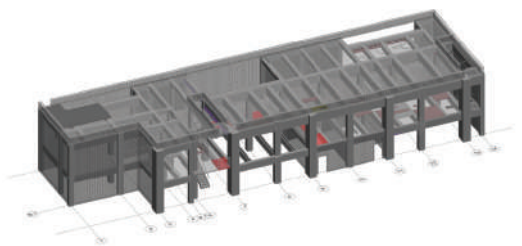


Fig. 5: Modelo tridimensional de un edificio con delaminación del concreto indicada (mostrada en áreas resaltadas en rojo).

Control de la salud estructural

Existe una gran variedad de tecnologías para monitorizar la respuesta estructural, las condiciones ambientales y el inicio o la propagación del deterioro, con el objetivo de ayudar a los propietarios y consultores a determinar cuándo deben tomarse medidas para resolver problemas de seguridad, mantenimiento o deterioro. ACI PRC-444.2-21¹⁹ enumera varias tecnologías disponibles en la actualidad, incluidos los sistemas de control acústico para estructuras postensadas, los monitores de deformación y deflexión por desplazamiento para evaluar el movimiento en componentes estructurales clave y el control de





Fig. 6: Utilización del escaneado lidar para captar el estado de una zona inaccesible: (a) montaje; y (b) una salida.

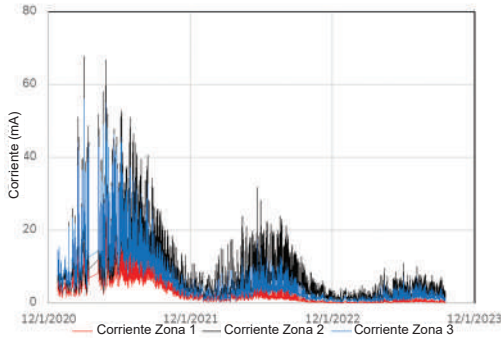


Fig. 7: Corriente registrada por el sistema SHM en el estadio reparado.

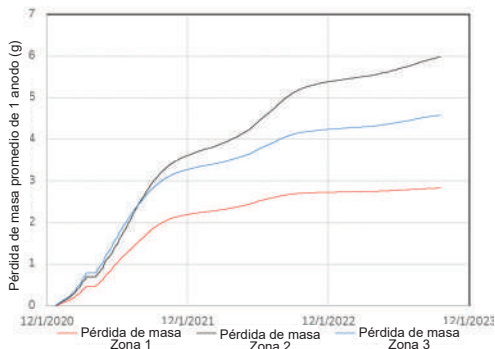


Fig. 8: Pérdida de masa del ánodo calculada a partir de la generación de corriente.

la corrosión para estructuras en entornos susceptibles, todos ellos componentes y condiciones que pueden afectar a la seguridad estructural.

Los resultados de la monitorización de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) pueden utilizarse para controlar los cambios en el rendimiento o para predecir la necesidad de futuras reparaciones. Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados de la monitorización de ánodos galvánicos instalados en la estructura de un estadio recientemente reparado. La corriente generada por los ánodos en discreto fue registrada por un registrador de datos (Fig. 7). A continuación, la corriente generada se convirtió en pérdida de masa en los ánodos mediante la Ley de Faraday. La pérdida de masa de los ánodos a lo largo del tiempo (Fig. 8) se utilizará para predecir la vida útil restante de los ánodos. Se emplean sensores integrados adicionales para controlar la temperatura y la humedad relativa en las tribunas a fin de examinar la vida útil prevista del revestimiento aplicado.

Las consideraciones clave incluyen la selección del número y la ubicación de los sensores para describir adecuadamente la estructura. Aunque pueden instalarse sensores en zonas que se consideren de interés para evaluar la estructura, confiar en los sensores para obtener información completa conlleva un riesgo inherente, ya que la supervisión de toda la estructura puede resultar difícil o prohibitiva desde el punto de vista de los costes. Por ello, en la actualidad es necesario realizar inspecciones in situ. Cuando las inspecciones in situ indican un posible problema y se realiza una evaluación más tradicional, los sistemas SHM pueden utilizarse para aumentar las evaluaciones existentes o iniciar otras nuevas. En los últimos años se han logrado avances significativos en lo que respecta a la interfaz de usuario, la recopilación de datos, la gestión y el intercambio de datos, por ejemplo, en las nubes, y la reducción al mínimo de las conexiones. Se espera que se produzcan más avances en estos aspectos, pero también en las aplicaciones de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para seleccionar los lugares de prueba e interpretar los datos.

Drones

Los drones son vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) que utilizan hélices para volar a una posición deseada en el aire mientras son controlados por un piloto en tierra. Los drones suelen estar equipados con cámaras especializadas de alta resolución para proporcionar fotografías mejoradas de lugares y estructuras que son caros, costosos y peligrosos de inspeccionar mediante acceso humano, como edificios de mediana y gran altura o estructuras industriales altas, como torres de refrigeración y puentes. Los vehículos aéreos no tripulados pueden utilizarse para escanear



Fig. 9: Los daños exteriores pueden resaltarse en un modelo tridimensional creado mediante fotogrametría UAV.

exhaustivamente superficies expuestas, y los datos resultantes pueden procesarse para crear imágenes precisas de alta resolución y modelos digitales tridimensionales.

Las imágenes detalladas pueden utilizarse para identificar y medir defectos visuales, registrar los resultados para su uso y comparación en el futuro, determinar el estado general de la estructura y servir de base para seleccionar zonas para una investigación o evaluación detallada sobre el terreno. Cabe señalar que se requiere un inspector experimentado para realizar las inspecciones digitales, ya que las tareas incluyen la revisión del modelo 3D y de las imágenes para identificar y categorizar los defectos. Aunque los resultados de una inspección como los mostrados en la Fig. 9 no pueden proporcionar datos exhaustivos adecuados para la confirmación inmediata de la seguridad razonable de una estructura, sí pueden hacerlo:

- Permiten la recogida holística de los defectos de forma inmediata y a lo largo del tiempo a un coste relativamente bajo (en comparación con el acceso humano);
- Proporcionar información exhaustiva sobre la salud general de una estructura; y
- Permitir una evaluación posterior sobre si es necesaria una evaluación en profundidad del estado para determinar la seguridad razonable de la estructura.

Acceso industrial por cuerda

El acceso industrial mediante cuerdas (IRA, por sus siglas en inglés) se refiere a las técnicas mediante las cuales se accede a las paredes exteriores de edificios u otras estructuras por medio de cuerdas. El objetivo principal de los trabajos verticales en cuerda es permitir el acceso a lugares de difícil acceso de edificios o estructuras altas sin andamios, plataformas giratorias o drones cuyo

uso pueda estar restringido por la normativa de la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés).

Los trabajos verticales en cuerda empezaron a utilizarse para trabajos industriales en la década de 1980. Desde entonces, asociaciones comerciales como la Industrial Rope Access Trade Association (IRATA) y la Society of Professional Rope Access Technicians (SPRAT) lo han codificado y convertido en un método probado y fiable para acceder a lugares de difícil acceso. En la actualidad, los trabajos verticales en cuerda suelen ser un medio de inspección práctica en edificios de gran altura o estructuras altas en los que los andamios o las plataformas giratorias no resultan prácticos o resultan prohibitivos desde el punto de vista de los costes (Fig. 10). Además de la inspección visual, se pueden realizar ensayos no destructivos adicionales, como la inspección de impacto acústico, la inspección GPR o la inspección de corrosión, si se consideran parte de la evaluación para determinar la seguridad estructural, mediante el acceso con cuerdas.

Aprendizaje automático

El aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) es el estudio de algoritmos informáticos que pueden aprender y desarrollarse por sí solos con la experiencia y los datos históricos. El ML se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, y recientemente se ha producido un aumento exponencial de su uso en la tecnología del concreto sobre la base de una serie de publicaciones pertinentes²⁰. El primer artículo identificado en relación con el concreto y el ML se publicó en 1992²¹.

El ML se ha utilizado en diferentes campos de la tecnología del concreto, y los resultados mostraron que las técnicas de ML pueden predecir el resultado basándose en datos históricos y se consideran aceptables para evaluar, modelar y



Fig. 10: Acceso industrial por cuerda desde lo alto de una estructura elevada.

predecir las propiedades del concreto desde su estado fresco hasta su endurecimiento, y desde su estado endurecido hasta su vida útil.

Desde el punto de vista de la seguridad de la estructura, tanto la durabilidad como la vida útil son parámetros necesarios que pueden preverse utilizando tecnologías de ML. Por ejemplo, los investigadores utilizaron datos registrados sobre la carbonatación del concreto con agregados reciclados²⁰. El modelo desarrollado por ML captó los parámetros que influían en la profundidad de la carbonatación y optó por ejecutar un proceso específico que demostró un rendimiento excepcional en la predicción de la profundidad de la carbonatación, lo que constituye una gran herramienta para predecir la durabilidad del concreto que aborda los problemas de corrosión relacionados con la carbonatación.

Se está desarrollando el ML para la detección de grietas en el concreto, que es una de las tareas importantes y que consumen mucho tiempo para la evaluación del estado o la inspección periódica que puede ser necesaria para algunas estructuras

existentes. Las investigaciones actuales indican que pueden utilizarse algoritmos para detectar grietas en estructuras de concreto. Por ejemplo, se están adoptando diferentes algoritmos ML para monitorear los elementos estructurales de concreto basados en datos adquiridos por sensores en tiempo real y detección de imágenes en color para detectar grietas habituales en la superficie del concreto, se estaban entrenando algoritmos para reconocer los patrones de las grietas e identificarlas con precisión, y se estaba utilizando un método de aprendizaje profundo para desarrollar un detector automático de grietas en el concreto. Además, la propagación de grietas en estructuras de concreto también se puede predecir utilizando ML y se está estudiando actualmente.

Las aplicaciones del ML en las tecnologías del concreto aún están en sus inicios y suponen un reto; sin embargo, la investigación no ha dejado de desarrollarse. Al igual que otras tecnologías en desarrollo, como los drones y las tecnologías lidar, los avances del ML ofrecen una perspectiva prometedora para ayudar en la evaluación de la seguridad de las estructuras.

Resumen

A los profesionales del diseño se les pide habitualmente que evalúen la seguridad de las estructuras existentes, a menudo basándose en información limitada y con acceso limitado a la estructura. Esta serie de artículos examina algunos de los retos asociados a las evaluaciones de estado y la necesidad de que los resultados se presenten dentro del contexto de las limitaciones de la evaluación.

Desde las primeras aplicaciones del concreto estructural y, posteriormente, las primeras normas de diseño y construcción, se han producido cambios significativos en el concreto y en la tecnología del concreto. En los últimos 50 años, se han producido cambios más sustanciales para garantizar mejor que los edificios nuevos se diseñen y construyan adecuadamente para satisfacer los requisitos de capacidad de servicio y niveles razonables de seguridad, así como la evaluación y valoración de los edificios existentes y el diseño y ejecución de reparaciones. En este artículo se analizan los continuos avances en el concreto y la tecnología del concreto, tanto para

la nueva construcción como para la prolongación de la vida útil de las estructuras existentes, en lo que respecta a la evaluación y valoración de las estructuras existentes.

Una mejor comprensión del comportamiento del concreto en las estructuras existentes, los cambios de paradigma, la revisión de los códigos y normas existentes y el desarrollo de otros nuevos, así como la aceptación de nuevas tecnologías, demuestran que hay nuevas esperanzas de seguir garantizando que las estructuras diseñadas y construidas con concreto estructural sigan proporcionando razonablemente la salud, la seguridad y el bienestar general del público durante su vida útil prevista y mucho más.

Referencias

1. Kesner, K.E.; Tepke, D.G.; Jiang, L.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety' of Existing Structures, Part 1," *Concrete International*, V. 45, No. 11, Nov. 2023, pp. 43-48.
2. Matthews, M.A., "Special Inspections as Originally Intended," *The Construction Specifier*, Feb. 10, 2015.
3. 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.
4. "2021 International Building Code (IBC)," International Code Council, Washington, DC, Dec. 2020.
5. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.11-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.
6. "2024 International Building Code (IBC)," International Code Council, Washington, DC, Dec. 2023.
7. Tepke, D.G., and Isgor, O.B., "Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?" *Concrete International*, V. 45, No. 8, Aug. 2023, pp. 31-36.
8. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety' of Existing Structures, Part 2," *Concrete International*, V. 45, No. 12, Dec. 2023, pp. 51-56.
9. 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.
10. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete structures—Code and Commentary (ACI CODE- 562-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 88 pp.
11. ICRI Committee 160, "Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings," International Concrete Repair Institute, St. Paul, MN, 2014, 13 pp.
12. Renne, N.; Kara De Maeijer, P.; Craeye, B.; Buyle, M.; and Audenaert, A., "Sustainability Assessment of Concrete Repairs through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA)," *Infrastructures*, V. 7, No. 10, Sept. 2022.
13. Vittoch, L.; Buyle, M.; Audenaert, A.; Seuntjens, O.; Renne, N.; and Craeye, B., "Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods," *Journal of Building Engineering*, V. 52, July 2022.
14. ACI Committee 228, "Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
15. Fahim, A.; Ghods, P.; Isgor, O.B.; and Thomas, M.D.A., "A Critical Examination of Corrosion Rate Measurement Techniques Applied to Reinforcing Steel in Concrete," *Materials and Corrosion*, V. 69, No. 12, July 2018, pp. 1784-1799.
16. Pfändler, P.; Bodie, K.; Crotta, G.; Pantic, M.; Siegwart, R.; and Angst, U., "Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Structures Using an Autonomous Flying Robot," *Automation in Construction*, V. 158, Feb. 2024.
17. Van Ede, M.C.; Fichtner, A.; and Angst, U., "Nondestructive Detection and Quantification of Localized Corrosion Rates by Electrochemical Tomography," *NDT & E International*, V. 142, Mar. 2024.
18. D'Amico, N., and Yu, T., "Photogrammetric Analysis of Concrete Specimens and Structures for Condition Assessment," Conference: SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Apr. 2016.
19. ACI Committee 444, "Structural Health Monitoring Technologies for Concrete Structures—Report (ACI PRC-444.2-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 110 pp.
20. Gamil, Y., "Machine Learning in Concrete Technology: A Review of Current Researches, Trends, and Applications," *Frontiers in Built Environment*, V. 9, Feb. 2023.
21. Li, Z.; Yoon, J.; Zhang, R.; Rajabipour, F.; Srubar III, W.V.; Dabo, I.; and Radlinska, A., "Machine Learning in Concrete Science: Applications, Challenges, and Best Practices," *Computational Materials*, V. 8, June 2022.

Seleccionados por los editores por su interés para el lector.



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.



Keith E. Kesner, FACI, 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.

Título original en inglés: "Reasonable Safety" of Existing Structures, Part 4: A New Hope

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Perú



*Traductor y Revisor Técnico:
Ing. Julio Antonio Higashi Luy*