

At the Intersection of Safety, Environmental Responsibility, and Durability

Seeking a sustainable approach to existing concrete structures

by David G. Tepke

The knowledge and expertise required for responsibly extending the service life of existing structures to meet societal demands is expanding. While it may have previously been common for a structural engineer specializing in new construction to design and administer concrete repair or restoration projects, new advancements and their associated complexities now require that professionals or assembled teams of professionals be proficient in applying a vast number of structural, materials, service-life extension, and environmental concepts specific to existing structures. With the breadth and depth of information being rapidly developed and disseminated, there is a need to fully educate, train, and develop professionals. This article discusses key advancements and education initiatives primarily associated with ACI, as well as universities.

The Brundlandt Commission observed that “humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”¹ The word “sustainable” means “to create and maintain conditions, under which humans and nature can exist in productive harmony, that permit fulfilling the social, economic, and other requirements of present and future generations.”²

Maintaining structural safety, economically extending service life, and making environmentally conscious material and process choices are sustainable acts that form core needs for existing buildings. Industry advancements in safety standards, structural monitoring and assessments, repair approaches, materials and methods for service-life extension,

and environmental management provide opportunities for achieving a higher level of sustainable development. Guides, codes, and government regulations are being developed and improved to introduce, advance, and formalize this knowledge to meet societal needs. Current and future users need to be educated following the adoption of new codes and changing provisions within jurisdictions.

Some of the more significant recent and developing advancements that may be applicable to existing structures, service-life extension, or environmental management from ACI include:

- Development of industry standard reference codes for concrete repair, design with alternative reinforcing materials, design with low-carbon concrete, and durability design;
- New or evolving guide documents for repair and rehabilitation, corrosion control, protective measures, alternative cements, sustainability initiatives, structural health monitoring, and evaluation;
- Availability of professional development opportunities associated with repair design, design using alternative reinforcement, and sustainability; and
- Increased advocacy and outreach and education initiatives, such as the creation of the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach in 2014, the employment of Code Advocacy Engineers by ACI since 2017, the initiation of local code advocacy groups, and initiatives for educating Code Officials.

The following sections discuss the key components of sustainability for existing concrete structures.

Existing Building Safety and Structural Performance

Safety initiatives and regulations associated with coastal structures, parking facilities, and building façade inspections are being implemented in the United States.³ This is partially in response to increased awareness from key events, but also to the general increased understanding and acknowledgment of distress mechanisms that can compromise building performance or create unsafe conditions. ACI CODE-562: Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code Requirements and Commentary was first published in 2013, and has gone through revisions in 2016, 2019, and 2021. It has been adopted jurisdictionally in some state building codes as a permissible approach over the past several years, and was first adopted as such by the International Code Council (ICC) in the 2024 International Existing Building Code (IEBC).⁴ The code has a number of features useful for evaluating potentially dangerous structural conditions and assessing and repairing structures.⁵ Other ACI structural industry standard reference codes that may be applicable for existing structures include ACI CODE-318: Building Code for Structural Concrete—Code Requirements and Commentary, where new construction is implemented in existing buildings, and ACI CODE-440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary,⁶ first published in 2022 and first adopted by the ICC as permissible in the 2024 International Building Code (IBC).⁷

While structural repair and rehabilitation are based on the principles of structural engineering, design and construction for repair, rehabilitation, and service-life extension have evolved in the industry as a specialty due to increased available industry-related information and experience, nuances, and complexities that differ from new construction. Tepke et al.⁸ provides examples of more than 70 ACI committee documents developed or updated over the last decade applicable to assessment, repair, rehabilitation, strengthening, or service-life extension of existing structures. Documents and educational opportunities supported by ACI Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; 364, Rehabilitation; 437, Strength Evaluation of Existing Concrete Structures; 546, Repair; 562, Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures; and 563, Specifications for Repair of Structural Concrete in Buildings, are examples directly related to existing building performance, investigation, and repair.

Documents and educational opportunities supported by ACI Committees 318, Structural Concrete Building Code; 201, Durability of Concrete; 222, Corrosion of Metals in Concrete; 362, Parking Structures; 377, Performance-Based Structural Integrity & Resilience of Concrete Structures; 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement; and Joint ACI-ASCE Committee 423, Prestressed Concrete, and others are examples with additional applicability to existing structures.

ACI educational initiatives specifically related to structural performance and repair include those associated with ACI Committee E706, Concrete Repair Education, that produces repair application procedure documents and expected future development of a certification program associated with ACI CODE-562. The International Concrete Repair Institute (ICRI) is an example of another organization that provides educational resources through committee consensus documents, certification, and learning opportunities focused on structural assessment and repair.

Environmental Management

The environmental impacts of concrete and concrete structures may include global climate change, natural resource use, ozone level, land use and habitat alteration, eutrophication, acidification, air pollution, water pollution, soil contamination, pollution due to radioactive substances, impacts due to waste generation, and noise and vibration.⁹ Industry-wide initiatives are being implemented to reduce environmental impact, including reducing carbon dioxide (CO₂) emissions in portland cement production, substituting portland cement with limestone powder, reducing overall global warming potential (GWP) of concrete production and use, using alternative materials, increasing efficiency of structural systems for reducing material usage, adaptive reuse, service-life extension, and using recycled or waste products in concrete. Schokker,¹⁰ Szoke et al.,¹¹ and Tennis et al.¹² provide general background on sustainability, the importance of structural efficiency, and the use of limestone additions in cement to reduce carbon emissions, respectively. Regulations are being implemented jurisdictionally in some locations requiring environmental management through life-cycle assessments and the use of environmental product declarations (EPDs) for qualifying use of materials.

ACI updated its strategic plan in 2007 to include sustainability as a focus. ACI Committee 130, Sustainability of Concrete, was formed in 2008 and produced ACI PRC-130-19: Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction¹³ in 2019. The newest revision of ACI CODE-318 (2025) includes sustainability provisions for the first time, and it is expected that the upcoming version of ACI SPEC-301: Specifications for Concrete Construction will include companion provisions. ACI CODE-323-24: Low-Carbon Concrete—Code Requirements and Commentary¹⁴ is a new industry standard reference code. Documents and educational opportunities supported by ACI Committees 130, Sustainability of Concrete; 242, Alternative Cements; 323, Low-Carbon Concrete Code; and 555, Concrete with Recycled Materials; and ACI Subcommittee 301-S, Sustainability, are directly related to minimizing environmental impact. Others also contribute to this, such as those associated with supplementary cementitious materials, durability initiatives, and design and construction efficiency. Organizations such as the American Cement Association (ACA)

have also been active in developing and disseminating information associated with reducing the GWP related to concrete production and use.

Many initiatives are focused on sustainability with respect to carbon demand of material production in new construction. Similar principles apply to consideration of durability, concrete repair, and service-life extension for existing structures. Durability has been recognized as important in providing sustainable construction and service life of a structure, and it is a key component in understanding the overall impact of life-cycle carbon demand of new structures.¹⁰ Responsible service-life extension of existing structures, rehabilitation, and adaptive reuse are sustainable acts. Justifiable benefits of protection, maintenance, and repair in comparison to removal and replacement have been discussed by Schokker,¹⁵ and ICRI Committee 160, Life Cycle and Sustainability,¹⁶ Renne et al.,¹⁷ and Wittcox et al.¹⁸ are examples of research demonstrating the benefit of including both life-cycle analysis and service-life extension for evaluation of approaches. Knowledge and inclusion of provisions for evaluating and implementing environmental management principles for materials and methods associated with new construction are developing. There is a need to further advance knowledge and integrate environmental management principles related to repair and rehabilitation strategies and service-life extension measures, such as those associated with repair methods, cathodic protection, and coating application, to compare with implications of replacement.

Durability Design and Service-Life Extension

Considerable advancements have been made since the beginning of the twentieth century in identifying and studying durability and materials-related distress mechanisms, integrating basic provisions to address them into codes, and controlling corrosion.^{19,20} Basic durability provisions are included in ACI CODE-562-25²¹ for repair of existing structures and in ACI CODE-318-25²² for new members in existing structures where applicable. ACI Committee 321, Concrete Durability Code, is developing a new code for durability design and construction of new structures that is expected to also be applicable for new portions of existing structures requiring replacements. This may be useful for increasing the service life of structures in general, more comprehensively addressing durability or acute needs for increasing performance of concrete in severe environments. The document is also expected to include a section devoted to detailing the maintenance to achieve the specified extended durability. ACI Committee 365C, Service Life Prediction Code, has developed a design specification for service-life evaluation to provide additional basis for design of new structures—ACI CODE-365-24: Service Life Evaluation—Design Specification²³—and is in the process of developing a companion design specification for service-life evaluation of existing structures. Documents and educational initiatives

supported by ACI Committees 201, 222, 365, and 515, Protective Systems for Concrete, are among those that directly apply to durability of existing structures. As described in Tepke and Mandry-Campbell,²⁰ several guide documents have also been developed by ACI, the Association for Materials Protection and Performance (AMPP), and ICRI in the past 40 years to aid designers in specifying different products and systems for service-life extension of existing structures exposed to corrosive conditions.

Curricula in Institutions of Higher Education

The level of engagement among students and young professionals is an essential part of successfully integrating effective sustainable development. Assessment and repair of concrete structures must be a focus to meet global sustainability goals. A survey of 1448 educators from 120 countries in the ACI Faculty Network was conducted to gain understanding of current university/college-level courses and focus programs associated with structural performance/design, sustainability, and durability/service-life extension being offered by various institutions. The survey was developed by the author and administered by email request and reminders by ACI in May 2024.

Survey questions

The following information was requested:

- Name of university;
- Undergraduate program focus and major (the major or program focus must have a minimum of four courses). Check all that are offered at your university (multiple answers):
 - Structural engineering major or program focus,
 - Structural concrete design major or program focus,
 - Concrete materials or concrete durability major or program focus,
 - Construction materials sustainability major or program focus,
 - Assessment, repair, and service-life extension of concrete major or program focus;
- Graduate program focus (the program focus must have a minimum of four courses). Check all that are offered at your university (multiple answers):
 - Structural engineering program focus,
 - Structural concrete design or analysis program focus,
 - Concrete materials or concrete durability program focus,
 - Construction materials sustainability program focus,
 - Assessment, repair, and service-life extension of concrete program focus;
- Individual courses (the course must be at least 75% devoted to the subject indicated). Check all that are offered at your university (multiple answers):
 - Structural concrete design course(s) for new structures using principles of ACI CODE-318,
 - Structural concrete design course(s) for glass fiber-

reinforced polymer (GRFP) reinforced concrete using principles of ACI CODE-440.11,

- Concrete durability design or service-life for new structures course(s),
- Concrete sustainability or low-carbon concrete course(s),
- Structural concrete repair or strengthening course(s) (any aspect),
- Structural concrete repair design course(s) using principles of ACI CODE-562,
- Structural concrete repair design course(s) using external or internal fiber-reinforced polymer (FRP) systems,
- Corrosion of reinforcing steel in concrete course(s),
- Nondestructive concrete testing course(s),
- Structural forensic or failure investigation course(s),
- Sustainability and service-life extension of existing structures course(s);
- Please provide any other information or qualifications to your responses you would like to share; and
- If you would like to be contacted to discuss your answers, please provide your name and email address.

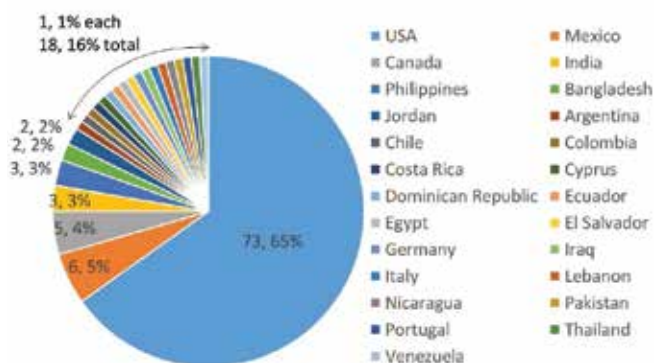


Fig. 1: Locations of universities represented by survey respondents (number and percent)

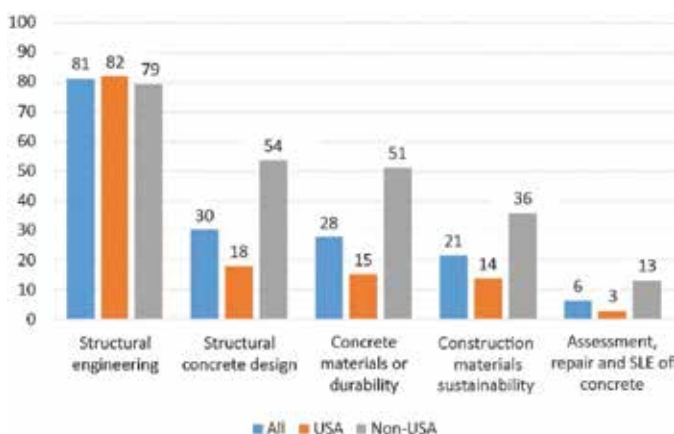


Fig. 2: Undergraduate program focus (at least four courses) (percent of institutions)

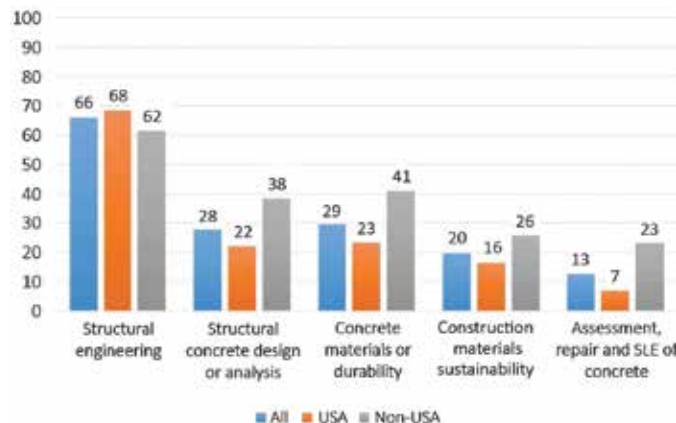


Fig. 3: Graduate program focus (at least four courses) (percent of institutions) (Note: SLE is service-life extension)

Survey results and discussion

A total of 132 responses from 120 institutions in 25 countries and five continents were received. The data provided herein is based on participants' self-reported responses. No attempt was made to solicit responses individually from members, confirm responses, or include additional schools. When there were multiple respondents from the same institution, information was collated to represent one university-based response. Interpretation of questions, perceptions, comprehensiveness of response, knowledge of all available courses and initiatives, and other aspects may impact accuracy. While there may be some inaccuracies from self-reporting, skewed participation, or omissions from universities with unreported programs or courses, the survey is expected to provide a reasonable description of the available courses and curricula.

Comments received from respondents provided some additional perspective. Multiple respondents indicated that they have one or more courses that cover the information, but not to the 75% level required in the survey. The 75% level was questioned by one respondent as being too restrictive for adequate representation. A follow-up conversation with one of the respondents conveyed the importance of accreditation bodies recognizing needs and the need for additional learning materials such as textbooks.

Survey results and reported percentages presented in Fig. 1 through Fig. 4 are based on the number of institutions represented by respondents.

Results indicate that many universities represented by respondents have courses at least 75% devoted to design of new concrete structures, but comparably less have courses devoted to alternative design, durability, or sustainability. There were comparatively more universities with undergraduate or graduate programs that focus on structural engineering than on concrete design, durability, or sustainability, and relatively few that focus on assessment, repair, and service-life extension. Therefore, it can be observed that there are some universities that are addressing, in some manner, these specialized topics, but also that a key opportunity exists for improvement.

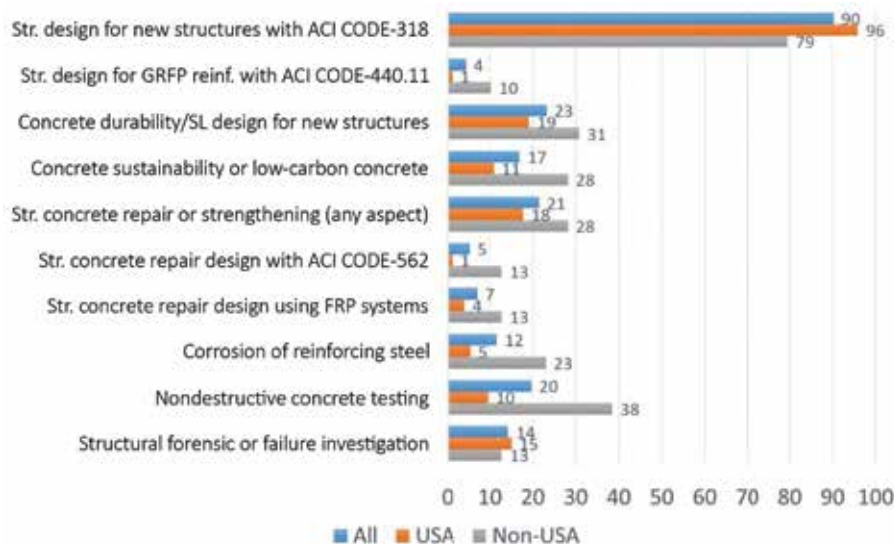


Fig. 4: Courses with at least 75% focus (percent of institutions) (Note: SL is service life)



Fig. 5: Sustainability with respect to existing building safety, durability, and low-environmental impact

Necessary Synergy

There is a necessary synergy between structural performance, extended life through durable design, and environmentally responsible use of materials and technologies for existing structures toward a safe, responsible future (Fig. 5). This includes efficient use of materials and technologies for a lower environmental impact of the repair and an overall lower life-cycle environmental impact through significant service-life extension.

Implementing a synergistic approach requires structural repair engineering expertise combined with necessary expertise in material sciences and sustainability. This may require a team. As the depth of information increases, new specialties and new branches of existing specialties may be needed. University education, continuing education, mentorship, and certificate or certification programs (such as those discussed in this article) provide opportunities for advancement. Programs for training workers who perform repairs are also critical, as the execution of work can significantly impact potential safety issues, durability of repairs, environmental costs associated with more frequent maintenance, and overall life-cycle costs.

A structural engineer repair specialty is analogous to structural engineers that specialize in wood, steel, masonry, or concrete design for new structures or specialty applications such as tanks, thin shells, or composite buildings. With existing structures alone, there is a need to have competency in new and changing code provisions that may vary jurisdictionally within an area of practice, advancing knowledge and options for repair approaches, historical development of materials in new structures that requires knowledge of antiquated systems, new and revised industry guide documents emerging from professional organizations, and new and improved investigative techniques.

Structural repairs of concrete require knowledge of materials-related distress mechanisms, specialty repair materials, mechanics, and specialty repair products, as well as the requisite experience that is different from new structural design and can take a number of years to suffice given the various systems and conditions that might be encountered. These complexities are augmented because formal institutional learning is focused mainly on new construction.

Conclusions

With evolving societal needs and scientific advancements comes the responsibility to educate professionals and students. Resources are available for current professionals, including mentorship, online learning, organizational involvement, and others; however, formal curricula for students who will populate the industry are limited. Many universities offer structural engineering courses and programs. Comparatively, fewer offer courses in concrete sustainability topics, advanced durability design, existing building safety, nondestructive testing, corrosion of reinforcing steel, or structural engineering focused on repair of existing structures. Programs that comprehensively and cohesively educate students on repairing and extending the service life of existing structures are even less common. This suggests that universities have opportunities to connect the critical synergistic elements of sustainability together as a cohesive approach for existing structures and better prepare students for practice.

For sustainable management of existing structures to emerge as prevalent and typical, those educating students, writing and enforcing codes, designing repairs, evaluating buildings, and implementing repairs and maintenance in existing buildings must understand and focus on the synergies of safety, durability, and environmental responsibility. Significant progress is being made, but continued

advancement of industry knowledge and education are needed to integrate these important topics into the mainstream for society to achieve the potential rewards of sustainable management of existing buildings.

Acknowledgments

The author would like to extend sincere appreciation and thanks to ACI staff Claire Hiltz and Kanette Worlds-Richards for administering and collecting survey data presented in this article; Ceki Halmen, University of Missouri-Kansas City, for valuable discussion about the survey results; and Stephen Szoke, ACI; David Keatts, SKA; and Stephen Robinson, SKA for valuable comments through review of previous drafts of this article. While suggestions by those mentioned were valuable, the opinions and accuracy of information are solely the author's responsibility, and views may not reflect those of others.

References

1. Brundlandt Commission, "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future," United Nations, New York, NY, 1987, 247 pp.
2. National Environmental Policy Act (NEPA) of 1969, Sec. 2 [42 U.S.C. §4321], United States Government, 1970.
3. 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.
4. ICC, "2024 International Existing Building Code (IEBC)," first edition, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2024, 288 pp.
5. Szoke, S.S.; Tepke, D.G.; and Gold, W., "New Code Provisions for GFRP-Reinforced Concrete and Structural Concrete Repair," *Structure*, Apr. 2023, pp. 30-33.
6. 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, 2022, 260 pp.
7. ICC, "2024 International Building Code (IBC)," first edition, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2024, 753 pp.
8. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety of Existing Structures, Part 4: A New Hope," *Concrete International*, V. 46, No. 2, Feb. 2024, pp. 43-53.
9. ISO 13315-1:2024, "Environmental Management for Concrete and Concrete Structures—Part 1: General Principles," second edition, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2024, 15 pp.
10. Schokker, A.J., "The Sustainable Concrete Guide: Strategies and Examples," U.S. Green Concrete Council, Farmington Hills, MI, 2009, 89 pp.
11. Szoke, S.S.; Nahlawi, K.; and Casilio, J., "Enhancing Sustainability Through Structural Concrete System Selection," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*, V. 175, No. 2, Feb. 2022, pp. 57-63.
12. Tennis, P.D.; Thomas, M.D.A.; Weiss, W.J.; Farny, J.A.; and Giannini, E.R., "State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%," SN3148.03, American Cement Association, Washington, DC, 2024, 92 pp.
13. ACI Committee 130, "Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction (ACI PRC-130-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 34 pp.
14. ACI Committee 323, "Low-Carbon Concrete—Code Requirements and Commentary (ACI CODE-323-24)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2024, 25 pp.
15. "The Sustainable Concrete Guide: Applications," first edition, A.J. Schokker, ed., U.S. Green Concrete Council, Farmington Hills, MI, 2010, 177 pp.
16. ICRI Committee 160, "Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings," International Concrete Repair Institute, Saint Paul, MN, Apr. 2014, 13 pp.
17. 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, Article 128.
18. Wittcox, 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, Article 104436.
19. Tepke, D.G., "Looking Back to See Ahead: Using Historical Knowledge of Durability to Provide Clues for Concrete Repair," *Concrete Repair Bulletin*, V. 36, No. 1, Jan./Feb. 2023, pp. 10-21.
20. Tepke, D.G., and Mandry-Campbell, J., "Historical Advancements in Corrosion Control of Existing Conventionally Reinforced Concrete Structures in the United States: Towards a Sustainable and Viable Future," *Concrete Repair Bulletin*, V. 37, No. 2, Mar./Apr. 2024, pp. 21-30.
21. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code Requirements and Commentary (ACI CODE-562-25)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2025, 134 pp.
22. ACI Committee 318, "Building Code for Structural Concrete—Code Requirements and Commentary (ACI CODE-318-25)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2025, 699 pp.
23. ACI Committee 365, "Service Life Evaluation—Design Specification (ACI CODE-365-24)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2024, 22 pp.

Selected for reader interest by the editors.



David G. Tepke, FACI, is Principal Engineer with SKA Consulting Engineers, Inc., in Charleston, SC, USA. He is Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach; and is a member of the ACI Technical Activities Committee and Committees 201, Durability of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 321, Concrete Durability Code; and 562, Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures. He is a NACE/AMPP Certified Corrosion Specialist and a licensed professional engineer.

En la intersección de la seguridad, la responsabilidad ambiental y la durabilidad

En busca de un enfoque sostenible para las estructuras existentes de concreto.

Por David G. Tepke

El conocimiento y la experiencia necesarios para prolongar de manera responsable la vida útil de las estructuras existentes, a fin de responder a las demandas de la sociedad, están en constante expansión. Si bien, antes era común que un ingeniero estructural especializado en obra nueva diseñara y dirigiera proyectos de reparación o restauración de concreto, los avances actuales y sus crecientes complejidades requieren que los profesionales, o los equipos multidisciplinarios formados por ellos, dominen una amplia gama de conceptos estructurales, de materiales, de extensión de vida útil y medioambientales específicos para las estructuras existentes. Dada la amplitud y profundidad, así como la rapidez con la que se genera y difunde la información, surge la necesidad de formar, capacitar y desarrollar plenamente a los profesionales. Este artículo analiza los avances clave y las iniciativas educativas, principalmente asociadas al ACI (American Concrete Institute), así como a distintas universidades. La Comisión Brundtland señaló que “la humanidad tiene la capacidad de hacer que el desarrollo sea sostenible, garantizando que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas propias”¹.

El término sostenible implica “crear y mantener condiciones en las que los seres humanos y la naturaleza puedan coexistir en una armonía productiva, que permita cumplir con los requisitos sociales, económicos y otros, tanto de las generaciones presentes como futuras”².

Mantener la seguridad estructural, prolongar la vida útil de manera económica y elegir materiales y procesos conscientes de su impacto en el medio ambiente son acciones sostenibles que constituyen necesidades básicas para los edificios existentes. Los avances del sector en materia de normas de seguridad, monitorización y evaluación estructural, métodos de reparación, materiales y técnicas para la extensión de vida útil, así como en gestión

medioambiental, ofrecen oportunidades para alcanzar un nivel superior de desarrollo sostenible. Se están desarrollando y mejorando guías, códigos y regulaciones gubernamentales con el fin de introducir, formalizar y difundir este conocimiento para dar respuesta a las demandas sociales. Los profesionales actuales y futuros necesitan formación y actualización conforme se adoptan nuevos códigos y cambian las disposiciones en cada jurisdicción.

Algunos de los avances más significativos y recientes del ACI, aplicables a estructuras existentes, extensión de vida útil o gestión medioambiental, incluyen:

- Desarrollo de códigos de referencia estándar para la reparación del concreto, el diseño con materiales de refuerzo alternativos, el diseño con concreto de bajas emisiones de carbono y el diseño orientado a la durabilidad.
- Nuevas o actualizadas guías sobre reparación y rehabilitación, control de corrosión, medidas de protección, cementos alternativos, iniciativas de sostenibilidad, monitorización de la salud estructural y evaluación.
- Ampliación de oportunidades de desarrollo profesional relacionadas con el diseño de reparaciones, el diseño con refuerzos alternativos y la sostenibilidad.
- Incremento de la labor de promoción, difusión y formación, así como la creación del Comité de Códigos y Normas de Defensa y Divulgación del ACI en 2014, la contratación de Ingenieros de Defensa de Códigos por parte del ACI desde 2017, la puesta en marcha de grupos locales de apoyo a los códigos y diversas iniciativas dirigidas a la capacitación de responsables de su aplicación.

Las siguientes secciones analizan los componentes esenciales de la sostenibilidad en las estructuras de concreto existentes.

Seguridad y rendimiento estructural de edificios existentes

Se están implementando en Estados Unidos diversas iniciativas y normativas de seguridad relacionadas con estructuras costeras, estacionamientos y la inspección de fachadas de edificios³. Esto responde, en parte, a una mayor concienciación derivada de eventos relevantes, pero también al conocimiento creciente sobre los mecanismos de deterioro que pueden comprometer el rendimiento estructural o generar condiciones de inseguridad.

El Código ACI-562: Evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto existentes — Requisitos y comentarios normativos, publicado por primera vez en 2013, ha sido revisado en 2016, 2019 y 2021. En los últimos años, se ha incorporado en algunos códigos de edificación estatales como enfoque válido, y en 2024 fue adoptado por el Consejo Internacional de Códigos (International Code Council (ICC)) en el Código Internacional de Edificaciones Existentes (International Existing Building Code (IEBC))⁴. Este código ofrece múltiples herramientas útiles para evaluar condiciones estructurales potencialmente peligrosas, así como para la reparación y rehabilitación de estructuras⁵.

Otros códigos de referencia estructurales del ACI aplicables a edificios existentes incluyen:

- Código ACI-318: Código de Edificación para Concreto Estructural — Requisitos y comentarios normativos, empleado cuando se ejecutan obras nuevas dentro de edificios existentes.
- Código ACI-440:11.22: Requisitos de edificación para estructuras de concreto armado con barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) — Código y comentarios⁶, publicado en 2022 y adoptado por el ICC en el Código Internacional de Construcción (International Building Code (IBC)) 2024⁷.

Si bien la reparación y rehabilitación estructural se fundamentan en los principios de la ingeniería estructural, el diseño y la construcción orientados a la reparación, la rehabilitación y la extensión de vida útil han evolucionado en el sector hasta consolidarse como una especialidad independiente, debido al aumento de la información técnica disponible, la experiencia acumulada y las particularidades que la diferencian de la obra nueva.

Tepke y colaboradores⁸ recopilan ejemplos de más de 70 documentos de comités del ACI desarrollados o actualizados en la última década, aplicables a la evaluación, reparación, rehabilitación, refuerzo o extensión de vida útil de estructuras existentes.

Entre los comités del ACI que generan documentos y oportunidades formativas directamente relacionados con el rendimiento, la investigación y la reparación de edificios existentes destacan:

- 228: Ensayos no destructivos del concreto.
- 364: Rehabilitación.
- 437: Evaluación de la resistencia de estructuras de concreto existentes.
- 546: Reparación.

- 562: Evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto.
- 563: Especificaciones para reparación de concreto estructural en edificios.

Otros comités cuyas publicaciones también resultan aplicables a las estructuras existentes incluyen:

- 318: Código de edificación de concreto estructural.
- 201: Durabilidad del concreto.
- 222: Corrosión de metales en el concreto.
- 362: Estructuras de estacionamiento.
- 377: Integridad estructural basada en el rendimiento y resiliencia de estructuras de concreto.
- 440: Refuerzo con polímeros reforzados con fibra.
- Comité en conjunto ACI-ASCE 423: Concreto pretensado, entre otros.

Las iniciativas educativas del ACI específicamente relacionadas con el rendimiento estructural y la reparación incluyen las asociadas al Comité E706: Educación en Reparación de Concreto, que elabora documentos sobre procedimientos de aplicación en reparaciones y que prevé el desarrollo futuro de un programa de certificación vinculado al Código ACI-562. Un ejemplo de otra organización que ofrece recursos educativos en esta área es el Instituto Internacional de Reparación de Concreto (ICRI) (International Concrete Repair Institute), que proporciona documentación consensuada por comités, programas de certificación y oportunidades de formación centradas en la evaluación y reparación estructural.

Gestión ambiental

Los impactos ambientales del concreto y de las estructuras de concreto pueden abarcar:

- Cambio climático global.
- Consumo de recursos naturales.
- Alteración de la capa de ozono.
- Uso del suelo y modificación de hábitats.
- Eutrofización.
- Acidificación.
- Contaminación atmosférica, hídrica y del suelo.

- Contaminación por sustancias radioactivas.
- Impactos derivados de la generación de residuos.
- Ruido y vibraciones⁹.

Para mitigar estos efectos, se están implementando iniciativas a nivel industrial orientadas a reducir la huella ambiental, entre ellas:

- Disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento portland.
- Sustitución parcial del cemento portland por polvo de piedra caliza.
- Reducción del potencial de calentamiento global (GWP) en la producción y uso del concreto.
- Empleo de materiales alternativos.
- Incremento de la eficiencia de los sistemas estructurales, reduciendo así el consumo de materiales.
- Reutilización adaptativa de estructuras existentes.
- Extensión de la vida útil de las construcciones.
- Incorporación de productos reciclados o residuos en la fabricación del concreto.

Diversos autores aportan antecedentes clave en este campo:

- Schokker¹⁰: visión general sobre sostenibilidad.
- Szoke¹¹ y colaboradores: importancia de la eficiencia estructural.
- Tennis¹² y colaboradores: uso de adiciones de caliza en el cemento para reducir emisiones de carbono.

En algunas jurisdicciones ya se están aplicando regulaciones que exigen la gestión ambiental, mediante evaluaciones de ciclo de vida y el uso de declaraciones ambientales de producto (EPDs) como requisito para la calificación de materiales.

El ACI actualizó su plan estratégico en 2007 para incluir la sostenibilidad como eje de acción. En 2008 se creó el Comité 130: Sostenibilidad del Concreto, que en 2019 publicó el ACI PRC-130-19¹³: Informe sobre el papel de los materiales en la construcción sostenible con concreto. La versión más reciente del Código ACI-318 (2025) incorpora por primera vez disposiciones específicas de sostenibilidad,

y se espera que la próxima edición del ACI SPEC-301: Especificaciones para la construcción con concreto incluya también normas complementarias. Asimismo, se ha desarrollado el Código ACI-323.24¹⁴: Concreto de bajas emisiones de carbono — Requisitos y comentarios normativos, que constituye un nuevo código de referencia para la industria.

Entre los comités del ACI que generan documentos y oportunidades educativas directamente relacionados con la minimización del impacto ambiental destacan el 130 (Sostenibilidad del Concreto), el 242 (Cementos Alternativos), el 323 (Código de concreto de bajas emisiones de carbono), el 555 (Concreto con materiales reciclados) y el subcomité 301-S (Sostenibilidad). Otros grupos también contribuyen en áreas como materiales cementantes suplementarios, iniciativas de durabilidad y eficiencia en diseño y construcción. Además, organizaciones como la Asociación Americana del Cemento (American Cement Association (ACA)) han desempeñado un papel clave en la difusión de información orientada a la reducción del potencial de calentamiento global (GWP) asociado a la producción y uso del concreto.

Muchas de las iniciativas actuales se centran en la sostenibilidad desde la perspectiva de la demanda de carbono en la producción de materiales para obra nueva. Sin embargo, principios similares son aplicables a la durabilidad, reparación del concreto y extensión de la vida útil de estructuras existentes. La durabilidad se reconoce como un factor esencial para garantizar construcciones sostenibles y prolongar la vida de servicio de las estructuras, además de ser un componente clave en la evaluación del impacto global del ciclo de vida en la demanda de carbono de las construcciones¹⁰. Acciones responsables como la extensión de la vida útil, la rehabilitación y la reutilización adaptativa son, en sí mismas, prácticas sostenibles. Diversos estudios —entre ellos los de Schokker¹⁵, el Comité 160 del ICRI¹⁶ (Ciclo de vida y sostenibilidad), Renne et al.¹⁷ y Wittcox et al.¹⁸— han demostrado los beneficios de incluir tanto el análisis de ciclo de vida como la extensión de la vida útil en la evaluación de estrategias, evidenciando la conveniencia de optar por la protección, el mantenimiento y la reparación frente a la demolición y sustitución.

Finalmente, se reconoce la necesidad de seguir avanzando en la integración de principios de gestión

ambiental aplicados a la construcción nueva y, de manera más intensa, al ámbito de la reparación y la rehabilitación. Esto incluye métodos como la reparación estructural, la protección catódica o la aplicación de recubrimientos, que deben ser evaluados frente a las implicaciones ambientales de la sustitución total de las estructuras.

Diseño de durabilidad y extensión de la vida útil

Desde comienzos del siglo XX se han logrado importantes avances en la identificación y estudio de los mecanismos de deterioro relacionados con la durabilidad y los materiales, la incorporación de disposiciones básicas para abordarlos en los códigos y el control de la corrosión^{19,20}. Las disposiciones fundamentales sobre durabilidad están incluidas en el Código ACI-562-25²¹ para la reparación de estructuras existentes y en el Código ACI-318-25²² para los elementos nuevos en estructuras existentes, cuando corresponde.

El Comité 321 del ACI (Código de Durabilidad del Concreto) está desarrollando un nuevo código para el diseño y la construcción orientados a la durabilidad de estructuras nuevas, que también se espera sea aplicable a las partes nuevas de estructuras existentes que requieran sustitución. Este código será útil para aumentar la vida útil de las construcciones en general, abordar de manera más integral la durabilidad y dar respuesta a necesidades específicas de mejora del rendimiento del concreto en ambientes agresivos. Además, se prevé que el documento incluya una sección dedicada al mantenimiento necesario para lograr la durabilidad extendida especificada.

Por su parte, el Comité 365C del ACI (Código de Predicción de Vida Útil) ha desarrollado una especificación de diseño para la evaluación de la vida útil con el fin de aportar bases adicionales al diseño de estructuras nuevas: Código ACI 365-24²³: Evaluación de vida útil — Especificación de diseño. Actualmente se está elaborando una especificación complementaria para la evaluación de la vida útil de estructuras existentes.

Entre los comités del ACI cuyos documentos e iniciativas educativas se aplican directamente a la durabilidad de estructuras existentes se encuentran el 201 (Durabilidad del concreto), el 222 (Corrosión de metales en el concreto), el 365 (Predicción de vida

útil) y el 515 (Sistemas de protección para concreto). Asimismo, como señalan Tepke y Mandry-Campbell, en los últimos 40 años tanto el ACI como la Asociación de Protección y Comportamiento de los Materiales (AMPP) (Association for Materials Protection and Performance) y el ICRI han desarrollado diversos documentos guía que ayudan a los proyectistas a especificar diferentes productos y sistemas para la extensión de la vida útil de estructuras existentes expuestas a condiciones corrosivas.

Planes de estudio en instituciones de educación superior

El nivel de participación de los estudiantes y jóvenes profesionales constituye un elemento esencial para lograr una integración exitosa del desarrollo sostenible. La evaluación y reparación de estructuras de concreto debe ser un eje prioritario para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad.

Con este propósito, se realizó una encuesta a 1 448 docentes de 120 países, todos ellos miembros de la Red de Docentes del ACI, con el fin de comprender mejor los cursos y programas especializados que actualmente ofrecen las universidades y centros de educación superior, en áreas relacionadas con el rendimiento y diseño estructural, la sostenibilidad y la durabilidad/ extensión de vida útil.

La encuesta fue elaborada por el autor y administrada por el ACI mediante correo electrónico y recordatorios en mayo de 2024.

Preguntas de la encuesta

Se solicitó la siguiente información:

- Nombre de la universidad.
- Enfoque y especialidad del programa de grado (la especialidad o enfoque del programa debe incluir un mínimo de cuatro asignaturas). Seleccionar todas las opciones que se ofrezcan en la universidad (respuestas múltiples):
 - o Ingeniería estructural como especialidad o enfoque del programa.
 - o Diseño de concreto estructural como especialidad o enfoque del programa.
 - o Materiales de concreto o durabilidad del concreto como especialidad o enfoque

del programa.

- o Sostenibilidad de materiales de construcción como especialidad o enfoque del programa.
- o Evaluación, reparación y extensión de vida útil del concreto como especialidad o enfoque del programa.

- Enfoque de programas de posgrado (el enfoque del programa debe incluir un mínimo de cuatro asignaturas). Seleccionar todas las opciones que se ofrezcan en la universidad (respuestas múltiples):
 - o Enfoque en ingeniería estructural.
 - o Enfoque en diseño o análisis de concreto estructural.
 - o Enfoque en materiales de concreto o durabilidad del concreto.
 - o Enfoque en sostenibilidad de materiales de construcción.
 - o Enfoque en evaluación, reparación y extensión de vida útil del concreto.
- Asignaturas individuales (cada asignatura debe estar dedicada al menos en un 75 % al tema indicado). Seleccionar todas las opciones que se ofrezcan en la universidad (respuestas múltiples):

- o Curso(s) de diseño de concreto estructural para estructuras nuevas usando los principios del Código ACI-318.
- o Curso(s) de diseño de concreto estructural con refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP), basados en el Código ACI-440.11.
- o Curso(s) sobre diseño de durabilidad del concreto o vida útil de estructuras nuevas.
- o Curso(s) sobre sostenibilidad del concreto o uso de concreto de bajas emisiones de carbono.
- o Curso(s) sobre reparación o refuerzo de concreto estructural (en cualquier aspecto).
- o Curso(s) de diseño de reparación de concreto estructural basados en los principios del Código ACI-562.
- o Curso(s) de diseño de reparación de concreto estructural con sistemas de polímero reforzado con fibra (FRP), internos o externos.
- o Curso(s) sobre corrosión del acero de refuerzo en el concreto.
- o Curso(s) sobre ensayos no destructivos del concreto.
- o Curso(s) sobre forense estructural o investigación de fallos.
- o Curso(s) sobre sostenibilidad y extensión de vida útil de estructuras existentes.

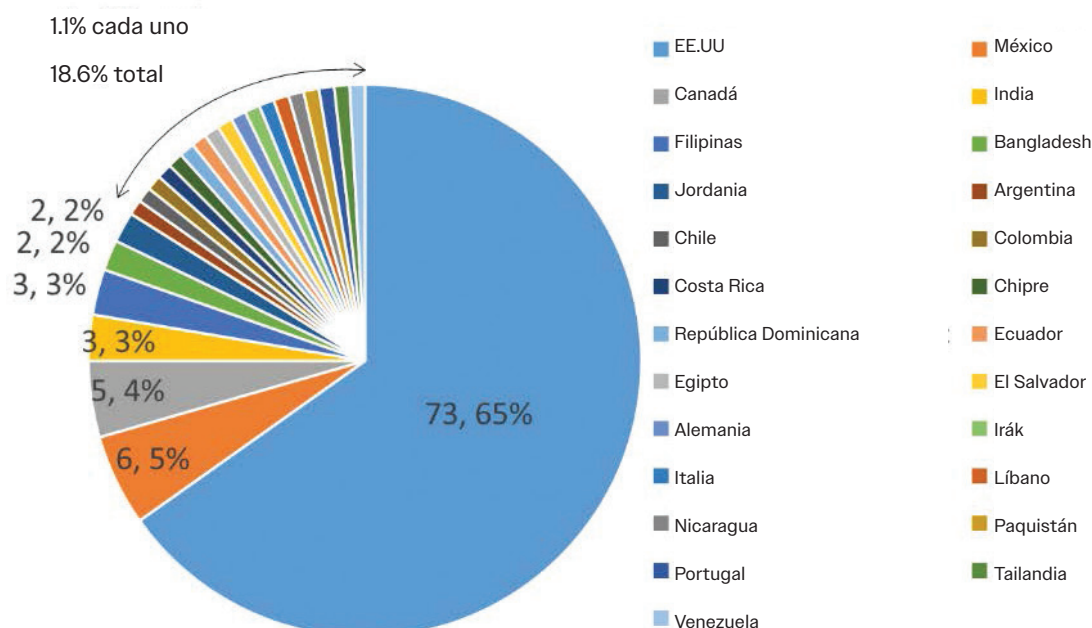


Fig. 1: Ubicación de las universidades representadas por los encuestados (número y porcentaje)

- Información adicional: los encuestados podían aportar cualquier otra información o calificación complementaria a sus respuestas.
- Datos de contacto: quienes desearan discutir sus respuestas podían facilitar su nombre y dirección de correo electrónico.

Resultados de la encuesta y discusión

Se recibieron un total de 132 respuestas provenientes de 120 instituciones en 25 países y cinco continentes. Los datos presentados en este documento se basan en las respuestas autoinformadas por los participantes. No se realizaron intentos de solicitar respuestas de manera individual a los miembros, confirmar la información proporcionada o incluir escuelas adicionales. Cuando hubo múltiples respuestas de una misma institución, la información fue consolidada para representar una sola respuesta por universidad.

La interpretación de las preguntas, las percepciones, la exhaustividad de las respuestas, el conocimiento de todos los cursos e iniciativas disponibles, entre otros aspectos, pueden afectar la precisión de los resultados. Si bien es posible que existan algunas inexactitudes derivadas del autoinforme, la participación parcial o la omisión de universidades con programas o cursos no reportados, se espera que la encuesta proporcione una descripción razonable de los cursos y planes de estudio disponibles. Los comentarios de los encuestados ofrecieron perspectivas adicionales.

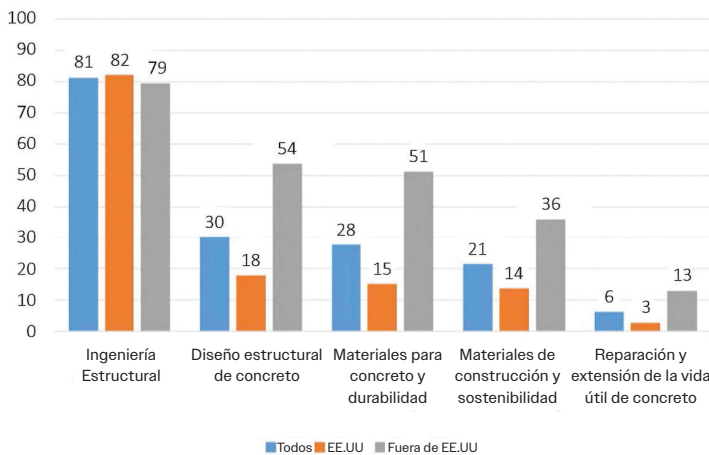


Fig. 2: Enfoque del programa de pregrado (al menos cuatro cursos) (porcentaje de instituciones)

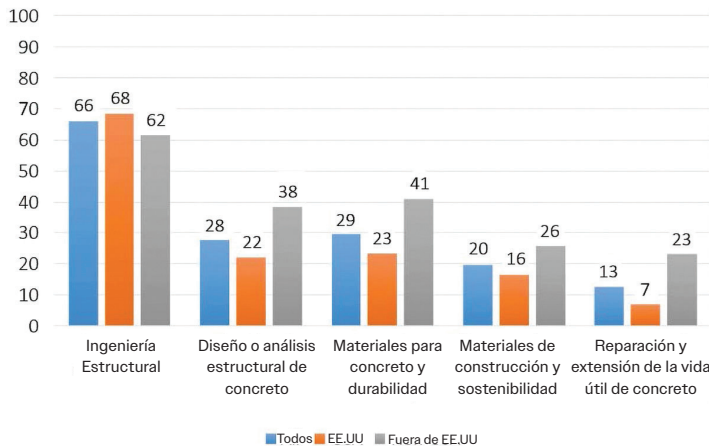


Fig. 3: Enfoque del programa de posgrado (al menos cuatro cursos) (porcentaje de instituciones) (Nota: SLE significa extensión de la vida útil)

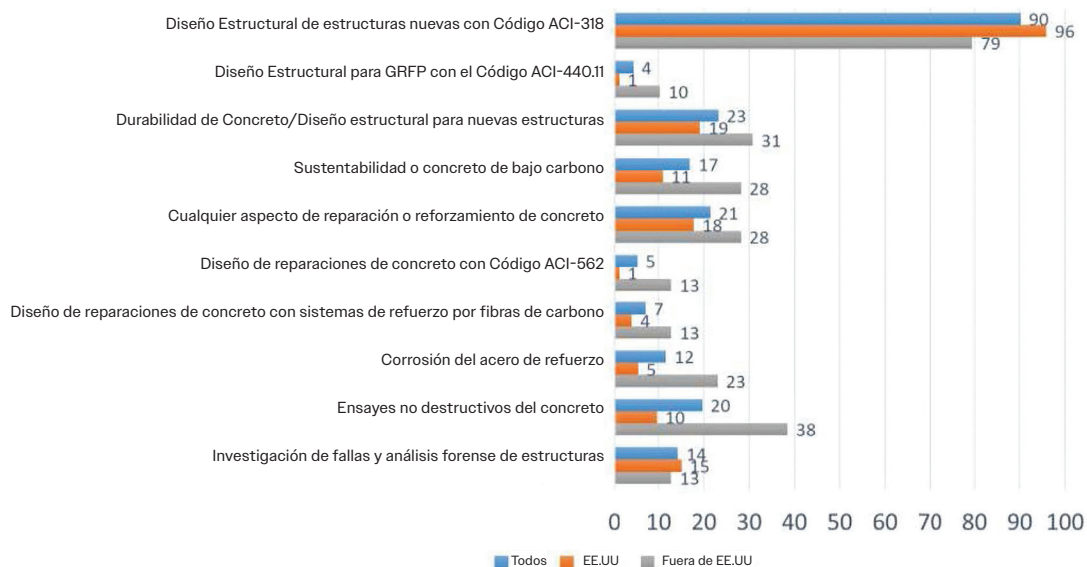


Fig. 4: Cursos con al menos un 75% de enfoque (porcentaje de instituciones) (Nota: SL es vida útil).

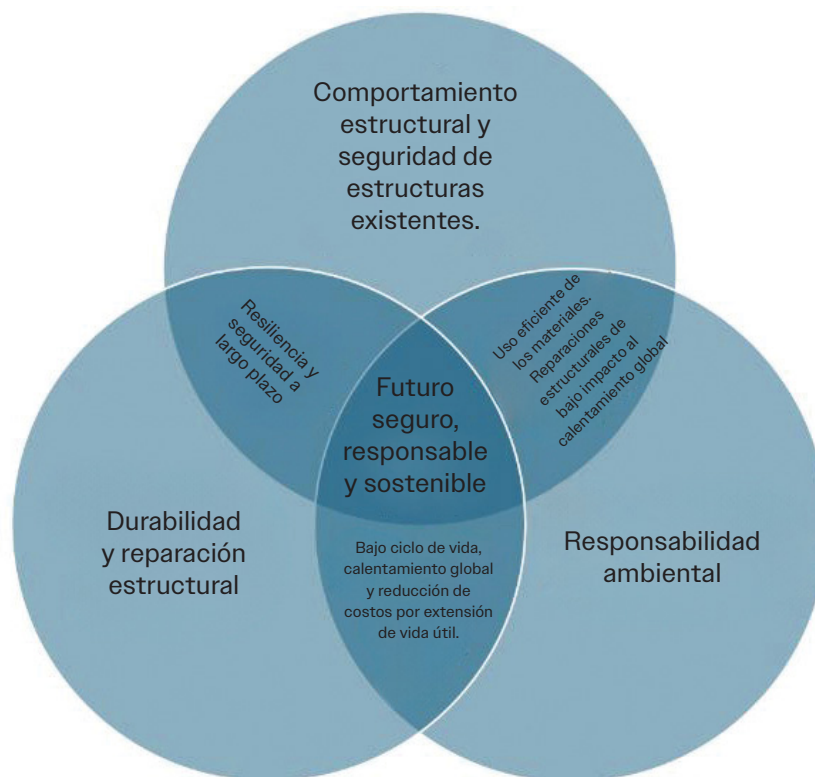


Fig. 5: Sostenibilidad en cuanto a la seguridad, durabilidad y bajo impacto ambiental de los edificios existentes.

Varios participantes señalaron que cuentan con uno o más cursos que cubren la información solicitada, pero no alcanzan el nivel del 75% requerido en la encuesta. Uno de los encuestados cuestionó que este umbral del 75% fuera demasiado restrictivo para una representación adecuada.

En una conversación posterior con uno de los participantes, se destacó la importancia de que los organismos de acreditación reconozcan estas necesidades, así como la necesidad de contar con materiales de aprendizaje adicionales, como libros de texto.

Los resultados de la encuesta y los porcentajes reportados en las Fig. 1 a la Fig. 4 se basan en el número de instituciones representadas por los encuestados. Los resultados indican que muchas de las universidades representadas ofrecen cursos con al menos un 75% de dedicación al diseño de nuevas estructuras de concreto, pero en comparación son menos las que imparten cursos sobre diseño alternativo, durabilidad o sostenibilidad. Asimismo, se encontró que un mayor número de universidades ofrece programas de licenciatura o posgrado enfocados en ingeniería estructural que en diseño de concreto, durabilidad o sostenibilidad, y relativamente pocas se enfocan en evaluación, reparación y extensión de la vida útil.

Por lo tanto, se observa que algunas universidades están abordando, de alguna manera, estos temas especializados; sin embargo, también queda en evidencia que existe una oportunidad clave de mejora.

Sinergia necesaria

Existe una sinergia esencial entre el desempeño estructural, la prolongación de la vida útil mediante un diseño durable y el uso ambientalmente responsable de materiales y tecnologías en estructuras existentes, con miras a un futuro seguro y sostenible (Fig. 5). Esto incluye el uso eficiente de materiales y tecnologías que reduzcan el impacto ambiental de las reparaciones y, en general, el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida mediante una extensión significativa de la vida en servicio.

La implementación de un enfoque sinérgico requiere la combinación de la experiencia en ingeniería de reparación estructural con la necesaria especialización en ciencias de los materiales y sostenibilidad. Esto puede demandar la conformación de equipos. A medida que aumenta la complejidad de la información, pueden surgir nuevas especialidades y ramificaciones dentro

de las ya existentes. La educación universitaria, la formación continua, la mentoría y los programas de certificación o acreditación (como los mencionados en este artículo) ofrecen oportunidades de avance. Los programas de capacitación para los trabajadores que realizan reparaciones también son fundamentales, ya que la correcta ejecución de las obras incide de manera significativa en la seguridad, la durabilidad de las reparaciones, los costos ambientales asociados a mantenimientos más frecuentes y los costos globales del ciclo de vida.

Una especialidad en reparación estructural para ingenieros puede considerarse análoga a la especialización de ingenieros estructurales en diseño de estructuras de madera, acero, mampostería o concreto, o en aplicaciones específicas como tanques, cascarones delgados o edificios compuestos. Solo en el ámbito de las estructuras existentes, se requiere competencia en nuevas y cambiantes disposiciones normativas que pueden variar jurisdiccionalmente en una misma área de práctica; en el conocimiento y las opciones más recientes en enfoques de reparación; en el entendimiento de los materiales empleados históricamente en nuevas construcciones que obliga al dominio de sistemas ya obsoletos; en la actualización constante de documentos guía elaborados por organismos profesionales; y en la aplicación de técnicas de investigación novedosas y mejoradas.

Las reparaciones estructurales de concreto requieren conocimiento sobre mecanismos de deterioro relacionados con materiales, materiales especiales de reparación, mecánica y productos específicos de reparación, además de la experiencia necesaria, que difiere del diseño estructural de nuevas construcciones y puede tomar varios años en desarrollarse, dado el rango de sistemas y condiciones que pueden presentarse. Estas complejidades se ven acentuadas por el hecho de que la enseñanza formal en instituciones educativas se centra principalmente en la construcción nueva.

Conclusiones

Con la evolución de las necesidades sociales y los avances científicos surge la responsabilidad de educar a profesionales y estudiantes. Existen recursos disponibles para los profesionales en

ejercicio, como la mentoría, el aprendizaje en línea, la participación en organizaciones, entre otros; sin embargo, los planes de estudio formales dirigidos a los estudiantes que integrarán la industria son limitados. Muchas universidades ofrecen cursos y programas en ingeniería estructural. En comparación, son menos las que imparten cursos sobre sostenibilidad del concreto, diseño avanzado para la durabilidad, seguridad en edificaciones existentes, ensayos no destructivos, corrosión del acero de refuerzo o ingeniería estructural enfocada en la reparación de estructuras existentes.

Los programas que educan de manera integral y coherente a los estudiantes en la reparación y extensión de la vida útil de las estructuras existentes son aún menos comunes. Esto sugiere que las universidades tienen la oportunidad de vincular los elementos sinérgicos fundamentales de la sostenibilidad en un enfoque cohesivo para las estructuras existentes y preparar mejor a los estudiantes para la práctica profesional.

Para que la gestión sostenible de las estructuras existentes se consolide como una práctica común y generalizada, quienes forman a los estudiantes, redactan y aplican normativas, diseñan reparaciones, evalúan edificios y ejecutan reparaciones y mantenimientos en edificaciones existentes deben comprender y enfocarse en las sinergias entre seguridad, durabilidad y responsabilidad ambiental. Se han logrado avances significativos, pero aún es necesario continuar.

Agradecimientos

El autor desea expresar su sincero agradecimiento a los miembros del personal del ACI Claire Hiltz y Kanette Worlds-Richards por la gestión y recopilación de los datos de la encuesta presentados en este artículo; a Ceki Halmen, de la Universidad de Missouri-Kansas City, por las valiosas discusiones sobre los resultados de la encuesta; y a Stephen Szoke (ACI), David Keatts (SKA) y Stephen Robinson (SKA) por sus valiosos comentarios durante la revisión de versiones anteriores de este artículo.

Si bien las sugerencias de las personas mencionadas fueron de gran valor, las opiniones y la precisión de la información son responsabilidad exclusiva del autor, y las opiniones expresadas pueden no reflejar las de otros.

David G. Tepke, FACI, es Ingeniero Principal en SKA Consulting Engineers, Inc., en Charleston, Carolina del Sur, EE. UU. Es Presidente del Comité ACI 222, Corrosión de Metales en el Concreto, y del Comité del ACI sobre Promoción y Divulgación de Códigos y Normas. Además, es miembro del Comité de Actividades Técnicas del ACI y de los Comités 201 (Durabilidad del Concreto), 301 (Especificaciones para la Construcción de Concreto), 321 (Código de Durabilidad del Concreto) y 562 (Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto). Es Especialista Certificado en Corrosión por NACE/AMPP y ingeniero profesional con licencia.



Título original en inglés:
**At the Intersection of Safety,
Environmental Responsibility,
and Durability.**

Seeking a sustainable approach to existing concrete structures

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo México
Sureste**



Traductora:
**Ing. Maria Jesús
Domínguez Ramos**



Revisor Técnico:
**Dr. Josseph Eli
Mandujano Zavala**