

# Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?

by David G. Tepke and O. Burkan Isgor

**C**orrosion of reinforcing steel in concrete is often associated with bridges, stadiums, parking or coastal structures, exterior façades of older buildings, and other structures exposed to severely corrosive or persistently corrosive conditions. Further, most service-life models are focused on exterior exposures.

Reinforced concrete structures with exterior exposure can certainly be subject to corrosion and make up a sizable portion of those that may require early repairs or more durable construction; however, there are interior environments that can also be severely corrosive. These environments may be present within manufacturing, industrial, and water treatment facilities as well as within seemingly benign and common exposures such as kitchens, boiler rooms, laundry areas, and elements that share exterior exposures in structures with building envelope issues. Because the effects of these environments may not be readily apparent, specifying engineers may fail to specify adequate durability provisions or assign an appropriate exposure category, leading to a reduced service life.

While current industry standard codes and guides provide provisions for addressing corrosive conditions and are likely to continue to evolve towards performance requirements, many specifications are focused on strength and water-cementitious materials ratio ( $w/cm$ ) requirements and limitations on admixed chloride contents for demonstrable durability. The goals of this article are to provide perspective on some common interior environments that may be susceptible to corrosion, give designers some concepts to consider when thinking about corrosivity of interior components, and provide general guidelines for mitigation methods.

Portions of this article, including some of the photos, were presented in the talk “Indoor Corrosion” as part of a session during the ACI Virtual Convention – Fall 2020, “Industry Experience on Unusual Reinforcing Steel Corrosion.”

## Background

ACI PRC-222-19<sup>1</sup> and ACI PRC-222.3-11<sup>2</sup> provide discussion on mechanisms, initiation, and propagation of corrosion. Reinforcing steel in concrete is typically well protected from corrosion due to the formation of a passivation layer on the steel resulting from the high pH of the surrounding pore solution. Corrosion of embedded reinforcing steel can initiate if the pH of the surrounding pore solution is reduced, a sufficient amount of chlorides or other halides (for example, bromides) are present at the steel level, or other variations in thermodynamic conditions result in a breakdown of the passive layer. Reduction of pH from the progressive mechanism known as carbonation occurs when atmospheric carbon dioxide combines with moisture to form carbonic acid that additionally reacts with calcium-bearing cementitious hydration products. Chlorides may penetrate from the exterior of the structure over time, as in the case of exposure to deicing chemicals or seawater, or they may be cast purposely in the form of chloride-containing admixtures or inadvertently from material contamination. Several other exposure conditions associated with manufacturing industries may introduce other halides to concrete in the form of industrial acids or salts, or otherwise contribute to reduction in pH or concrete disintegration that compromises protection of embedments.

Long-term service life of structures with respect to corrosion-related deterioration requires limiting the amount of admixed chlorides in new construction, external chloride (or halide) ingress, and large thermodynamic variations at the level of steel. However, industry professionals often debate how to specify the allowable admixed chloride content and methods for reducing penetrability of external ions. With respect to limiting ion penetrability, U.S. codes generally place limits on the maximum  $w/cm$  and minimum specified compressive strength to limit penetrability, although it is well known that these parameters, in and of themselves, are not

necessarily exclusive or the most beneficial indicators for reducing ion ingress in concrete. Advancements and initiatives have focused on using performance-based testing or pragmatic use of supplementary cementitious materials (SCMs) to achieve chloride penetrability characteristics that may influence corrosion initiation.<sup>3</sup>

In a previous *Concrete International* article,<sup>4</sup> it was demonstrated that there is conflicting guidance in several ACI documents on the allowable admixed chloride limits. Although a number of steps have been taken to reduce the inconsistencies, particularly whether these limits are specified with respect to percent mass of concrete or cementitious material content,<sup>5</sup> there are still major differences in various ACI documents. For example, ACI CODE-318-19(22), Table 19.3.2.1, requires that allowable water-soluble chloride contents in concrete mixtures containing conventional reinforcing steel do not exceed 1.00% where maintained dry, 0.30% where exposed to moisture, and 0.15% where exposed to moisture and an external source of chlorides, all by mass of cementitious materials (with qualifications).<sup>6</sup> Taking a more conservative approach, ACI PRC-222-19, Table 4.2.3, limits the allowable admixed (water soluble) chloride content in new construction to 0.25% mass of cementitious materials content for conventionally reinforced concrete in dry conditions and 0.15% for wet conditions. The significantly lower limit adapted by ACI PRC-222-19 for dry conditions is mainly motivated by the definition of dry conditions and whether these conditions can be maintained throughout the service life of a structure. ACI PRC-222-19, Section 4.2.3, describes interior conditions that may be more susceptible to corrosion in discussion of limiting admixed chlorides:

“Interior locations that are wetted occasionally, such as kitchens, bathrooms, and laundry rooms; buildings constructed with pumped lightweight concrete that is subsequently sealed before the concrete dries (for example, with vinyl tiles); and internal locations with high humidity can be susceptible to corrosion damage. Note that the designer has little control over the change in use or the service environment of a building, but the chloride content of the concrete mixture constituents should be specified.”<sup>1</sup>

An engineer may ask: Can I assume that the inside of a structure will remain dry and free of exposure to corrosive contaminants throughout its service life, or should I consider the possibility of localized or more global exposure to corrosive conditions?

ACI CODE-318-19(22) provides cover requirements based, in part, on being “exposed to weather” or having lack of such exposure. It also indicates in Section 20.5.1.4.1, that: “In corrosive environments or other severe exposure conditions, the specified concrete cover shall be increased as deemed necessary.”<sup>6</sup> These provisions can be of relevance for both interior and exterior portions of a structure, but the question remains: What is a corrosive environment? While, in principle, the provision can address many conditions that a

typical engineer might consider corrosive, a designer may not always consider the possibility of corrosive conditions or possibility of future corrosive conditions in interior exposures. It may not always be correct to assume that interior environments or portions thereof will remain free of exposure to corrosive contaminants with relative humidity (RH) in the 30 to 50% range during the service life, such as is typical of comfortable, habitable interior building environments. Interior exposures to chemicals, salts, or excessively moist conditions can, in some instances and service-life spans, be conducive to distress from corrosion. Although low RH in building interiors is expected to limit corrosion, localized high moisture profiles or changing moisture conditions can be prevalent, for instance, in kitchens, showers, pools, and bathrooms; components with condensation; rooms with open fenestrations; and when the structure experiences building envelope issues or local sustained leaks from water pipes embedded in concrete. If concrete in these interior conditions contain large amounts of admixed chlorides (for example, 1.00% by mass of cement as allowed by ACI CODE-318-19(22) in dry conditions), it is possible that reinforcement corrosion could be a significant problem.

When considering the differences between interior and exterior concrete of a structure, it is also necessary to reflect on carbonation. It is widely established and observed that the rate of penetration of carbonation is greatest at RH between about 40 and 75% RH.<sup>7</sup> The authors have seen relatively deep carbonation within interior structural concrete components, where cover thickness for corrosion protection is generally not considered. Carbonation alone can break down the passive film on the steel; however, corrosion rates from carbonation-induced corrosion are generally significant when there is adequate moisture available around reinforcement. This typically occurs at RH above 70%; hence, corrosion is conventionally assumed to be negligible for most interior concrete. Prevalent concerns for carbonation-induced and sustained corrosion can occur in areas exposed to moderate moisture, such as those indicated, or when conditions change over time from the removal of coatings, floor coverings, or repurposing, as well as due to building envelope issues or sustained water leaks. Another potentially more critical condition occurs due to the release of admixed chlorides that were bound in cementitious hydration products that occurs when pH is reduced from carbonation.<sup>7</sup> Because chloride-induced corrosion can be sustained at significant levels at lower RH levels than carbonation, and damage from chloride-induced corrosion is generally more severe, the coupled carbonation and chloride attack condition can be much more concerning. This brings back the question whether the inside of a structure can always be assumed to remain dry and safe from corrosion throughout its service life.

Certainly, it has been established that the presence of moisture, oxygen, and the aforementioned corrosive conditions promote corrosion and associated distress. Components that are subject to these conditions, either from

the beginning of service or due to changing conditions or structure use, can be susceptible to corrosion, whether in interior or exterior service conditions. Design to address corrosive conditions of new structures depends on the severity of the exposure as well as the intended service life. Expected durability associated with interior corrosion through the use of current code provisions may be acceptable for some intended service-life requirements and interior conditions, but more severe conditions, or extended service life for purposes of sustainability or overall service-life economy may require more thorough considerations during design.

As existing buildings age beyond service life achievable from application of typical building code provisions, concrete may begin to exhibit related distress. Specific water-soluble chloride limits for new construction were not included in ACI CODE-318 until 1983. Thus, when assessing existing structures, both age and exposure conditions must be considered in determining parameters for corrosion evaluation and potential requirements for corrosion control for interior portions of buildings. Indeed, corrosion assessment of interiors of structures should not be neglected for older structures or structures with conditions conducive to promoting corrosion.

### Susceptible Interior Conditions and Microclimates

The authors have observed interior corrosion in different structures including:

- Stadium restrooms and crawlspace areas;
- Classroom building interior portions of exterior columns;
- Food manufacturing facility interior slabs, protected roof joists, and structural framing;
- Textile plant structural framing members;
- Plating facility structural framing;
- Water treatment facility building areas adjacent to chemical treatment;
- Historic building framing;
- Boiler room slabs;
- Indoor pool facilities; and
- Interior coastal structure framing adjacent to exterior areas where contaminants penetrate the building envelope.

Certainly, this is not an exhaustive list and is only meant to provide examples. In fact, internal corrosion is commonly observed in components with high admixed chloride contents and inadvertent high moisture profiles, either due to building envelope issues or internal water leaks. Several examples of such corrosion are shown in Fig. 1 through 3. Corrosion of these structures has been observed from chlorides introduced at the time of mixing (Fig. 1), from penetration of contaminants such as chlorides or other halides (Fig. 2), or from a combination of factors including activation of admixed chlorides and external halide ingress or carbonation (Fig. 3). Depending on exposures, conditions may change from benign to corrosive for older structures or when structures are

repurposed. Figure 4 shows corrosion of interior concrete of a building constructed circa 1910-1911.

### Measures for Mitigating Interior Corrosion

#### New structures

One of the critical aspects of mitigating corrosion in interior concrete is limiting the amount of admixed chlorides. Currently, there are inconsistencies in the guidelines provided by various ACI documents, particularly between ACI CODE-318-19(22) and ACI PRC-222-19, the former requiring allowable admixed (water soluble) chloride content in concrete not to exceed 1.00% by mass of cement for dry conditions, the latter recommending a more conservative limit of 0.25% by mass of cementitious material. Considering numerous documented examples of reinforcement corrosion in interior concrete, it is clear that ACI Committee 222R's approach, which assumes that moisture levels in concrete could be sufficiently high for extended periods during the service life of a structure, might be advisable. Whether this limit should be 0.25% by mass of cementitious material requires further investigation. ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, is currently working on the development of a standard test method for critical chloride threshold in concrete, as supported by a Task Group and Concrete Research Council-funded research.<sup>8</sup> It's expected that after the finalization of this standard testing approach, and generation of data using the test, ACI will be in a position to unify allowable admixed chloride limits in concrete in a more informed way.

ACI PRC-222.3-11 provides a number of approaches for extending the service life of structures potentially exposed to corrosive conditions. For interior structures not exposed to external corrosives or possible corrosion of the concrete that may expose steel, the primary approach is to limit the amount of chlorides cast in during construction. For structures exposed to corrosives, reducing the penetrability of concrete to corrosive substances and minimizing cracking potential of



**Fig. 1: Corrosion of reinforcing steel in interior concrete of a classroom due to the activation of admixed chlorides under localized increase in moisture content**



**Fig. 2: Corrosion in interior concrete due to penetration of contaminants such as chlorides or other halides: (a) water treatment facility hallway near hypochlorite room; (b) interior of coastal condominium unit adjacent to exterior balcony at sliding glass door (photos courtesy of Kent Yarborough and Mason Undercoffer); (c) indoor water park reinforced concrete stairs (photo at lower right courtesy of Eric Couch); and (d) food manufacturing facility spicing area (arrow shows particularly damaged area near expansion joint)**

concrete is of importance. For concrete subjected to acids or other conditions that might be corrosive to the concrete itself, reduced penetrability and external protection may be necessary. In cases where very long service life is needed or desired, increased cover or reduced penetrability can provide added protection from carbonation.

Deterioration of aesthetic or protective measures should also be considered in design, as it should generally not be used as primary measures for mitigation. For example, tile, rubber backing on carpet, or coatings may be assumed to provide protection; however, these features may not be maintained or may be changed in the future. Upset conditions where concrete may potentially be exposed to corrosive conditions, such as water treatment facilities, from localized or global exposure to brining operations or salt addition in food manufacturing plants (Fig. 2(a) and (d)), or other similar conditions, should be considered. Influence of passive or active carrying of contaminants through steam, such as the movement of acetic acid (vinegar) or brining salts, should be considered for roof components (Fig. 3(e)). It should also not be assumed that exterior clad components will necessarily be immune to corrosion, as water can sometimes penetrate the envelope at windows and fenestrations.

While reducing  $w/cm$  may be an appropriate approach in some cases, the use of SCMs such as fly ash, silica fume, or slag

cement; use of corrosion inhibitors; or use of more corrosion-resistant steel may be appropriate or necessary depending on the required service life. Increasing the compressive strength may provide an indicator of better general quality of concrete but has been shown to be a generally poor predictor of durability, particularly if it is accompanied by increased cracking potential. Performance-based tests to demonstrate reduced penetrability, such as ASTM C1876<sup>9</sup> (resistivity or conductivity) or ASTM C1202<sup>10</sup> (chloride ion penetrability) may be useful. ACI Committee 321, Concrete Durability Code, is currently developing durability code provisions that may eventually be accepted into practice.

### Existing structures

Service-life extension of interior components of existing structures with corrosive conditions or corrosion-related deterioration can be similar to those of exterior exposures. As with all structures, preliminary and comprehensive condition assessments may be needed to evaluate contamination, moisture levels, deterioration, and corrosion activity. Documents from ACI Committees 222; 348, Structural Reliability and Safety; 546, Repair of Concrete; and 562, Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures, can be consulted with respect to evaluating and repairing structures with corrosion-related distress. ACI CODE-562-21<sup>11</sup>



**Fig. 3: Corrosion in interior concrete due to combination of factors: (a) boiler room slab in concrete with admixed chlorides and exposure to external bromides (photo on the left shows complete section loss); (b) plating facility with various chemical exposures; (c) column base with hydrochloric acid exposure in dye facility; (d) textile cleaning room floor with citric acid, chloride, and hydrogen peroxide exposures; and (e) ceiling at food manufacturing brining area with steam, acetic acid, and salt exposure**

has provisions for evaluating structural damage to determine the presence of potentially unsafe conditions that might require temporary shoring until final repairs are made.

Prior to the onset of corrosion, protective coatings may be used. In some cases, such as in food manufacturing facilities, compatibility with government regulations may be necessary. When corrosion commences, techniques including cathodic protection may be used. Level of damage, moisture conditions, temperature, concrete resistivity, intended service-life extension, and other factors must be considered. Practicalities of aesthetics, functionality, and monitoring also must be considered. In situations where distress and deterioration are advanced, partial or full replacement of affected areas may be needed. In these cases, compatibility of the new replacement concrete must be considered. This includes possible connection or separation of the new components with existing, load sharing, and reduction of



**Fig. 4: Corrosion of an interior slab in an historic building constructed circa 1910-1911**

shrinkage in the new concrete for reducing stresses and possibility for cracking in the new or existing concrete.

An important tool that can help prioritize repair and replacement operations of existing structures is reactive-transport modeling of concrete structures. Most service-life models in the literature have traditionally focused on chloride ingress in concrete. However, when interior concrete is considered, the issue is rather challenging as the problem involves coupled heat, moisture, and ionic transfer modeling that can also simulate reactive processes such as chloride binding, chloride release during pH-reducing processes (for example, acid ingress or carbonation), and interactions with other halides. Modeling these reactive processes has been a challenge because each depends on the cementitious material compositions and reactivities, as well as mixture proportions of the concrete. Recent developments in reactive-transport modeling of cementitious systems, where transport processes are modeled with coupled finite element algorithms and reactions modeled using thermodynamic modeling tools, have the potential to inform the decision-making process with respect to existing structures.<sup>12,13</sup>

## Concluding Remarks

Corrosion is not exclusive to exterior structures and components. This article provides a summary of conditions and structures that might be more susceptible to interior corrosion and discussion of considerations and mitigation measures. We hope that the information and examples provided in this article may offer practitioners some perspective on the types of conditions that may require additional consideration in design for longevity. It is clear that the guidance in the ACI documents with respect to defining allowable admixed chloride limits needs to be unified and should consider the possibility that dry conditions might not be guaranteed for interior concrete during the service life of a structure.

## References

1. ACI Committee 222, "Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI PRC-222-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 60 pp.
2. ACI Committee 222, "Guide to Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures (ACI PRC-222.3-11)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 28 pp.
3. AASHTO - R 101, "Standard Practice for Developing Performance Engineered Concrete Pavement Mixtures," American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, 2022, 14 pp.
4. Trejo, D.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "The Allowable Admixed Chloride Conundrum," *Concrete International*, V. 38, No. 5, May 2016, pp. 35-42.
5. Azad, V.J.; Suraneni, P.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; and Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Allowable Admixed Chloride Limits in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 115, No. 5, Sept. 2018, pp. 727-738.
6. 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.

7. Isgor, O.B., and Razaqpur, A.G., "Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transport and Carbonation Processes in Concrete Structures," *Cement and Concrete Composites*, V. 26, No. 1, Jan. 2004. pp. 57-73.

8. Adil, G.; Halmen, C.; Vaddey, P.; Pacheco, J.; and Trejo, D., "Multi-Laboratory Validation Study of Critical Chloride Threshold Test Method," *ACI Materials Journal*, V. 119, No. 6., Nov. 2022, pp. 91-100.

9. ASTM C1876-19, "Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 7 pp.

10. ASTM C1202-22, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 8 pp.

11. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code and Commentary (ACI CODE-562-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.

12. Azad, V.J.; Li, C.; Verba, C.; Ideker, J.H.; and Isgor, O.B., "A COMSOL-GEMS Interface for Modeling Coupled Reactive-Transport Geochemical Processes," *Computers & Geosciences*, V. 92, July 2016, pp. 79-89.

13. Isgor, O.B., and Weiss, W.J., "A Nearly Self-Sufficient Framework for Modelling Reactive-Transport Processes in Concrete," *Materials and Structures*, V. 52, No. 1, Feb. 2019.

Selected for reader interest by the editors.



**David G. Tepke**, FACI, is a Principal Engineer with SKA Consulting Engineers, Inc., in Charleston, SC, USA. He specializes in structural and materials evaluation, troubleshooting, repair, and service-life extension. He is a NACE/AMPP Certified Corrosion Specialist and Protective Coating Specialist. Tepke is the Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and a member of ACI Committees 201, Durability of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 321, Durability Code; and 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete. He is a licensed professional engineer.



**O. Burkan Isgor**, FACI, is a Professor in the School of Civil and Construction Engineering at Oregon State University, Corvallis, OR, USA. He is a past Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and a member of ACI Committees 236, Material Science of Concrete; and 365, Service Life Prediction. His research interests include corrosion of steel in concrete, service-life modeling, and reactive-transport modeling of cementitious systems. He is also a Fellow of the Canadian Society for Civil Engineering.

# ¿Está el interior de su estructura a salvo de la corrosión?

por David G. Tepke y O. Burkan Isgor.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto se encuentra generalmente asociada con puentes, estadios, parqueaderos, estructuras costeras, fachadas exteriores de edificios antiguos, y otras estructuras expuestas a condiciones de corrosión severa o persistente. Además, la mayoría de los modelos de vida útil se centran en exposición de ambientes exteriores.

Las estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes exteriores pueden ser vulnerables a la corrosión, representando una porción significativa de aquellas que podrían necesitar reparaciones anticipadas o un diseño y construcción orientados hacia la durabilidad. Sin embargo, no debemos pasar por alto que ciertos entornos interiores también pueden ser altamente corrosivos. Estos ambientes pueden encontrarse en instalaciones de producción, industriales y de tratamiento de aguas, e incluso en lugares aparentemente inofensivos y comunes como cocinas, cuartos de calderas, lavanderías, y en elementos que comparten exposiciones exteriores en estructuras con problemas de envolvente o en el revestimiento. Debido a que los efectos de estos entornos pueden no ser evidentes, es posible que los ingenieros a cargo no especifiquen los criterios de durabilidad adecuados ni asignen una categoría de exposición apropiada, lo que puede resultar en una reducción de la vida útil de estas estructuras.

Mientras que los códigos y guías actuales de la industria establecen medidas para combatir las condiciones corrosivas, y es probable que sigan evolucionando hacia requisitos de rendimiento más estrictos, muchas especificaciones se enfocan en los requisitos de resistencia y la relación agua-materiales cementantes (a/mc) y en las limitaciones de los contenidos de cloruros mezclados para garantizar una durabilidad demostrable. En este contexto, los objetivos de este artículo son proporcionar una perspectiva sobre algunos ambientes de exposición interiores comunes que pueden ser susceptibles a la corrosión, dar a los diseñadores algunos conceptos para tener en cuenta cuando piensen en la corrosión de los componentes interiores, y proporcionar directrices generales para los métodos de mitigación.

Partes de este artículo, incluidas algunas de las fotos, se presentaron en el conversatorio "Corrosión en interiores" como parte de una sesión durante la Convención Virtual de ACI - otoño 2020, "Experiencia de la industria sobre la corrosión inusual del acero de refuerzo."

## Antecedentes

ACI PRC-222-19<sup>1</sup> y ACI PRC-222.3-11<sup>2</sup> proporcionan discusiones sobre los mecanismos y periodos de iniciación y propagación de la corrosión. El acero de refuerzo en el concreto suele estar protegido de la corrosión a causa de la formación de una capa pasiva sobre el acero debido al elevado pH del agua de poros que se encuentra alrededor. La corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto puede iniciar si el pH de la solución de poros circundante se reduce, una cantidad suficiente de cloruros u otros haluros (por ejemplo, bromuros) están presentes a nivel del acero, u otras variaciones en las condiciones termodinámicas dan lugar a una ruptura de la capa pasiva. La reducción del pH a partir del mecanismo progresivo conocido como carbonatación se produce cuando el dióxido de carbono atmosférico se combina con la humedad para formar ácido carbónico que, además, reacciona con los productos de hidratación cementantes portadores de calcio. Los cloruros pueden penetrar desde el exterior de la estructura con el paso del tiempo, como en el caso de la exposición a productos químicos de deshielo o al agua de mar, o pueden ser vertidos a propósito en forma de aditivos que contienen cloruros o inadvertidamente por contaminación del material. Muchas otras condiciones de exposición asociadas a las industrias de manufactura pueden introducir otros haluros en el concreto en forma de ácidos o sales industriales, o contribuir de otro modo a la reducción del pH o a la desintegración del concreto que comprometa la protección del acero embebido.

La vida útil a largo plazo de las estructuras con respecto al deterioro relacionado con la corrosión implica limitar la cantidad de cloruros mezclados en las nuevas construcciones, la entrada de cloruros (o haluros) externos y las grandes variaciones termodinámicas a nivel del acero. Sin embargo, los profesionales de la industria debaten a menudo sobre cómo especificar el contenido admisible de cloruros añadidos y los métodos para reducir la penetración de los iones externos. Con respecto a la limitación de la penetración de los iones, los códigos de EE. UU. suelen poner límites a la relación  $a/mc$  máxima y a la resistencia a la compresión mínima especificada para limitar la penetrabilidad,

aunque es bien sabido que estos parámetros, en sí mismos, no son necesariamente exclusivos o los indicadores más beneficiosos para reducir la penetración de iones en el concreto. Los avances y las iniciativas se han centrado en el uso de pruebas basadas en el rendimiento o en el uso pragmático de materiales cementantes suplementarios (MCS) para conseguir características de penetración del ion cloruro que puedan influir en la iniciación de la corrosión<sup>3</sup>.

En un artículo anterior de Concrete International<sup>4</sup>, se demostró que existen orientaciones contradictorias en varios documentos del ACI sobre los límites admisibles de cloruros en mezclas de concreto. Aunque se han tomado una serie de medidas para reducir estas incoherencias, si estos límites se especifican particularmente con respecto al porcentaje de masa de concreto o al contenido de material cementante<sup>5</sup>, todavía existen diferencias importantes en varios documentos de ACI. Por ejemplo, ACI CODE-318-19(22), Tabla 19.3.2.1, establece que los contenidos de cloruros solubles admisibles en agua, en mezclas de concreto que contengan acero de refuerzo convencional, no deben superar el 1.00% en estado seco, el 0.30% en exposición a la humedad y el 0.15% cuando se presente exposición a la humedad y a una fuente externa de cloruros, todo ello en masa de materiales cementantes (con certificación)<sup>6</sup>. Adoptando un enfoque más conservador, ACI PRC-222-19, Tabla 4.2.3, limita el contenido admisible de cloruros (solubles en agua) en obra nueva al 0.25% de la masa de los materiales cementantes para el concreto reforzado convencional en condiciones secas y al 0.15% en condiciones húmedas. El límite significativamente inferior adaptado por ACI PRC-222-19 para condiciones secas está motivado principalmente por la definición de condiciones secas y si estas condiciones pueden mantenerse durante toda la vida útil de una estructura. ACI PRC-222-19, sección 4.2.3, describe las condiciones interiores que pueden ser más susceptibles a la corrosión en la discusión sobre la limitación de cloruros en las mezclas de concreto:



"Los lugares interiores que se humedecen ocasionalmente, como cocinas, baños y lavaderos; los edificios construidos con concreto ligero bombeado que se sella posteriormente antes de que se seque el concreto (por ejemplo, con baldosas de vinilo); y los lugares interiores con alta humedad pueden ser susceptibles de sufrir daños por corrosión. Se debe tener en cuenta que el diseñador tiene poco control sobre el cambio de uso o el entorno de servicio de un edificio, pero debería especificarse el contenido de cloruros de los constituyentes de la mezcla de concreto.<sup>1"</sup>

Un ingeniero puede preguntarse: ¿Puedo suponer que el interior de una estructura permanecerá seco y libre de exposición a contaminantes corrosivos durante toda su vida útil, o debo considerar la posibilidad de una exposición localizada o más global a condiciones corrosivas?

ACI CODE-318-19(22) establece requisitos de recubrimiento basados, en parte, en estar "expuesto a la intemperie" o no estarlo. También indica en la Sección 20.5.1.4.1, que: "En ambientes corrosivos u otras condiciones de exposición severas, el recubrimiento de concreto especificado se incrementará según se considere necesario"<sup>6</sup>. Estas disposiciones pueden ser relevantes tanto para las partes interiores como exteriores de una estructura, pero la pregunta sigue en pie: ¿Qué es un ambiente corrosivo? Aunque, en principio, la disposición puede abordar muchas condiciones que un ingeniero típicamente podría considerar corrosivas, un diseñador puede no siempre considerar la posibilidad de condiciones corrosivas o la posibilidad de futuras condiciones corrosivas en ambientes de exposición interiores. Puede que no siempre sea correcto asumir que los ambientes interiores o partes de ellos permanecerán libres de exposición a contaminantes corrosivos con una humedad relativa (HR) en el rango de 30 a 50% durante la vida útil, tal como es típico de ambientes interiores de edificios cómodos y habitables. La exposición en el interior a productos químicos, sales o condiciones de humedad excesiva puede, en algunos casos provocar daños por corrosión durante la vida útil de la estructura. Si bien se espera que una baja humedad relativa (HR) en el interior de los edificios restrinja la corrosión, es posible que prevalezcan perfiles localizados de alta humedad o condiciones de humedad cambiantes, por ejemplo, en cocinas, duchas, piscinas y baños, componentes con condensación, habitaciones con ventanas abiertas, así como cuando la estructura experimenta problemas con el revestimiento del edificio o persistentes fugas de tuberías de agua incrustadas en el concreto. Si el concreto en estas condiciones internas contiene altas cantidades de cloruros mezclados (por ejemplo, 1.00% en masa de cemento, tal como lo permite el ACI CODE-

318-19(22) en condiciones secas), la corrosión del acero de refuerzo podría convertirse en un problema significativo.

Al considerar las diferencias entre el concreto interior y exterior de una estructura, también es necesario reflexionar sobre la carbonatación. Está ampliamente establecido y observado que la velocidad de penetración de la carbonatación es mayor con una HR comprendida entre el 40 y el 75% aproximadamente<sup>7</sup>. Los autores han observado una carbonatación relativamente profunda en componentes estructurales internos de concreto, en los que generalmente no se considera el espesor del recubrimiento para la protección contra la corrosión. La carbonatación por sí sola puede romper la capa pasiva sobre el acero; no obstante, las tasas de corrosión inducidas por la carbonatación suelen ser significativas cuando hay una humedad adecuada alrededor de la armadura. Esto generalmente ocurre con una humedad relativa superior al 70%, por lo que convencionalmente se asume que la corrosión es mínima en la mayoría de los concretos interiores. Los problemas de corrosión inducida por carbonatación más frecuentes pueden presentarse en áreas expuestas a humedad moderada, como las mencionadas anteriormente, o cuando las condiciones cambian a lo largo del tiempo debido a la eliminación de revestimientos, recubrimientos de suelos o reutilización, así como a problemas con el revestimiento del edificio o persistentes fugas de agua. Otra situación potencialmente más crítica ocurre cuando se liberan cloruros en la mezcla que estaban unidos a productos de hidratación del cemento, lo cual sucede cuando el pH se reduce por la carbonatación<sup>7</sup>. Debido a que la corrosión inducida por cloruros puede mantenerse a niveles significativos con niveles de humedad relativa más bajos que la carbonatación, y el daño por corrosión inducida por cloruros es generalmente más

severo, la combinación de carbonatación y ataque por cloruros puede ser mucho más preocupante. Esto plantea nuevamente la cuestión de si se puede asumir que el interior de una estructura permanecerá siempre seco y libre de corrosión durante toda su vida útil.

Sin duda, se ha determinado que la presencia de humedad, oxígeno y las condiciones corrosivas previamente mencionadas propician la corrosión y los problemas relacionados. Los componentes expuestos a estas condiciones, desde el comienzo de su puesta en servicio o debido a cambios ambientales o al uso de la estructura, podrían ser vulnerables a la corrosión, tanto en condiciones de exposición internas como externas. El diseño orientado a combatir las condiciones corrosivas de las nuevas estructuras depende de la severidad de la exposición y de la vida útil proyectada. La durabilidad prevista asociada con la corrosión interna mediante el uso de las disposiciones del código actual puede ser aceptable para algunos requerimientos de vida útil y condiciones internas. Sin embargo, para condiciones más severas, o una vida útil prolongada por motivos de sostenibilidad o economía a largo plazo, podrían requerirse consideraciones más rigurosas durante la fase de diseño.

A medida que los edificios existentes envejecen más allá de la vida útil alcanzable mediante la aplicación de las disposiciones típicas de los códigos de construcción, el concreto puede empezar a mostrar problemas relacionados. Los límites específicos de cloruros solubles en agua para nuevas construcciones no se incluyeron en ACI CODE-318 hasta 1983. Por lo tanto, cuando se evalúan estructuras existentes, deben considerarse tanto la edad como las condiciones de exposición para determinar los parámetros de evaluación de la corrosión y los requisitos potenciales para el control de la corrosión en las partes interiores de los edificios. De hecho, la evaluación de la corrosión de los interiores de las estructuras no debe descuidarse en el caso de estructuras antiguas o con condiciones que favorezcan la corrosión.

## Condiciones interiores y microclimas susceptibles

Los autores han observado corrosión por exposición a ambientes interiores en diferentes estructuras, entre las que se encuentran:

- Los baños de los estadios y las zonas de arrastre;
- Partes interiores de columnas exteriores de salones de clases;
- Losas interiores, vigas de techo protegidas y marcos estructurales en instalaciones de fabricación de alimentos;
- Elementos estructurales de fábrica textil;
- Marcos estructurales de planta de galvanizado;
- Áreas de planta de tratamiento de agua adyacentes a la zona de tratamiento químico;
- Marcos estructurales de edificio histórico;
- Losas de cuarto de calderas;
- Instalaciones de piscinas cubiertas; y
- Elementos estructurales interiores adyacente a zonas exteriores de edificaciones costeras, donde los contaminantes penetran en la envolvente del edificio.



**Fig. 1:** Corrosión del acero de refuerzo en el concreto interior de un salón de clases debido a la activación de cloruros mezclados bajo un aumento localizado en el contenido de humedad.

Ciertamente, no se trata de una lista exhaustiva y sólo pretende proporcionar ejemplos. De hecho, la corrosión interna se observa comúnmente en componentes con un alto contenido de cloruro mezclado y perfiles inadvertidamente altos de humedad, ya sea debido a problemas de la envolvente del edificio o a fugas internas de agua. En las Figuras 1 a 3 se muestran varios ejemplos de este tipo de corrosión. La corrosión de estas estructuras se ha observado a partir de cloruros añadidos en el momento de la mezcla (Fig. 1), de la penetración de contaminantes como cloruros u otros haluros (Fig. 2), o de una combinación de factores que incluyen la activación de cloruros mezclados y la entrada de haluros externos o la carbonatación (Fig. 3). Dependiendo de las exposiciones, las condiciones pueden cambiar de benignas a corrosivas en las estructuras más antiguas o cuando las estructuras se reutilizan. La Figura 4 muestra la corrosión del concreto interior de un edificio construido alrededor de 1910-1911.

## Medidas para mitigar la corrosión en ambientes de exposición interior

### Nuevas estructuras

Uno de los aspectos fundamentales para mitigar la corrosión en el concreto interior es limitar la cantidad de cloruros añadidos. Actualmente, existen discrepancias en las directrices proporcionadas por varios documentos del ACI, en particular entre el ACI CODE-318-19(22) y el ACI PRC-222-19. El primero establece que el contenido permitido de cloruros mezclados (solubles en agua) en el concreto no debe exceder el 1.00% en peso de cemento para condiciones secas, mientras que el segundo recomienda un límite más conservador del 0.25% en peso del material cementante. Considerando los numerosos ejemplos documentados de corrosión del acero de refuerzo en concretos de estructuras interiores, está claro que el enfoque del Comité 222R del ACI, que supone que los niveles de humedad en el concreto podrían ser lo suficientemente altos durante largos periodos en la vida útil de una estructura, podría ser deseable. Si este límite debiese ser del 0.25% en peso del material cementante, se requiere entonces de más investigación. El Comité 222 del ACI, Corrosión de Metales en el Concreto, trabaja actualmente en el desarrollo de un método de ensayo estándar

para el umbral crítico de cloruros en el concreto, con el apoyo de un Grupo de Trabajo y de una investigación financiada por el Concrete Research Council<sup>8</sup>. Se espera que tras la finalización de este método de ensayo estándar, y la generación de datos utilizando el ensayo, el ACI pueda estar en condiciones de unificar formalmente los límites de cloruros admisibles en el concreto.

El ACI PRC-222.3-11 proporciona una serie de enfoques para prolongar la vida útil de las estructuras que podrían estar expuestas a condiciones corrosivas. Para las estructuras interiores que no están expuestas a corrosivos externos o a una posible corrosión del concreto que pueda exponer el acero, el enfoque principal consiste en limitar la cantidad de cloruros incorporados durante la construcción. Para las estructuras expuestas a agentes agresivos, es importante reducir la permeabilidad del concreto a las sustancias corrosivas y minimizar el potencial de agrietamiento del concreto. Para los elementos expuestos a ácidos u otras condiciones que puedan ser corrosivas para el propio concreto, puede ser necesaria una permeabilidad reducida y una protección externa. En los casos en que se requiera o se desee una vida útil extremadamente larga, el aumento del recubrimiento o la reducción de la permeabilidad pueden ofrecer una mayor protección contra la carbonatación.

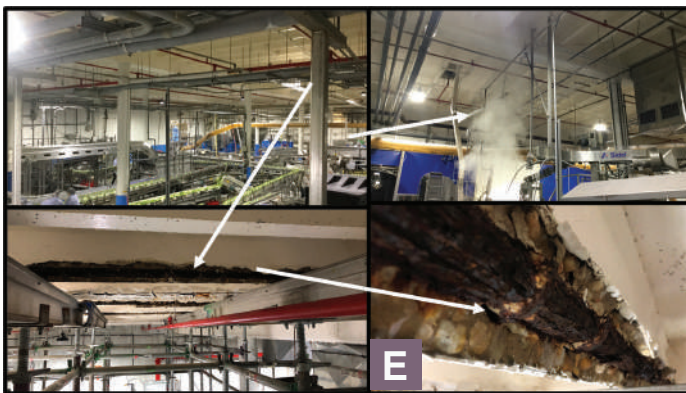
El deterioro de las medidas estéticas o de protección también debe considerarse en el diseño, ya que generalmente no se utilizan como la principal medida de mitigación. Por ejemplo, se puede suponer que las baldosas, los revestimientos de goma para las superficies de las alfombras o los recubrimientos ofrecen protección; sin embargo, es posible que estas características no se mantengan o se modifiquen en el futuro. En este sentido, se deben tener en cuenta las condiciones cambiantes en las que el concreto pueda estar potencialmente expuesto a condiciones corrosivas, como en las instalaciones de tratamiento de agua, por exposición localizada o global a operaciones de salmuera o adición de sal en plantas de fabricación de alimentos (Fig. 2(a) y (d)), u otras condiciones similares. La influencia del transporte pasivo o activo de contaminantes a través del vapor, como el desplazamiento de ácido acético (vinagre) o sales de salmuera, debe considerarse en los componentes del techo (Fig.

3(e)). Tampoco debe suponerse que los componentes externos revestidos serán necesariamente inmunes a la corrosión, ya que el agua puede penetrar ocasionalmente en el revestimiento a través de las ventanas y otras aberturas.

Aunque que la reducción de la relación a/mc puede ser un enfoque apropiado en algunos casos, el uso de MCS tales como cenizas volantes, humo de sílice o cemento de escoria; el uso de inhibidores de corrosión; o el uso de acero más resistente a la corrosión puede ser apropiado o necesario dependiendo de la vida de servicio requerida. El aumento de la resistencia a la compresión puede proporcionar un indicador de una mejor calidad general del concreto, pero se ha demostrado que, en general, no es un buen predictor de la durabilidad, sobre todo si va acompañado de un aumento del potencial de fisuración. Pueden ser útiles los ensayos basados en el rendimiento para demostrar una permeabilidad reducida, como ASTM C1876<sup>9</sup> (resistividad o conductividad) o ASTM C1202<sup>10</sup> (permeabilidad de iones cloruro). El Comité 321 del ACI, Código de Durabilidad del Concreto, está elaborando actualmente disposiciones del código de durabilidad que, con el tiempo, podrían aceptarse en la práctica.



**Fig. 2: Corrosión en concreto interior debido a la penetración de contaminantes como cloruros u otros haluros: (a) pasillo de instalaciones de tratamiento de agua cerca de la sala de hipoclorito; (b) interior de una unidad de condominio costero adyacente al balcón exterior en la puerta corrediza de vidrio (fotos cortesía de Kent Yarborough y Mason Undercoffer); (c) escaleras de concreto reforzado en un parque acuático interior (foto en la parte inferior derecha cortesía de Eric Couch); y (d) área de condimentación en una instalación de fabricación de alimentos (la flecha muestra un área particularmente dañada cerca de la junta de expansión).**



**Fig. 3:** Corrosión en concreto interior debido a la combinación de factores: (a) losa de sala de calderas en concreto con cloruros mezclados y exposición a bromuros externos (la foto a la izquierda muestra una pérdida completa de sección); (b) instalación de galvanizado con varias exposiciones químicas; (c) base de columna con exposición a ácido clorhídrico en una instalación de teñido; (d) suelo de sala de limpieza textil con exposiciones a ácido cítrico, cloruro y peróxido de hidrógeno; y (e) techo en área de salmuera de fabricación de alimentos con exposición a vapor, ácido acético y sal.



**Fig. 4:** Corrosión de una losa interior en un edificio histórico construido aproximadamente entre 1910 y 1911.

## Estructuras existentes

La extensión de la vida útil de los componentes interiores de las estructuras existentes con condiciones corrosivas o deterioro relacionado con la corrosión puede ser similar a la de las exposiciones exteriores. Como ocurre con todas las estructuras, pueden ser necesarias evaluaciones preliminares y exhaustivas del estado para evaluar la contaminación, los niveles de humedad, el deterioro y la actividad corrosiva. Los documentos de los Comités del ACI 222; 348, Confiabilidad y Seguridad Estructural; 546, Reparación del Concreto; y 562, Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto, pueden consultarse con respecto a la evaluación y reparación de estructuras con problemas relacionados con la corrosión. El Código ACI-562-21<sup>11</sup> tiene disposiciones para evaluar los daños estructurales a fin de determinar la presencia de condiciones potencialmente inseguras que podrían requerir un apuntalamiento temporal hasta que se realicen las reparaciones finales.

Antes del inicio de la corrosión, pueden utilizarse revestimientos protectores. En algunos casos, como en las instalaciones de fabricación de alimentos, puede ser necesaria la compatibilidad con la normativa gubernamental. Cuando comienza la corrosión, pueden utilizarse técnicas que incluyan la protección catódica. Para esto, es necesario tener en cuenta el nivel de daños, las condiciones de humedad, la temperatura, la resistividad del concreto, la extensión prevista de la vida útil y otros factores. También deben tenerse en cuenta los aspectos estéticos, funcionales y de control. En situaciones en las que el deterioro es avanzado, puede ser necesaria la sustitución parcial o total de las zonas afectadas. En estos casos, debe considerarse la compatibilidad del concreto de sustitución, lo cual incluye la posible conexión o separación de los nuevos componentes con los existentes, el reparto de cargas y la reducción de retracción en el concreto nuevo para reducir las tensiones y la posibilidad de fisuración en el concreto nuevo o en el existente.

Una herramienta importante que puede ayudar a priorizar las operaciones de reparación y sustitución de las estructuras existentes es modelar el transporte de agentes agresivos hacia la estructura de concreto. La mayoría de los modelos de vida útil reportados en la literatura se han centrado tradicionalmente en el ingreso de cloruros en el concreto. Sin embargo, cuando se considera el concreto interior, la cuestión es bastante complicada, ya que el problema implica incluir en el modelo la combinación de calor, humedad y transferencia iónica que también puede simular procesos reactivos como la fijación de cloruros, la liberación de cloruros durante procesos que reducen el pH (por ejemplo, la entrada de ácidos o la carbonatación) y las interacciones con otros haluros. Modelar estos procesos reactivos ha sido un reto porque cada uno de ellos depende de las composiciones y reactividades de los materiales cementantes, así como de las proporciones de mezcla del concreto. Los recientes avances en modelos de transporte reactivo de sistemas cementantes, en los que los procesos de transporte se modelan con algoritmos de elementos finitos acoplados y las reacciones se modelan utilizando herramientas de modelización termodinámica, tienen el potencial de informar y mejorar el proceso de toma de decisiones con relación a las estructuras existentes<sup>12,13</sup>.

## Conclusiones

La corrosión no se limita a las estructuras y componentes exteriores. Este artículo ofrece un resumen de las condiciones y estructuras que pueden ser más propensas a la corrosión interior, así como un análisis de las consideraciones y medidas de mitigación. Esperamos que la información y los ejemplos proporcionados en este artículo brinden a los profesionales una perspectiva sobre los tipos de condiciones que pueden requerir consideraciones adicionales en el diseño para la vida útil. Queda claro que se necesita unificar la orientación de los documentos del ACI con respecto a la definición de los límites permitidos de cloruros añadidos y que se debe tener en cuenta la posibilidad de que las condiciones secas no estén garantizadas para el concreto interior durante la vida de servicio de una estructura.

## Referencias

1. ACI Committee 222, "Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI PRC-222-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 60 pp.
2. Comité 222 del ACI, "Guide to Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures (ACI PRC-222.3-11)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 28 pp.
3. AASHTO - R 101, "Standard Practice for Developing Performance Engineered Concrete Pavement Mixtures," American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, 2022, 14 pp.
4. Trejo, D.; Isgor, O.B.; y Weiss, W.J., "The Allowable Admixed Chloride Conundrum", Concrete International, V. 38, n.º 5, mayo de 2016, pp. 35-42.
5. Azad, V.J.; Suraneni, P.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; e Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Allowable Admixed Chloride Limits in Concrete," ACI Materials Journal, V. 115, No. 5, Sept. 2018, pp. 727-738.
6. 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.
7. Isgor, O.B., y Razaqpur, A.G., "Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transport and Carbonation Processes in Concrete Structures," Cement and Concrete Composites, V. 26, No. 1, Jan. 2004. pp. 57-73.
8. Adil, G.; Halmen, C.; Vaddey, P.; Pacheco, J.; y Trejo, D., "Multi-Laboratory Validation Study of Critical Chloride Threshold Test Method," ACI Materials Journal, V. 119, No. 6., Nov. 2022, pp. 91-100.
9. ASTM C1876-19, "Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 7 pp.
10. ASTM C1202-22, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 8 pp.
11. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures-Code and Commentary (ACI CODE-562- 21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.
12. Azad, V.J.; Li, C.; Verba, C.; Ideker, J.H.; e Isgor, O.B., "A COMSOL-GEMS Interface for Modeling Coupled Reactive- Transport Geochemical Processes", Computers & Geosciences, V. 92, julio de 2016, pp. 79-89.
13. Isgor, O.B., y Weiss, W.J., "A Nearly Self-Sufficient Framework for Modelling Reactive-Transport Processes in Concrete," Materials and Structures, V. 52, No. 1, Feb. 2019.



**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 en revestimientos protectores certificado por NACE/ AMPP. Tepke es presidente del Comité 222 de ACI, Corrosión de Metales en el concreto, y miembro de los Comités ACI 201, Durabilidad del concreto; 301, Especificaciones para la construcción de concreto; 321, Código de durabilidad; y 329, Criterios de rendimiento del concreto premezclado. Es ingeniero profesional autorizado.



**O. Burkan Isgor**, FACI, es catedrático en la Escuela de Construcción e Ingeniería Civil en la Universidad Estatal de Oregón, Corvallis, OR, EE. UU. Ha sido presidente del Comité 222 del ACI, Corrosión de metales en el concreto, y miembro de Comités ACI 236, Ciencia de los materiales del concreto; y 365, Predicción de vida útil. Sus intereses de investigación incluyen la corrosión del acero en el concreto, modelos de vida útil, y modelos del transporte reactivo de sistemas cementosos. También es miembro de la Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil.

**La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Colombia**

*Título: ¿Está el interior de su estructura a salvo de la corrosión?*



**Traductor:**  
*Ing. Wilmer Junior  
Urango Romero*



**Revisora Técnica:**  
*PhD. Margareth Josefina  
Dugarte Coll*