

Design Durability Assurance Experiences on Infrastructure Projects in Australia

by Warren Green, David McDonald, John Kwong, and Christopher Lim

Durability planning is a system that formalizes the process of achieving durability through appropriate design, construction, and maintenance.¹ All engineering materials deteriorate with time, at rates dependent upon the type of material, the severity of the environment, and the deterioration mechanisms involved. The objective is to select the most cost-effective combination of materials to achieve the required design life. In doing so, it is critical to realize that the nature and rate of deterioration of materials is a function of their environments.

Accordingly, the environment is a “load” on a material, just as a force is a “load” on a structural component. It is the combination of the structural and environmental loads in synergy that determines the performance of the structural component.

The advantages of durability planning include, but are not limited to:

- Establishment of a continuous link (through-train) in durability objectives between design, construction, and maintenance;
- Increased likelihood of design life being achieved by structures and buildings;
- Prediction of materials’ performances in their service environments;
- Reduced life-cycle costs;
- Establishment of predictable maintenance actions and costs;
- Reduced maintenance and repair costs;
- Enabling the initiation of fiscal maintenance management; and
- Minimization of downtime in operations.

Durability Philosophy

Protective measures to be adopted for structures and elements depend on the risk of deterioration, the cost of preventative measures, the feasibility and cost of remedial actions, and ongoing preventative maintenance activities. It is typical that these need to be balanced to arrive at the best

whole-of-life cost and optimized value for money. A holistic project-through durability philosophy is depicted in the flow chart shown in Fig. 1.

Durability Assessment Reports

A durability assessment report (DAR) documents durability strategies to provide a continuous link between design intent, construction, and maintenance. A qualitative analysis of design information is used to identify the level of durability risk by considering the probability (or likelihood) of deterioration and the consequences of deterioration.

The DAR then entails:

- Inputs in terms of materials’ durability:
 - Review of material data (type, asset item design/detail, and construction);
 - Review of environmental data (including determination of exposure classification or durability limit state);
 - Review of design-life requirements;
 - Identification of potential deterioration mechanisms; and
 - Identification of the critical durability issues with respect to construction; and
 - Outputs of the process (where relevant):
 - Design durability options and materials selections; and
 - Durability checklists.
- Durability checklists will include:
- Environmental tests, including groundwater and soil analyses;
 - Exposure classifications, based on relevant standards, codes, and guidelines; and
 - Durability assessments listing durability issues to be addressed, including:
 - Element (such as a girder);
 - Sub-element (such as concrete);
 - Minimum required design life (in years);
 - Durability issue (such as corrosion); and
 - Durability-assessment findings (with methods to meet the design requirements).

Durability Risk Analysis

The durability risk analysis classifies risk by considering the likelihood of deterioration and the consequences of deterioration. The likelihood of deterioration is a factor related to the materials selected, the design requirements, and the environment. The consequence of deterioration is rated based on the risks that it may endanger people or operations.

The risk rating after durability design relates similarly to the significance of material failure, the proposed materials, and the associated design and construction practices. Levels of risk rating include:

- Normal (compliant)—No increased risk or likelihood or consequence of deterioration that would affect operations or safety during the design life, and the asset is compliant with the durability requirements of the contract;
- Increased—There is an increased likelihood or consequence of deterioration that may affect operations or safety during the design life. Modification of the materials or design to reduce the likelihood or consequence of deterioration is required; and
- High—There is an increased likelihood and consequence of deterioration that will affect operations and/or safety during the design life. Significant changes to the materials or design to reduce the likelihood or consequence of deterioration will be required.

A qualitative analysis used to identify the level of risk rating is shown in Table 1.

Where deterioration risk is high, detailed changes to the design and/or materials are required to achieve material design life within each design package to reduce the deterioration risks to normal. Through integration of the key durability requirements and considerations such as design life, material selection, and maintenance, it is possible to achieve the anticipated life of an asset.

Inspection, Monitoring, and Maintenance

Durability starts with design and construction, but fundamental to ensuring the durability of assets is the regular cleaning, preventative maintenance (if permitted), and refurbishment to ensure the assets perform their functions efficiently and effectively over their intended design lives. Planned maintenance in response to regular inspections, condition monitoring, and analysis of reports would underpin any asset maintenance strategy.

Inspection during the construction phase enables early identification of

issues that have the potential to affect the long-term durability of the constructed assets. The inspection and quality assurance process should include:

- Confirmation of specification compliance for all materials;
- Confirmation that materials installations meet requirements defined in the durability assessment checklists, including:
 - Appropriate measures are adopted on site during adverse weather that could impact long-term durability;
 - Materials are not contaminated; and

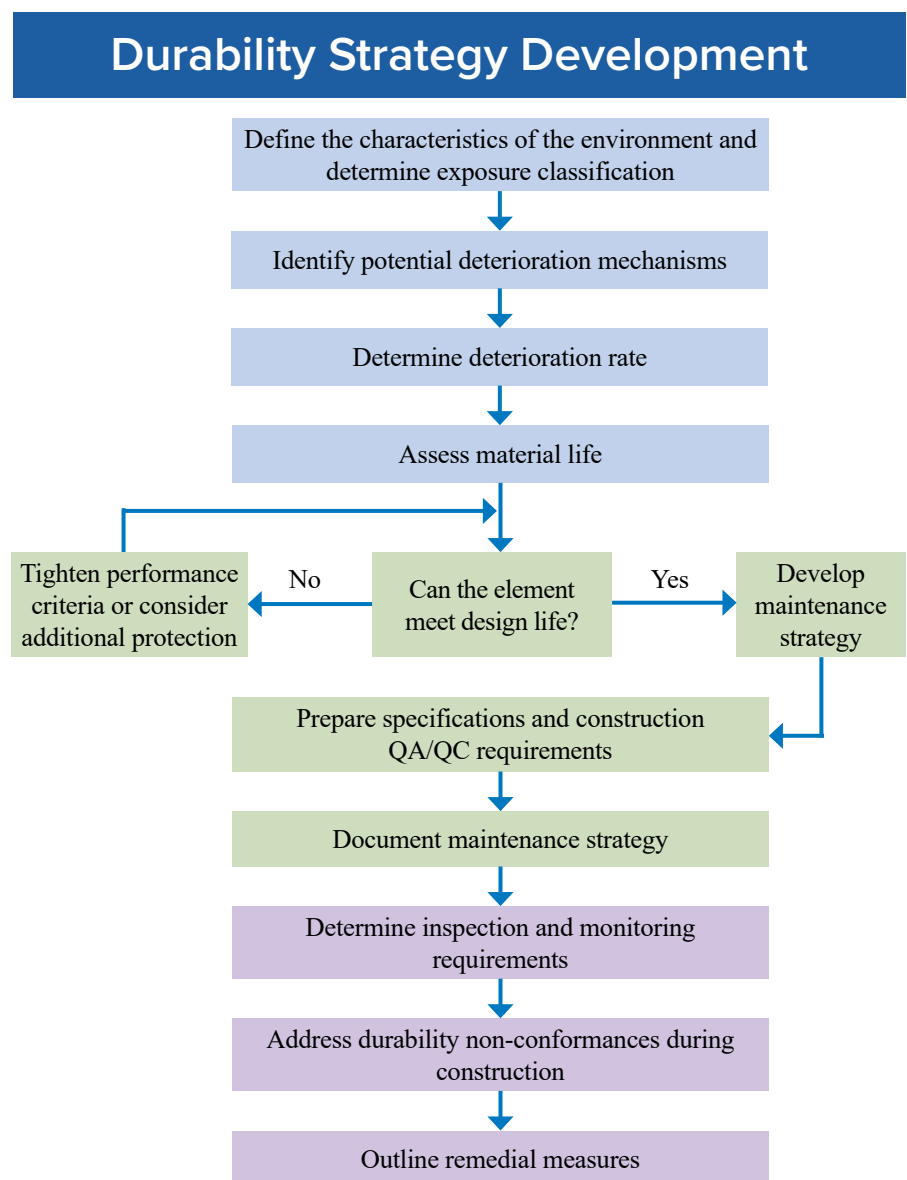


Fig. 1: Development of durability strategy for a project

Table 1:
Durability risk analysis methodology

		Consequences of deterioration	
		Normal	Increased
Likelihood of deterioration	Normal	Normal/compliant risk	Increased risk
	Increased	Increased risk	High risk

- Durability review of nonconformances, construction defect records, and defect rectification plans.

Regular inspections and detailed monitoring may identify defects or damage that could compromise the durability of the asset and therefore trigger maintenance activity. Such triggers may include:

- Impact damage;
- Cracking of concrete; and
- Fire damage.

Durability Assessment of Marine Exposure

Durability assessments required by most codes generally follow a path of assessment to determine the exposure using pre-assigned criterion. However, the path varies considerably depending on which code or standard is being used. Some of the codes or standards that are commonly used in the United States, Europe, and Australia are outlined as follows.

United States

ACI Committee 321, Concrete Durability Code, has the goal to develop: “a mandatory-language document addressing concrete durability. The code...will provide minimum prescriptive requirements and, where applicable, provide alternative performance requirements for achieving concrete durability. The code will identify durability exposure categories and classes, and steps for durability planning, and provide requirements for durability design, construction/quality management, and maintenance. The code will be a stand-alone document that can be referenced in other standards.”²

The committee is proceeding with chapters that include, but are not necessarily limited to:

- Durability exposure categories;
- Durability design requirements;
- Maintenance requirements;
- Construction; and
- Quality.

Currently, ACI CODE-318-19(22),³ which is the building code most commonly used in the United States, has numerical rankings for severity in regard to freezing-and-thawing, sulfate, water, and chloride exposure. In the case of chloride

exposure, severity rankings range from C0 (concrete dry or protected from moisture) to C2 (concrete exposed to moisture and an external source of chlorides). Sources of chlorides include deicing chemicals, salt, brackish water, seawater, or spray from these sources. Concrete subject to exposure class C2 must have a water-cementitious materials ratio (w/cm) no higher than 0.40. In addition, ACI CODE-318-19(22) specifies minimum cover over reinforcing bars.

Europe

BS EN 206:2013⁴ is used as the design specification in Europe applicable to cast-in-place or precast structures. The exposure ratings are determined based upon the exposure types with higher-number exposures being given for more severe exposure, for example:

- XC indicates corrosion of the reinforcement induced by carbonation; and
- XS indicates corrosion of the reinforcement induced by chlorides from seawater.

Based upon the determined exposure, a maximum water-cement ratio (w/c), minimum cement content, and minimum strength class are then prescribed as outlined in Table F.1 from BS EN 206:2013.⁴

Eurocode implicitly assumes a design working life (service life) of 50 years. A procedure is included within EN 1992-1-1:2004⁵, which involves a modification to the structural class of concrete based on the exposure class for cases where designers want to either take a “credit” for higher-quality materials and/or construction quality, or to achieve design service lives greater than 100 years.

Australia

In Australia, the two main codes used for concrete are AS 3600:2018⁶ for buildings with design lives of 50 years and AS 5100.5:2017⁷ for bridges with design lives of 100 years. These codes provide specific requirements for various exposures that include minimum cement quantities, maximum w/c , and curing. Minimum concrete cover is also provided based upon the exposure and concrete compressive strength.

Exposures for marine structures are divided into:

- Permanently submerged;
- In spray zone (1 m [3 ft] above wave crest level); and
- In tidal/splash zone (immediately below the spray zone, including the zone 1 m below lowest tide and up to 1 m above highest tide on vertical structures, and all exposed soffits of horizontal structures over the sea).

Additional exposures area provided for various distances away from the coastline.

While these two codes provide requirements for 50- and 100-year designs, minimal design guidance is included for other design lives.

Comparison of various codes and standards

The mentioned ACI, EN, and AS codes and specifications address exposure classes; however, only the Australian Bridge

Design Standard (AS 5100.5:2017)⁷ provides cover requirements as a function of concrete compressive strength or w/c (which are common surrogates for concrete permeability). However, guidance for longer design life of structures is scant and generally relies on guidance from a durability specialist.

Case Study

Durability assessment of marine exposure—100-, 150-, and 200-year design lives

An example project considered herein is a reinforced concrete (RC) bridge in a marine exposure environment. As part of the conceptual design for the project, an analysis of durability options was to be provided. This analysis was to consider durability planning for various design lives to determine what impact the design life may have on the cost of construction. A conceptual design durability assessment was required to outline concrete quality and reinforcement cover requirements for select RC elements of the bridge to meet 100-, 150-, and 200-year design lives.

The main components of this bridge that were included in the conceptual durability assessment included:

- Piles—driven steel linings (sacrificial) with RC infill piles;
- Pile caps—cast-in-place RC;
- Pier columns—cast-in-place RC; and
- Girders—prestressed precast concrete.

The principal for the project was a road authority, and any conceptual durability assessment needed to be based on particular concrete mixtures to be used (refer to Table 2). The

RC elements for the bridge were designed to meet the requirements of AS 5100.5:2017⁷ and the road authority's structural concrete specification.

AS 5100.5:2017⁷ provides concrete quality and cover requirements to meet a 100-year design life but does not provide guidance on concrete requirements for more than 100 years.

The minimum concrete quality and cover requirements for the bridge concrete elements, over a 100-year design life in accordance with AS 5100.5:2017⁷ and based on the use of fly ash and cement blended concretes only, are summarized in Table 3. The concrete mixtures proposed in the road authority structural concrete specification (refer to Table 2) generally meet or exceed these requirements.

In a coastal marine environment, the principal deterioration mechanism of the RC bridge elements considered in the conceptual durability options analysis was initiation of chloride-induced corrosion of the reinforcement. Deterministic chloride diffusion modeling was then undertaken to determine the required reinforcement type for each of the proposed concretes and exposure environments to meet the 100-, 150-, and 200-year design lives using minimum concrete covers outlined in AS 5100.5:2017.⁷ In addition, the required minimum concrete cover for carbon steel to achieve 100-, 150-, and 200-year design lives for the main concrete elements was also tabulated to allow comparison. Table 4 provides a summary of the findings inclusive of how the road authority concrete mixtures were considered.

Table 2:
Principal (road authority) proposed concrete mixtures

Element	AS 5100.5:2017 exposure classification	Minimum compressive strength f_c , MPa	Minimum cementitious content, kg/m ³	Supplementary cementitious content, %	Maximum. w/b [†]
Piles (steel lined cast-in-place)	B2 (permanently submerged)	40	400	25 FA*	0.45
	C2 (tidal/splash)	50	450	30 FA	0.40
Pile caps (cast-in-place)	C2 (tidal/splash)	55	470	30 FA	0.36
Pier columns (cast-in-place)	C1 (spray)	50	450	30 FA	0.40
	C2 (tidal/splash)	55	470	30 FA	0.36
Girders (precast)	B2 (coastal atmospheric)	40	400	25 FA	0.45
	B2 (coastal atmospheric)	55	470	20 FA	0.45

*FA is fly ash

[†] w/b is water-binder ratio

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³

Table 3:
Quality and cover requirements for fly ash and cement blended concrete for a 100-year design life

Element	AS 5100.5:2017 exposure classification	Minimum compressive strength f'_c , MPa	Minimum cementitious content, kg/m ³	Supplementary cementitious content, %	Maximum w/b [†]	Minimum cover [‡] , mm
Piles (steel lined cast-in-place)	B2 (permanently submerged)	40	400	20 to 30 FA [*]	0.45	60
	C2 (tidal/splash)	50	470	25 to 40 FA	0.36	80
Pile caps (cast-in-place)	C2 (tidal/splash)	50	470	25 to 40 FA	0.36	80
Pier columns (cast-in-place)	C1 (spray)	50	450	25 to 40 FA	0.40	70
	C2 (tidal/splash)	50	470	25 to 40 FA	0.36	80
Girders (precast)	B2 (coastal atmospheric)	40	400	20 to 30 FA	0.45	50
	B2 (coastal atmospheric)	50	400	20 to 30 FA	0.45	40

*FA is fly ash

[†] w/b is water-binder ratio

[‡]Minimum cover requirements are the same for carbon and galvanized steel, and stainless-steel reinforcement per AS 5100.5:2017; and cover allowances do not consider additional cover requirements for curing compounds or if cast against ground

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³

Table 4:
Minimum concrete and reinforcement type requirements to meet a 100-, 150-, and 200-year design life

Element	AS 5100.5:2017 exposure classification	f'_c , MPa	Minimum cementitious content, kg/m ³	FA, %	Max. w/b	Design cover, mm, and reinforcement type required to meet minimum design life							
						100 years		150 years			200 years		
						Carbon steel	Galvanized	Carbon steel	Galvanized	Stainless	Carbon steel	Galvanized	Stainless
Piles (steel lined cast-in-place)	B2 (permanently submerged)	40	400	25	0.45	60	—	75	60	—	85	60	—
	C2 (tidal/splash)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	80	—	—
Pile caps (cast-in-place)	C2 (tidal/splash)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	90	80	—
Pier columns (cast-in-place)	C1 (spray)	50	470	30	0.40	70	—	70	—	—	80	70	—
	C2 (tidal/splash)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	80	90	—
Beams (precast)	B2 (coastal atmospheric)	40	400	25	0.45	80	50	90	70	50	105	80	50
	B2 (coastal atmospheric)	40	400 (500 used)	35	0.45 (0.36 used)	50	—	60	50	—	65	50	—
	B2 (coastal atmospheric)	55	470	25	0.40 (0.36 used)	60	40	70	50	50	80	60	40

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³; 10 mm = 0.4 in.

Summary

Durability assessment, durability design, and durability planning are vital in minimizing the risks of long-term deterioration of structures, structural elements, and components. Materials engineering competences combined with a durability assurance process can be brought to bear to design concrete, metals, and polymers for design lives in excess of 100 years and even 200 years on a particular bridge project, for example. Climate change impacts also need to be considered as part of the design process on those projects.

References

1. Cherry, B., and Green, W., *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, first edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2021, 402 pp.
2. ACI Committee 321, Concrete Durability Code, www.concrete.org/getinvolved/committees/directoryofcommittees/acommitteehome.

[aspx?committee_code=C0032100](#).

3. 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.
4. BS EN 206:2013, "Concrete. Specification, Performance, Production and Conformity," British Standards Institution, London, UK, 2013.
5. EN 1992-1-1:2004, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
6. AS 3600:2018, "Concrete Structures," Standards Australia, Sydney, Australia, 2018.
7. AS 5100.5:2017, "Bridge Design, Part 5: Concrete," Standards Australia, Sydney, Australia, 2017.

Selected for reader interest by the editors.



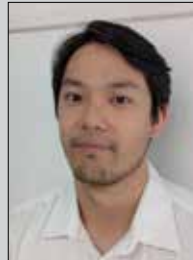
Warren Green is a Principal Corrosion Scientist at Vinsi Partners, based in Texas, USA. He is a Fellow and CPEng with Engineers Australia and has over 30 years of experience in corrosion science, engineering, and materials technology covering marine, infrastructure, civil, industrial, and building structures. Green is also a Visiting Adjunct Associate

Professor in the Faculty of Science and Engineering at Curtin University, Perth, WA, Australia. His latest CRC Press-published book is *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*.

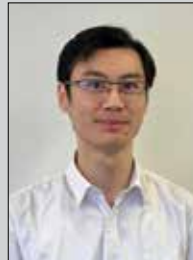


David McDonald, FCI, is a Principal Engineer at Vinsi Partners, based in Sydney, NSW, Australia. He received his PhD in 1991 from the University of Sydney, Sydney, Australia, and went on to develop a career working in materials development and consulting. He has specialized expertise in concrete, corrosion, and building product

selection, durability, and performance. McDonald is a member of several organizations and committees, including the Concrete Institute of Australia and the Council for Civil Engineering at the University of Sydney. His publications include two book chapters, more than 50 papers, and six U.S. patents.



John Kwong received his BE in civil engineering with Honors from the University of Newcastle, Callaghan, NSW, Australia, in 2018. Since graduating, he has specialized in the field of structural engineering with a developing interest in durability design/assurance. He also has a keen interest in the operation of emerging technologies, such as remotely operated vehicles, which he has successfully deployed on site.



Christopher Lim received his BE in civil engineering with honors and his bachelor's of design in architecture from the University of Sydney in 2022. Since graduating, he has primarily worked on the durability of major transportation infrastructure, helping to provide durability assurance and thermal modeling. He has an interest in durability modeling of concrete structures, namely carbonation and thermal modeling.

Sign up for
Concrete

SmartBrief

Created by SmartBrief in partnership with ACI, Concrete SmartBrief provides a daily email snapshot of the concrete industry with news from leading global sources. Summaries of what matters to you, written by expert editors, to save you time and keep you informed and prepared.

Welcome to Concrete SmartBrief; sign up at: www.smartbrief.com/ACI

Experiencias sobre garantía de la durabilidad del diseño en proyectos de infraestructuras en Australia

Por Warren Green, David McDonald, John Kwong y Christopher Lim

La planificación de la durabilidad es un sistema que formaliza el proceso de alcanzar la durabilidad mediante el diseño, la construcción y el mantenimiento adecuados¹. Todos los materiales de ingeniería se deterioran con el tiempo, a ritmos que dependen del tipo de material, la severidad del entorno y los mecanismos de deterioro que intervienen. El objetivo es seleccionar la combinación de materiales más rentable para alcanzar la vida útil requerida. Para ello, es fundamental tener en cuenta que la naturaleza y el ritmo de deterioro de los materiales dependen de su entorno.

Por consiguiente, el entorno es una “carga” sobre un material, al igual que una fuerza es una “carga” sobre un componente estructural. Es la combinación de las cargas estructurales y ambientales en sinergia lo que determina el desempeño del componente estructural.

Las ventajas de la planificación de la durabilidad incluyen, entre otras, las siguientes:

- Establecimiento de un vínculo continuo (“tren directo”) en los objetivos de durabilidad entre el diseño, la construcción y el mantenimiento;
- Aumento de la probabilidad de que las estructuras y los edificios alcancen la vida útil de diseño;
- Predicción del comportamiento de los materiales en sus entornos de servicio;
- Reducción de los costos del ciclo de vida;
- Establecimiento de acciones y costos de mantenimiento predecibles;
- Reducción de los costos de mantenimiento y reparación;
- Posibilidad de iniciar una gestión fiscal del mantenimiento; y
- Minimización del tiempo de inactividad en las operaciones.

Filosofía de la durabilidad

Las medidas de protección que deben adoptarse para las estructuras y los elementos dependen del riesgo de deterioro, del costo de las medidas preventivas, de la viabilidad y costo de las medidas correctoras y de las actividades de mantenimiento preventivo en curso. Normalmente, es necesario equilibrarlos para obtener el mejor costo a lo largo de toda la vida útil y la mejor relación calidad-precio. El diagrama de flujo de la Fig. 1 muestra una filosofía holística de proyecto mediante la durabilidad.

Desarrollo de una estrategia de durabilidad

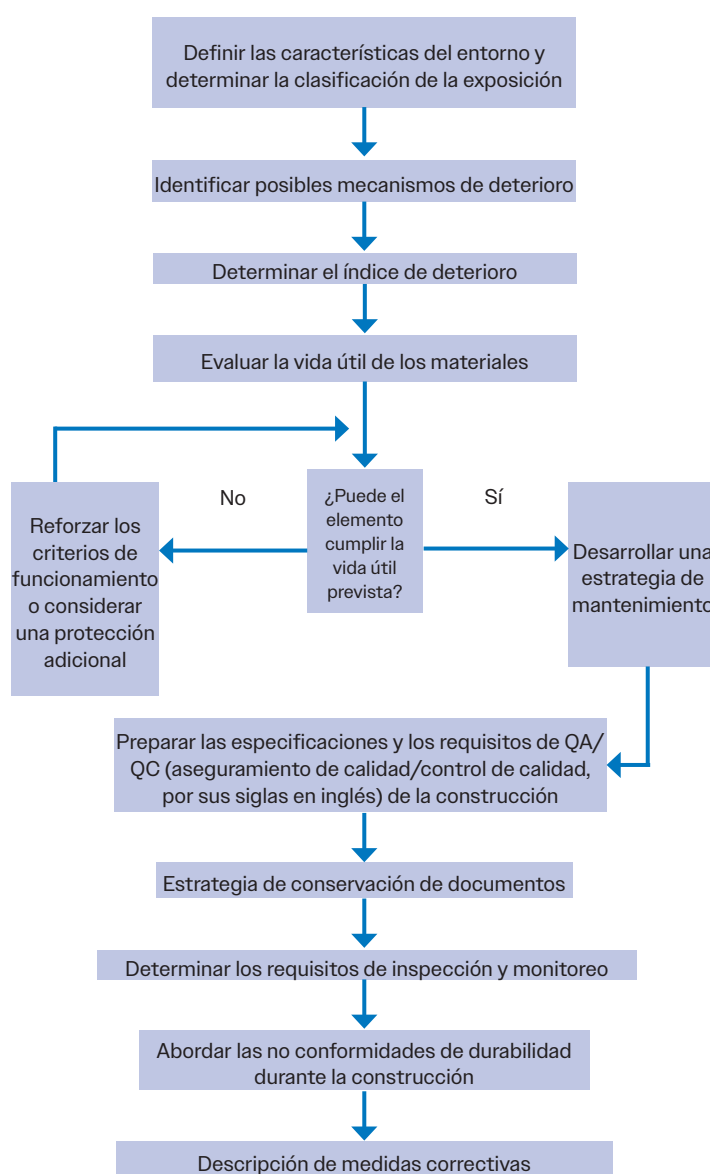


Fig. 1: Desarrollo de la estrategia de durabilidad de un proyecto

Informes de evaluación de la durabilidad

Análisis de riesgos de durabilidad

Un informe de evaluación de la durabilidad (DAR, por sus siglas en inglés) documenta las estrategias de durabilidad para proporcionar un vínculo continuo entre la intención del diseño, la construcción y el mantenimiento. Se utiliza un análisis cualitativo de la información de diseño para identificar el nivel de riesgo de durabilidad considerando la probabilidad (o posibilidad) de deterioro y las consecuencias del mismo. El DAR implica entonces:

- Aportaciones en términos de durabilidad de los materiales;
- Revisión de los datos del material (tipo, diseño/detalle del elemento del activo y construcción);
- Revisión de los datos ambientales (incluida la determinación de la clasificación de exposición o el estado límite de durabilidad);
- Revisión de los requerimientos de vida del diseño;
- Identificación de los posibles mecanismos de deterioro; e
- Identificación de los problemas críticos de durabilidad con respecto a la construcción; y
- Resultados del proceso (cuando proceda):
- Opciones de durabilidad del diseño y selección de materiales; y
- Listas de comprobación de la durabilidad.

Las listas de comprobación de la durabilidad incluirán:

- Pruebas ambientales, incluyendo análisis de aguas subterráneas y suelos;
- Clasificaciones de exposición, basadas en normas, códigos y directrices pertinentes; y
- Evaluaciones de durabilidad en las que se enumeran los aspectos de durabilidad que deben abordarse, incluyendo:
 - Elemento (como una viga);
 - Subelemento (como el concreto);
 - Vida útil mínima de diseño requerida (en años);
 - Problema de durabilidad (como la corrosión); y
 - Resultados de la evaluación de la durabilidad (con métodos para cumplir los requisitos de diseño).

El análisis de riesgos de durabilidad clasifica el riesgo teniendo en cuenta la probabilidad de deterioro y las consecuencias del mismo. La probabilidad de deterioro es un factor relacionado con los materiales seleccionados, los requisitos de diseño y el entorno. La consecuencia del deterioro se califica en función de los riesgos que pueda poner en peligro a las personas o a las operaciones.

La calificación del riesgo tras el diseño de la durabilidad se relaciona de forma similar con la importancia del fallo del material, los materiales propuestos y las prácticas de diseño y construcción asociadas. Entre los niveles de calificación del riesgo se incluyen:

- Normal (conforme). No hay un mayor riesgo o probabilidad o consecuencia de deterioro que afecte a las operaciones o a la seguridad durante la vida útil del diseño, y el activo cumple los requisitos de durabilidad del contrato;
- Medio. Existe una moderada probabilidad o consecuencia de deterioro que puede afectar a las operaciones o a la seguridad durante la vida útil del diseño. Es necesario modificar los materiales o el diseño para reducir la probabilidad o las consecuencias del deterioro; y
- Alto. Hay una mayor probabilidad y consecuencia de deterioro que afectará a las operaciones y/o a la seguridad durante la vida útil del diseño. Se requerirán cambios significativos en los materiales o en el diseño para reducir la probabilidad o las consecuencias del deterioro.

El nivel de calificación de riesgo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1:
Metodología de análisis de los riesgos de durabilidad

		Consecuencias del deterioro	
		Normal	Medio
Probabilidad de deterioro	Normal	Riesgo normal/conforme	Riesgo medio
	Medio	Riesgo medio	Riesgo Alto

Cuando el riesgo de deterioro es alto, se requieren cambios detallados en el diseño y/o en los materiales para alcanzar la vida útil de diseño del material dentro de cada paquete de diseño para reducir los riesgos de deterioro dentro de los límites normales. Mediante la integración de los requisitos clave de durabilidad y consideraciones como la vida útil del diseño, la selección de materiales y el mantenimiento, es posible alcanzar la vida útil prevista de un activo.

Inspección, supervisión y mantenimiento

La durabilidad comienza con el diseño y la construcción, pero para garantizar la durabilidad de los activos es fundamental la limpieza periódica, el mantenimiento preventivo (si está permitido) y la renovación para garantizar que los activos desempeñan sus funciones con eficiencia y eficacia durante su vida útil prevista. El mantenimiento planificado en respuesta a las inspecciones periódicas, la supervisión del estado y el análisis de los informes serían la base de cualquier estrategia de mantenimiento de activos.

La inspección durante la fase de construcción permite identificar con anticipación los problemas que pueden afectar a la durabilidad a largo plazo de los activos construidos. El proceso de inspección y garantía de calidad debe incluir:

- Confirmación del cumplimiento de las especificaciones de todos los materiales;
- Confirmación de que las instalaciones de los materiales cumplen los requisitos definidos en las listas de comprobación de la evaluación de la durabilidad, incluyendo:
 - Adopción de medidas adecuadas en la obra durante condiciones meteorológicas adversas que puedan afectar la durabilidad a largo plazo;
 - Los materiales no están contaminados; y
- Revisión de la durabilidad de las no conformidades, registros de defectos de construcción y planes de rectificación de defectos.

Las inspecciones periódicas y el seguimiento detallado pueden detectar defectos o daños que podrían comprometer la durabilidad del activo y, por tanto, desencadenar una actividad de mantenimiento. Dichos desencadenantes pueden ser

- Daños por impacto;
- Agrietamiento del concreto; y
- Daños por incendio.

Evaluación de la durabilidad por exposición al ambiente marino

Las evaluaciones de durabilidad exigidas por la mayoría de los códigos suelen seguir una ruta de evaluación para determinar la exposición utilizando un criterio preasignado. Sin embargo, la trayectoria varía considerablemente en función del código o norma que se utilice. Algunos de los códigos o normas que se utilizan habitualmente en Estados Unidos, Europa y Australia se describen a continuación.

Estados Unidos

El Comité 321 del ACI, Código de Durabilidad del Concreto, tiene como objetivo desarrollar: “un documento de lenguaje obligatorio que aborde la durabilidad del concreto. El código... proporcionará requisitos prescriptivos mínimos y, cuando sea aplicable, proporcionará requisitos de funcionamiento alternativos para lograr la durabilidad del concreto. El código identificará las categorías y clases de exposición de durabilidad y los pasos para la planificación de la durabilidad, y proporcionará requisitos para el diseño de la durabilidad, la gestión de la construcción/calidad y el mantenimiento. El código será un documento independiente al que se podrá hacer referencia en otras normativas”².

El comité está trabajando en capítulos que incluyen, pero no se limitan necesariamente a:

- Categorías de exposición de la durabilidad;
- Requisitos de diseño de durabilidad;
- Requisitos de mantenimiento;
- Construcción; y
- Calidad.

En la actualidad, el CÓDIGO ACI-318-19(22)³, que es el código de construcción más comúnmente utilizado en Estados Unidos, tiene clasificaciones numéricas para la severidad con respecto al congelamiento y deshielo, la exposición al sulfato, al agua y a cloruros. En el caso de la exposición a cloruros, las clasificaciones de gravedad van de C0 (concreto seco o protegido de la humedad) a C2 (concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros). Las fuentes de cloruros incluyen productos químicos de deshielo, sal, agua salobre, agua de mar o aerosoles procedentes de estas fuentes. El concreto sujeto a la clase de exposición C2 debe tener una relación agua-materiales cementantes (w/cm) no superior a 0.40. Además, el CÓDIGO ACI-318-19(22) especifica el recubrimiento mínimo de las varillas de refuerzo.

Europa

La norma BS EN 206:2013⁴ se utiliza como especificación de diseño en Europa aplicable a las estructuras prefabricadas o moldeadas en el lugar. Las clasificaciones de exposición se determinan en función de los tipos de exposición; por ejemplo, las exposiciones más graves se clasifican con un número más alto:

- XC indica la corrosión del refuerzo inducida por la carbonatación; y
- XS indica la corrosión del refuerzo inducida por los cloruros del agua de mar.

En función de la exposición determinada, se prescriben una relación agua-cemento (w/c , por sus siglas en inglés) máxima, un contenido mínimo de cemento y una clase de resistencia mínima, tal como se indica en la Tabla F.1 de la norma BS EN 206:2013⁴.

El Eurocódigo asume implícitamente una vida útil de diseño de 50 años. En la norma EN 1992-1-1:2004⁵ se incluye un procedimiento que implica una modificación de la clase estructural del concreto basada en la clase de exposición para los casos en que los proyectistas deseen obtener un “crédito” por materiales de mayor calidad y/o calidad de construcción, o para lograr vidas útiles de diseño superiores a 100 años.

Australia

En Australia, los dos principales códigos utilizados para el concreto son el AS 3600:2018⁶ para edificios con una vida útil de 50 años y el AS 5100.5:2017⁷ para puentes con una vida útil de 100 años.

Estos códigos establecen requisitos específicos para diversas exposiciones que incluyen cantidades mínimas de cemento, relación w/c máxima y curado. También se establece el recubrimiento mínimo del concreto en función de la exposición y de la resistencia a la compresión del concreto.

Las exposiciones para estructuras marinas se dividen en:

- Permanentemente sumergida;
- En la zona de salpicaduras (1 m [3 pies] por encima del nivel de la cresta de las olas); y
- En la zona de mareas y salpicaduras (inmediatamente por debajo de la zona de salpicaduras, incluida la zona 1 m por debajo de la marea más baja y hasta 1 m por encima de la marea más alta en estructuras verticales, y todos los plafones expuestos de estructuras horizontales sobre el mar).

Se proporcionan zonas de exposición adicionales para varias distancias alejadas de la línea de costa.

Si bien estos dos códigos establecen requisitos para diseños de 50 y 100 años, se incluyen directrices de diseño mínimas para otras vidas de diseño.

Comparación de diversos códigos y normas

Los códigos y especificaciones ACI, EN y AS mencionados abordan las clases de exposición; sin embargo, solo la Norma Australiana de Diseño de Puentes (AS 5100.5:2017)⁷ establece los requisitos de cobertura en función de la resistencia a la compresión del concreto o de la relación w/c (que son sustitutos habituales de la permeabilidad del concreto). Sin embargo, las directrices para alargar la vida útil de las estructuras son escasas y, por lo general, dependen de los consejos de un especialista en durabilidad.

Estudio de caso

Evaluación de la durabilidad de una exposición al ambiente marino: vida útil de 100, 150 y 200 años

Un ejemplo de proyecto considerado en este documento es un puente de concreto reforzado (RC, por sus siglas en inglés) en un entorno de exposición marina. Como parte del diseño conceptual del proyecto, debía realizarse un análisis de las opciones de durabilidad. Este análisis debía considerar la planificación de la durabilidad para varias vidas de diseño con el fin de determinar qué impacto puede tener la vida de diseño en los costos de construcción. Se requería una evaluación de la durabilidad del diseño conceptual para esbozar los requisitos de calidad del concreto y de recubrimiento del refuerzo para determinados elementos de RC del puente con el fin de cumplir con las vidas de diseño de 100, 150 y 200 años.

- Pilotes: Revestimientos de acero fundido (sacrificiales) con pilotes rellenos de RC;
- Encepados: RC moldeado en sitio;
- Columnas de pilares: RC colado en sitio; y
- Viguetas: prefabricadas de concreto pretensado.

El contratista del proyecto era una autoridad en materia de carreteras, y cualquier evaluación conceptual de la durabilidad debía basarse en las mezclas de concreto específicas que se utilizarían (véase el cuadro 2). Los elementos de RC del puente se diseñaron para cumplir los requisitos de la norma AS 5100.5:2017⁷ y la especificación de concreto estructural de la autoridad vial.

La norma AS 5100.5:2017⁷ establece los requisitos de calidad y recubrimiento del concreto para una vida útil de diseño de 100 años, pero no proporciona orientación sobre los requisitos del concreto para más de 100 años.

Tabla 2:
Mezclas de concreto propuestas por las principales autoridades viales

Elemento	Clasificación de exposición AS 5100.5:2017	Resistencia mínima a compresión f'_c , MPa	Contenido mínimo de cemento, kg/m ³	Contenido de material cementante suplementario, %	Máximo. w/b [†]
Pilotes (con revestimiento de acero fabricados en el lugar)	B2 (sumergido permanentemente)	40	400	25 FA*	0.45
	C2 (marea/salpicadura)	50	450	30 FA	0.40
Encepados de pilotes (fabricados en el lugar)	C2 (marea/salpicadura)	55	470	30 FA	0.36
Columnas del muelle (fabricadas en el lugar)	C1 (rociado)	50	450	30 FA	0.40
	C2 (marea/salpicadura)	55	470	30 FA	0.36
Vigas (prefabricadas)	B2 (atmosférica costera)	40	400	25 FA	0.45
	B2 (atmosférica costera)	55	470	20 FA	0.45

*FA (por sus siglas en inglés) es ceniza volante

[†] w/b es la relación agua-cementante

Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³

Tabla 3:
Requisitos de calidad y recubrimiento del concreto mezclado con ceniza volante para una vida útil de 100 años

Elemento	Clasificación de exposición AS 5100.5:2017	Resistencia mínima a compresión f'_c , MPa	Contenido mínimo de cemento, kg/m ³	Contenido de material cementante suplementario, %	Máximo, w/b [†]	Recubrimiento mínimo [‡] , mm
Pilotes (con revestimiento de acero fabricados en el lugar)	B2 (sumergido permanentemente)	40	400	20 a 30 FA*	0.45	60
	C2 (marea/salpicadura)	50	470	25 a 40 FA	0.36	80
Encepados de pilotes (fabricados en el lugar)	C2 (marea/salpicadura)	50	470	25 a 40 FA	0.36	80
Columnas del muelle (fabricadas en el lugar)	C1 (rociado)	50	450	25 a 40 FA	0.40	70
	C2 (marea/salpicadura)	50	470	25 a 40 FA	0.36	80
Viguetas (prefabricadas)	B2 (atmosférica costera)	40	400	20 a 30 FA	0.45	50
	B2 (atmosférica costera)	50	400	20 a 30 FA	0.45	40

*FA es ceniza volante

[†] w/b es la relación agua-cementante

[‡]Los requisitos mínimos de recubrimiento son los mismos para el acero al carbono, el acero galvanizado y el refuerzo de acero inoxidable, según AS 5100.5:2017; y los requisitos de recubrimiento no tienen en cuenta los requisitos de recubrimiento adicionales para los compuestos de curado o si se moldean contra el suelo

Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yd³

Tabla 4:

Requisitos mínimos del tipo de concreto y refuerzo para una vida de diseño de 100, 150 y 200 años

Elemento	Clasificación de exposición AS 5100.5:2017	$f'_{c,i}$ MPa	Contenido mínimo de cemento, kg/m ³	FA, %	Máx. w/b	Recubrimiento de diseño, mm, y tipo de refuerzo requerido para alcanzar la vida útil mínima							
						100 años		150 años			200 años		
						Acero al carbono	Galvanizado	Acero al carbono	Galvanizado	Inoxidable	Acero al carbono	Galvanizado	Inoxidable
Pilotes (con revestimiento de acero fabricados en el lugar)	B2 (sumergido permanentemente)	40	400	25	0.45	60	—	75	60	—	85	60	—
	C2 (marea/salpicadura)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	80	—	—
Encepados de pilotes (fabricados en el lugar)	C2 (marea/salpicadura)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	90	80	—
Columnas del muelle (fabricadas en el lugar)	C1 (rociado)	50	470	30	0.40	70	—	70	—	—	80	70	—
	C2 (marea/salpicadura)	55	470	30	0.36	80	—	80	—	—	80	90	—
Vigas (prefabricadas)	B2 (atmosférica costera)	40	400	25	0.45	80	50	90	70	50	105	80	50
	B2 (atmosférica costera)	40	400 (500 usados)	35	0.45 (0.36 usados)	50	—	60	50	—	65	50	—
	B2 (atmosférica costera)	55	470	25	0.40 (0.36 usados)	60	40	70	50	50	80	60	40

Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m³ = 1.7 lb/yard³; 10 mm = 0.4 in.

En la Tabla 3 se resumen los requisitos de calidad y recubrimiento mínimos del concreto para los elementos de concreto del puente, durante una vida útil de diseño de 100 años, de acuerdo con AS 5100.5:2017⁷ y basándose únicamente en el uso de concretos mezclados con cenizas volantes y cemento. Las mezclas de concreto propuestas en la especificación de concreto estructural de la autoridad vial (consulte la Tabla 2) generalmente cumplen o superan estos requisitos.

En un entorno marino costero, el principal mecanismo de deterioro de los elementos de los puentes de CR considerados en el análisis conceptual de las opciones de durabilidad fue el inicio de la corrosión del refuerzo inducida por cloruros. Posteriormente, se llevó a cabo el modelado determinista de difusión de cloruros para establecer el tipo de refuerzo necesario para cada uno de los concretos y entornos de exposición propuestos a fin de cumplir con las vidas de diseño de 100, 150 y 200 años utilizando los recubrimientos mínimos de concreto descritos en AS 5100.5:2017⁷. Además, también se tabuló el recubrimiento de concreto mínimo requerido para el acero al carbono a fin de lograr vidas de diseño de 100, 150 y 200 años para

los principales elementos de concreto, a fin de permitir la comparación. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los hallazgos, incluida la forma en que se consideraron las mezclas de concreto de las autoridades viales.

Resumen

La evaluación, el diseño y la planificación de la durabilidad son vitales para minimizar los riesgos de deterioro a largo plazo de estructuras, elementos estructurales y componentes. Las competencias en ingeniería de materiales combinadas con un proceso de garantía de la durabilidad pueden utilizarse para diseñar el concreto, los metales y los polímeros para una vida útil superior a 100 años e incluso 200 años en un determinado proyecto de puente, por ejemplo. Los efectos del cambio climático también deben tenerse en cuenta en el proceso de diseño de esos proyectos.

Referencias

1. Cherry, B., and Green, W., Corrosion and Protection of Reinforced Concrete, first edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2021, 402 pp.
2. ACI Committee 321, Concrete Durability Code, www.concrete.org/getinvolved/committees/directoryofcommittees/acommitteehome.aspx?committee_code=C0032100.
3. 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.
4. BS EN 206:2013, "Concrete. Specification, Performance, Production and Conformity," British Standards Institution, London, UK, 2013.
5. EN 1992-1-1:2004, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
6. AS 3600:2018, "Concrete Structures," Standards Australia, Sydney, Australia, 2018.
7. AS 5100.5:2017, "Bridge Design, Part 5: Concrete," Standards Australia, Sydney, Australia, 2017.

Warren Green es el Director Científico especializado en corrosión de Vinsi Partners, con sede en Texas (Estados Unidos). Es miembro y CPEng de Engineers Australia y cuenta con más de 30 años de experiencia en ciencia de la corrosión, ingeniería y tecnología de materiales, abarcando estructuras marinas, de infraestructura, civiles, industriales y de edificios. Green es también profesor adjunto visitante en la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Curtin, Perth, AO, Australia. Su último libro publicado en CRC Press se titula Corrosion and Protection of Reinforced Concrete (Corrosión y protección del concreto reforzado).



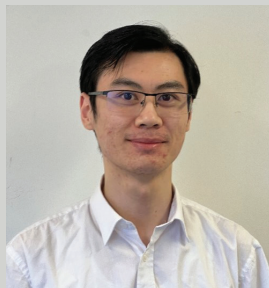
David McDonald, FACI, es Director de Ingeniería en Vinsi Partners, con sede en Sydney, NGS, Australia. Se doctoró en 1991 por la Universidad de Sidney (Australia) y desarrolló su carrera profesional en el campo de la consultoría y el desarrollo de materiales. Es especialista en concreto, corrosión y selección, durabilidad y comportamiento de productos de construcción. McDonald es miembro de varias organizaciones y comités, entre ellos el Instituto del Concreto de Australia y el Consejo de Ingeniería Civil de la Universidad de Sydney. Entre sus publicaciones figuran dos capítulos de libros, más de 50 artículos y seis patentes estadounidenses.



John Kwong recibió su título de Ingeniero Civil con honores de la Universidad de Newcastle, Callaghan, NGS, Australia, en 2018. Desde que se graduó, se ha especializado en el campo de la ingeniería estructural con un creciente interés en el diseño/aseguramiento de la durabilidad. También tiene un gran interés en el funcionamiento de las tecnologías emergentes, como los vehículos operados a distancia, que ha desplegado con éxito en obra.



Christopher Lim obtuvo su título de Ingeniero Civil con matrícula de honor y su licenciatura en Diseño Arquitectónico por la Universidad de Sidney en 2022. Desde que se graduó, ha trabajado principalmente en la durabilidad de grandes infraestructuras de transporte, ayudando a proporcionar garantías de durabilidad y modelado térmico. Le interesa la modelización de la durabilidad de las estructuras de concreto, en particular la carbonatación y la modelización térmica.



Título original en inglés:
**Design Durability Assurance
Experiences on Infrastructure
Projects in Australia**

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



Traductora:
**Lic. Iliana M. Garza
Gutiérrez**



Revisor Técnico:
**Dr. Lucio Guillermo
López Yépez**