

# ESTRATÉGIAS PROJETOVAIS PARA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM AMBIENTES SUJEITOS À CORROSÃO DAS ARMADURAS: ANÁLISE DE INDICADORES E PARÂMETROS TÉCNICOS

Henrique Bueno Machado<sup>1</sup>  
Andrielli Morais De Oliveira<sup>2</sup>

## RESUMO

A corrosão de armaduras é uma das principais causas de degradação em estruturas de concreto armado, resultando em custos elevados de manutenção e comprometimento da segurança estrutural. A norma ABNT NBR 6118 contempla aspectos relacionados à durabilidade, mas apresenta limitações no detalhamento de parâmetros críticos, especialmente no tocante à corrosão induzida por cloretos. Este artigo propõe uma análise crítica da normatização brasileira e seu alinhamento com diretrizes internacionais (ACI, EN, AS), sugerindo a adoção de indicadores complementares de durabilidade. Parâmetros como resistividade elétrica, coeficiente de difusão de cloretos, absorção capilar, permeabilidade à água e qualidade da cura são discutidos como instrumentos técnicos de apoio ao projeto estrutural. Resultados de pesquisas nacionais evidenciam a efetividade da incorporação de adições pozolânicas no controle da penetração de agentes agressivos. Como contribuição prática, apresenta-se um fluxograma para elaboração de projetos de durabilidade com base em indicadores mensuráveis. A análise evidencia a necessidade de revisão normativa que incorpore abordagens baseadas em desempenho, a fim de ampliar a vida útil das estruturas e mitigar impactos econômicos, sociais e ambientais.

**Palavras-chave:** Durabilidade do concreto, Corrosão de armaduras, Indicadores de desempenho, Projeto de estruturas, NBR 6118, Normas internacionais.

## DESIGN STRATEGIES FOR THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN ENVIRONMENTS PRONE TO REINFORCEMENT CORROSION: ANALYSIS OF INDICATORS AND TECHNICAL PARAMETERS

### ABSTRACT

Reinforcement corrosion is one of the main causes of degradation in reinforced concrete structures, leading to high maintenance costs and compromising structural safety. The Brazilian standard ABNT NBR 6118 addresses durability-related aspects but lacks detailed guidance on critical parameters, especially concerning chloride-induced corrosion. This paper presents a critical analysis of the Brazilian standards and their alignment with international guidelines (ACI, EN, AS), suggesting the adoption of complementary durability indicators. Parameters such as electrical resistivity, chloride diffusion coefficient, capillary absorption, water permeability, and curing quality are discussed as technical tools to support structural design. Research conducted in Brazil highlights the effectiveness of incorporating pozzolanic additives in mitigating the ingress of aggressive agents. As a practical contribution, a flowchart is proposed to guide the development of durability-focused structural designs based on measurable indicators. The analysis reveals the need for a regulatory revision that incorporates performance-based approaches to extend structural service life and reduce economic, social, and environmental impacts.

**Keywords:** Concrete durability, Reinforcement corrosion, Performance indicators, Structural design, NBR 6118, International standards.

Recebido em 25 de junho de 2025. Aprovado em 20 de julho de 2025

<sup>1</sup> Doutorando em Construção Civil pela Universidade Federal de Goiás. E-mail: henrique.machado@ufg.br

<sup>2</sup> Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Docente na Universidade Federal de Goiás. E-mail: andriellimorais@ufg.br

## INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado são amplamente empregadas em obras de infraestrutura e edificações devido à sua resistência mecânica, versatilidade e viabilidade econômica. Contudo, a exposição a ambientes agressivos pode acelerar processos de deterioração, comprometer a segurança estrutural, reduzir a vida útil e acarretar altos custos com manutenção (Cascudo *et al.*, 2021; Hooton, 2019). Entre os mecanismos mais recorrentes de degradação, destaca-se a corrosão das armaduras induzida por íons cloreto, frequentemente presente em ambientes marinhos, no uso de agentes de degelo ou por materiais contaminados utilizados na produção do concreto (Carasek; Cascudo, 2011).

A durabilidade, nesse contexto, configura-se como um requisito indispensável ao desempenho estrutural. Segundo a ISO 6241:1984 e a ASTM E632A, durabilidade é definida como a capacidade de manter a operacionalidade e segurança durante um período previamente especificado, sob condições ambientais definidas. O impacto econômico da perda de durabilidade é expressivo: estima-se que nos Estados Unidos os custos diretos com a corrosão giram em torno de US\$ 276 bilhões ao ano, o que representa aproximadamente 3% do PIB nacional (NACE, 2002). No Canadá, cerca de 40% das pontes rodoviárias já ultrapassaram 40 anos de serviço, com patologias associadas à corrosão demandando investimentos superiores a dez bilhões de dólares canadenses (Cusson, 2004).

A abordagem normativa brasileira, representada sobretudo pela ABNT NBR 6118:2014, passou a considerar parâmetros como classe de agressividade ambiental, cobrimento das armaduras e relação água/cimento, ampliando os cuidados em relação à durabilidade (ABNT, 2014). Complementarmente, a NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) introduz diretrizes quanto à qualidade do concreto, controle da fissuração e uso de adições minerais. Apesar dos avanços, tais prescrições ainda são consideradas limitadas quando comparadas a normas internacionais, especialmente no que tange à abordagem baseada em desempenho e à quantificação de parâmetros como a difusão de cloretos e a resistividade elétrica (Ollivier; Vichot, 2014).

A literatura aponta que concretos com mesma relação água/cimento ou mesma resistência à compressão podem apresentar comportamentos distintos frente à penetração de cloretos e início da corrosão, devido à microestrutura, adições minerais e procedimentos de cura (Oliveira, 2007; Alves, 2019). Concretos com adição de cinzas volantes, escória ou sílica ativa tendem a apresentar menor permeabilidade e maior resistividade elétrica, retardando a despassivação das armaduras (Coutinho, 2012; Gomes *et al.*, 2013).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo discutir e propor diretrizes complementares ao projeto estrutural com foco na durabilidade, com base em indicadores obtidos por ensaios laboratoriais, como resistividade elétrica, coeficiente de migração de cloretos, permeabilidade e absorção de água. Também é apresentado um comparativo entre a abordagem normativa brasileira e os referenciais técnicos de países como Estados Unidos, Austrália e membros da União Europeia, os quais integram parâmetros de desempenho em suas diretrizes (ACI, 2019; EN 206, 2016; AS 3600, 2018).

Como contribuição prática, propõe-se um fluxograma técnico para orientar o desenvolvimento de projetos estruturais em ambientes agressivos, visando maior robustez técnica, racionalidade econômica e sustentabilidade no ciclo de vida das estruturas de concreto.

## MATERIAI E MÉTODOS

Conforme a NBR 6022/2003 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), este trabalho classifica-se como um **artigo analítico**, uma vez que desenvolve uma análise dos diversos componentes que influenciam a resistência do concreto à penetração de íons cloreto,

estabelecendo relações entre esses fatores e o desempenho global do material em ambientes agressivos. O estudo também contempla uma avaliação crítica das limitações normativas brasileiras, especialmente no que tange às diretrizes de durabilidade estrutural.

Trata-se de uma **revisão técnica de literatura com enfoque analítico-comparativo**, que busca consolidar e confrontar evidências técnicas sobre o comportamento do concreto frente ao ataque de cloretos, bem como verificar a suficiência das prescrições normativas nacionais frente às práticas internacionais.

Foram analisadas **normas técnicas brasileiras e internacionais**, com destaque para a ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 12655:2015 e a ABNT NBR 15575, além de documentos normativos estrangeiros, como as diretrizes do **ACI (American Concrete Institute)** e do **CEB-FIP (Comité Euro-International du Béton)**, no que se refere à durabilidade e à prevenção da corrosão por cloretos.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em fontes como **Google Scholar, SciELO, Periódicos CAPES** e repositórios institucionais, priorizando publicações entre os anos de 2000 e 2023. Os critérios de seleção incluíram artigos científicos, dissertações, manuais técnicos e relatórios de pesquisa que abordassem:

- Mecanismos de transporte de cloretos no concreto;
- Influência da permeabilidade, relação água/cimento, tipo de cimento e adições minerais;
- Impacto da espessura de recobrimento e da cura;
- Desempenho de materiais pozolânicos;
- Limitações das classes de agressividade previstas nas normas brasileiras.

Os dados coletados foram organizados de forma qualitativa e submetidos a análise crítica, permitindo a identificação de lacunas normativas e a proposição de caminhos técnicos mais robustos para a durabilidade de estruturas sujeitas à ação de íons cloreto.

## Fundamentação Normativa

A durabilidade do concreto armado passou a integrar com maior rigor os requisitos normativos brasileiros a partir da atualização da ABNT NBR 6118, em sua versão de 2014. Essa norma introduziu o conceito de classes de agressividade ambiental (CAA), definindo valores mínimos para cobertura das armaduras, relações água/cimento (a/c) e resistência à compressão do concreto (fck), conforme o grau de exposição da estrutura (ABNT, 2014). A ABNT NBR 12655:2015 complementa esses requisitos, abordando a produção do concreto e a influência das condições de cura na durabilidade, estabelecendo também limites para absorção e diretrizes para o uso de adições minerais (ABNT, 2015).

No entanto, tais prescrições ainda carecem de respaldo experimental direto, e pouco dialogam com parâmetros mensuráveis associados ao transporte de íons cloreto. A norma não especifica, por exemplo, limites para o coeficiente de difusão de cloretos ou resistividade elétrica, indicadores amplamente reconhecidos em normas internacionais como a ACI 365.1R (USA), EN 206 (Europa) e AS 3600 (Austrália).

A ACI 365.1R (2000) enfatiza a importância da vida útil projetada e recomenda o uso de indicadores de desempenho, como resistividade, permeabilidade e tempo de início da corrosão, como critérios de projeto. A norma EN 206, por sua vez, incorpora o conceito de abordagem baseada em desempenho e especifica classes de exposição (XC, XD, XS) com parâmetros associados à penetração de agentes agressivos, integrando diretrizes para tipos de cimento, adições e tempo mínimo de cura. Já a AS 3600:2018 estabelece diretrizes quantitativas

para indicadores como profundidade de carbonatação e resistência à difusão de cloretos, com base em ensaios laboratoriais.

A ausência de tais parâmetros nas normas brasileiras limita a capacidade preditiva dos projetos quanto ao início e progressão da corrosão. Essa lacuna é particularmente preocupante em obras situadas em ambientes marinhos, urbanos costeiros ou sujeitos ao uso de cloretos no concreto, como estacionamentos, túneis ou pontes rodoviárias.

Portanto, a fundamentação normativa deste trabalho sustenta-se na necessidade de aproximação entre os critérios qualitativos atualmente presentes nas normas brasileiras e os parâmetros quantitativos de desempenho amplamente utilizados em normas internacionais. Tal alinhamento permitiria maior confiabilidade na estimativa da vida útil e embasamento técnico mais sólido na especificação de materiais e soluções executivas para estruturas expostas à ação de cloretos.

### Durabilidade na NBR 6118:2014, NBR 12655:2015 e NBR 15575:2003

No ano de 2003, a NBR 6118 teve como um dos principais pontos de sua atualização as abordagens inerentes à durabilidade. A partir de então, questões como a classe de agressividade do ambiente e qualidade do concreto foram colocadas visando atender exigências relacionadas à durabilidade. A versão de 2014 trouxe alterações adicionais, reforçando essas diretrizes.

A NBR 6118:2014 trata da vida útil como o período durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como a execução de reparos decorrentes de danos acidentais. Ela ainda aborda os mecanismos de deterioração predominantes, como a carbonatação e a penetração de íons cloreto — esta última entendida como a ruptura localizada da camada de passivação da armadura.

Para definir premissas mínimas de proteção, a norma trata das classes de agressividade ambiental (CAA), apresentadas na Tabela 1, cabendo ao projetista classificar a estrutura de acordo com as informações ambientais locais.

**Tabela 1:** Classe de Agressividade Ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
	I		
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup> Marinha <sup>a</sup>	Pequeno
III	Forte	Industrial <sup>a, b</sup> Industrial <sup>a, c</sup>	Grande
IV	Muito forte	Respingos de maré	Elevado

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (2014)

Além disso, são abordadas recomendações de projeto relacionadas à drenagem, forma arquitetônica e estrutural, detalhamento de armaduras, medidas especiais de proteção, qualidade do concreto, cobrimento e controle de fissuração — expressas nas Tabelas 2, 3 e 4.

A qualidade do concreto é correlacionada com a relação água/cimento (a/c), resistência à compressão e durabilidade. Em caso de ausência de ensaios específicos, permite-se a adoção de requisitos mínimos, como os da Tabela 2. Sobre o cobrimento, define-se o mínimo ( $c_{\min}$ ) e o nominal ( $c_{\text{nom}} = c_{\min} + \Delta c$ ), considerando-se valores como  $\Delta c \geq 10$  mm para obras correntes. Adicionalmente, impõe-se que  $c_{\text{nom}} \geq \phi$  da barra ou elemento equivalente, e a dimensão máxima do agregado graúdo não deve exceder  $1,2 \times c_{\text{nom}}$  (Tabela 3).

**Tabela 2:** Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (2014)

**Tabela 3:** Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c=10$ mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.  
<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.  
<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.  
<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR 6118 (2014)

Quanto ao controle de fissuração, a abertura máxima característica das fissuras ( $w_k$ ) depende da classe de agressividade e do tipo de concreto (Tabela 4).

**Tabela 4:** Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

<sup>a</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Fonte: NBR 6118 (2014)

A NBR 12655:2015 complementa a NBR 6118 ao estabelecer parâmetros para preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto. Ela também apresenta limites de relação a/c, consumo mínimo de cimento e classe do concreto conforme a agressividade do meio (Tabela 5), e define requisitos adicionais para condições especiais (Tabela 6).

**Tabela 5:** Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto $\text{kg/m}^3$	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 12655 (2015)

**Tabela 6:** Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: NBR 12655 (2015)

No tocante à presença de cloretos, a norma impõe limites máximos de concentração no concreto endurecido (Tabela 7), cuja verificação pode ser feita conforme a ASTM C 1218. Entretanto, a literatura técnica evidencia que concretos com mesma relação a/c ou classe de resistência podem apresentar desempenho distinto quanto à durabilidade. Oliveira (2007) demonstrou que concretos C25 sem adições minerais e concretos com cinza volante apresentam diferentes tempos de iniciação, propagação e taxa de corrosão.

**Tabela 7:** Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.

Classe de agressividade (5.2.2)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl <sup>-</sup> ) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (2015)

Por fim, cabe destacar a NBR 15575:2013, que trata da durabilidade dentro do contexto de desempenho. A norma exige que a estrutura seja projetada conforme as condições ambientais e prevê a manutenção preventiva durante sua vida útil. A vida útil de projeto (VUP), quando não especificada, deve ser assumida como 50 anos, podendo alcançar valores intermediários ( $\geq 63$  anos) ou superiores ( $\geq 75$  anos), conforme Tabela 8.

Contudo, a NBR 6118:2014 permanece essencialmente qualitativa em sua abordagem, não definindo valores objetivos para a vida útil assegurada. A NBR 15575, por sua vez, reconhece essa lacuna e sugere a consulta a normas internacionais para atendimento adequado (Medeiros, 2016).

**Tabela 8:** Vida útil de projeto mínima e superior (VUP).

Sistema	VUP anos		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

<sup>a</sup> Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.

Fonte: NBR 15575 (2013)

Assim, observa-se que há subjetividades, incompatibilidades e lacunas normativas importantes nas diretrizes brasileiras, especialmente no que se refere ao estabelecimento de critérios mensuráveis e mecanismos de validação experimental que sustentem a durabilidade das estruturas em ambientes agressivos. deste trabalho sustenta-se na necessidade de aproximação entre os critérios qualitativos atualmente presentes nas normas brasileiras e os parâmetros quantitativos de desempenho amplamente utilizados em normas internacionais. Tal alinhamento permitiria maior confiabilidade na estimativa da vida útil e embasamento técnico mais sólido na especificação de materiais e soluções executivas para estruturas expostas à ação de cloretos.

### **Oportunidades na NBR 6118:2014 e NBR 12655:2015 Frente Às Normas Americanas, Europeias E Australianas**

Nos Estados Unidos, o código ACI 318 estabelece os principais critérios para projeto de estruturas de concreto, sendo complementado por documentos como o ACI 201.2R — Guide to Durable Concrete e o ACI 301 — Specifications for Structural Concrete, que tratam de durabilidade, requisitos de execução, testes e aceitação. A Tabela 9, extraída de Paula (2018), apresenta as classes de exposição conforme o ACI 318, reforçando a importância de um detalhamento robusto para ambientes agressivos

**Tabela 9:** Classes de agressividade ambiental conforme o ACI 318 (ACI, 2008).

Categoria	Severidade	Classe	Condição	
F Congelamento e descongelamento	Não aplicado	F0	Concreto não exposto a ciclos de congelamento e descongelamento	
	Moderado	F1	Concreto exposto a ciclos de congelamento e descongelamento e ocasionalmente exposto a umidade	
	Severo	F2	Concreto exposto a ciclos de congelamento e descongelamento e em contato constante com umidade	
	Muito severo	F3	Concreto exposto a congelamento e descongelamento e em constante contato com umidade e exposto a ataques químicos	
			Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) no solo, % por peso	Sulfato dissolvido em água (SO <sub>4</sub> ), ppm
S	Não aplicado	S0	SO <sub>4</sub> < 0,10	SO <sub>4</sub> < 150
	Moderado	S1	0,10 SO <sub>4</sub> < 0,20	150 SO <sub>4</sub> < 1500
	Severo	S2	0,20 SO <sub>4</sub> < 2,00	150 SO <sub>4</sub> <
	Muito severo	S3	SO <sub>4</sub> > 2,00	SO <sub>4</sub> > 10.000
P Requerem baixa permeabilidade	Não aplicado	P0	Em contato com a água onde baixa permeabilidade não é necessária	
	Requerido	P1	Em contato com a água onde baixa permeabilidade é necessária	
C Proteção contra corrosão de armadura	Não aplicável	C0	Concreto seco ou protegidos da umidade	
	Moderado	C1	Concreto exposto à umidade, mas não a fontes externas de cloretos	
	Severo	C2	Concreto exposto à umidade e uma fonte externa de cloretos de produtos químicos de degelo, sal, água salobra, salgada ou spray a partir destas fontes	

Fonte: PAULA (2018)

Na Europa, as estruturas de concreto são definidas pela EN206 - Concrete, que também contam com muito mais objetividade e detalhamento, conforme Tabela 10 que trata de até 21 classe de exposição, além de todo um detalhamento complementar suportado por outras normas.

Com exemplo, possuem uma norma específica a EN1990 - Basis of structural design, para definir critérios de vida útil e tirar a subjetividade dos projetistas. Outra importante norma complementar é a EN197 – Composition, specifications and a conformity criteria for common cements, responsável para a seleção de opções de cimentos portland, compostos e misturados, e suas correspondentes relações A/C.

A EN206 já considera como uma prática a adição dos materiais Pozolânicos à mistura do concreto em substituição ao cimento, desta forma, para parametrizar as misturas, já são estabelecidos coeficientes, k, e limites máximos para adições.

Estas adições recebem uma classificação de Adições do Tipo II, e sua massa total não é incluída no cálculo da razão efetiva de água/cimento, ela tem sua massa total corrigida por um coeficiente k, ou seja, a fórmula final para a / c é calculada com o seguinte ajuste onde  $a / c = a / (c + k*(Pozolana))$ . Os valores de k são baseados em ensaios que garantem a estas misturas um desempenho de resistência de 28 dias igual ao dos cimentos padrões, estes que são representados pelos cimentos CEM I ou CEM II/A.

Portanto valores de k são previamente definidos, para escória o valor de k é 0,6, conforme a EN15167-1 - Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete, Mortar, and Grout. Para adição de cinzas volantes o k é de 0,4, atendendo EN450-1 - Fly Ash for Concrete. Na adição de sílica ativa, para atender a EN13263-1 - Silica Fume for Concrete, o k é 2,0 (exceto para exposições XC (carbonatação) e XF (congelamento) onde k = 1,0).

Para os limites máximos, a EN206 define para este Tipo II (pozolanas) uma porcentagem limite de adição em relação a massa de cimento: para cinzas volantes = 33% para CEM I e 25% para CEM II / A, para sílica fume = 11% e para a escória 50% (CEM I e CEM II / A). Além disso, para sílica ativa, o teor mínimo de cimento não pode ser inferior a 30 kg/m<sup>3</sup>. Importante

ressaltar que, caso existam dados complementares e ensaios, a EN206 permite uma flexibilização nestes valores (Hooton, 2019).

Importante destacar esta definição prévia em relação às adições Pozolânicas na EN206, pois já demonstram o quão importante e usual é a sua adição nos concretos, definindo ainda limites normativos para tal.

**Tabela 10:** Classes de agressividade ambiental conforme EN 206-1 (CEN, 2000).

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos de ocorrência
<b>Sem risco de corrosão ou ataque</b>		
X0	Para concreto não armado e sem metais na composição: todas as exposições, exceto ao gelo e degelo, à abrasão ou ataque químico. Para concreto armado ou com metais: ambiente muito seco.	Concreto no interior de edificações com umidade do ar muito baixa.
<b>Corrosão Induzida por carbonatação</b>		
XC1	Seco ou permanentemente úmido.	Concreto no interior de edifícios com baixa umidade do ar ou permanentemente submerso em água.
XC2	Úmido, raramente seco.	Superfícies de concreto sujeitas a longos períodos de contato com água. Algumas fundações.
XC3	Moderadamente úmido.	Concreto no interior de edifícios com moderada ou elevada umidade do ar. Concreto no exterior protegido da chuva.
XC4	Ciclicamente úmido e seco.	Superfícies de concreto sujeitas ao contato com a água, fora do âmbito da classe XC2.
<b>Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar</b>		
XD1	Moderadamente úmido.	Superfícies de concreto expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Úmido, raramente seco.	Piscinas. Concreto exposto a águas industriais contendo cloretos.
XD3	Ciclicamente úmido e seco.	Partes de pontes expostas a água contendo cloretos. Pavimentos. Lajes de estacionamento de automóveis.
<b>Corrosão induzida por cloretos da água do mar</b>		
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com água do mar.	Estruturas em zona costeira ou na sua proximidade.
XS2	Submersão permanente.	Partes de estruturas marítimas.
XS3	Zonas de marés ou de rebentação.	Partes de estruturas marítimas.
<b>Ataque pelo gelo e degelo com ou sem produtos descongelantes</b>		
XF1	Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes.	Superfícies verticais de concreto expostas à chuva e ao gelo.
XF2	Moderadamente saturado de água com produtos descongelantes.	Superfícies verticais de concreto de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar.
XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes.	Superfícies horizontais de concreto expostas à chuva e ao gelo.
XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes.	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes. Superfícies de concreto expostas ao gelo e água contendo produtos descongelantes. Zona das estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo.
<b>Ataque químico</b>		
XA1	Ligeiramente agressivo	
XA2	Moderadamente agressivo	
XA3	Fortemente agressivo	
<b>Desgaste</b>		
XM1	Desgaste moderado	
XM2	Desgaste severo	
XM3	Desgaste muito severo	

Fonte: PAULA (2018)

A EN206 também prevê métodos probabilísticos e de fator parcial embasados no fib Model code 2010, para prever a vida útil da estrutura e avaliar quesitos projetuais de durabilidade.

Na Austrália a AS 3600 – Concrete Structures é a norma responsável pelas definições de estruturas de concreto e, conseqüentemente, sua durabilidade. Além de todas as classes de agressividade constantes na ACI, incluem diferentes classes e requisitos para a exposição direta à água do mar em zonas permanentemente submersas, marés e de pulverização, bem como para

zonas costeiras (dentro de 1 km do mar) e exposições costeiras (1 a 50 km do mar) levando inclusive a topografia em consideração (Hooton, 2019).

Fato importante de se destacar é a utilização do documento CIA Z7/01 **DURABILITY PLANNING** pela norma Australiana. Este documento formaliza o processo de execução e atribui a obrigatoriedade do acompanhamento por um Consultor de Durabilidade. O Consultor de Durabilidade atua para garantir que as premissas de projeto serão seguidas e que os objetivos do proprietário do ativo serão alcançados, ou seja, cumprindo questões projetuais de vida útil (Hooton, 2019).

As normativas internacionais evidenciam que a NBR ainda apresenta lacunas importantes em diversos aspectos relacionados à durabilidade. Um dos principais pontos diz respeito à limitação das classes de agressividade ambiental a apenas quatro categorias, o que se mostra insuficiente diante da diversidade de condições reais de exposição. A adoção de uma classificação mais ampla e combinada, como ocorre em normas internacionais, pode oferecer maior precisão nas especificações projetuais.

Outro ponto relevante refere-se ao uso de adições pozolânicas. Embora seja reconhecido que sua incorporação consome  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e reduza a alcalinidade da solução porosa, o que potencialmente diminui o teor crítico de cloretos necessário para a despassivação da armadura (Gomes, 2013), estudos indicam que os benefícios superam as desvantagens. Coutinho (2012) aponta que a redução da permeabilidade proporcionada por determinadas pozolanas, especialmente quando acompanhada de cura úmida prolongada, promove significativa proteção das armaduras em virtude da densificação da matriz do concreto.

Complementarmente, Ollivier e Vichot (2014) ressaltam que, ainda que o valor crítico de despassivação seja alterado, o fator determinante para o processo corrosivo é a velocidade de penetração dos cloretos, e esta é substancialmente reduzida pelo uso adequado de adições minerais.

Assim, as exigências normativas internacionais relativas às pozolanas e seus parâmetros de uso representam avanços que poderiam ser incorporados às normas brasileiras, especialmente para estruturas expostas a ambientes com alto potencial de deterioração. Finalmente, recomendações relativas à previsão da vida útil por meio de modelos probabilísticos, bem como o acompanhamento técnico por especialistas ao longo do ciclo de projeto e execução, tendem a fortalecer significativamente a confiabilidade e longevidade das estruturas de concreto armado.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Discussão E Proposta De Parâmetros Para Projetos, Desenvolvendo Projeto De Durabilidade**

Indicadores de durabilidade devem ser aplicados para a elaboração dos projetos de estruturas de concreto armado, eles de fato representarão um grande avanço na garantia da vida útil de projetos, principalmente aqueles que cobram maior competência neste quesito (Ribeiro, Cascudo, 2018).

Avaliar de forma resumida e objetiva, como proposto pela NBR 6118:2014, se atentando basicamente a classes de agressividade, relação a/c, tipo de concreto e cobrimento, podem, muitas vezes, não ser o suficiente para atender a durabilidade em concretos expostos a cloretos.

Assim, se faz necessário a avaliação de outros parâmetros para realmente abordarmos um projeto estrutural com foco na durabilidade. Avaliar a resistividade elétrica, a difusão por cloretos, a permeabilidade à água e a absorção de água por capilaridade e imersão, podem fornecer parâmetros mais adequados aos projetos. Ante o exposto, propõe-se a complementação

da norma com parâmetros de ensaio que especifiquem coeficientes de migração/difusão de cloretos, ensaios de absorção de água, ensaios de resistividade elétrica e volumétrica, ensaios de ultrassom, e sobretudo que especifique melhor os parâmetros a serem adotados em condições com cloretos, carbonatação, chuvas ácidas, dentre outros.

Um trabalho realizado por Alves (2019), faz uma tabulação geral dos principais indicadores, parâmetros, métodos e critérios de avaliação, que podem contribuir fortemente para os quesitos de durabilidade, segue Tabela 11.1 e Tabela 11.2.

**Tabela 11.1:** Parâmetros, métodos e critérios de avaliação.

Item	Parâmetros	Métodos	Crítérios de Avaliação - Normalizados	Crítérios de Avaliação - Postulados	Denotação
1	Absorção de água por imersão (%)	NBR 9778:2005	CEB-192 (1989) - Absorção < 3%		Baixa Absorção - Qualidade Boa
			CEB-192 (1989) - Absorção 3% - 5%		Média Absorção - Qualidade Média
			CEB-192 (1989) - Absorção > 5%		Alta Absorção - Qualidade Pobre
2	Permeabilidade a água do concreto	CEB - 192	< 10 <sup>-12</sup> (m/s)		Permeabilidade: Baixa - Qualidade do concreto: Boa
			10 <sup>-12</sup> - 10 <sup>-15</sup> (m/s)		Permeabilidade: Média - Qualidade do concreto: Média
			> 10 <sup>-15</sup> (m/s)		Permeabilidade: Alta - Qualidade do concreto: Pobre
3	Absorção de água por capilaridade (%)	NBR 9779:2012			
4	Absorção / permeabilidade à água (%)	Cachimbo (CSTC NIT 224:2002)			
5	Penetração de água sob pressão	NBR 10787:2011			
6	Índice de vazios (%)	NBR 9778:2005			
7	Coefficiente de permeabilidade ao gás - Parâmetro GEMBUERAU normalizado RILEM TC 116-PCD	AFREM - AFPC			
8	Coefficiente de permeabilidade ao gás	FIGG		Cather <i>et al.</i> (1984) Tempo (s) < 30	Categoria de qualidade 0 - Pobre
				Cather <i>et al.</i> (1984) Tempo (s) 30 - 100	Categoria de qualidade 1 - Moderado
				Cather <i>et al.</i> (1984) Tempo (s) 100 - 300	Categoria de qualidade 2 - Satisfatório
				Cather <i>et al.</i> (1984) Tempo (s) 300 - 1000	Categoria de qualidade 3 - Bom
				Cather <i>et al.</i> (1984) Tempo (s) > 1000	Categoria de qualidade 4 - Excelente
9	Difusão/migração de cloretos em regime não estacionário	NT BUILT 492:1999		G <sub>jetv</sub> (2001): D <sub>ca</sub> ≥ 15 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Reduzida
				G <sub>jetv</sub> (2001): 10 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s < D <sub>ca</sub> < 15 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Moderada
				G <sub>jetv</sub> (2001): 5 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s < D <sub>ca</sub> ≤ 10 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Elevada
				G <sub>jetv</sub> (2001): 2,5 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s < D <sub>ca</sub> ≤ 5 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Muito elevada
				G <sub>jetv</sub> (2001): D <sub>ca</sub> ≤ 2,5 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Ultra elevada

Fonte: ALVES (2019)

**Tabela 11.2:** Parâmetros, métodos e critérios de avaliação.

Item	Parâmetros	Métodos	Crítérios de Avaliação - Normalizados	Crítérios de Avaliação - Postulados	Denotação
10	Coefficiente de carbonatação				
11	Resistividade elétrica aparente superficial do concreto	Wenner (ASTM G 57: 1995) - Métodos dos 4 eletrodos - CEB 192	Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm) > 20		Desprezível
			Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm) 10 a 20		Baixa
			Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm) 5 a 10		Alta
			Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm) < 5		Muito alta
12	Penetrabilidade de íons cloreto	ASTM C 1202: 1992	Carga passante (C) > 4000		Penetração de íons cloretos - Alta
			Carga passante (C) 2000 - 4000		Penetração de íons cloretos - Moderada
			Carga passante (C) 1000 - 2000		Penetração de íons cloretos - Baixa
			Carga passante (C) 100 - 1000		Penetração de íons cloretos - Muito baixa
			Carga passante (C) < 100		Penetração de íons cloretos - Desprezível
13	Potencial de corrosão	ASTM C 876: 1991	Potencial de corrosão ECS (mV) - mais negativo que - 276		Probabilidade de corrosão > 90%
			Potencial de corrosão ECS (mV) - mais positivo que - 126		Probabilidade de corrosão < 10%
			Potencial de corrosão ECS (mV) - entre - 126 e - 276		Probabilidade de corrosão Incerta
14	Taxa de corrosão gravimétrica das armaduras	ASTM G 1: 1990		ALONSO e ANDRADE (1990): Taxa de corrosão μm/ano < 1,15	Desprezível
				ALONSO e ANDRADE (1990): Taxa de corrosão μm/ano 1,1 - 5,75	Baixa
				ALONSO e ANDRADE (1990): Taxa de corrosão μm/ano 5,75 - 11,5	Moderado
				ALONSO e ANDRADE (1990): Taxa de corrosão μm/ano > 11,5	Alta

Fonte: ALVES (2019)

Estudos realizado por Paula (2018), comparando concretos, demonstra o quanto estes parâmetros são importantes indicadores no quesito durabilidade. Um determinado concreto com

a/c de 0,76, resistência à compressão 31,6 MPa, apresentou resistência à penetração do cloreto extremamente alta, 2,3 kΩ.cm, e outro concreto de a/c de 0,45 e 73,4 MPa, apresentou resistência à penetração do cloreto moderada, 13,7 kΩ.cm.

Portanto, apenas a relação a/c e a classe de concreto não demonstraram uma realidade para a resistência à cloretos. Neste caso, a mistura do primeiro concreto, que utilizou cimento pozolânico CP IV e teve um percentual de cimento substituído pela sílica ativa, apresentou maior resistência à penetração, já o segundo que utilizou cimento CP II F sem adições, apresentou menor resistência.

A medida de resistividade elétrica de um concreto permite avaliar o contexto eletrolítico no qual está inserida a armadura. Um concreto de baixa resistividade constitui um eletrólito favorável a corrosão, enquanto um concreto muito resistivo opões se ao estabelecimento de correntes iônicas, limitando assim a cinética da corrosão. A informação dada pela resistividade elétrica é qualitativa e apenas atesta sobre o risco de corrosão (Ollivier, Vichot, 2014).

Um concreto com alta resistividade elétrica pode apresentar uma baixa permeabilidade, impedindo o fluxo de corrente entre as regiões anódicas e catódicas, ou seja, barrando o ataque por cloretos (Freire,2005). As adições minerais provocam alterações na resistividade, que ocorrem devido alterações químicas na solução do poro, reduzindo significativamente a redução no meio aquoso (Pires, 2016).

Atingir uma resistividade elevada nos concretos é um dado muito significativo, pois acena para uma dificuldade muito alta em termos do transporte de espécies iônicas no concreto, como os cloretos por exemplo (Paula, 2018). A resistividade elétrica superficial é uma propriedade do concreto que possui uma relação muito estreita com a durabilidade (Cascardo,1997). Conclusivamente, pode-se afirmar que a resistividade inicial alta nos concretos é um indicativo de boas características de durabilidade para concretos sujeitos a ataque por cloretos.

A utilização desse ensaio é bastante vantajosa, uma vez que sua realização é simples, podendo ser realizado exatamente nos elementos estruturais que se deseja medir. Isso permite uma avaliação indireta da ocorrência de atividade do processo de corrosão das armaduras no interior do concreto.

O método utilizado é o de Wenner, normalizado pela ASTM G57 (ASTM,2002) conforme Tabela 12.

**Tabela 12** - Classificação do concreto quanto à resistividade elétrica superficial aparente – método de Wenner.

Parâmetro	Método	Critérios de Avaliação	Indicação de probabilidade de corrosão
Resistividade elétrica aparente superficial do concreto - (kΩ.cm)	Wenner (ASTM G 57: 2002) - Métodos dos 4 eletrodos - CEB 192	> 20	Desprezível
		10 a 20	Baixa
		5 a 10	Alta
		< 5	Muito alta

Fonte: ALVES (2019)

Um trabalho realizado por Alves (2019) demonstrou que o indicador de resistividade elétrica superficial aparente, método de Wenner, apresentou ter forte correlação com importantes indicadores que monitoram a probabilidade de corrosão das armaduras e, principalmente, com aqueles que estão atrelados ao transporte de cloretos através do concreto.

A difusão de cloretos, pode ser medida no ensaio de migração de cloretos no estado estacionário ou não estacionário, ambos permitem a obtenção de um parâmetro intrínseco à

durabilidade dos concretos, e aos mecanismos de transporte (Paula, 2018). O ensaio foi sugerido por Tang e Nilsson (1992) e está descrito na publicação finlandesa NT BUILD 492 – Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steadystate migration experiments (Nordtest, 1999).

Os íons cloreto podem penetrar por difusão devido a gradientes de concentração (circunstância análoga ao ingresso da humidade) ou por eletromigração, segundo a ação de um campo elétrico externo. Apesar destes mecanismos de transporte se processarem sob leis de velocidade distintas e serem suscetíveis de ocorrência de forma individual ou em simultâneo, podem também ser previstos através de modelos de cálculo, como o modelo matemático que recorre na 1ª e 2ª Lei de Fick (Santos, 2014).

O coeficiente de difusão aparente dos cloretos é dependente das adições minerais. Respeitando se uma cura úmida adequada, a adição de escoria de alto forno, de cinza volante ou de sílica ativa reduz de maneira notável os coeficientes de difusão dos cloretos no concreto (Ollivier, Vichot, 2014).

Outro indicador, a permeabilidade à água, é prescrita pela NBR 10786 (ABNT, 2013), e expressará a velocidade de percolação de água no concreto, demonstrando a quão densa é a rede de poros de determinado concreto através da lei de Darcy.

É importante destacar que, de maneira geral, os concretos atuais apresentam uma boa qualificação de mistura, ou seja, baixas relações a/c, considerável consumo de cimento e boa compactação, portanto serão concretos com baixa permeabilidade, apresentando coeficientes de permeabilidade menores ou entre os valores de 10-12 a 10-10, ou seja, os resultados podem não ser conclusivos para a classificação de durabilidade (Paula, 2018).

Também é possível avaliar indicadores de durabilidade através de ensaios de absorção de água, estes possuem uma boa correlação com as propriedades mecânicas e de mecanismos de transporte no concreto. O ensaio de imersão fornece dados que podem ser correlacionados com a porosidade do concreto, já o ensaio de absorção por capilaridade pode ser relacionado com a permeabilidade, além de que este último auxilia no cálculo do raio médio dos capilares do concreto.

Assim, estes ensaios de absorção, por se tratarem de simples e bem descritos na NBR, poderiam ser facilmente exigidos para concretos suscetíveis aos ataques por cloreto, sendo assim mais um parâmetro para qualificação do projeto.

Além destes indicadores que podem ser previstos desde a concepção projetual, os critérios de execução também devem ser considerados, dentre eles a cura do concreto merece destaque.

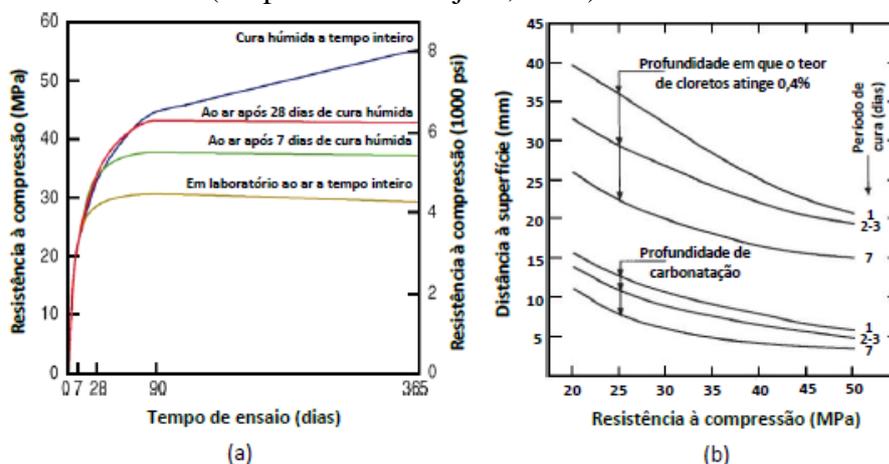
Os processos de cura auxiliam na formação do gel *CSH*, que irá permitir a segmentação (bloqueio) dos poros capilares na pasta cimentícia e, conseqüentemente, torná-la mais resistente à penetração de agentes agressivos suscetíveis de progredir até ao nível das armaduras (Bertolini *et al.*, 2004; Coutinho, 2005).

Com o intuito de se obter uma adequada cura do concreto, é necessário prevenir a evaporação prematura da água, que tende a ser acelerada pelo vento, gradientes térmicos (temperatura do concreto superior à temperatura ambiente devido ao calor de hidratação) e baixa humidade relativa (Bertolini *et al.*, 2004).

De acordo com Luca Bertolini *et al.* (2004), numa fase inicial, caso não seja preservada a humidade no concreto, entre 3 a 7 dias, ocorrerá a suspensão das reações de hidratação do concreto (após a sua interrupção, não existe forma de garantir o seu restabelecimento) e a resistência à compressão aos 28 dias será inferior à pretendida. Apesar de este ser um inconveniente em termos de resistência, as conseqüências de uma cura inadequada são piores a nível de durabilidade.

O fato exposto através da Gráfico 1:

**Gráfico 1** - Efeito do período de cura no desenvolvimento da resistência à compressão aos 7, 28, 90 e 365 dias (a) (adaptado de Soroka, 1993); Efeito do período de cura e da resistência à compressão na profundidade de carbonatação e penetração de cloretos após 1 ano (b) (adaptado de Zemajstis, 2014).

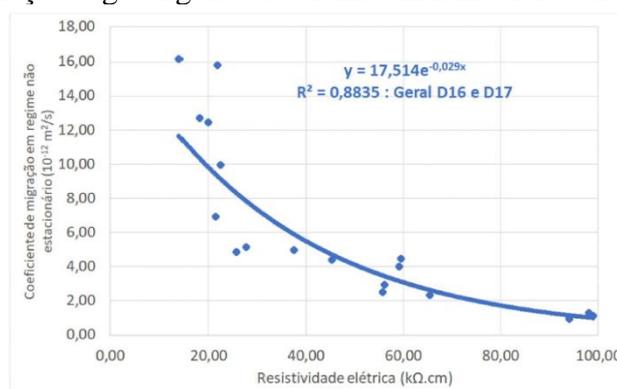


Fonte: SANTOS (2014)

Desta forma, se faz necessário, assim como na norma portuguesa NP EN 13670:2011 – Execução de Estruturas de Betão, que o período e tipo de cura recomendado seja definido em função das características do concreto. Desta forma, as classes de cura designam os períodos mínimos de cura, em função da resistência à compressão característica aos 28 dias pretendida para a camada superficial do concreto.

Buscando cada vez mais metodologias para desenvolver os indicadores de durabilidade, Alves (2019) propôs correlacionar diferentes indicadores, o que trouxe resultados muito relevantes, segue Gráfico 2:

**Gráfico 2:** Curva de correlação entre Resistividade elétrica e coeficiente de migração em regime não estacionário, utilizando concretos de REFERÊNCIA e ADIÇÕES em todas as relações água/ligante. TOTAL GERAL - D16 e D17.



Fonte: ALVES (2019)

Importante ressaltar o quanto a correlação é assertiva, gerando inclusive um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,88$ , ou seja, concretos com menores coeficientes de migração de cloretos em regime não estacionário também são concretos com maior resistividade elétrica.

Alves (2019), ainda afirma que além de comprovar enorme correlação entre os indicadores de resistividade elétrica e o coeficiente de migração de cloretos, foi possível

perceber que esses concretos se tornaram extremamente competentes, fato atribuído as contribuições auferidas pelas adições minerais, neste caso de sílica ativa e o metacaulim.

A velocidade da penetração dos cloretos depende da porosidade da pasta de cimento, seu valor dependerá da concentração de cloretos da solução intersticial e também do cátion associado, conforme exposto pela primeira lei de Fick. Existe ainda uma diferença na difusão de cloretos combinados como por exemplo  $\text{CaCl}_2$  que é mais rápida quando comparada com cátions monovalentes como o  $\text{CaCl}$ . Estudos ainda indicam que a fixação por cloretos reduz a dimensão dos poros menores, modificando assim a morfologia das fibras C-S-H. Portanto os cloretos livres, como os combinados modificam a geometria dos poros, influenciando o processo de penetração. Essas considerações ressaltam a complexidade das interações entre os diferentes fatores que intervêm na difusão dos cloretos (Ollivier, Vichot, 2014).

Devido a essa complexidade se faz necessário buscar novas alternativas para o desenvolvimento de projetos de durabilidade, com a abordagem baseada em desempenho (Baroghel, 2006), pois a abordagem clássica na qual se considerava apenas a resistência mecânica do concreto possivelmente não será capaz de suprir quesitos primordiais para a durabilidade.

Dentro desta perspectiva Ollivier, Vichot (2014), fazem uma proposta de uma tabela guia para a durabilidade, embasada em alguns indicadores, como o de absorção de água, difusão de cloretos, permeabilidade ao gás e permeabilidade à água, conforme Figura 2 abaixo, onde:

Diferentes níveis de exigência (1 a 5) são definidos em função da vida útil e categoria da estrutura, e valores limites para quatro indicadores relevantes do ponto de vista de corrosão, sendo:

- $P_{\text{água}}$ : porosidade do concreto obtida por meio do ensaio de absorção de água por imersão;
- $D_{\text{a(mig)}}$ : coeficiente de difusão aparente de íons cloro obtido por ensaio de migração elétrica;
- $k_{\text{gás}}$ : permeabilidade ao gás;
- $k_{\text{liq}}$ : permeabilidade à água;

**Figura 2:** Indicadores de durabilidade e valores limites propostos em função do tipo de ambiente e da vida útil exigida (AFGC, 2004). Caso de iniciação da corrosão pelos cloretos.

$P_{\text{água}}$  é dada em %,  $D_{\text{a(mig)}}$  é dado em  $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
 $K_{\text{gás}}$  (para  $s=0$  e para  $P_{\text{entrada}} = 0,2 \text{ MPa}$ ) é dado em  $10^{-18} \text{ m}^2$  e  $K_{\text{liq}}$  é dado em  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

Tipo de ambiente	Corrosão induzida por cloretos (e = 50 mm)			
	5 Exposição a sais marinhos ou de degelo		6 Imersão em água contendo cloretos	7 Zona de maré
Vida útil exigida Categoria da estrutura Nível de exigência	5.1 [Cl <sup>-</sup> ] baixa <sup>(1)</sup>	5.2 [Cl <sup>-</sup> ] alta <sup>(2)</sup>		
< 30 anos Nível 1	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 14$
De 30 a 50 anos Edificação Nível 2	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 11$	$P_{\text{água}} < 13$	$P_{\text{água}} < 11$
De 50 a 100 anos Edificação e demais obras civis Nível 3	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 11$ $D_{\text{a(mig)}} < 2$ $K_{\text{liq}} < 0,1$ <sup>(3)</sup>	$P_{\text{água}} < 13$ $D_{\text{a(mig)}} < 7$	$P_{\text{água}} < 11$ $D_{\text{a(mig)}} < 3$ $K_{\text{liq}} < 0,1$ <sup>(3)</sup>
De 100 a 120 anos Grandes estruturas/ Obras de grande porte Nível 4	$P_{\text{água}} < 12$ $D_{\text{a(mig)}} < 20$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,1$ <sup>(3)</sup>	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{água}} < 12$ $D_{\text{a(mig)}} < 5$	$P_{\text{água}} < 10$ $D_{\text{a(mig)}} < 2$ $K_{\text{gás}} < 100$ $K_{\text{liq}} < 0,05$
> 120 anos Estruturas excepcionais Nível 5	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 20$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 1$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{\text{a(mig)}} < 20$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$

Durabilidade potencial baixa	1) concentração de cloretos livres na superfície $\leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
Durabilidade potencial média	2) concentração de cloretos livres na superfície $\geq 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
Durabilidade potencial elevada	3) alternativa: $K_{\text{gás}} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
Durabilidade potencial muito elevada	4) alternativa: $K_{\text{liq}} < 0,01 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
	5) alternativa: $p < 15\%$ e $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25\%$
	6) alternativa: $p < 16\%$ e $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25\%$
	7) alternativa: $p < 14\%$ e $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25\%$
	8) alternativa: $K_{\text{gás}} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ e $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25\%$
	9) alternativas: 1) $K_{\text{gás}} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
	2) $K_{\text{gás}} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ e $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25\%$

Fonte: OLLIVIER, VICHOT (2014)

Importante salientar que as especificações para a tabela foram estabelecidas com base em dados experimentais, e foram verificadas por simulações numéricas efetuadas com auxílio de modelos empíricos (abordagem determinística ou probabilística) e físicos. As especificações correspondem a medidas realizadas segundo métodos descritos no guia AFGC (2004), em corpos de prova armazenados em água por mais de três meses após a moldagem (Ollivier, Vichot, 2014).

Após a exposição dos principais indicadores de durabilidade e da relevância da sua incorporação desde a fase de concepção estrutural, constata-se que a metodologia atualmente preconizada pela NBR 6118 se mostra limitada para atender estruturas submetidas a classes elevadas de agressividade. Isso se deve, sobretudo, à ausência de critérios quantitativos e à dependência de parâmetros indiretos, como relação *a/c* e cobrimento.

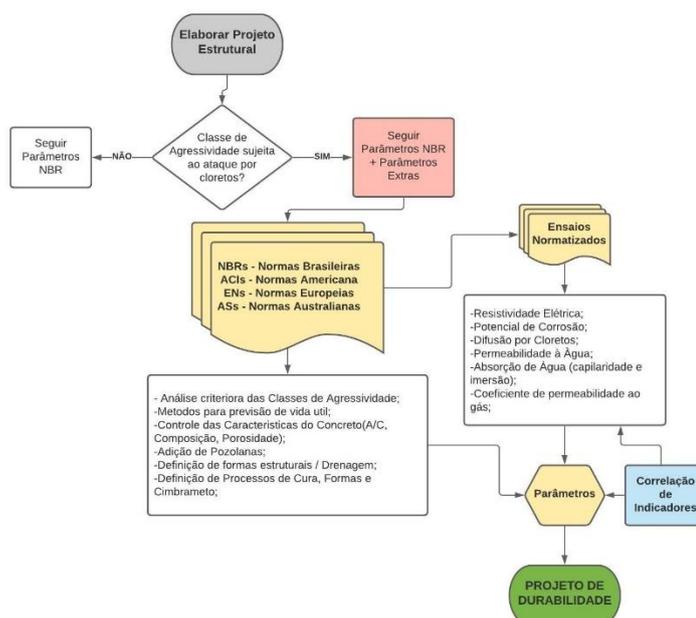
Neste contexto, este artigo propõe um fluxograma orientador para a elaboração de projetos de durabilidade com base em indicadores mensuráveis e dados de desempenho. A proposta visa fornecer uma estrutura metodológica prática que possa ser incorporada ao processo projetual por engenheiros, projetistas e consultores técnicos, considerando não apenas os requisitos normativos vigentes, mas também ferramentas de avaliação complementar já consolidadas em pesquisas nacionais e internacionais.

O Fluxograma 1 estabelece uma sequência lógica de etapas desde a definição da classe de agressividade ambiental até a correlação entre os indicadores técnicos (como resistividade elétrica, coeficiente de migração de cloretos, permeabilidade e absorção), promovendo um sistema de decisão robusto e tecnicamente embasado para a definição de parâmetros projetuais.

Ressalta-se que este fluxograma deve ser compreendido como um instrumento de base conceitual e aplicada, passível de refinamento mediante estudos de caso e análises de efetividade futura. Ainda assim, sua adoção pode representar um importante passo para a consolidação de uma abordagem baseada em desempenho no contexto da engenharia estrutural brasileira.

A adoção sistematizada de indicadores, como demonstrado ao longo deste artigo, permite não apenas o aumento da confiabilidade das estruturas em ambientes agressivos, mas também contribui para a longevidade, segurança e sustentabilidade das obras de engenharia.

**Fluxograma 1:** Elaboração de Projeto de Durabilidade em Ambientes Agressivos.



Fonte: Autor (2024)

Assim, mais do que um roteiro ilustrativo, o fluxograma proposto neste trabalho representa uma oportunidade concreta para fomentar a padronização de boas práticas no Brasil, ampliando o diálogo entre a pesquisa acadêmica e a prática projetual. Ao sistematizar critérios técnicos mensuráveis e correlacionáveis, essa ferramenta pode contribuir não apenas para a longevidade das estruturas, mas também para o amadurecimento normativo em direção a uma abordagem baseada em desempenho, alinhada às diretrizes internacionais mais avançadas.

## CONCLUSÃO

A análise técnica realizada ao longo deste estudo evidenciou que a durabilidade de estruturas de concreto armado, especialmente em ambientes agressivos, não pode ser assegurada apenas pela aplicação direta dos requisitos mínimos previstos nas normas brasileiras atuais, como a NBR 6118:2014 e a NBR 12655:2015. A abordagem normativa nacional, embora represente um avanço importante na sistematização do projeto estrutural, ainda carece de parâmetros quantitativos específicos que permitam estimar e controlar de forma eficaz os mecanismos de degradação associados à corrosão por cloretos.

Foi demonstrado que múltiplos fatores interagem de forma complexa no processo de penetração de agentes agressivos — incluindo a espessura do revestimento, a permeabilidade do concreto, a presença de adições pozolânicas, a qualidade da cura e a densificação da matriz cimentícia. Nenhum desses fatores, isoladamente, é suficiente para garantir a durabilidade estrutural. Por essa razão, a adoção de indicadores de desempenho como resistividade elétrica, coeficientes de difusão de cloretos, absorção de água e permeabilidade à água e ao gás deve ser considerada como diretriz técnica complementar e essencial para o dimensionamento de estruturas duráveis.

Normas internacionais, como a EN 206 (Europa), o ACI 318 (EUA) e a AS 3600 (Austrália), demonstram caminhos avançados ao instituírem critérios objetivos, métodos de previsão de vida útil e exigências vinculadas ao uso de adições minerais e ao acompanhamento técnico especializado. Essas práticas oferecem não apenas maior segurança técnica, como também reforçam a confiabilidade e o desempenho das estruturas ao longo do tempo.

Diante disso, o presente trabalho propôs um fluxograma lógico para auxiliar projetistas na elaboração de Projetos de Durabilidade, integrando os indicadores discutidos e ressaltando a necessidade de correlação entre eles. Esta proposta não visa substituir os critérios normativos nacionais, mas complementá-los com ferramentas que permitam maior precisão no enfrentamento das condições agressivas, favorecendo o atendimento à vida útil de projeto.

Recomenda-se, portanto, a revisão e ampliação das NBRs vigentes no que tange à durabilidade, especialmente nos quesitos de classificação de agressividade, incorporação de ensaios padronizados e exigência de parâmetros de desempenho. A evolução normativa traria ganhos expressivos sob os aspectos técnico, econômico, social e ambiental, promovendo estruturas mais resilientes, sustentáveis e com menores custos de manutenção ao longo de seu ciclo de vida.

## REFERÊNCIAS

ABNT - **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2014.

ABNT - **NBR 12655** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, fev. 2015.

ABNT - **NBR 15575 - 1**, Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - **NBR 15575 - 2**, Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - **NBR 15575 - 3**, Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de piso. Rio de Janeiro, 2013.

ACI 201.2R-16, Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2016.

ACI C301, Specifications for Structural Concrete, ACI 301–16, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2016.

ACI 318–19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2019.

AFGC, Guide. **Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Matîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-reaction** – Etat de l'art et guide pour la mise em oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC, Bagneux, juillet 2004), 252p.

ALVES, A. C. C. **Indicadores de Durabilidade do Concreto – Contribuição aos Parâmetros e Critérios de avaliação para Ambientes Contendo Cloretos**, Goiânia, Brasil, 2019. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. **Durabilidade do concreto a partir da abordagem de desempenho**. Tradução de P. K. X. Bastos. In: CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Eds. Trad.); OLLIVIER, J.-P.; VICHOT, A. (Eds.). Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1. ed. São Paulo: Ibracon.2014.

BERTOLINI, Luca et. al. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**. ed. Wiley, 2004. ISBN 3-527-30800-8.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da Carbonatação no Concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, cap.24, vol 1, 2011, p. 849 – 885.

CASCUDO, O. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de corrosão da armadura**. In: ISAIA, G.C. (ed.), Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, Editora UFG/São Paulo, 1997.

CIA, Concrete Durability Series, **Durability Planning**, Concrete Institute of Australia Recommended Practice Z7/01, Sydney, 2014.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do betão**: Volume I. 5ª ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2012. ISBN 978-972-49-0326-2.

COUTINHO, A. S. – **Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem**. 1ª ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,2005. ISBN 972-752-073-1.

CUSSON, D.; ISGOR, B. **Durability of concrete structures: prevention, evaluation, inspection, repair and prediction**, National Research Council Canada, NRCC-46624, Canada, 2004.

EN 197-1, Cement—Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 206, Concrete—Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardisation, Brussels, 2016.

EN 450-1 Fly Ash for Concrete—Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 13263-1 Silica Fume for Concrete—Part 1: Definitions, Requirements and Conformity Criteria, European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 15167-1 Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete, Mortar, and Grout,—Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, European Committee for Standardisation, Brussels.

Fib, Model Code, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2010.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto**. Curitiba, 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Parana. 2005.

GOMES, A.; et. Al. **Materiais de Construção: Cimento Portland e Adições**. Instituto Superior Técnico, 2013.

HOOTON, R. D. **Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures**, Cement and Concrete Research, Volume 124, 2019, 105827, ISSN 0008-8846. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105827>

MEDEIROS, S. F. L.; NOBREGA, S. H. S. NOBREGA, P. G. B. **Implicações da Norma de Desempenho NBR 15575:2013 no Projeto de Estruturas de Concreto**, anais do 58º congresso brasileiro do concreto cbc2016, outubro 2016, IBRACON, ISSN. 2175-8182.

NACE - Associação Nacional de Engenheiros de Corrosão. Custos de corrosão e estratégias preventivas nos Estados Unidos; No. FHWA-RD-01-156; Internacional: Houston, TX, EUA, 2002.

NP EN 13670. 2011. Execução de estruturas de betão. Monte da Caparica. Instituto Português da Qualidade.

OLIVEIRA, A. M. de. **Avaliação do Desempenho de Concretos com Adições Mineraias quanto à Corrosão das Armaduras Induzida por Cloretos**. 2007. 276 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

OLLIVIER, J.P.; VICHOT A. **Durabilidade do concreto, Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**, tradução, CASCUDO, O.; CARASEK, H. 1ª Edição, Editora IBRACON, São Paulo, 2014.

PAULA, Marcelo Cândido – **Avaliação da Durabilidade de Concretos Fornecidos por Centrais Dosadores**. Goiânia, Brasil, 2018. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

PIRES, P. F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições mineraias**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

RIBEIRO, D. V.; CASCUDO, O. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: RIBEIRO, D. V. (Org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto - Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. v. 1, 2. ed. Rio de Janeiro:Elsevier Editora Ltda., 2018. Cap. 3, p. 33-50.

SANTOS, T. M. H. **Corrosão das Armaduras do Betão Armado Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade** - Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, LISBOA, 2014.

ZEMAJTSIS, J. Z. **Role of concrete curing**. America's Cement Manufacturers. 2014.