

PROJETO DE DURABILIDADE PARA CONCRETO ARMADO EXPOSTO A CARBONATAÇÃO

DURABILITY PROJECT FOR REINFORCED CONCRETE EXPOSED TO CARBONATION

WEIBULL, Jon Karl¹
SILVA, Hyuri Sales da²
SILVA, Gustavo de Carvalho³
MARTINS, Fabiano Battemarco da Silva⁴

Resumo: O concreto armado surgiu no final do século XIX como uma revolução, um material robusto, que duraria para sempre. Fazia sentido à época, dadas as propriedades do concreto e do aço, a maneira como trabalhavam em sinergia. Passada a vida útil das estruturas, patologias começaram a surgir e conseqüentemente, pesquisas buscando respostas para os problemas que passaram a afligir a tecnologia construtiva número um no mundo. Em torno da década de 1960 começam, ao redor do mundo, estudos sobre a durabilidade e como prevenir patologias ou reabilitar estruturas de concreto armado. No Brasil, a norma de concreto armado, NBR 6118 (ABNT, 2014) cita a necessidade de cumprimento da vida útil da estrutura em condições de serviço e segurança para as adversidades ambientais à época do projeto. Enquanto normas de durabilidade têm sido desenvolvidas ao longo dos últimos anos, como a norma para RAA, NBR 15577, partes 1 a 7 (ABNT, 2018) e para ataque por sulfatos, NBR 13583 (ABNT, 2014), ainda faltam normas que guiem o projetista para o cumprimento da vida útil exigida pela norma de desempenho NBR 15575, partes 1 a 6 (ABNT, 2013). A principal forma de degradação no concreto armado se dá por corrosão nas armaduras causadas por cloretos e/ou carbonatação. Este artigo apresenta um guia, baseado em técnicas modernas, para o projeto de durabilidade e cálculo estimado da vida útil para estruturas de concreto armado expostas a ataques por carbonatação.

Palavras-chave: concreto armado; patologia; durabilidade; carbonatação.

Abstract: Reinforced concrete emerged at the end of the 19th century as a revolution, a robust material that would last forever. It made sense at the time, given their properties, the way they worked in synergy. After the expiration of the service life expectancy for the structures, pathologies began to emerge and, consequently, researches seeking answers to the problems that had come to afflict the number one constructive technology in the world. Around the 1960s, studies about durability and how to prevent pathologies or rehabilitate reinforced concrete structures began around the world. In Brazil, the reinforced concrete standard, NBR 6118 (ABNT, 2014) mentions the need to comply with the service life expectancy of the structure in terms of serviceability and safety for the environmental adversities at the time of the project. While durability standards have been developed over the past few years, such as the standard for RAA, NBR 15577, parts 1 to 7 (ABNT, 2018) and for exposure to sulphates, NBR 13583 (ABNT, 2014), standards that help the designer to comply with the service life demands in NBR 15575, parts 1 to 6 (ABNT, 2013) are still lacking. The main form of degradation in reinforced concrete is the corrosion of the reinforcement bars, by chlorides and/or carbonation. This article presents a guide, based on modern practices, for designing durability projects and estimating the service life expectancy, at the design phase of reinforced concrete structures exposed to carbonation attacks.

Keywords: reinforced concrete; pathology; durability; carbonation.

¹ Graduado em Engenharia Civil na área de Estruturas pela Universidade Santa Úrsula - jon.weibull@souusu.com.br

² Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Santa Úrsula - hyuri.silva@souusu.com.br

³ Graduado em Engenharia Civil na área de Estruturas pela Universidade Santa Úrsula. - gustavo.carvalho@souusu.com.br

⁴ Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental pela UFRRJ; Professor da Universidade Santa Úrsula - fabiano.battemarco@usu.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado surgiu no final do século XIX, ganhando força rapidamente até se tornar a principal tecnologia construtiva no mundo. Isso transcorreu devido principalmente a uma “promessa” de durabilidade infinda para as estruturas com essa tecnologia, especialmente nos primeiros anos de vida da tecnologia. O concreto possui excelente resistência a compressão, um pH muito alto, da ordem de 12,6 ao final do período de cura, mas possui baixa resistência a tração. Já o aço, possui excelente resistência a tração, mas exposto ao meio ambiente tende a retornar espontaneamente ao seu estado natural, na forma de óxidos, sulfetos e carbonatos, tal qual se encontra na natureza. Esse processo de oxidação do aço, na presença de água e em condições ambientes, é conhecido pelo nome de corrosão. Tanto o concreto, quanto o aço tem coeficientes muito similares de dilatação térmica, ou seja, sob as mesmas condições de temperatura e pressão, sua dilatação ou retração são praticamente idênticas.

A ideia por trás do concreto armado que se tinha à época era simples, inserindo barras de aço nas regiões tracionadas do concreto, o conjunto estaria protegido contra fissuramento e possível ruptura da seção de concreto. Por sua vez, a alta alcalinidade do concreto protegeria as barras de aço contra corrosão e, ao mesmo tempo, as isolaria do contato com o meio ambiente agressivo. Dessa forma, pensou-se haver descoberto uma estrutura “eterna”.

Com o passar da vida útil das estruturas, tal como se conhece hoje, essas estruturas ora pensadas eternas, começaram a apresentar problemas. De acordo com Possan (2010), estes problemas, aliados a custos crescentes em manutenção, motivaram uma busca pelas possíveis causas. O entendimento das causas possibilitou criar medidas que previnam, retardem ou controlem o processo de degradação nessas estruturas. A motivação cada vez mais forte por uma redução nos custos de manutenção das estruturas, que em alguns países chegam a representar até 40% dos recursos da indústria da construção civil segundo Mehta e Monteiro (2008), levou a criação de métodos para estimar e prolongar a vida útil de uma estrutura, ainda em fase de projeto. Nos dias atuais, o estudo destes fenômenos de corrosão e degradação das diversas tecnologias construtivas, incluindo estruturas de concreto armado, é parte pequena de uma esfera muito mais ampla, conhecida como estudo das patologias das edificações. O entendimento das estruturas através das patologias é crucial para que projetistas elaborem projetos com vida útil longa o suficiente para o aproveitamento máximo do material, trazendo vantagens não só estruturais como econômicas ao empreendimento, como concorda Souza e Ripper (1998). Está claro no momento desta redação que o concreto armado é uma excelente tecnologia de construção, mas precisa ser projetada pensando não apenas em resistência

mecânica ou economia construtiva direta, mas sob o prisma da durabilidade e economia a longo prazo. Sendo assim, objetivou-se com esta pesquisa, apresentar um guia, baseado em técnicas modernas, para o entendimento e o projeto de durabilidade e cálculo estimado da vida útil para estruturas de concreto armado expostas a ataques por carbonatação.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Ribeiro e Cascudo (2018) “Um concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada, durante um período previsto”. E continua ressaltando que um concreto durável não é garantia de uma estrutura durável, visto que outros fatores também influem na durabilidade.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) define a vida útil de projeto (VUP) como o tempo para o qual as características das estruturas de concreto se mantêm, atendidos os requisitos de uso e manutenção previstos.

Segundo Possan (2010), o aumento do interesse em durabilidade, aliado aos esforços das instituições internacionais, impulsionou o desenvolvimento dos modelos de comportamento e de previsão da vida útil, resultando em abordagens determinísticas e abordagens estocásticas. A abordagem determinística fornece previsões de vida útil em função de taxas de degradação, enquanto a estocástica em função da probabilidade de ocorrência de cada fator de influência. Já Ribeiro e Cascudo (2018) definem quatro níveis de abordagem, segundo o Quadro 1.

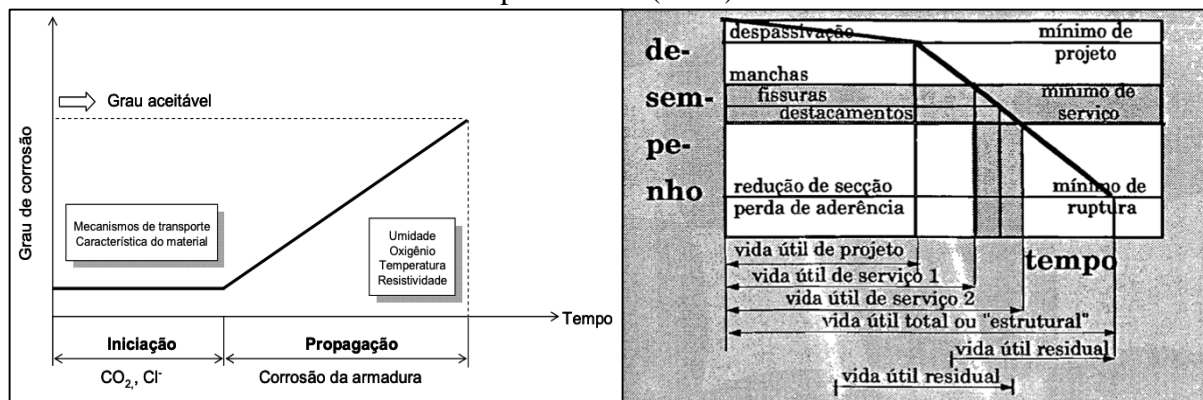
Quadro 1 - Níveis de abordagem em função dos métodos de estudo e projeto de durabilidade

NÍVEL	DESCRIÇÃO
1	Prescritiva, baseado em recomendações visando melhoria da qualidade do concreto por meio de dosagens, drenagens, e outras análises empíricas. $VUP \leq 50$ anos.
2	Mista, soma aos recursos ao nível prescritivo os parâmetros de desempenho, coeficientes de permeabilidade, difusividade e resistividade elétrica. $50 \leq VUP \leq 100$ anos.
3	Desempenho determinístico, modelos preditivos de vida útil baseados nos mecanismos de transporte envolvidos no período de iniciação, absorção, difusão, migração, etc. $VUP \geq 100$ anos.
4	Desempenho probabilístico, exige um grande volume de dados de entrada para ser eficaz, apesar disso, é normativo internacional e faz parte do Eurocode 2 (BSI, 2004), geralmente aplicado a projetos com vida útil de projeto acima de 100 anos. $VUP \geq 100$ anos.

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Cascudo (2018)

Existem diversos modelos para previsão da vida útil de um projeto, alguns mais simples como o de Tuutti (1982), outros mais complexos como o de Helene (1993) (figura 1). O modelo proposto por Helene (1993) é bem completo e se tornou bem aceito levando em conta os diversos estágios de degradação já conhecidos para estruturas de concreto. É importante notar que, independente do modelo analisado, a vida útil do projeto compreende o período que leva até a despassivação das armaduras, também chamado de período de iniciação. Apesar deste modelo completo ser de vital importância para o estudo dos mecanismos de corrosão e o entendimento destas patologias no concreto, para fins de projeto de durabilidade e previsão da vida útil, o período de iniciação receberá toda a atenção. É justamente este período de iniciação que define o tempo necessário para que a frente de carbonatação e/ou de cloretos vençam o cobrimento e alcancem as armaduras, iniciando o processo de corrosão. Deste modo, estimar a vida útil de projeto, para estruturas expostas a cloretos ou gás carbônico, significa encontrar o tempo de iniciação necessário para que a penetração de cloretos e/ou gás carbônico atinjam as armaduras.

Figura 1 – À esquerda, o modelo simplificado de Tuutti (1982) e, à direita, modelo proposto por Helene (1993).



Fonte: Tuutti (1982, apud VIEIRA, 2003) e Helene (1993), respectivamente.

A norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013) estabeleceu desde julho de 2013, critérios mínimos de vida útil de projeto, sendo o desempenho mínimo equivalente 50 anos. Isto significa que uma estrutura deve, com manutenção mínima, ser capaz de resistir a cloretos e a gás carbônico por 50 anos antes de necessitar intervenção. Como será visto adiante, tal meta não pode ser garantida apenas com cobrimento mínimo e a relação água cimento como preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), esse é o mínimo aceitável por norma e corresponde a abordagem de nível 1 para durabilidade. Será necessário, além de cumprir as exigências mínimas da norma de concreto, o entendimento do microclima, coeficientes, indicadores, mecanismos de transporte e os materiais utilizados na produção do concreto.

2.2. CARBONATAÇÃO NO CONCRETO ARMADO

De todas as patologias que afligem as edificações em concreto armado, a principal é a corrosão das armaduras, seja por exposição intensa a cloretos, intenso nas áreas litorâneas, seja por exposição a altas concentrações de gás carbônico, comum em grandes centros de circulação. Este artigo se limitará a discorrer sobre a vida útil de projeto em estruturas afetadas por exposição a altas taxas de gás carbônico, como exemplos, garagens e túneis rodoviários. A estimativa da vida útil de projeto não requer a exposição das reações de oxidação, para isso recomenda-se a leitura de Tuutti (1982), Helene (1993), Vieira (2003), Possan (2010) e extenso material em Ribeiro (2018). Como breve resumo do mecanismo de oxidação em concreto carbonatado pode-se expor que, com a redução da alcalinidade do concreto O mais importante para fins de projeto de vida útil é entender os mecanismos de transporte no material concreto. Sendo a exposição ao gás carbônico uma certeza, prolongar a vida útil significa retardar ao máximo o transporte da frente de carbonatação, aumentando o período de iniciação. Possan (2010) ressalta em sua tese a limitação imposta pela análise unilateral da carbonatação, ignorando a sinergia entre os possíveis agentes agressivos e, a desconsideração do período de propagação após a despassivação.

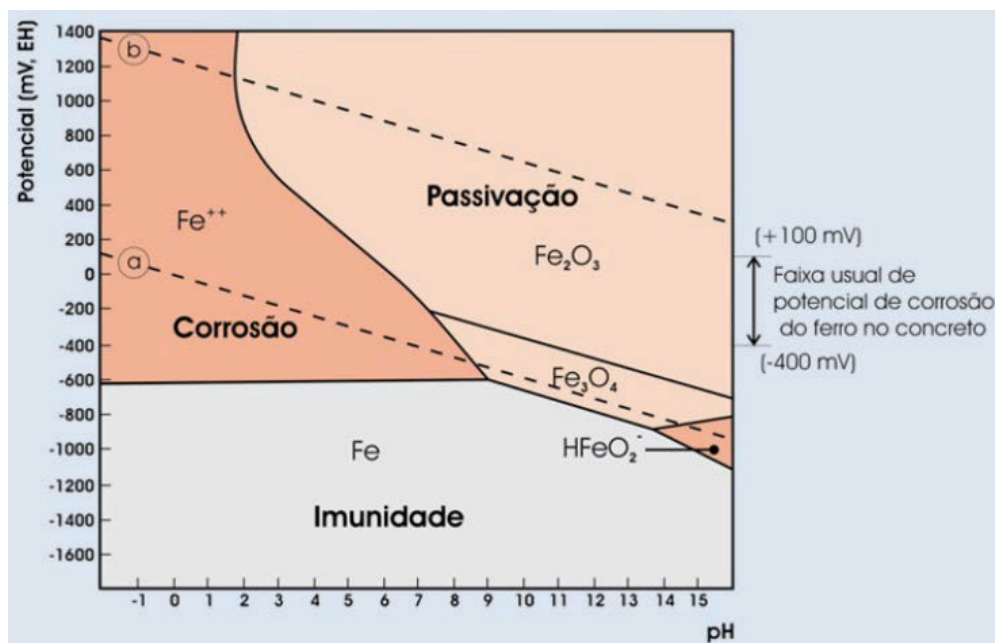
A passivação do aço é um fenômeno que resulta na perda de reatividade química do material em certas condições específicas, como por exemplo, o ambiente alcalinidade elevada do concreto sadio. Em pH elevado, como no concreto com alta concentração de hidróxido de cálcio, ocorre a formação de um filme ou película, instável e frágil, com espessura estimada de 300 nanômetros. Esta película impede a reação do ferro com o ambiente externo, impedindo a continuidade da corrosão.

Apesar da carbonatação do concreto não ser agente direto nas reações de corrosão, é facilitador para o processo. A carbonatação do concreto ocorre através da ligação do gás carbônico ao hidróxido de cálcio do concreto formando, ao final das reações, o carbonato de cálcio e reduzindo o pH do concreto para valores abaixo de 9. Para valores de pH abaixo de 10,5 a película passivadora, que é relativamente instável, se rompe e deixa de proteger o aço que fica exposto a condições ambientes propícias a oxidação. Vale lembrar que os óxidos são os estados naturais para os metais e que esta reação ocorre espontaneamente na presença de oxigênio e água.

A figura 2 mostra um diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-H₂O. Neste diagrama é possível identificar, segundo Ribeiro (2018) 3 zonas onde a proteção do aço no concreto estará garantida.

- Elevação do potencial de corrosão em meios com pH acima de 2, passivação da armadura e base da tecnologia de proteção da armadura por inibição anódica.
- Diminuição do potencial de corrosão para valores abaixo do limite de imunidade, impede que se estabeleça o efeito pilha, base da tecnologia de proteção da armadura por inibição catódica.
- Manter o pH no concreto acima de 10,5 e abaixo de 13. Quando homogêneo e compacto, este é o pH natural no concreto sadio.

Figura 2 – Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-H₂O



Fonte: Santos (2006, apud Ribeiro, 2018)

2.2.1. Indicadores de durabilidade

Para Ribeiro e Cascudo (2018), uma abordagem de projeto de durabilidade de nível 2 ou maior, requer mais do que seguir as prescrições de norma, é preciso estudar o microclima e, uma vez descobertos os agentes agressivos atuantes, projetar o material de acordo com parâmetros efetivos de desempenho, denominado indicadores de durabilidade. A seleção do concreto em função dos indicadores de durabilidade adequados não só atuará no controle dos mecanismos de transporte, como no controle da propagação que necessariamente encontrará maiores barreiras em seu processo. Baroguel-Bouny et al. (2014) dispõe um simples guia criado pela AFGC – *Association Française de Génie Civil* (Associação Francesa de Engenharia Civil), exemplificando de forma bem clara os efeitos de três indicadores de durabilidade na estimativa

da vida útil de projeto, para o caso de iniciação da corrosão por carbonatação (Tabelas 1 e 2). O mesmo artigo traz tabela para prevenção contra cloretos, que apesar de interessante, não compõe a temática do artigo e ficou de fora, sendo leitura recomendada para os que desejam aprofundamento no tema.

Tabela 2 – Indicadores de durabilidade para o guia AFGC

Indicador	Descrição
$P_{\text{água}}$ (%)	Porosidade – Índice de vazios obtido pela NBR 9778 (ABNT, 2005)
$D_{a(\text{mig})}$ ($\times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Coefficiente de migração de cloretos aparente, ensaio de migração de cloretos (migração iônica)
$K_{\text{gás}}$ ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)	Coefficiente de permeabilidade ao gás (oxigênio) pressão de 0,2 MPa
K_{liq} ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)	Coefficiente de permeabilidade à água NBR 10786 (ABNT, 2013)

Fonte: Ribeiro e Cascudo (2018)

Tabela 2 – Indicadores de durabilidade para o guia AFGC

Vida útil exigida Categoria da estrutura Nível de exigência	Corrosão Induzida por Carbonatação ($e = 30\text{mm}$)			
	Tipo de ambiente			
	1	2	3	4
	Seco e muito seco (UR < 65%) ou úmido continuamente	Úmido (UR > 80%)	Moderadamente Úmido (65% < UR < 80%)	Ciclos frequentes de umidif./secagem
< 30 anos Nível 1	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 15$	$P_{\text{água}} < 16$
De 30 a 50 anos Edificação Nível 2	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 16$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 14$
De 50 a 100 anos Edificação e demais obras civis Nível 3	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 14$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{liq}} < 0,01$
De 100 a 120 anos Grandes estruturas ou obras de grande porte Nível 4	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 12$ $K_{\text{gás}} < 100$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$
> 120 anos Estruturas excepcionais Nível 5	$P_{\text{água}} < 19$ $K_{\text{gás}} < 10$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{água}} < 9$ $D_{a(\text{mig})} < 1$ $K_{\text{gás}} < 10$ $K_{\text{liq}} < 0,01$
Nota: $K_{\text{gás}}$ ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$); K_{liq} ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$); $D_{a(\text{mig})}$ ($\times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).				

Fonte: AFGC citado por BAROGUEL-BOUNY (2014)

2.2.2. Principais mecanismos de transporte no concreto

Segundo Ribeiro (2018) “grande parte dos fatores que influenciam a durabilidade do concreto está associada à capacidade de transporte de massa na sua rede de poros e/ou fissuras”. Estruturas produzidas a partir de cimento Portland apresentam uma microestrutura complexa, e seu estudo é difícil. O transporte de massa por essas estruturas pode ser facilitado ou restrito pela distribuição e tamanho dos poros, interconectividade e sinuosidade. Tais atributos estão por sua vez diretamente ligados a fatores como a relação água/cimento, a morfologia da zona de transição (agregados), adições minerais, umidade relativa e grau de saturação. Explicar a fundo cada um dos mecanismos de transporte exigiria várias páginas, além da explicação minuciosa da microestrutura do concreto e seu processo de cura. Novamente, existe extenso material para o entendimento destes processos físicos nas referências deste artigo. Para efeito de ambientação com o tema, segue uma lista com breve resumo destes mecanismos compilados de Ribeiro (2018).

Permeabilidade – Fluxo de um fluido através de um sólido poroso devido a um gradiente de pressão (Lei de Darcy). A interconectividade é o principal responsável pelo aumento da permeabilidade numa pasta de cimento, o que decresce com a evolução da cura e aumenta com a adição de agregados pela criação de zonas de transição. Uma boa argamassa tem permeabilidade inferior a 10^{-12} m/s, valor tão baixo que torna difícil a determinação precisa dessa propriedade. A permeabilidade de CO₂ diminui com a própria carbonatação que tende a preencher os poros e capilares.

Absorção capilar – Transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Sendo dependente não só da microestrutura como da saturação do concreto. A absorção capilar pode ser usada como indicativo da porosidade do concreto e sua resistência à penetração de agentes agressivos diluídos.

Difusão – Transporte de massa por diferença de potencial químico, muitas vezes concentração. É um processo espontâneo onde a difusão equilibra as concentrações em dois meios. Principal responsável pela penetração de cloretos, dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio (O₂), ou seja, todos os principais agentes necessários para a corrosão das armaduras. Não à toa, é de considerável influência no período de iniciação e, em se tratando de controle da carbonatação, deve concentrar a maior parte da preocupação para projeto. O coeficiente de difusão varia com a porosidade, teor de cimento, composição do cimento, relação água/cimento, umidade relativa e temperatura.

Migração iônica – ocorre na presença de gradiente de potencial elétrico. Apesar de ser um caso pontual, este mecanismo de transporte é utilizado como base para o cálculo do coeficiente de difusão aparente. O processo de migração iônica pode ser acelerado por potencial elétrico adequado e, como é possível transportar os resultados à difusão por relação analítica, tornou-se um ensaio ágil para determinação da penetração de cloretos no concreto. Para maiores detalhes sobre o ensaio de migração iônica recomenda-se a leitura do capítulo 4 em Ribeiro (2018).

2.2.3. Fatores que influenciam na carbonatação

Ribeiro (2018) lista uma série de fatores que influenciam diretamente a resistência à carbonatação, a seguir.

Relação água/cimento – Como a porosidade e conseqüente permeabilidade aos gases está diretamente ligada ao fator água/cimento no concreto, é natural que exerça grande influência na resistência à carbonatação do concreto.

Consumo e tipo de cimento – A frente de carbonatação avança de forma inversamente proporcional à quantidade de reservas alcalinas disponíveis na matriz cimentícia hidratada. Sob a ótica da construção de reservas alcalinas, as adições pozolânicas tendem a reduzir a resistência direta à carbonatação em função da redução desta reserva, sendo o ideal, utilizar cimentos com grande quantidade de clínquer, como o CP I. É importante lembrar que não se advoga em favor, nem desfavor do cimento CP I, a alta reserva de álcalis seria extremamente prejudicial em relação à outra patologia, a reação álcali-agregado. Voltando assim ao que deve ser o lema em projetos de durabilidade, entendimento dos agentes agressores no micro clima do projeto, entendimento do material empregado, tomada de decisão baseada em indicadores e ensaios.

Presença de adições minerais – Entrando agora mais a fundo nas adições pozolânicas, dois efeitos ocorrem na hidratação de concretos com essas adições. O efeito *filler* que melhora a resistência a fissuração, o refinamento dos poros, melhora as características das zonas de transição. O efeito pozolânico reduz a reserva alcalina do concreto, fator preponderante na resistência à carbonatação. Em relação aos tipos de adições minerais, adições de metacaulim com cura úmida adequada são as que mais se aproximam do concreto de referência, sem adições. Enquanto cimento com escória de alto forno, cinza volante ou sílica ativa, apresentam as piores resistências.

Condições de cura – A porosidade reduz com o tempo e o método de cura, quanto melhor a hidratação do cimento, menor a taxa de carbonatação com o tempo.

Presença de fissuras – Fissuras são pontos de entrada facilitados para o gás carbônico, funcionam como atalhos para as armaduras.

Concentração de CO₂ – A velocidade de carbonatação será tanto maior quanto maior a concentração de CO₂ no ambiente do concreto. Especialmente para concretos com porosidade alta em função de alta relação água cimento.

Umidade relativa do ar – A umidade no ar satura os poros do concreto. O transporte do CO₂ pelo mecanismo de difusão em meio líquido é menor quando comparado ao meio gasoso. Concretos completamente saturados praticamente não apresentam penetração de CO₂. Em concretos completamente secos, ocorre difusão facilitada de CO₂ pelos poros, entretanto, sem a presença de água, a reação de carbonatação não ocorre. O processo ocorre com maior velocidade quando existe um filme de umidade nas paredes dos poros com acesso desobstruído para o gás carbônico.

Temperatura – Em ambientes entre 20 °C e 40 °C, o principal mecanismo de transporte de gás carbônico é a difusão. Para temperaturas mais elevadas, em geral a velocidade de carbonatação aumenta.

2.2.1. Velocidade de carbonatação

Até este momento, foram expostos os processos e os mecanismos que regem a carbonatação nos concretos. Fatores atenuantes e cuidados com a escolha do tipo de cimento, aditivos e execução para os concretos em zonas com alta concentração de gás carbônico. Também ficou claro que para situações cotidianas de projeto com temperaturas médias entre 20°C e 40°C o principal mecanismo de transporte do gás carbônico é por difusão. Desta forma, a velocidade de carbonatação no concreto pode ser descrita, deterministicamente, pelas Leis de Fick, segundo a equação (1), Ribeiro (2018).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{D}{x} \quad (1)$$

Sendo,

x – Profundidade de Carbonatação;

t – Tempo;

D – Coeficiente de difusão.

A integração desta equação no tempo, com simples manipulações algébricas resulta na equação (2), de forma estática.

$$t = K \cdot x^2 + K_0 \quad (2)$$

Sendo,

K e K_0 – Constantes.

Em sua tese, Possan (2010) ressalta o fato de que o coeficiente de difusão não é constante ao longo do processo de carbonatação, corroborado por Ribeiro (2018) que acrescenta o distanciamento do modelo parabólico da equação (2) ao longo desse processo. O comportamento irregular levou a utilização de uma equação mais simples para descrever a profundidade de carbonatação (equação 3).

$$x = A \cdot t^n \quad | \quad 0 < n < 1 \quad (3)$$

Sendo,

x – Profundidade de carbonatação;

A – Coeficiente de difusão;

t – Tempo, em anos;

Ribeiro (2018) afirma que na grande maioria dos estudos feitos até hoje utilizou-se 0,5 como valor para n , como padronização para o cálculo e estimativa do valor do coeficiente de difusão A . Este coeficiente pode ser estimado pelo ensaio de migração de cloretos, no entanto, Ribeiro (2018) expõe um estudo recente, em que um elevado número de estruturas foi avaliado para a determinação dos coeficientes de difusão para $n = 0,5$, tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores de durabilidade para o guia AFGC

Número, tipo de estrutura e idade	Variação dos coeficientes de difusão (ano ^{0,5} /mm)	Média dos coeficientes de difusão (ano ^{0,5} /mm)
11 prédios com idades entre 8 e 24 anos	1,2 a 6,7	3
7 parques de automóveis com idades entre 14 e 41 anos	2,2 a 7,6	4,3
1 molhe marítimo com 10 anos	1,8	-
1 ponte com 90 anos	1,9	-

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018)

Apesar de não poderem ser adotados os valores na tabela, já que o coeficiente de difusão, como descrito varia em função de diversos parâmetros, este estudo fornece através da média uma ordem de grandeza plausível para o coeficiente.

2.2.1. Previsão de vida útil de estrutura com exposição a gás carbônico

Num projeto de estruturas, conhecida a resistência a compressão e o traço, o primeiro passo é fazer ensaios de migração de cloretos para as dosagens do projeto. Um profissional

experiente, que conhece o microclima de cada ambiente da estrutura, irá fazer a escolha do tipo de cimento, fator água/cimento, e todos os outros fatores que contribuem para a resistência do concreto a agentes agressivos específicos. De posse dessas dosagens, deverá ser feito o ensaio de migração de cloretos para determinar o coeficiente de migração. Com isto, é possível prever o tempo de iniciação do concreto para diversos cobrimentos e vice-versa. Para efeito de exemplo, tomando como base o coeficiente de migração médio para os parques de estacionamento da tabela 3, $A = 4,3 \text{ (ano}^{0,5}/\text{mm)}$ e um cobrimento de 30 mm, deseja-se descobrir o tempo que a frente de carbonatação levará para atingir as armaduras, equação (4).

$$30 = 4,3 \cdot t^{0,5} \rightarrow t \approx 48 \text{ anos} \quad (4)$$

Se agora desejar-se o cobrimento mínimo para que se tenha uma vida útil (t) de 100 anos utilizando este mesmo concreto, o cálculo será como na equação (5).

$$c = 4,3 \cdot 100^{0,5} \rightarrow c \approx 43 \text{ mm} \quad (5)$$

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de durabilidade para estruturas de concreto armado ganhou muita força no cenário internacional desde a década de 1960. O Brasil demorou a acompanhar este movimento, e algumas tragédias aconteceram nesse meio tempo, mas já se nota um direcionamento no sentido de projetos de durabilidade, com normas modernas para ensaios de patologias e indicadores de desempenho. Novas normas para migração e difusão de cloretos, carbonatação, potencial de corrosão, resistividade elétrica e presença e perfil de cloretos estão em desenvolvimento enquanto deste artigo.

Possan (2010) trouxe em sua tese uma abordagem preditiva probabilística, que em suas próprias palavras surgiu duas décadas antes na Europa, mas extremamente relevante para um Brasil que ainda usa métodos prescritivos na maioria de seus projetos. Ribeiro (2018) compila uma série bem completa de procedimentos, ensaios, estudos e mecanismos de degradação e corrosão em estruturas de concreto armado, incluindo inibidores de corrosão, catódicos e anódicos. Isto mostra a importância que se está dando a essa nova esfera de projetos, especialmente com a vigência da NBR 15575 (ABNT, 2013). A indústria da construção civil agora é responsável por suas estruturas por, no mínimo, 50 anos. A necessidade de reduzir custos de manutenção dentro desta faixa de vida útil pode ter ajudado a impulsionar essa nova mentalidade.

Como se viu, estimar a vida útil de projeto, não é complicado, as equações são simples e poucas. Por outro lado, os mecanismos de transporte, a química e o entendimento dos

processos patogênicos e suas implicações sobre os materiais, exigem uma leitura aprofundada, uma vez que, em geral, não agem de forma unilateral, mas em sinergia. Não adianta entender como estimar a vida útil de projeto para uma estrutura de concreto sem entender como dosar e criar o concreto com os indicadores de durabilidade que alcancem a meta desejada. As leituras e o embasamento teórico são extensos, sendo recomendado para futuros trabalhos a dissertação sobre concreto armado exposto a cloretos e sua sinergia com a carbonatação. Também, um aprofundamento na abordagem probabilística para previsão da vida útil em estruturas de concreto armado expostas a cloretos e carbonatação.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

—. **NBR 9778:** *Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.

—. **NBR 10786:** *Concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água*. Rio de Janeiro, 2013.

—. **NBR 13583:** *Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio*. Rio de Janeiro, 2014.

—. **NBR 15575-1:** *Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro, 2013.

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

—. **NBR 15575-3:** *Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos*. Rio de Janeiro, 2013.

—. **NBR 15575-4:** *Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas*. Rio de Janeiro, 2013.

—. **NBR 15575-5:** *Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas*. Rio de Janeiro, 2013.

—. **NBR 15575-6:** *Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 6: Sistemas hidrosanitários*. Rio de Janeiro, 2013.

—. **NBR 15577-1:** *Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para o uso de agregados em concreto*. Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-2:** *Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto*. Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-3:** *Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 3: Análise petrográfica para verificação de potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto*. Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-4:** *Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-5: Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 5: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-6: Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

—. **NBR 15577-7: Agregados: Reatividade álcali-agregados. Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

BAROGUEL-BOUNY, V.; CAPRA, B. LAURENS, S. **A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura.** Tradução de Oswaldo Cascudo. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (eds.). *Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.* CASCUDO, O.; CARASEK, H. (eds., trad.,). São Paulo: IBRACON, p.255-326, cap 9. 2014.

BSI, BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 1992-1-1, Eurocode 2 – Part 1-1: Design of concrete structures – General rules and rules for buildings.** BSI, 2004.

HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008, 674p.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2010.

RIBEIRO, D. V.; CASCUDO, O. *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.* In: RIBEIRO, D. V. (coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto. Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.** Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018.

RIBEIRO, D. V. (coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto. Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.** Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação (Mestrado em estruturas). Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília. 162p. 2006.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** Pini, 1998.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of steel in concrete.** Sveriges Tekniska Forskningsinstitut; CBI - Cement och betonginstuted. Estocolmo, 1982.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Porto Alegre, 2003.