De 24/06/2026 a 27/06/2026
São Paulo
https://doi.org/10.67775/7wb95717

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

PREVISÃO DE VIDA ÚTIL POR CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURA EXISTENTE: COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE TUUTTI E POSSAN EM EDIFICAÇÃO DE 1973 EM PORTO ALEGRE-RS

Pedro Rafael Schirmer[1]; Luciani Somensi Lorenzi[2]*; Lucas Alexandre Reginato[2]; Alexandre Lorenzi[2]

*Autor de contato: luciani.lorenzi@ufrgs.br

[1] Departamento de Engenharia Civil (DECIV), Laboratório de Ensaios e Modelos Experimentais (LEME), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
[2] Instituto de Desempenho da UFRGS, Laboratório de Ensaios e Modelos Experimentais (LEME), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

Métodos de previsão de vida útil (VUP) por carbonatação apoiam decisões de inspeção, diagnóstico e planejamento de manutenção de estruturas de concreto armado. Este trabalho aplica e compara os métodos de Tuutti (1982) e de Possan (2010) nas abordagens determinísticas e probabilísticas de uma edificação existente, construída em 1973, na cidade de Porto Alegre, RS. Foram obtidas, por meio de ensaio in loco com fenolftaleína, 18 medições de cobrimento (média de 31,29 mm; desvio padrão de 11,93 mm) e 103 medições de profundidade de carbonatação (média de 21,73 mm; desvio padrão de 7,24 mm). Devido à amostragem limitada, os dados foram agregados para representar um componente estrutural fictício do sistema. Para a idade atual de 51 anos, as previsões resultaram em 106 anos (Tuutti), 37 anos (Possan determinístico) e 11 anos (Possan probabilístico), adotando-se Pf = 20% como critério de falha (β = 0,84). Discute-se a sensibilidade do método de Possan quando os parâmetros de entrada se afastam do domínio de calibração, o que tem efeito acentuado na abordagem probabilística. Conclui-se que os métodos são úteis na rotina de avaliação, desde que sejam explicitados as hipóteses, os limites de validade e as implicações para a tomada de decisões de intervenção.

Palavras-chave: vida útil; carbonatação; durabilidade; confiabilidade; inspeção.

ABSTRACT

Service-life prediction methods for carbonation support inspection, diagnosis, and maintenance planning of reinforced concrete structures. This paper applies and compares Tuutti's method (1982) and Possan's method (2010) in deterministic and probabilistic approaches for an existing building built in 1973 in Porto Alegre, Brazil. Field data comprised 18 cover measurements (mean 31.29 mm; standard deviation 11.93 mm) and 103 carbonation depth measurements (mean 21.73 mm; standard deviation 7.24 mm) obtained through on-site phenolphthalein testing. Due to limited sampling, data were aggregated into a representative fictitious structural component. For a current age of 51 years, predicted service lives were 106 years (Tuutti), 37 years (Possan deterministic), and 11 years (Possan probabilistic), adopting Pf = 20% (β = 0.84) as the failure criterion. Results highlight the sensitivity of Possan's model when input parameters fall outside its calibration domain, with stronger distortion under probabilistic simulation. Both methods can be integrated into assessment routines provided that assumptions, validity limits, and decision-making implications are explicitly stated.

Keywords: service life; carbonation; durability; reliability; inspection.

1. INTRODUÇAÕ

Processos de deterioração em estruturas de concreto armado, em especial os associados à despassivação e à corrosão das armaduras, são causas recorrentes de manifestações patológicas e de necessidade de reabilitação. Entre esses processos, a carbonatação destaca-se por reduzir o pH da matriz cimentícia e comprometer a camada passivadora do aço, criando condições favoráveis ao início da corrosão (TUUTTI, 1982; ACI, 2000).

A quantificação da vida útil associada à carbonatação é relevante para sistemas estruturais e elementos expostos, pois orienta a priorização de inspeções, a definição de níveis de risco aceitáveis e a seleção de estratégias de manutenção. Para edificações existentes, nas quais a variabilidade executiva e a ausência de registros completos são comuns, métodos de previsão de vida útil devem ser aplicados de forma pragmática, com rastreabilidade das hipóteses adotadas e vínculo com evidências de campo.

Neste contexto, o método de Tuutti (1982) é amplamente empregado como referência por sua simplicidade e por considerar a evolução da frente de carbonatação proporcional à raiz quadrada do tempo, ajustada por um coeficiente empírico. Já o método de Possan (2010) propõe uma formulação com variáveis ambientais e do material, podendo ser aplicado de forma determinística ou probabilística (Monte Carlo), incorporando variabilidade estatística e um critério de falha por probabilidade.

Este trabalho tem como objetivo aplicar e comparar os métodos de Tuutti (1982) e de Possan (2010) nas abordagens determinística e probabilística, em um estudo de caso real de edificação construída em 1973, em Porto Alegre, RS. Além de apresentar o procedimento de obtenção de dados in loco e de parametrização, discute-se a coerência dos resultados e as limitações de validade quando os parâmetros de entrada se afastam do domínio de calibração dos modelos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A carbonatação é um processo físico-químico em que o dióxido de carbono (CO2) difunde-se pelos poros do concreto e reage com os produtos de hidratação, reduzindo a alcalinidade da matriz. Quando a frente carbonatada atinge a profundidade das armaduras (cobrimento), o aço pode perder sua condição passiva, iniciando-se a fase de propagação da corrosão em presença de umidade e oxigênio (TUUTTI, 1982).

Em termos práticos, modelos de avanço de carbonatação frequentemente adotam uma dependência da raiz quadrada do tempo, refletindo um mecanismo de difusão dominante. A condição de exposição (por exemplo, estruturas externas desprotegidas das intempéries) é determinante, pois controla a umidade, a concentração de CO2 disponível e a cinética das reações, o que influencia o coeficiente de carbonatação.

Normas e documentos de referência reconhecem que os requisitos de durabilidade dependem do ambiente e do nível de confiabilidade desejado, recomendando que as hipóteses e parâmetros sejam compatíveis com o contexto de exposição (ISO, 2008; fib, 2010). Para estruturas existentes, a avaliação dos cobrimentos reais e das profundidades de carbonatação por meio de ensaios in loco fornece evidências diretas e deve ser integrada à previsão.

2.1 Método de Tuutti (1982)

Na formulação clássica, Tuutti (1982) organiza o processo de deterioração em duas fases: iniciação, correspondente ao tempo necessário para que a frente carbonatada atinja a armadura, e propagação, associada à evolução da corrosão após a despassivação. Para a fase de iniciação, é usual empregar um modelo do tipo $x_c(t) = k \cdot \sqrt{t}$, em que x_c é a profundidade de carbonatação e k é um coeficiente empírico ajustado à realidade do concreto e do ambiente.

Em aplicações em estruturas existentes, o coeficiente k pode ser calibrado com base em medições de profundidade de carbonatação e em idade conhecida, permitindo estimar o tempo de atingimento do cobrimento médio. Uma limitação inerente à abordagem é o uso de valores médios, o que pode subestimar o efeito de falhas localizadas e de variabilidade elevada no cobrimento.

2.2 Método de Possan (2010) e abordagem probabilística

O método de Possan (2010) modela o avanço da frente de carbonatação por meio de uma equação calibrada com base em dados experimentais, incorporando variáveis relacionadas ao material e ao ambiente, como resistência à compressão, umidade relativa, teor de CO2 e cobrimento. A aplicação pode ser determinística, usando valores representativos (médias) dos parâmetros de entrada, ou probabilística, tratando os parâmetros de entrada como variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade.

Na abordagem probabilística, a condição de falha pode ser expressa por uma função limite g(X), que compara a resistência (por exemplo, o cobrimento) à solicitação (a profundidade de carbonatação prevista). A probabilidade de falha Pf é estimada por meio de simulações de Monte Carlo, que geram amostras fictícias das variáveis conforme suas distribuições e avaliam a fração de simulações em que $g(X) < 0$. Possan (2010) adota, para o estudo de durabilidade, índices de confiabilidade compatíveis com as recomendações do fib Model Code 2010 e da ISO 13823 (fib, 2010; ISO, 2008).

No presente estudo, o critério de falha adotado é Pf = 20% ($\beta = 0{,}84$), conforme a referência ISO 13823 utilizada por Possan (2010). Esse nível de confiabilidade é adequado para discutir a proximidade do fim de vida útil da análise em avaliações preliminares, devendo ser contextualizado em relação ao risco aceitável e às consequências de uma falha na tomada de decisão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estudo de caso e condições de exposição

A construção em estudo situa-se na cidade de Porto Alegre, RS, próxima ao centro histórico e à margem do Guaíba, tendo sido construída em 1973. A estrutura é de concreto armado, com resistência característica à compressão de projeto de 12 MPa e cobrimento prescrito de 30 mm, mais conservador do que a prescrição de 20 mm da NB1 então em vigor (ABNT, 1960).

Foram avaliados pilares externos, expostos ao ambiente e desprotegidos das intempéries, com discriminação por orientação solar (oeste, norte e leste). Apesar de a orientação poder influenciar o microclima local, os modelos aplicados não a consideram explicitamente, razão pela qual o ambiente foi tratado de forma uniforme como exposição externa desprotegida.

3.2 Plano de investigação e amostragem

Os dados de entrada foram obtidos por meio de ensaios in loco e de medições diretas. A quantidade de amostras foi limitada, totalizando 18 entradas para cobrimento e 103 para profundidade de carbonatação, distribuídas em quatro grupos de peças. Para evitar que a variabilidade entre elementos individuais impedisse a comparação entre métodos, as amostras foram agregadas em um único componente estrutural fictício, considerado representativo do sistema estrutural como um todo.

A adoção de um componente estrutural representativo é uma escolha metodológica adequada quando o objetivo é demonstrar o procedimento de aplicação dos modelos e discutir a sensibilidade aos parâmetros, mas impõe limitações. Em particular, a agregação tende a mascarar pontos críticos associados a cobrimentos mínimos e a falhas localizadas, devendo ser explicitada como fonte de incerteza.

3.3 Ensaio de profundidade de carbonatação

A profundidade atual de carbonatação foi medida diretamente nas estruturas com o uso de um indicador de acidez (fenolftaleína). O procedimento consistiu em perfurar uma abertura por serra-copo, previamente guiada por um furo piloto, escolhendo-se a posição de modo a evitar atingir armaduras ou estribos e a minimizar o impacto na capacidade portante durante o ensaio.

Após a extração do miolo e a limpeza da superfície exposta, aspergiu-se solução de fenolftaleína na proporção 1:49:50 (fenolftaleína, álcool e água, respectivamente). A viragem para a rosa indica concreto não carbonatado, permitindo medir a profundidade carbonatada com um paquímetro. Ao final do ensaio, o furo foi preenchido com graute estrutural para a recomposição e a proteção da armadura.

3.4 Medição de cobrimento

A espessura de cobrimento foi obtida por medição direta com paquímetro durante a abertura das janelas de inspeção realizadas no ensaio de carbonatação. As medições foram registradas e tratadas estatisticamente para a obtenção da média e do desvio padrão.

No método probabilístico, o cobrimento foi tratado como variável aleatória com distribuição lognormal, conforme recomendação de Possan (2010), e a transformação inversa foi aplicada para gerar amostras fictícias a partir de números aleatórios uniformes.

3.5 Estimativa e adoção de parâmetros de entrada

Além dos dados obtidos em campo (cobrimento e carbonatação), os parâmetros necessários ao método de Possan (2010) foram adotados com base em hipóteses justificadas e em fontes documentadas. A resistência à compressão foi tomada como 12 MPa, com desvio padrão de 7,0 MPa, de acordo com recomendação de variabilidade para condição de preparo compatível com concretos de 10 a 15 MPa (ABNT, 2015).

A umidade relativa do ar foi adotada com base na Normal Climatológica 1991-2020 para Porto Alegre, resultando em média de 75,2% e desvio padrão de 9,82%. Para o teor de CO_2 atmosférico, adotaram-se o valor médio de 0,042% e o desvio padrão de 0,0022%, com base em dados reportados por Stoco (2022) e discutidos no estudo base.

3.6 Aplicação dos modelos e critérios de falha

No método de Tuutti (1982), considerou-se apenas a fase de iniciação como contributiva para a vida útil de análise, isto é, o tempo necessário para que a profundidade de carbonatação alcance o cobrimento. O coeficiente de carbonatação foi calibrado com base na profundidade medida em campo e na idade atual da estrutura, e a vida útil prevista foi obtida ao igualar a profundidade prevista ao cobrimento médio.

No método de Possan (2010) determinístico, as médias dos parâmetros de entrada foram aplicadas diretamente na equação modeladora, resultando em uma vida útil de análise definida pelo atingimento do cobrimento. Na abordagem probabilística, as variáveis foram tratadas como aleatórias, com distribuições propostas por Possan (2010): resistência à compressão, teor de CO2 e umidade relativa, com distribuições normais e lognormais, e cobrimento, com distribuição lognormal. A simulação de Monte Carlo foi implementada em uma planilha eletrônica e validada por meio de comparação com o software comercial (ModelRisk), conforme descrito no estudo-base.

Adotou-se como critério de falha o atingimento da probabilidade de falha Pf = 20%, associado ao índice de confiabilidade $\beta = 0{,}84$, compatível com a ISO 13823 (ISO, 2008) e com a aplicação apresentada por Possan (2010) para estados limites de durabilidade.

3.7 Implementação da simulação de Monte Carlo e transformação inversa

Na abordagem probabilística, a simulação de Monte Carlo foi empregada para propagar a variabilidade das variáveis de entrada até a variável resposta (profundidade de carbonatação prevista). O procedimento consiste em gerar um conjunto de amostras fictícias para cada variável aleatória, de modo que a frequência das amostras convirja à função de distribuição de probabilidade (f.d.p.) assumida.

Para isso, foram gerados números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1 e aplicada a transformação inversa da função de probabilidade acumulada (f.p.a.) de cada variável. Em uma planilha eletrônica, esse processo pode ser implementado por meio de funções do tipo NORM.INV(RAND(); μ; σ) para variáveis normais e LOGNORM.INV(RAND(); μ*; σ*) para variáveis lognormais.

No caso do cobrimento, tratado como variável lognormal, é necessária a conversão dos parâmetros da distribuição a partir da média (μ) e do desvio padrão (σ) medidos em campo. A conversão é feita por: $\mu^* = \ln(\mu^2 / \mathrm{sqrt}(\mu^2 + \sigma^2))$ e $\sigma^* = \mathrm{sqrt}(\ln(1 + \sigma^2/\mu^2))$, permitindo a geração de amostras com média e variância compatíveis.

Um aspecto prático relevante é a reprodutibilidade. Em implementações em Excel, a fixação de semente do gerador aleatório não é nativa; assim, quando se deseja rastreabilidade, recomenda-se gerar previamente a lista de números aleatórios e fixá-la como valores no arquivo, chamando-a por referência nas funções de transformação inversa.

3.8 Função limite, probabilidade de falha e índice de confiabilidade

A avaliação probabilística requer a definição de uma função limite g(X) que separa os domínios de segurança e de falha. Para estados limites de durabilidade por carbonatação, uma representação direta é g(X,t) = c - x_c(t), em que c é o cobrimento (aleatório) e x_c(t) é a profundidade de

carbonatação prevista (aleatória por depender das demais variáveis de entrada). A falha ocorre quando $g(X,t) < 0$, ou seja, quando a frente carbonatada atinge ou ultrapassa a armadura.

A probabilidade de falha Pf(t) é estimada como a razão entre o número de simulações que resultam em $g(X,t) < 0$ e o número total de simulações: $Pf(t) = N_falha / N_total$. A curva Pf(t) ao longo do tempo pode então ser usada para definir a vida útil de análise como a menor idade em que Pf(t) ultrapassa um valor alvo.

O índice de confiabilidade β é frequentemente utilizado como métrica equivalente. Para distribuições aproximadamente normais do estado limite, há uma relação monotônica entre β e Pf. No presente estudo, adotou-se $\beta = 0,84$, correspondente a Pf = 20% conforme a ISO 13823, seguindo a prática reportada por Possan (2010) em avaliações de durabilidade.

3.9 Síntese das variáveis aleatórias e parâmetros adotados

O Quadro 1 sintetiza as variáveis consideradas aleatórias, as distribuições assumidas e os parâmetros (médias e desvios-padrão) utilizados na simulação probabilística.

Quadro 1 – Variáveis aleatórias adotadas na abordagem probabilística.

Variável	Distribuição	Média	Desvio padrão
Resistência à compressão (MPa)	Normal	12	7,0
Umidade relativa (%)	Normal	75,2	9,82
Teor de CO2 (%)	Normal	0,042	0,0022
Cobrimento (mm)	Lognormal	31,29	11,93

Fonte: Possan (2010) e dados de campo (autoria própria).

3.10 Procedimento operacional recomendado para aplicação em rotina de inspeção

Com base no estudo, propõe-se um procedimento operacional mínimo para aplicação dos métodos em avaliações de patologia: (i) levantamento de dados de projeto e de histórico de exposição; (ii) inspeção visual e seleção de pontos críticos; (iii) abertura controlada de janelas de inspeção para medição de cobrimento e carbonatação; (iv) tratamento estatístico para obtenção de parâmetros e identificação de mínimos; (v) aplicação de modelos determinísticos para triagem; (vi) aplicação probabilística somente quando as distribuições de entrada forem suportadas por amostragem suficiente e quando o caso esteja dentro do domínio de calibração; e (vii) integração dos resultados com critérios de risco e consequências para priorização de intervenções.

A etapa (iv) é particularmente relevante: além de médias e desvios-padrão, recomenda-se registrar percentis (por exemplo, P5) do cobrimento, pois são esses valores que determinam a probabilidade de falha em abordagens probabilísticas. Quando o objetivo é suportar a decisão de intervenção, a escolha do componente representativo deve ser justificada e, se possível, substituída por avaliação em grupos homogêneos de exposição ou por elementos com funções semelhantes.

4. RESULTADOS

4.1 Estatística dos dados de cobrimento e carbonatação

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das medições de cobrimento. A Tabela 2 apresenta a estatística das medições de profundidade de carbonatação obtidas por meio de ensaios in loco.

Tabela 1 – Espessura de cobrimento medida in loco

Espessura de cobrimento (mm)	
Média	31,29
Desvio padrão	11,93

Fonte: os autores.

Tabela 2 – Profundidade de carbonatação medida em ensaio

Profundidade de carbonatação medida (mm)	
Média	21,73
Desvio padrão	7,24

Fonte: os autores.

4.2 Parâmetros ambientais e do material para o método de Possan

As Tabelas 3 a 5 sintetizam os parâmetros adotados para a aplicação do método de Possan (2010) no estudo, incluindo resistência à compressão, umidade relativa e teor de CO2.

Tabela 3 – Resistência à compressão adotada

Resistência à compressão (MPa)	
Média	12,0
Desvio padrão	7,0

Fonte: os autores.

Tabela 4 – Umidade relativa adotada

Umidade relativa (%)	
Média	75,2
Desvio padrão	9,82

Fonte: os autores, com base na Normal Climatológica 1991-2020 (INMET).

Tabela 5 – Teor de CO2 adotado

Teor de CO2 (%)	
Média	0,042

Desvio padrão	0,0022

Fonte: os autores, com base em Stoco (2022).

4.3 Previsões de vida útil

A Tabela 6 reúne os resultados de vida útil previstos pelos diferentes métodos para o componente estrutural representativo. Para o método probabilístico, a vida útil corresponde à idade em que a probabilidade de falha atinge 20% (β = 0,84).

Tabela 6 – Previsões de vida útil pelos métodos avaliados

Sistema	Idade atual (anos)	Tuutti (anos)	Possan determinístico (anos)	Possan probabilístico (anos)
Sistema estrutural	51	106	37	11

Fonte: os autores

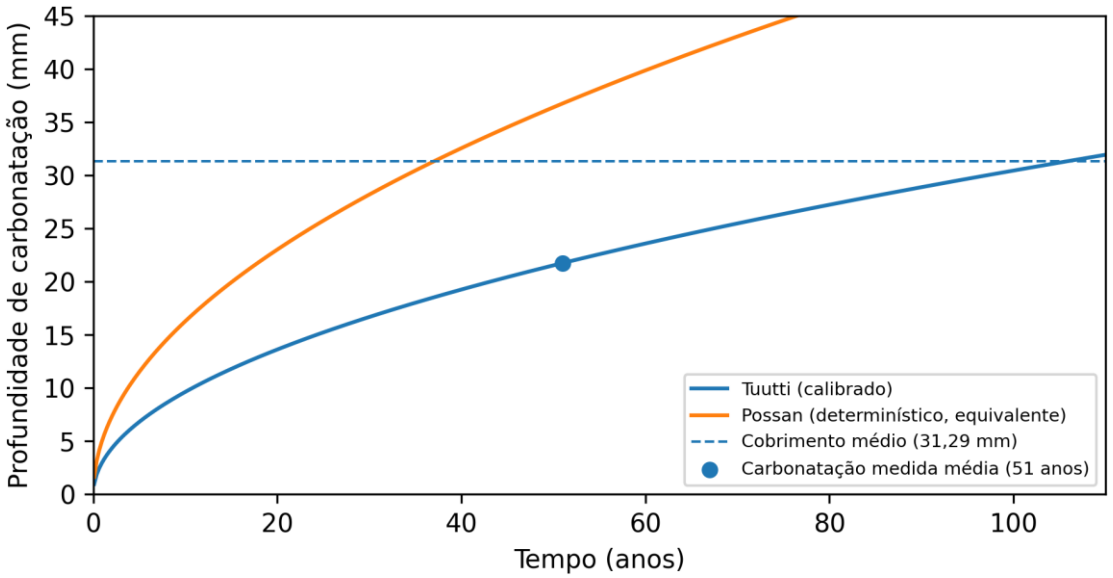

Figura 1 – Curvas ilustrativas do avanço da carbonatação para Tuutti (calibrado) e Possan (determinístico), com referência ao cobrimento médio e ao valor médio observado aos 51 anos. Fonte: os autores.

4.4 Observações sobre variabilidade, falhas localizadas e critério probabilístico

Os resultados evidenciam uma discrepância significativa entre os métodos. Enquanto Tuutti (1982) indica vida útil de análise superior à idade atual, a abordagem probabilística de Possan (2010) indica ultrapassagem do critério Pf = 20% em idade inferior à atual. Essa diferença decorre, em grande parte, de como a variabilidade é tratada e do critério de falha definido.

Como o método de Tuutti utiliza médias de cobrimento e de profundidade de carbonatação, não contempla diretamente falhas localizadas em alguns componentes, o que compromete o desempenho do sistema como um todo. Além disso, a aplicação em estruturas externas desprotegidas pode exigir cuidado adicional na interpretação, pois a condição de exposição pode reduzir ou aumentar a cinética, conforme o regime de umidade do concreto.

No método probabilístico, a falha é definida por ultrapassar uma probabilidade-alvo, o que significa que, mesmo com profundidade média inferior ao cobrimento médio, a presença de uma cauda inferior de cobrimentos (valores menores) pode levar a que a probabilidade de $g(X) < 0$ supere 20%. No estudo base, essa sensibilidade foi particularmente elevada quando os parâmetros de entrada se afastaram do domínio de construção do modelo de Possan (2010), especialmente quanto à resistência à compressão.

4.5 Comparação entre carbonatação medida e prevista (Possan probabilístico)

No estudo base, além da vida útil probabilística, foi registrada a profundidade média de carbonatação prevista pelo método de Possan (2010) para a idade atual do edifício (51 anos). A comparação direta com o valor médio medido permite avaliar a aderência global do modelo ao caso de estudo.

Observou-se que a profundidade média prevista pelo método de Possan, em abordagem probabilística, foi substancialmente superior ao valor médio medido em campo, sugerindo que a parametrização, especialmente a resistência à compressão adotada e sua variabilidade, conduz a uma cinética de carbonatação mais intensa do que a observada na estrutura real. Essa diferença ajuda a explicar, em parte, a previsão de vida útil reduzida quando se adota o critério Pf = 20%.

Tabela 7 – Carbonatação média medida e prevista na idade atual.

Idade (anos)	Carbonatação medida média (mm)	Carbonatação prevista média (mm)	Diferença (mm)	Relação prevista/medida
51	21,73	38,37	16,64	1,77

Fonte: os autores

4.6 Interpretação dos resultados frente aos limites de validade

Uma implicação direta da Tabela 7 é que a confiabilidade da previsão depende de quão representativos são os parâmetros adotados no caso real. Para concretos mais antigos e de baixa resistência, é possível que características microestruturais, como a relação água/cimento e o grau de hidratação ao longo do tempo, diferenciem-se das amostras utilizadas na calibração original do modelo, o que pode afetar o coeficiente efetivo de carbonatação.

Dessa forma, a aplicação de modelos calibrados em domínios distintos deve ser acompanhada de verificação com dados de campo. Quando a discrepância entre o medido e o previsto é elevada, recomenda-se reavaliar as hipóteses de entrada ou proceder à calibração do modelo com base em medições adicionais, antes de usar os resultados para a definição de intervenção.

5. DISCUSSÃO

A comparação entre os resultados mostra que o método de Tuutti (1982), calibrado diretamente pelos dados de campo, fornece uma estimativa de vida útil coerente com um modelo de difusão simplificado, mas potencialmente otimista quando se considera a variabilidade de cobrimento e a ocorrência de pontos críticos. A discrepância com Possan (2010) probabilístico reforça que, em avaliações de estruturas existentes, o uso de uma única métrica média pode ser insuficiente para capturar risco de despassivação em regiões localizadas.

Por outro lado, o método de Possan (2010) apresenta maior sofisticação ao incorporar variáveis ambientais e do material, bem como ao permitir análise probabilística. No entanto, o estudo evidencia que sua aplicação exige atenção ao domínio de calibração do modelo. A resistência característica de 12 MPa do estudo de caso é inferior às faixas de resistência típicas utilizadas na construção do modelo (20 a 60 MPa, conforme discutido no texto base), o que pode levar a distorções. Em particular, na abordagem probabilística, valores simulados na cauda inferior das distribuições podem reduzir excessivamente a vida útil prevista, resultando em valores conservadores.

A interpretação prática desses resultados deve ser orientada pela finalidade da avaliação. Em triagens e diagnósticos preliminares, a abordagem determinística de Possan (2010) pode fornecer um valor conservador, ainda coerente com observações de campo, enquanto a abordagem probabilística pode ser reservada para situações em que as distribuições de entrada sejam caracterizadas por um programa de ensaios mais robusto e em que a estrutura se situe no domínio de calibração do modelo.

Adicionalmente, o trabalho evidencia a importância de registrar e justificar os procedimentos de estimativa de dados não diretamente medidos. A adoção da umidade relativa como normal climatológica e do teor de CO2 com base em dados da literatura é adequada quando o objetivo é demonstrar a aplicação do método, mas deve ser substituída por medições locais quando a decisão de intervenção envolver consequências maiores.

Como perspectiva de aplicação em patologia das construções, recomenda-se integrar previsões de vida útil a inspeções sistemáticas e evidências de deterioração, estabelecendo níveis de ação. A identificação de instâncias em que a carbonatação atingiu a armadura, observada durante os ensaios de campo, sugere que intervenções localizadas (recomposição, proteção superficial ou tratamento anticorrosivo) podem ser prioritárias mesmo quando a previsão média indicar vida útil remanescente.

5.1 Implicações para inspeção, priorização de intervenções e tomada de decisão

Em termos de gestão de ativos, a principal utilidade de uma previsão de vida útil por carbonatação é apoiar decisões com um horizonte temporal explícito, reduzindo arbitrariedades. Quando a estrutura apresenta idade avançada e evidências locais de despassivação, o modelo deve ser usado para orientar onde intensificar os ensaios e quais componentes demandam intervenção imediata, e não como substituto do diagnóstico.

No caso analisado, a elevada dispersão do cobrimento sugere que intervenções baseadas apenas nas médias podem deixar zonas de maior vulnerabilidade sem tratamento. Assim, recomenda-se que programas de inspeção incluam, além de medidas de carbonatação, o mapeamento do cobrimento por métodos complementares (por exemplo, pacometria) e a definição de regiões críticas, priorizando as faces mais expostas ao regime de umidade e aos ciclos de molhagem e secagem.

O critério probabilístico Pf = 20% (β = 0,84) deve ser interpretado como um limiar de alerta, compatível com avaliações preliminares e com a necessidade de considerar as consequências. Para elementos com elevada consequência de falha, a organização pode adotar alvos mais restritivos (Pf mais baixo), o que reduzirá a vida útil de análise e intensificará a necessidade de ações preventivas.

5.2 Limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros

A principal limitação do estudo é a reduzida quantidade de medições de cobrimento, o que impõe incerteza elevada nos percentis inferiores da distribuição. Em abordagens probabilísticas, esses percentis determinam a probabilidade de falha, motivo pelo qual amostragens maiores ou métodos de varredura não destrutiva tendem a aumentar a robustez das conclusões.

Outra limitação decorre do uso de parâmetros ambientais obtidos por meio de normal climatológica e de teor de CO2 a partir da literatura, em vez de medições microclimáticas na fachada. Como a carbonatação é fortemente influenciada pela umidade no poro e pelos ciclos de exposição, recomenda-se, em estudos futuros, instrumentar a estrutura com sensores ou realizar campanhas de monitoramento para calibrar parâmetros locais.

Por fim, recomenda-se avaliar o desempenho dos modelos em faixas de resistência compatíveis com o seu domínio de calibração e, quando o concreto apresentar resistência inferior, considerar calibração adicional por meio de ensaios acelerados ou de modelos alternativos. Essa etapa é particularmente importante para evitar o conservadorismo excessivo em modelos probabilísticos, que pode levar a decisões de intervenção prematuras e a custos adicionais.

6. CONCLUSÕES

Os métodos de Tuutti (1982) e Possan (2010), nas abordagens determinística e probabilística, podem ser incorporados à rotina de investigação de edificações existentes, desde que haja rastreabilidade das hipóteses, dos dados de entrada e do critério de falha adotado.

No estudo de caso (51 anos de idade), as previsões de vida útil de análise foram: 106 anos (Tuutti), 37 anos (Possan determinístico) e 11 anos (Possan probabilístico, Pf = 20%). O método de Tuutti, por se basear em médias de cobrimento e de carbonatação, não contempla explicitamente falhas localizadas e pode subestimar o risco quando a variabilidade de cobrimento é elevada.

O método de Poisson mostrou-se adequado quando os parâmetros de entrada estão dentro do domínio de construção do modelo; afastamentos, como resistência à compressão inferior às faixas típicas, podem ocasionar distorções, potencializadas na abordagem probabilística pela influência de valores extremos.

Para uso em patologia das construções, recomenda-se que as previsões de vida útil sejam acompanhadas de inspeções direcionadas, com atenção às regiões de cobrimento mínimo e às evidências de carbonatação que atinjam as armaduras, a fim de orientar intervenções localizadas e estratégias de proteção.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 365: **Service-Life Prediction - State-of-the-Art Report**. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NB1: **Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 1960.

COMITÉ EURO-INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). **CEB-FIP Model Code for Concrete Structures** (2010). Lausanne: CEB, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13823: **General principles on the design of structures for durability**. Geneva, 2008.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

STOCO, M. A. **Dióxido de carbono na cidade de São Paulo: medidas em superfície e análises sazonais**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Doctoral Thesis (Monograph). Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.