Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À CARBONATAÇÃO

R. COUTO
Mestrando em Engenharia de Estruturas
Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais; Brasil
rafaelcouto2111@gmail.com

S.M.C. DINIZ
Professora Associada
Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais; Brasil
diniz_s@yahoo.com

RESUMO

Face às crescentes demandas da sustentabilidade no ambiente construído, a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado (CA) submetidas a distintos mecanismos de degradação é tema da maior relevância. A despeito da importância do tema, a durabilidade das estruturas de CA é tratada por métodos prescritivos nas normas técnicas atuais (veja-se, por exemplo, a NBR 6118:2014 e o ACI 318-14). Em tais normas, considerado o ambiente onde a estrutura estará inserida, é assumido que o atendimento a especificações, --tais como a resistência à compressão do concreto e a espessura do recobrimento das armaduras--, será suficiente para a garantia da vida útil de projeto. Dentre os mecanismos de degradação, a carbonatação é um dos principais fenômenos físico-químicos que podem limitar a vida útil das estruturas de CA. Existem diversos fatores que influenciam no processo de deterioração por carbonatação tais como aqueles relacionados aos materiais (relação água/cimento do concreto, tipo de cimento e adições, cura e compactação do concreto, e fissuração) e ambientais (concentração de CO_2, teor de umidade e temperatura). Devido à variabilidade de tais parâmetros, a vida útil de estruturas de CA submetidas à carbonatação só pode ser estabelecida em termos probabilísticos. Neste trabalho são discutidos os três elementos necessários à descrição probabilística da vida útil de estruturas de CA submetidas à carbonatação: (i) o modelo determinístico requerido para a descrição da evolução do processo de carbonatação; (ii) a descrição estatística das variáveis intervenientes no problema; (iii) as ferramentas da Confiabilidade Estrutural necessárias à descrição probabilística da vida útil.
Palavras-chave: carbonatação, concreto armado, durabilidade, incertezas, avaliação probabílistica, simulação de Monte Carlo, vida útil.

ABSTRACT

Given the growing demands of sustainability in the built environment, the forecast life of reinforced concrete (RC) structures submitted to different degradation mechanisms is a matter of great importance. Despite the importance of the subject, the durability of the RC prescriptive structures is handled by the current technical standards methods (see, for example, NBR 6118:2014 and ACI 318-14). In such standards, considered the environment where the structure is inserted, it is assumed that the service specifications, -- as the strength of concrete compression and the thickness of the cover of reinforcing steel--, will be sufficient to guarantee the life of project. Among the degradation mechanisms, the carbonation is a major physical and chemical phenomenon that can limit the life of structures RC. There are several factors that influence by carbonation process of deterioration such as those related to materials (water/cement ratio of concrete, kind of cement and additions, cure and compaction of concrete and cracking) and environmental (CO_2 concentration, moisture content and temperature). Due to the variability of these parameters, the life of RC structures subjected to carbonation can only be established in probabilistic terms. This paper discussed the three elements necessary for the probabilistic description of the life of RC structures subjected to carbonation: (i) the deterministic model required to describe the evolution of the carbonation process; (ii) the statistical description of the variables involved in the problem; (iii) the Structural Reliability of the tools necessary for probabilistic description service life.
Keywords: carbonation, reinforced concrete, durability, uncertainties, probabilistic assessment, Monte Carlo simulation, service life.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

A discussão a respeito da durabilidade das estruturas de concreto armado é essencial na hora de se projetar e executar algum empreendimento. A NBR 6118:2014 [1] preconiza que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, as condições ambientais da época e do local sejam levadas em consideração, para que assim, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.

De acordo com Barbudo [2], o concreto armado empregado nas estruturas possui duas funções básicas: deve ser suficientemente resistente e dúctil e, no ponto de vista da durabilidade, deve resistir às condições ambientais e do meio agressivo em que a estrutura está inserida.

A durabilidade está diretamente relacionada com a sustentabilidade. Atualmente, a necessidade em construções mais sustentáveis faz com que estudos referentes à durabilidade das estruturas sejam cada vez mais frequentes. Com estruturas mais duráveis, a quantidade de materiais utilizados nas construções e reformas são menores e, consequentemente, a quantidade resíduos sólidos gerados no futuro é menor.

Dessa maneira, a NBR 6118:2014 [1] faz observações a respeito de mecanismos de deterioração das estruturas. Esses mecanismos são referentes aos que causam a deterioração do concreto e aos que causam a deterioração do aço. Os causadores da deterioração do concreto são: a lixiviação, a expansão por sulfato e a reação álcali-agregado. Já os mecanismos que causam a deterioração do aço são: a despassivação por carbonatação e a despassivação por ação de cloretos.

Dentre os mecanismos de deterioração citados anteriormente, a carbonatação é uma das principais causas de deterioração da armadura das estruturas em concreto armado. Com isso, faz-se necessário um estudo mais aprofundado a respeito do assunto. De acordo com Marques e Costa [3], um dos mais importantes agentes que causam a deterioração da armadura é o dióxido de carbono (CO_2). O processo de carbonatação ocorre através da difusão do CO_2 da superfície do concreto para o interior da estrutura, atingindo assim a armadura e iniciando o processo de corrosão.

Existem diversos fatores que influenciam na hora de avaliar uma deterioração por carbonatação. Segundo Carmona [4], esses fatores são: a relação água/cimento do concreto, o tipo de cimento e adições, a concentração de CO_2 no ambiente, a cura e a compactação do concreto, a umidade, a temperatura e a fissuração. Além desses, a qualidade do concreto em estudo e a espessura do cobrimento irão influenciar diretamente no processo.

Para se avaliar um problema como o da carbonatação, podemos utilizar a confiabilidade das estruturas como ferramenta. De acordo com Possan [5], a confiabilidade permite quantificar as incertezas e o efeito destas na segurança e no desempenho das estruturas. É um conceito composto por vetores quantificáveis, como: mantenabilidade, segurança, vida útil, entre outros. A confiabilidade não envolve apenas a probabilidade de um dado sistema em não falhar, mas também o estudo dos fatores que contribuem para a ocorrência de falhas.

Como existem inúmeros parâmetros envolvidos na carbonatação, para realizar uma avaliação probabilística, é necessária a utilização de uma simulação computacional numérica, que no caso, será utilizado a Simulação de Monte Carlo. Para se realizar uma simulação, um modelo matemático de caráter determinístico deverá ser utilizado para que os resultados obtidos sejam o mais próximo da realidade possível.

2. CRITÉRIOS DA NBR 6118:2014 PARA INFLUÊNCIA DO MEIO AMBIENTE

A NBR 6118:2014 [1] possui recomendações para que a vida útil da estrutura seja maior. Porém, ainda não existe uma equação para se quantificar a vida útil. Com isso, essa é uma área de estudo que possui a necessidade de maior aprofundamento e pesquisas. Esse item irá demonstrar o que existem de informações para os efeitos do meio ambiente em estruturas de concreto armado de acordo com a norma brasileira.

2.1 Vida Útil de projeto

A NBR 6118:2014 [1] conceitua vida útil como período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor. A vida útil da estrutura pode ser analisada como um todo ou por partes, pois alguns elementos podem precisar de atenção especial, como por exemplo, juntas de movimentação. De acordo com Barbudo (1992) [2], vida útil é o período

de tempo que a estrutura conserva suas características geométricas, de funcionalidade e de segurança, sem custos inesperados de reparação.

2.2 Mecanismos de Envelhecimento e Deterioração

2.2.1 Mecanismos referentes à deterioração do concreto

Lixiviação: Ocorre pela ação das águas puras, carbônicas agressivas e ácidas que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento. O sintoma básico é uma superfície com agregados expostos ou arenosos, com eflorescências de carbonato, presença elevada de fuligem e com risco de desenvolvimento de fungos e bactérias. Ela causa uma redução no pH do extrato aquoso dos poros superficiais do concreto e isso gera o risco de despassivação da armadura [6].

Expansão por Sulfato: Ocorre pela expansão e reações deletérias da pasta de cimento hidratado por ação de águas e solos que contêm sulfatos. Causa a expansão e fissuração do concreto, e com isso, a perda de coesão na pasta de cimento e redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais. Só ocorrerá o ataque quando a concentração de sulfatos ultrapassar um determinado limite [7].

Reação álcali-agregado: De acordo com a NBR 6118:2014 [1], é a expansão por ação das reações entre os álcalis do concreto e agregado reativo. Deverá ser identificado pelo projetista o tipo de elemento estrutural e a situação quanto à presença de água nos elementos.

2.2.2 Mecanismos referentes à deterioração da armadura

Despassivação por Carbonatação: É causada pela ação do CO_2 da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros de concreto, reduzindo o pH. A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 60%, pois aí possibilita a instalação da corrosão. A identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos. Quando a armadura é atingida, pode ocorrer séria corrosão e aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de partes dela [6].

Despassivação por ação de cloretos: É a despassivação da armadura pela ação de cloretos que penetram no concreto através de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar e que superam, na solução dos poros do concreto, uma concentração limite, causando assim a despassivação da armadura. O próprio concreto pode possuir íons cloreto, pois são originados da água de amassamento, de agregados contaminados de aditivos. Com a armadura despassivada, ocorrerá uma corrosão localizada da armadura [7].

3. CARBONATAÇÃO

De acordo com PCA 2617 [8], a carbonatação ocorre quando o CO_2 penetra e reage com o hidróxido de cálcio e forma carbonatos. Após a reação, é formado o carbonato de cálcio, como representado na equação 1:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

Essa reação reduz o pH da solução do poro de concreto para menos de 8,5. Nessas condições de pH, a camada passivadora da armadura fica instável e ocorre a despassivação da armadura.

De acordo com Huang *et al.* [9], a carbonatação do concreto ocorre devido a fatores atmosféricos e causa a queda do valor do pH nos poros do concreto. Consequentemente, quando a frente de carbonatação, que é definida pela profundidade de carbonatação, atinge a superfície das barras de aço em estruturas de concreto armado, ocorre a despassivação da armadura e a corrosão das barras se inicia.

De acordo com Ramezanianpour *et al.* [10], a carbonatação ocorre devido ao processo de difusão do CO_2, e, esse processo, é muito lento e diretamente relacionado com as condições ambientais. A profundidade de carbonatação também está ligada à mistura do concreto.

De acordo com Barbudo [2], a difusão é o movimento de um componente de uma mistura através de um estímulo físico. A principal causa da difusão é a existência de um gradiente de concentração do componente que difunde em uma direção, tendendo a igualar a concentração e destruir o gradiente.

A carbonatação é um processo físico químico que ocorre a partir da superfície para o interior do concreto, como é mostrado na figura 1. Cabe ressaltar que, de acordo com Helene [6], a carbonatação não reduz a resistência do concreto. Ela inclusive aumenta a dureza superficial, ela é prejudicial apenas para as barras de aço.

A carbonatação superficial dos concretos é variável de acordo com a natureza de seus componentes, com o meio ambiente (rural, industrial ou urbano) e com as técnicas construtivas de transporte, lançamento, adensamento, cura, etc. Como consequência, a profundidade de carbonatação é de difícil previsão e também variável dentro de amplos limites [11].

A carbonatação não é perceptível a olho nu e, por isso, é necessário realizar ensaios para determinação da profundidade de carbonatação. Um ensaio muito simples de se verificar a profundidade de carbonatação é feito com a fenolftaleína, que é um indicador ácido-básico. De acordo com Helene [11], uma determinação mais precisa só é possível através do estudo de seções microscópicas.

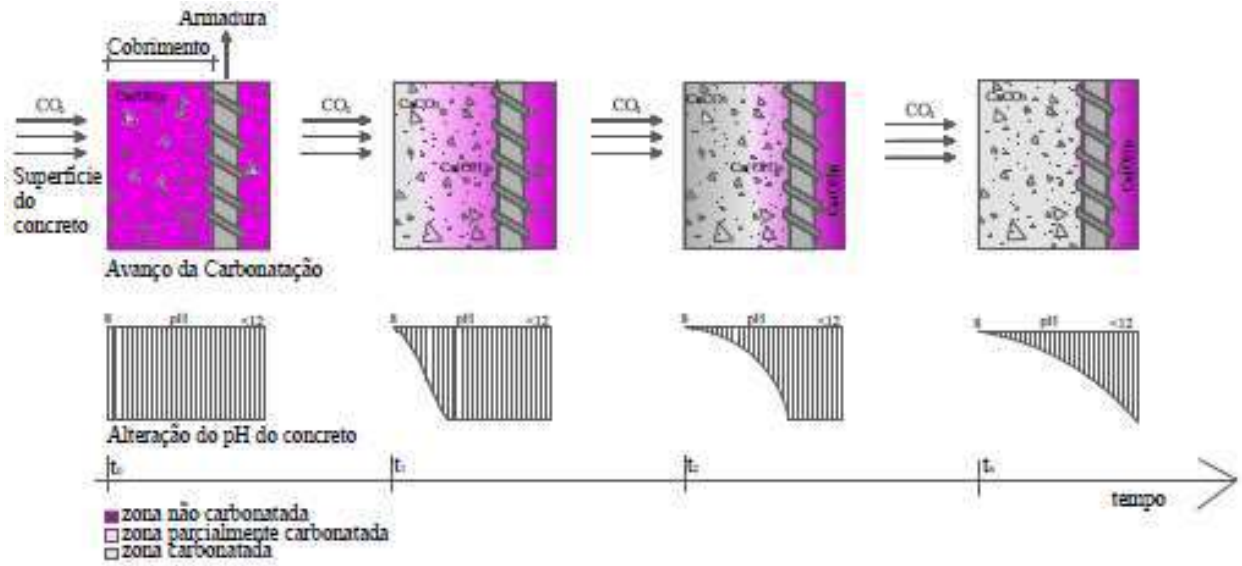


Figura 1: Esquema de avanço da frente de carbonatação com o tempo e modificação no pH (Fonte: Possan [5])

3.1 Fatores que influenciam na carbonatação

Para realizar análises probabilísticas a respeito da carbonatação, deve-se fazer um levantamento de todos os fatores que irão influenciar e entrarão nas análises como variáveis, para que assim se possa realizar uma simulação de Monte Carlo. Quanto mais informações estiverem disponíveis, mais precisa será a simulação e melhores serão os resultados obtidos.

3.1.1 Relação água/cimento

A NBR 6118:2014 [1] preconiza que para garantir a durabilidade de uma estrutura de concreto, a relação água/cimento deve ser dada de acordo com a classe de agressividade ambiental. Pode-se concluir que a carbonatação sofrerá alterações devido a essa relação, ou seja, devido à consistência da pasta de concreto.

Segundo Cascudo [12], a relação água/cimento é um dos parâmetros mais importantes, quando se diz respeito à corrosão da armadura, pois é ela que determina a qualidade do concreto, ou seja, define as características de compacidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida.

De acordo com Houst e Wittmann [13], a difusão depende fortemente da porosidade do concreto. Quanto maior a relação água/cimento, menor será a qualidade do concreto e maior será a porosidade e, dessa forma, maior será a velocidade de difusão.

Ho e Lewis [14] dizem que a relação água/cimento de uma mistura é geralmente considerada um dos principais parâmetros de projeto, pois afetam diretamente a qualidade do concreto. A figura 2 apresenta um gráfico referente à relação água/cimento pela profundidade de carbonatação.

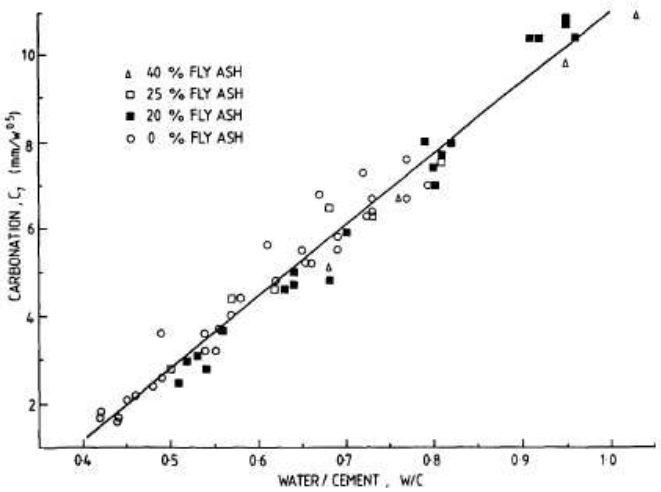


Figura 2: Água/cimento x Profundidade de carbonatação (Fonte: Ho and Lewis [14])

3.1.2 Cimento e aditivos

Esse é um fator que a partir de pesquisa bibliográfica, pode-se perceber que há uma diferença muito grande de condições em que os estudos foram realizados, então é um fator que merece um estudo melhor e mais preciso para ser levado em consideração em uma análise probabilística.

Para Barbudo [2], para os tipos de cimento e aditivos utilizados, é arriscado comparar os resultados pelas diferenças dos ensaios que foram realizados, pois, em geral, qualquer tipo de cimento pode produzir concreto de boa qualidade, com alta ou baixa resistência à carbonatação. Com isso, é fator arriscado de se trabalhar para se obter uma avaliação probabilística precisa.

3.1.3 Concentração de CO_2 na atmosfera

Conforme explicado no item 2 sobre o processo de difusão, ela irá ocorrer devido ao gradiente de concentração da substância que estará difundindo. Portanto, quanto maior a concentração de CO_2 na atmosfera, mais rapidamente ocorrerá o processo de difusão e mais rápido o CO_2 atingirá a armadura.

De acordo com Tuutti [15], a concentração de CO_2 na atmosfera varia entre 0,033% a 1% do volume. O menor valor é encontrado em atmosferas normais e os maiores valores em atmosferas de cidades. Porém, maiores concentrações podem acontecer em alguns locais, por exemplo, cidades com tráfego de veículos muito elevados, ou regiões bem próximas a chaminés de indústrias. Com isso, essa concentração deverá ser checada no local.

3.1.4 Cura, compactação e fissuração do concreto

A cura do concreto é essencial quando se trata de durabilidade, pois é quando se inicia o processo de retração. A compactação mal feita pode fazer com que a porosidade do concreto seja grande e, dessa forma, o processo de difusão ocorra com uma velocidade maior. Tanto a cura quanto a compactação irão interferir na porosidade do concreto, e assim, na velocidade de carbonatação.

Uma má compactação ou cura produzem uma elevada porosidade, principalmente na superfície externa do concreto e, por isso, é um dos fatores que mais influenciam na velocidade de carbonatação. No intervalo de um a sete dias de cura, a velocidade de carbonatação diminui quando o número de dias de cura aumenta. Após sete dias, a velocidade de carbonatação quase não altera [14].

Nas fissuras que não possuem dimensões críticas, o processo de corrosão da armadura se inicia rapidamente. Com isso, a corrosão gera produtos, e esses produtos vedam a fissura. Portanto, a fissuração não irá interferir no processo de carbonatação [15].

3.1.5 Umidade

As condições climáticas determinam a umidade do concreto superficial, e dessa forma, a velocidade de difusão do CO_2 no concreto. A carbonatação é altamente dependente da umidade relativa do concreto. A maior velocidade de carbonatação ocorre quando a umidade relativa está entre 50% e 75%. Abaixo de 25% de umidade relativa, o grau de carbonatação é considerado insignificante. Acima de 75%, a umidade relativa restringe a difusão de CO_2 [16].

De acordo com Tuutti [15], nos poros secos, o dióxido de carbono se difunde facilmente, mas não reage com a ausência de água. Em contrapartida, os poros com muita água atrapalham na difusão do CO_2 para o interior do concreto, sendo assim, a velocidade de carbonatação é muito menor. Por isso, entre 50% e 75% é que se consegue uma maior velocidade de carbonatação. Esse fator pode ser observado na figura 3.



Figura 3 – Grau de Carbonatação x Umidade Relativa do ar (Fonte: Andrade [17])

3.1.6 Temperatura

Possan [5] diz que o aumento da temperatura não causa grande aumento na taxa de carbonatação. A temperatura irá causar um aumento da velocidade de corrosão do aço, sendo um fator importante apenas na fase de propagação. A temperatura tem um papel duplo nos processos de deterioração. Por um lado seu incremento promove um aumento da velocidade de corrosão e a mobilidade dos íons, porém, visto de outro ângulo, a sua diminuição pode dar lugar a condensações que por sua vez podem produzir incrementos locais no teor de umidade [17]. Com isso, o aumento ou a diminuição da temperatura poderão acelerar no processo da carbonatação.

De acordo com Andrade [17], vale ressaltar que é importante destacar que a umidade, o oxigênio e a temperatura podem ter efeitos opostos. Por exemplo, uma maior umidade irá facilitar a corrosão, mas irá impedir o acesso de oxigênio e a difusão, ou, um incremento de temperatura acelera a corrosão, mas diminui a condensação. Este efeito pode dar lugar a interpretações errôneas.

3.1.7 Efeito da proteção da chuva

A difusão do CO_2 ocorre com 60% da velocidade em ambientes externos, comparados aos ambientes internos. Os concretos tendem a umedecer rapidamente, enquanto secam lentamente. Com isso, os concretos de ambientes externos sofrem mais com os ciclos de molhagem e secagem, e dessa forma permanecem por mais tempo saturados, reduzindo então a velocidade de difusão do CO_2 no concreto [18].

Então, pode-se concluir que locais que estão desprotegidos da chuva estão menos susceptíveis à carbonatação, pois ficam mais tempos saturados e isso impede que o CO_2 penetre e atinja a armadura. Isso pode ser verificado, por

exemplo, na parte de baixo dos tabuleiros de pontes e viadutos de estruturas de concreto armado, onde ocorre uma retenção muito grande de CO_2 e não são protegidos da chuva.

4. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A confiabilidade estrutural é empregada para designar a medida de segurança de um determinado sistema estrutural para um determinado desempenho esperado. A confiabilidade da estrutura está ligada ao complemento da probabilidade de falha de um sistema estrutural. Ela está ligada também às diversas variáveis envolvidas em um sistema estrutural e os diversos valores em que cada variável pode assumir [19].

O comportamento de uma estrutura é afetado por várias variáveis, onde, no caso da carbonatação, poderá ser: umidade relativa, classe de agressividade da região, temperatura, composição do concreto, relação água/cimento, dentre outros.
No caso da carbonatação, a falha irá acontecer quando a profundidade de carbonatação for maior do que o cobrimento nominal da armadura, e isso fará com que ocorra a despassivação da armadura e início do processo de corrosão da armadura.

Como foi proposto, o trabalho irá avaliar o efeito da carbonatação pela Simulação de Monte Carlo como ferramenta da confiabilidade das estruturas. A Simulação de Monte Carlo é uma das técnicas mais tradicionais para se realizar a análise probabilística e, quanto maior a amostra adotada, ou seja, o número de repetições da simulação, melhores serão os resultados.

4.1 Níveis dos métodos de Confiabilidade Estrutural

De acordo com Diniz [20], a grande variabilidade de idealizações em modelos de confiabilidade das estruturas e os inúmeros modos que são possíveis de se combinar essas idealizações para descrever um determinado problema, é necessário que exista uma classificação. Essas classificações são feitas em níveis de confiabilidade e são divididas em:

- **Métodos de nível 0:** são aqueles que usam o formato das "tensões admissíveis". No método das tensões admissíveis todas as cargas são tratadas similarmente e as tensões elásticas são reduzidas por um fator de segurança.
- **Métodos de nível I:** são aqueles que empregam um valor característico para cada valor "incerto". Como exemplo tem-se os formatos do tipo LRFD (Load and Resistance Factor Design) ou Método dos Estados Limites.
- **Métodos de nível II:** são aqueles que empregam dois valores para cada parâmetro "incerto" (usualmente média e variância) e uma medida da correlação entre parâmetros (usualmente covariância). Os métodos do índice de confiabilidade são exemplos de métodos do nível II.
- **Métodos de nível III:** são aqueles que empregam a probabilidade de falha da estrutura como medida de sua confiabilidade. Para tal as funções de densidade de probabilidade das variáveis básicas são requeridas.
- **Métodos de nível IV:** são aqueles que explicitamente representam riscos (ou seja, o produto das probabilidades de falha e consequências para todos os possíveis modos de falha) na avaliação dos custos do ciclo de vida da estrutura.

4.2 Problema básico da Confiabilidade

O problema básico da confiabilidade estrutural se encontra na verificação que a força resistente R seja maior do que a força solicitante S ao longo da vida útil da estrutura. Devido às incertezas na determinação das resistências e das solicitações, a confiabilidade só pode ser tratada em termos probabilísticos, ou seja, P (R>S) [20].

Em normas técnicas como a NBR 6118:2014 [1], visando uma maior simplicidade no dimensionamento das estruturas, é adotado um método semi-probabilístico onde são introduzidos fatores de majoração e minoração das solicitações e das resistências. Para a calibração de tais fatores podem ser utilizados métodos de confiabilidade.

Sejam R e S, variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas. A probabilidade de falha P_f para R e S contínuas e estatisticamente independentes, é dada pela seguinte expressão [21]:

$$(R < S) = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s)\, ds \qquad (2)$$

Como mostra a figura 4, a probabilidade de falha está associada à região de sobreposição das curvas $f_R(r)$ e $f_S(s)$. Com respeito a isso, observa-se que a região de sobreposição depende das posições relativas de $f_R(r)$ e $f_S(s)$, ou seja, mantidas as posições das médias e aumentando a dispersão ou mantidas as dispersões e aproximando as médias, P_f aumenta.



Figura 4: Função Densidade de Probabilidade $f_R(r)$ e $f_S(s)$ (Fonte: Ang e Tang [21])

A variável M, onde M = R – S, é conhecida como "margem de segurança". Dado que R e S são variáveis aleatórias, M também é uma variável aleatória com função densidade de probabilidade $f_M(m)$. A falha ocorrerá se M for negativo (M < 0). Quando R e S são estatisticamente independentes e seguem distribuições normais, M também terá distribuição normal com média e desvio padrão dados por:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \tag{3}$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R{}^2 + \sigma_S{}^2} \tag{4}$$

Onde μ_R e σ_R, μ_S e σ_S são média e desvio padrão das variáveis R e S, respectivamente. Nesse caso a probabilidade de falha, P_f, pode ser obtida de forma exata por:

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(-\beta) \tag{5}$$

Com Φ sendo a função distribuição acumulada da variável normal padrão β dada por:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R{}^2 + \sigma_S{}^2}} \tag{6}$$

Esta probabilidade de falha pode ser representada graficamente como a área hachurada da figura 5. Da figura observa-se que o índice de confiabilidade também pode ser interpretado como o número de desvios padrões que distam a média do valor f_M (0).

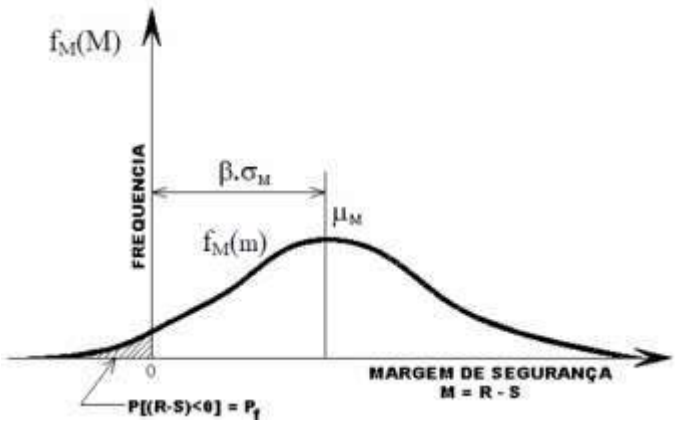


Figura 5**:** Função Densidade de Probabilidade da Margem de Segurança, Probabilidade de Falha, Índice de Confiabilidade (Fonte: Ang e Tang [21]).

De uma forma mais geral R e S podem ser funções de várias variáveis aleatórias X_1, X_2, X_3, ..., X_n. A função de desempenho da estrutura pode ser definida como:

$$g(X) = g(X_1, X_2, \ldots, X_n) \tag{7}$$

Entende-se então que:
$g(\mathbb{X}) > 0$: região de segurança do sistema
$g(\mathbb{X}) = 0$: estado limite do sistema
$g(\mathbb{X}) < 0$: região de falha do sistema

Geometricamente, a equação do estado limite, $g(\mathbb{X}) = 0$, é uma superfície n-dimensional, denominada "superfície de falha". Em um lado desta superfície está a região de segurança, $g(\mathbb{X}) > 0$, enquanto do outro lado, a região de falha, $g(\mathbb{X}) < 0$ [21].

A posição da superfície de falha pode ser representada pela distância mínima da superfície $g(\mathbb{X}) = 0$ até a origem das variáveis reduzidas [21]. Na verdade, Shinozuka [22] mostrou que o ponto na superfície de falha com distância mínima até a origem é o ponto mais provável de falha.

4.3 Simulação de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo é um processo de replicação do mundo real com um conjunto de hipóteses e modelos da realidade. Ela pode ser aplicada para prever ou estudar o desempenho das respostas às variações dos parâmetros de entrada do processo. Também, é utilizada como alternativa de otimização de projetos, principalmente em caso de vida útil [21].

Uma amostra obtida pela simulação de Monte Carlo é semelhante a uma amostra obtida experimentalmente e, dessa forma, os resultados poderão ser tratados estatisticamente. Os dados necessários para a realização da simulação serão: 1) – Modelos matemáticos de caráter determinístico, que para o problema da carbonatação serão as etapas da deterioração de estruturas de concreto armado pela carbonatação e 2) – descrição estatística das variáveis básicas pertinentes à carbonatação [7].

Uma das principais tarefas na simulação Monte Carlo é a geração de valores apropriados das variáveis aleatórias (ou seja, números aleatórios). A utilização da simulação de Monte Carlo na avaliação de desempenho da estrutura pode ser feita de duas formas:

- Calculando as estatísticas (média, desvio padrão e tipo de distribuição) da resposta do sistema. Neste caso, em primeiro lugar uma amostra de resposta da estrutura é obtida, em seguida, uma distribuição de probabilidade é ajustada aos dados de amostra e os parâmetros de distribuição estimados;

- Calcular a probabilidade de falha da estrutura. Neste caso, uma função de desempenho é estabelecida e uma amostra dos possíveis resultados é simulada. O número de resultados não satisfatórios é contado, e a probabilidade de falha é obtida pela razão entre o número de resultados não satisfatórios pelo número de simulações realizadas.

4.4 Confiabilidade em estruturas sob o efeito da carbonatação

Conforme foi discutido anteriormente, precisa-se de informações específicas a respeito das variáveis que influenciam na carbonatação. Essas informações são: O tipo de distribuição da variável, a média e o desvio padrão. Após pesquisa bibliográfica, percebe-se que como é um assunto que já vem sendo bastante estudado, grande parte das informações necessárias já estão disponíveis.

Para se realizar a simulação de Monte Carlo para o efeito da carbonatação, as variáveis a serem empregadas serão: relação água/cimento, o valor da concentração de CO_2 na atmosfera, os processos de cura, compactação do concreto e fissuração do concreto, a umidade, a temperatura e os efeitos de proteção da chuva para alguns elementos estruturais.

Com todos esses fatores envolvidos, a Simulação de Monte Carlo ocorrerá de maneira bem próxima a valores reais contribuindo e muito para que a normalização ocorra e sejam gerados novos dados para futuras pesquisas a respeito do assunto.

De acordo com a NBR 6118:2014 [1], a vida útil da estrutura se é perdida quando a frente de carbonatação atinge o aço, despassivando assim a armadura. Devido a isso, deve-se considerar que a vida útil é perdida logo após a frente de carbonatação ser maior ou igual ao cobrimento.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Para quantificar a profundidade de carbonatação, alguns modelos matemáticos são propostos. A tabela 4 possui algumas dessas formulações que levam em consideração alguns parâmetros que deverão ser previamente calculados. Lembrando que serão demonstrados apenas para exemplificar a problemática.

Tabela 4 – Modelos para determinação da profundidade de carbonatação (Fonte: Possan [5])

Autor (ano)	Modelo	Fatores	Observações
SMOLCZYK (1969)	$e_c = k \cdot \sqrt[n]{t - t_0}$	e_c = espessura carbonatada (mm); t_0 = idade inicial da estrutura (anos); t = tempo de exposição (anos). k = coeficiente de carbonatação; n = parâmetro que depende do tipo de cimento. Para cimentos Portland comum $n \approx 1,7$. Para cimentos Portland de alto forno $n \approx 2,0$	- Considera somente dois tipos de cimento. - Não informa como determinar o k.
HAMADA (1969)	$e_c = \frac{R}{\sqrt{k}} \cdot t$, para $k = \frac{0,30.(1,15 + 3a/c)}{(ac - 0,25)^2}$	e_c = espessura carbonatada; k = coeficiente em função da a/c; a/c = relação água/cimento; R = coeficiente tabelado. $R = r_c r_a r_s$ = função do tipo de cimento (r_c), tipo de agregado (r_a) e aditivo (r_s).	- Parâmetros do modelo são tabelados. - k é função da a/c
SMOLCZYK (1976)	$e_c = a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_c}} - \frac{1}{\sqrt{f_{c\,\lim}}} \right) \cdot \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada (cm); a = velocidade de carbonatação; f_c = resistência à compressão do concreto (kgf/cm²); f_{clim} = valor limite da resistência à compressão do concreto que pode ser carbonatada (kgf/cm²); t = tempo de exposição (semanas). Para ambientes internos a= 220 e f_{clim}= e 920. Para ambientes externos a= 250 e f_{clim}= e 625.	- Não informa como determinar o coeficientes a; - A carbonatação é função somente da resistência à compressão.
SCHIESSL (1976)	$e_c = \left(\frac{2.D.(c_1 - c_2)}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada; D = coeficiente de difusão efetiva do CO_2 (m²/s); a = volume de material alcalino no concreto; $c_1 - c_2$ = diferença da concentração de CO_2 entre a superfície e a frente de carbonatação (kg/m³); t = tempo de exposição.	- Parâmetros de entrada de determinação não trivial, como D, a, c_1 e c_2;
TUUTTI (1982)	$e_c = k.\sqrt{t}$	e_c = espessura carbonatada (mm); t = tempo em anos ou meses; k = coeficiente dependente da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto.	- Não informa como determinar o k para projetos novos.

5. CONCLUSÃO

O assunto de durabilidade das estruturas deve ser levado em consideração ao se projetar qualquer empreendimento. O meio ambiente vem sofrendo com o grande volume de resíduos sólidos gerados, e, com isso, é cada vez mais importante visar a sustentabilidade das construções, onde, a sustentabilidade está diretamente ligada à durabilidade. Com estruturas mais duráveis, a geração de resíduos sólidos é bem menor, e, dessa forma, os impactos ambientais das construções serão menores.

Uma série de manifestações patológicas referentes à agressividade do ambiente foram apresentadas. Com o passar do tempo essas manifestações patológicas são intensificadas, principalmente pela variação de poluentes que a atmosfera vem recebendo. Estudos referentes à atmosfera devem ser realizados com maior frequência e discutidos, levantando assim quais os efeitos da agressividade do ambiente nas estruturas de concreto armado.

A atmosfera terrestre vem sofrendo modificações ao longo dos anos, os níveis de poluição tem aumentado e por consequência, a concentração de CO_2. Como foi citado ao longo do trabalho, a concentração de CO_2 influencia diretamente na velocidade da carbonatação nas estruturas de concreto armado. Devido a fatores como esse, os estudos referentes à vida útil das estruturas deverão ser intensificados.

Com o desenvolvimento dos auxílios computacionais para a engenharia, a facilidade de se fazer estudos matemáticos computacionais é muito maior, sendo assim, estudos como o demonstrado no artigo. A simulação de Monte Carlo é uma das principais ferramentas para o estudo da Confiabilidade das Estruturas. Com ela, podem-se obter resultados próximos ao experimental sem que sejam realizados os ensaios necessários, dependendo da disponibilidade de dados. Isso pode ser um grande aliado, pois dependendo do problema, a variabilidade de informações é muito grande e a simulação facilita o processamento dos dados e possui uma precisão nos resultados muito satisfatória, além de economizar nos ensaios.

Para o caso da carbonatação, o trabalho levantou algumas características necessárias para se realizar a Simulação de Monte Carlo. Porém, é necessário que haja um estudo melhor elaborado e mais específico para se realizar a simulação. Deve-se verificar a disponibilidade de dados referentes às características do processo de carbonatação disponíveis e confiáveis.

6. REFERÊNCIAS

[1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento* (NBR 6118:2014).

[2] Barbudo, M.A.S. *Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón.* Madrid, Universidade Complutense de Madrid, Departamento de Ingeniería Química, 1992, 386 p.

[3] Marques, P.F. and Costa, A. *Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies.* Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 258-265, 2010.

[4] Carmona, T.G. *Avaliação probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado*. São Paulo, Universidade de São Paulo PCC. USP, 2005, 93 p.

[5] Possan, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 263 p., 2010.

[6] Helene, P.R.L. *Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*. In: Ambiente Construído, v. 1, n. 2. São Paulo, 13p., 1997.

[7] Lorensini, R.V. *Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação.* Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 100 p., 2006.

[8] Portland Cement Association (2002). *Types and causes of Concrete Deterioration.,* (PCA 2617:2002).

[9] Huango, Q., Jiang, Z., Zhang, W., Gu, X,, Dou, X. *Numerical analysis of the effect of coarse aggregate distribution on concrete carbonation*. Construction and Building Materials, Vol. 37, pp. 27-35, 2012.

[10] Ramezanianpour, A.A., Tarighat, A., Miyamoto, A. *Concrete Carbonation Modelling and Monte Carlo Simulation Method for Uncertainty Analysis of Stochastic Front Depth*. Mem. Fac. Eng. Yamaguchi University, Vol. 50 No.2, pp. 57-60, 2000.

[11] Helene, P. R. L.*Corrosão em Armaduras para Concreto Armado,* IPT, PINI, São Paulo, Brasil, 46p., 1986.

[12] Cascudo, O. *O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas* . 237 p. Goiânia, Editora UFG, 1997.

[13] Houst, Y.F. and Wittmann, F.H. *Influence of Porosity and Water Content on the Diffusivity of CO_2 and O_2 Through Hydrated Cement Paste*. Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp. 1165-1176, 1994.

[14] Ho, D.W.S. and Lewis R.K. *Carbonation of concrete and its prediction*. Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 489-504, 1987.

[15] Tuutti, K. *Corrosion of Steel in Concrete*, Stokholm, 1982. 469 p. Swedish Cement and Concrete Research, Fo nº 504.

[16] ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete,* ACI 201.2R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.

[17] Andrade, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Trad. De Antonio Carmona e Paulo Helene., 104 p. São Paulo, Pini, 1992.

[18] Schiessl, P. *Corrosion of Steel in Concrete*. Report of the Technical Committee. 60-CSC, RILEM, Chapman and Hall, London, 1998.

[19] Awruch, A.M.; Gomes, H.M. *Análise da confiabilidade de estruturas de concreto armado com uma metodologia para inclusão de efeitos estocásticos de propriedades dos materiais*. In: Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y Diseno en Ingeniería 2014:30(2):S5-96, 2013.

[20] Diniz, S. M. C. *Structural Reliability: Rational Tools for Design Code Development*. ASCE. 10 p., 2008.

[21] Ang, A. H. e Tang, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, Risk and Reliability*, Vol. II, John Wiley & Sons. EUA, 1990.

[22] Shinozuka, M. *Basic Analysis of Structural Safety*. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 721-740. 1983.