

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Curso de Engenharia Civil**

PEDRO RAFAEL SCHIRMER

**Aplicação de dois métodos de estimativa da vida útil de estruturas
de concreto armado pelo avanço da carbonatação**

Porto Alegre
Agosto de 2024

PEDRO RAFAEL SCHIRMER

**Aplicação de dois métodos de estimativa da vida útil de estruturas
de concreto armado pelo avanço da carbonatação**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Lucas Alexandre Reginato

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Schirmer, Pedro Rafael

Aplicação de dois métodos de estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado pelo avanço da carbonatação / Pedro Rafael Schirmer. -- 2024.

67 f.

Orientador: Lucas Alexandre Reginato.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2024.

1. Vida Útil. 2. desempenho. 3. carbonatação. I.
Reginato, Lucas Alexandre, orient. II. Título.

PEDRO RAFAEL SCHIRMER

**APLICAÇÃO DE DOIS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO PELO AVANÇO DA CARBONATAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de Agosto de 2024

Banca examinadora

Prof. Lucas Alexandre Reginato (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador

Eng° Civil Tobias Pigatto Ottoni

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professora PhD. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)

PhD. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng° Civil Alessandro Simas Franchetto

MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Métodos para a previsão da vida útil de estruturas de engenharia têm ganhado importância crescente num contexto de grandes preocupações com o futuro do meio ambiente e os impactos da engenharia. A carbonatação é protagonista na depreciação da vida útil de estruturas e tem sua modelagem tradicionalmente considerada onerosa e de difícil aplicação. O método de Tuutti (1982) fornece uma ferramenta simples, porém limitada, para estimar a evolução da carbonatação. O método de Possan (2010) é mais abrangente e permite a apreciação da confiabilidade das variáveis e do resultado, sendo porém de aplicação mais trabalhosa. Este trabalho expõe a aplicação instrutiva de ambos os métodos em caso real de uma edificação, bem como os esforços investigativos para a obtenção dos dados de entrada, incluindo o ensaio de profundidade de carbonatação. Com isso, o trabalho busca demonstrar que esforços para a previsão da vida útil podem ser efetivamente integrados às rotinas de projeto, construção e avaliação de edificações, contribuindo para uma visão de engenharia mais alinhada com as tendências mundiais de desempenho durável e sustentável. Ao final, por meio da implementação da aplicação dos métodos, foi obtido pelo método de Tuutti um resultado superior ao esperado, ao mesmo tempo que se verificou a adequação do método de Possan para valores dos parâmetros dentro do domínio da base de dados usado na sua construção, com prejuízo a situações fora desta faixa.

Palavras-chave: Vida Útil; desempenho; carbonatação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coeficiente de difusão de O ₂ em função da relação água cimento para cimento Portland comum	12
Figura 2 – Delineamento da pesquisa	15
Figura 3 – A distribuição normal subjaz as premissas estatísticas do Método Seis Sigma	21
Figura 4 – Funções de densidade de probabilidade típicas em análise estatística	23
Figura 5 – Método de transformação inversa para a geração das variáveis aleatórias	24
Figura 6 – Representação gráfica dos estados de falha e segurança	26
Figura 7 – Efeito da adição de sílica ativa (SA) no índice de confiabilidade para o cimento CP IV ARI	27
Figura 8 – Histograma de frequências de vida útil e f.p.a associada para um exemplo	28
Figura 9 – Normal climatológica de Porto Alegre 1991-2020 da umidade relativa do ar	36
Figura 10 – Profundidade de carbonatação com o avanço da idade, abordagem determinística ..	41
Figura 11 – Uma linha na planilha de simulações pelo método Monte Carlo	42
Figura 12 – Histograma de frequências e f.p.a da abordagem probabilística com destaque em vermelho para o corte de 20% de probabilidade de falha	44
Figura 13 – Reprodução da simulação anterior no <i>software ModelRisk</i> da Vose	45
Figura 14 – Janela aproximada do gráfico da Figura 12	45

Figura 15 – Janela aproximada do gráfico da Figura 13	46
Figura 16 – Resultado da simulação probabilística	46
Figura 17 – Sobreposição das modelagens dos avanços da frente de carbonatação segundo o modelo de Possan (2010) em abordagem probabilística e determinística e o modelo de Tuutti (1982)	47
Figura 18 – Tela de simulação	48
Figura 19 – Resultado da simulação probabilística, segunda aplicação	49
Figura 20 – Histograma de frequências e f.p.a da segunda aplicação com destaque em vermelho para o corte de 90% de probabilidade de falha	49
Figura 21 – <i>Software ModelRisk</i> para a segunda aplicação	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coefficientes da equação modelo de Possan	17
Tabela 2 –	Probabilidade de falha P_f versus índice de confiabilidade β	20
Tabela 3 –	Índices de confiabilidade β alvo recomendados para projeto de estruturas, com relação aos períodos de referência especificados	22
Tabela 4 –	Espessura de cobrimento medida <i>in loco</i>	31
Tabela 5 –	Profundidade de carbonatação medida em ensaio	32
Tabela 6 –	Produção anual nacional de cimento por tipologia	34
Tabela 7 –	Evolução da normatização dos cimentos Portland comum e composto no Brasil ...	34
Tabela 8 –	Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto	35
Tabela 9 –	Resistência à compressão das peças estudadas	35
Tabela 10 –	Umidade relativa	36
Tabela 11 –	Teor de CO_2	37
Tabela 12 –	Vida útil prevista pelo método de Tuutti	37
Tabela 13 –	Resumo dos dados de entrada para abordagem determinística	39
Tabela 14 –	Dados de entrada para aplicação na equação modelo de Possan	40
Tabela 15 –	Vida útil prevista pelo método de Possan em abordagem determinística	41

Tabela 16 –	Parâmetros de entrada para abordagem probabilística	42
Tabela 17 –	Vida útil prevista pelo método de Possan em abordagem probabilística	47
Tabela 18 –	Previsões de vida útil pelos diferentes métodos	47

LISTA DE SIGLAS

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

ACI – *American Concrete Institute*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VUP – Vida Útil de Projeto

LACOR - Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CO₂ – dióxido de carbono

O₂ – gás oxigênio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

fib – Fédération Internationale du Béton

ISO – *International Organization for Standardization*

f.d.p – função de densidade de probabilidade

f.p.a – função de probabilidade acumulada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	DIRETRIZES DO TRABALHO	3
2.1	OBJETIVOS	3
2.2	DELIMITAÇÕES.....	3
2.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
3	MÉTODOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	6
3.1	MÉTODOS BASEADOS EM EXPERIÊNCIAS ANTERIORES	6
3.2	MÉTODOS BASEADOS EM COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO	7
3.3	MÉTODOS BASEADOS EM ENSAIOS ACELERADOS.....	7
3.4	MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS	8
3.5	MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS PROBABILÍSTICOS	8
3.6	MÉTODO DE TUUTTI (1982)	8
3.7	MÉTODO DE POSSAN (2010).....	14
3.7.1	<i>Modelo de carbonatação</i>	<i>14</i>
3.7.2	<i>Abordagem determinística para previsão da vida útil</i>	<i>17</i>
3.7.3	<i>Abordagem probabilística para previsão da vida útil.....</i>	<i>18</i>
3.7.4	<i>Método de Monte Carlo</i>	<i>22</i>
4	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	30
4.1	PROPOSTA DE ESTUDO DE CASO	30
4.2	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E ESPESSURA DE COBRIMENTO	31
4.3	CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO.....	32
4.4	TIPO DE CIMENTO	33
4.5	TEOR DE ADIÇÃO.....	34
4.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	35
4.7	UMIDADE RELATIVA.....	35
4.8	TEOR DE CO ₂	36
4.9	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TUUTTI (1982).....	37
4.10	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE POSSAN (2010)	38
4.10.1	<i>Abordagem determinística</i>	<i>39</i>
4.10.2	<i>Abordagem probabilística</i>	<i>41</i>
4.11	COMPARAÇÃO.....	47
4.12	APLICAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO COM DADOS DE POSSAN (2010).....	48
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais usado no mundo. Com uma produção anual da ordem de 14,0 bilhões de metros cúbicos (Jagamohan, 2024) e participação basicamente universal na infraestrutura em todas as culturas e nações, é patente a importância que tem a pesquisa neste material quanto a suas propriedades e processos de transformação.

Diversos aspectos do concreto já foram amplamente estudados, como as reações de endurecimento, a conformação de sua microestrutura, os materiais de sua composição, os efeitos de aditivos e adições, as técnicas de preparação, lançamento, cura e conservação, entre outros. Neste esforço, os mecanismos de degradação e a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado têm sido enfoque de inúmeras pesquisas nas últimas décadas e grandes avanços têm sido demonstrados.

O fenômeno da carbonatação do concreto por ação do gás carbônico é em grande parte dos casos o principal mecanismo contributivo para a depreciação da vida útil de estruturas de concreto armado (Possan, 2010). A modelagem deste fenômeno, no entanto, tende a ser complexa e a previsão do seu impacto nas estruturas, tradicionalmente, tem sido dispensada por ser considerada muito onerosa ou até mesmo inexecutável em obras convencionais.

Já em 1982, o pesquisador e professor sueco Kyösti Tuutti buscou intervir no estado das coisas e propor um modelo de fácil aplicação para a apreciação da carbonatação em estruturas de concreto armado (Tuutti, 1982). O modelo proposto tinha como base uma relação simples entre a profundidade de avanço da frente carbonatada e o tempo decorrido, ponderada por um coeficiente tabelado obtido em ensaios experimentais. A intenção de propiciar a fácil modelagem do processo de carbonatação para as estimativas de vida útil de estruturas foi em grande parte bem sucedida, na medida em que efetivamente introduziu ao ferramental dos engenheiros um instrumento prático que se viu amplamente difundido após sua publicação.

Com o passar dos anos, o modelo de Tuutti veio a ser gradativamente contestado e as limitações do seu método tornaram-se cada vez mais evidentes. Além disso, novas preocupações passaram a integrar a disciplina de desempenho de edificações. A sociedade evoluiu no sentido de cada vez mais dar atenção aos impactos que a degradação das construções ocasiona ao meio ambiente, à economia

e à segurança. A comunidade de engenharia, em razão disso, tem se visto na obrigação de superar a visão tradicional puramente mercadológica da edificação como produto e da engenharia como serviço, expandindo o horizonte de seus interesses para além do atendimento a garantias de contrato, e incluir as transformações de longo prazo que ocorrem nas edificações e em seu entorno em suas preocupações.

Neste ensejo, os estudos recentes na previsão da vida útil de estruturas buscam construir modelos mais precisos dos mecanismos de degradação, a fim de obter resultados mais confiáveis. Em caráter inovador, o conceito de confiabilidade é uma das grandes tendências da engenharia nos últimos tempos, hoje constatando estar em franca fase de implementação nos manuais e nos códigos que regimentam a atividade do engenheiro. Os métodos que se esforçam por incluir a confiabilidade na sua alçada acabam, no entanto, por comprometer aquela facilidade de aplicação sem a qual dificilmente se pode esperar sua ampla aceitação nas rotinas de engenharia.

O método de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado proposto por Possan (2010) traz um modelo de carbonatação abrangente que permite a apreciação de vários fatores de influência tanto por meio de uma abordagem determinística quanto probabilística. A abordagem probabilística, no entanto, requer o uso de ferramentas que não são usuais na prática de engenharia e solicitam um esforço maior na investigação dos parâmetros de entrada para a aplicação do modelo, exigindo quantificar a variabilidade destes fatores, dessa forma comprometendo a facilidade que o método simples de Tuutti em especial proporcionava.

Este trabalho objetiva contribuir para a comunidade de engenharia por meio de uma exposição da aplicação de ambos os métodos de Tuutti e de Possan para a previsão da vida útil em caso de uma estrutura existente de concreto armado. A descrição instrutiva dos passos a serem seguidos na aplicação de ambos os métodos, bem como as soluções para obtenção dos dados de entrada utilizados, pretendem demonstrar que é sim possível integrar atividades de previsão de vida útil de estruturas nas rotinas de projeto, construção ou avaliação de edificações convencionais, inclusive com recurso a modelos mais complexos e com apreciação da confiabilidade das entradas e dos resultados.

2 DIRETRIZES DO TRABALHO

2.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é expor a aplicação de dois métodos de previsão de vida útil de edificações com base na modelagem do avanço da frente de carbonatação em peças estruturais de concreto armado por meio de um estudo de caso de uma edificação existente.

Os objetivos secundários são a exposição dos procedimentos adotados para estimar dados de entrada que não se pôde obter diretamente e comparar os resultados das previsões dos métodos entre si e com os dados colhidos diretamente em ensaios na estrutura em estudo.

2.2 DELIMITAÇÕES

A delimitação mais significativa deste trabalho reside na validade dos dados de entrada usados. Em que pese o desejo de se obter no final resultados representativos da realidade, o enfoque declarado deste estudo está prioritariamente na exposição e aplicação dos métodos estudados de previsão de vida útil com base na carbonatação. Além disso, há que se considerar a indisponibilidade de algumas informações em registro da edificação estudada. Por essas razões, algumas decisões foram tomadas neste trabalho a fim de facilitar sua consecução, em especial no tocante à adoção de valores representativos para as variáveis dos modelos.

De forma geral, este estudo fica também delimitado pelas delimitações dos estudos a que faz referência. Como será discutido em tempo, os métodos usados neste trabalho têm cada um suas premissas, suposições e limitações, que são reproduzidos para este trabalho que os aplica.

Em caráter excepcional, é oportuno observar os efeitos da enchente histórica no Rio Grande do Sul e como afetaram este trabalho. A Universidade suspendeu todas as atividades presenciais a partir do dia 06 de maio, tendo havido já recomendado o cancelamento das aulas no dia 02 da semana anterior. Os alunos voltaram a ter aulas presenciais somente no dia 01 de julho. Durante este hiato, o estado foi palco do drama coletivo e dos dramas pessoais de centenas de milhares de pessoas afetadas

pela tragédia. Com efeito, as prioridades mudaram e diversos projetos foram interrompidos.

No início do trabalho, havia a intenção de se realizar pessoalmente os ensaios para a obtenção dos dados a serem usados no estudo de caso. Em face da impossibilidade de se tomar emprestado do LEME os equipamentos necessários para a consecução dos ensaios durante a suspensão das atividades acadêmicas, o planejamento e a realização dos ensaios acabariam por consumir um tempo que não mais se dispunha quando o trabalho foi retomado, em vista ainda do horizonte encurtado para a apresentação do trabalho para a banca, em função da redução do semestre letivo. Em razão disso, optou-se por dedicar os esforços na ampla revisão bibliográfica e exposição dos temas estudados, bem como na redação detalhada dos processos e procedimentos pertinentes ao estudo. Ao fim, foi produzido um trabalho final que se julga plenamente satisfatório de acordo com as pretensões iniciais.

2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Existe a preocupação no decorrer deste trabalho de selecionar fontes de informação de acordo com sua qualidade e confiabilidade (Menezes, 2021) Preferência foi dada a fontes com forte respaldo institucional, como normas técnicas e regulamentos, ou com forte autoridade, como livros ou publicações de autores ou periódicos conhecidos com um número apreciável de citações. Eventualmente, foram consultadas fontes menos sólidas, como trabalhos de pequena repercussão ou artigos em sites da *internet*, porém de maneira sempre judiciosa e crítica, buscando validar a informação em mais de uma fonte quando possível.

Para fins de revisão bibliográfica, um capítulo será dedicado a apresentar os métodos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado. Primeiramente, os métodos são genericamente dispostos em cinco categorias, brevemente descritas cada uma. A seguir, são expostos em detalhe os métodos que serão aplicados neste trabalho, a saber, o método de Tuutti (1982) e o método de Possan (2010). O estudo apresenta o fundamento que justifica cada método, a sequência de procedimentos que levou à formulação final de cada método e uma explicação de como se pode aplicar cada um deles em casos práticos. Para o método de Possan, será necessário desenvolver com maior detalhe a explicação de alguns procedimentos subsidiários ao método, a fim de garantir que o leitor possa, fazendo referência a este estudo,

reproduzir por conta a sua aplicação caso assim deseje. Neste capítulo, as principais fontes evidentemente são os trabalhos de Tuutti (1982) e de Possan (2010), os quais foram diretamente estudados a fim de compreender suas proposições, havendo também chamada a outras fontes que foram úteis.

Consolidado o embasamento teórico, procede-se para o registro do estudo de caso de aplicação dos modelos estudados. No estudo de caso, será feito uso dos dados obtidos em uma investigação real sobre o estado de carbonatação da estrutura de uma edificação existente. As informações cedidas incluem a idade da edificação, a resistência à compressão de projeto, a planilha de profundidades de carbonatação e cobertura de armadura e outras informações descritivas. Outros parâmetros de entrada necessários para a aplicação dos métodos serão obtidos de outras formas, o que será devidamente comentado. Neste capítulo, as principais fontes são os relatórios da investigação, normas e trabalhos acadêmicos descrevendo a execução dos ensaios realizados, fontes para obtenção adicional dos dados, entre outras.

Por fim, as previsões teóricas e as medições serão comparadas e discutidas, comentando-se sobre a adequação dos modelos ao caso de estudo e os fatores que possivelmente intervirem para se haver obtido resultados diferentes.

3 MÉTODOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

O *American Concrete Institute*, em relatório divulgado no ano de 2000 sobre os métodos de previsão de vida útil do concreto (ACI, 2000), discrimina tais métodos em 5 grupos, sendo aqueles os baseados em experiências anteriores, baseados em comparação de desempenho, baseados em ensaios acelerados, baseados em modelos matemáticos ou baseados em modelos probabilísticos. Este conceito metodológico pode ser aplicado a diversos processos de degradação do concreto, incluindo a carbonatação, o ataque por cloretos, o ataque por sulfatos, o ataque por agentes orgânicos, a lixiviação, a degradação por gelo e degelo, entre outros.

Estes grupos não são exclusivos, visto que na prática em regra os métodos desenvolvidos por pesquisadores compartilham premissas de mais de um grupo simultaneamente. Possan (2010) ilustra uma abordagem em que métodos baseados em experiências anteriores ou em ensaios acelerados podem resultar em modelos de degradação, que, por sua vez, podem ser determinísticos ou probabilísticos.

A seguir, são descritos brevemente os grupos de métodos de previsão da vida útil de estruturas de concreto. Após isso, serão discutidos em específico os métodos que serão utilizados neste trabalho.

3.1 MÉTODOS BASEADOS EM EXPERIÊNCIAS ANTERIORES

Os métodos baseados em experiências anteriores consistem em replicar técnicas e métodos de dimensionamento consagrados em manuais e normas, seguindo a premissa tradicional da responsabilidade na engenharia de que em se seguindo estas diretrizes, o engenheiro poderá razoavelmente presumir que a estrutura atenderá os requisitos exigidos. Estes métodos faltam, no entanto, quando se considera o avanço na inovação tecnológica e a mudança nos parâmetros de interferência do ambiente nas estruturas construídas, bem como a crônica defasagem dos órgãos reguladores com relação à atualidade do mercado.

É interessante que a NBR 15575 (2021) declara este grupo de métodos como sendo “a melhor forma para se determinar a VUP” (NBR 15.575:1 – Anexo C), arguindo que em países europeus estes métodos eram muito usados durante as décadas de 60 e 70 para a regulamentação dos valores das VUP mínimas requeridas.

Isso evidencia a tendência crônica de atraso do Brasil com relação às práticas de engenharia no primeiro mundo.

3.2 MÉTODOS BASEADOS EM COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO

Os métodos baseados em comparação de desempenho consistem em observar a curva de degradação de uma estrutura existente e presumir que esta curva será respeitada por uma outra estrutura com características semelhantes. Este método é de difícil aplicação, na medida em que a engenharia de construções sofre de enorme variabilidade desde os materiais e técnicas construtivas até as condições de uso, manutenção e ambiente no serviço. Na prática, a aplicação altamente contingencial destes métodos implica a impossibilidade de regulamentação para fins de segurança técnica e jurídica, ficando reservada para aplicações especiais e singulares.

3.3 MÉTODOS BASEADOS EM ENSAIOS ACELERADOS

Os métodos baseados em ensaios acelerados consistem em reproduzir sob controle um mecanismo de degradação em modelos reduzidos da estrutura de interesse, usando-se de artifícios de laboratório para acelerar o desenvolvimento do mecanismo. Os fatores intervenientes no processo são controlados a fim de se preservar um coeficiente de aceleração, que representa a relação entre a velocidade de degradação em condições naturais comparada com aquela obtida em laboratório.

Neste grupo de métodos reside uma ponte importante entre o mercado e a Universidade, visto que muitas vezes laboratórios acadêmicos são requisitados por indústrias para validar novas tecnologias, especialmente no contexto da publicação recente da revisão da norma de desempenho em 2021. Além disso, as Universidades participam ativamente de pesquisas necessárias para a elaboração e atualização das normas técnicas. Por exemplo, o LACOR, pertencente à UFRGS, atende cerca de 140 indústrias do ramo metal-mecânico de diferentes partes do Estado com ensaios acelerados de corrosão para testar novos materiais e tecnologias (LACOR, 2012).

3.4 MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS

Os métodos baseados em modelos matemáticos consistem em tentativas de descrever precisamente os processos envolvidos na degradação da estrutura de concreto segundo leis e formulações da físico-química e outras áreas adjacentes. Para isso, os métodos fazem amplo uso do arcabouço teórico das ciências puras, em especial quanto aos mecanismos de transportes, como a Lei de Faraday, a equação de Darcy, a primeira e a segunda Leis de Fick, entre outras (Possan, 2010).

Estes métodos no geral resultam em formulações bastante complexas, requerendo dados de difícil obtenção e fazendo uso de premissas e simplificações que, por mais que preservem a fidelidade dos modelos com os fenômenos representados, reduzem o leque de aplicações, especialmente no tocante à investigação de estruturas já existentes, exigindo ensaios adicionais demorados e custosos.

3.5 MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS PROBABILÍSTICOS

Os métodos baseados em modelos probabilísticos consistem no uso adaptado de formulações determinísticas em que se objetiva o cálculo não de previsões exatas do tempo necessário para o evento ocorrer do comprometimento do desempenho da estrutura, mas sim a obtenção da probabilidade de ocorrência da falha em função da idade. Com isso, a vida útil de projeto de uma estrutura pode ser definida em termos de uma idade a partir da qual a probabilidade de falha ultrapassa um valor admissível.

Esta abordagem está de acordo com a tendência geral da engenharia nas últimas décadas em direção a uma visão de projeto baseada em confiabilidade. Os métodos probabilísticos permitem a consideração da variabilidade e incerteza na medição de algumas variáveis de modelo, desta forma sendo possível obter estimativas que se confia mais próximas da realidade.

3.6 MÉTODO DE TUUTTI (1982)

A tese de doutorado de Kyösti Tuutti apresentada em 1982 para a Universidade de Lund na Suécia é possivelmente o mais conhecido trabalho no âmbito da corrosão de armaduras em concreto. Em resumo, o trabalho estuda os mecanismos envolvidos

na corrosão do aço em estruturas de concreto armado, dividindo o processo em uma fase de iniciação e uma fase de propagação. O trabalho descreve os fatores intervenientes nas fases de iniciação e de propagação e oferece um modelo para quantificar a evolução destas fases. Por fim, o trabalho propõe um método de previsão da vida útil delineando um estado limite com base na abertura de fissuras ou no surgimento de depósitos superficiais de produtos da corrosão, associados a uma profundidade máxima de corrosão a ser permitida atingir na fase de propagação.

A influência do trabalho de Tuutti se deve a dois motivos. Em primeiro lugar, a concepção do processo de corrosão da armadura em uma fase de iniciação e uma fase de propagação forneceu um *framework* para a abordagem do processo, permitindo formulações mais precisas para cada fase considerando apenas fenômenos que acontecem simultaneamente a cada tempo. De fato, como observa a ACI (2000), a maioria dos modelos subsequentes de corrosão de armaduras utilizam a mesma abordagem de Tuutti (1982). Em segundo lugar, a formulação simples do avanço da frente de carbonatação no concreto contribuiu no sentido de trazer maior atenção a este fenômeno, visto que até então a carbonatação era um processo considerado complexo demais para apreciação fora dos livros e dos laboratórios.

No modelo de Tuutti (1982), o processo de corrosão do aço tem seu início no término da fase de iniciação. No decorrer da fase de iniciação, ocorrem dois fenômenos simultâneos, a saber, a penetração de íons cloreto e o avanço da frente de carbonatação até a profundidade da armadura. Os fenômenos são considerados por Tuutti de forma independente e o tempo da fase de iniciação é dado como o tempo do processo mais rápido.

A velocidade da fase de iniciação depende da taxa com que os agentes corrosivos avançam no concreto e a concentração final necessária desses agentes para comprometer a passivação da armadura. A seguir, apresentamos somente a ação do CO₂, vulgo a carbonatação, interesse deste trabalho.

A carbonatação é modelada por Tuutti por um coeficiente k (mm/s^{1/2}) em função da taxa de difusão do CO₂ no concreto e da capacidade do concreto de assimilar o CO₂ penetrado. Esta capacidade está associada à reserva alcalina da matriz cimentícia (teor de álcalis na matriz). O coeficiente de carbonatação pondera uma relação em que o avanço da frente de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo decorrido.

Em formulação, as Equações 1 e 2 abaixo são usadas em laboratório para determinar o coeficiente de carbonatação k para um concreto com características fixadas.

$$g\left(\frac{k}{2\sqrt{D_1}}\right) = \sqrt{\pi} * \frac{k}{2\sqrt{D_1}} * \exp\left(\frac{k^2}{4D_1}\right) * \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{D_1}}\right) \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{c_X - c_1}{g\left(\frac{k}{2\sqrt{D}}\right)} + c_X - c_2 = 0 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

c_X = concentração de CO_2 na descontinuidade (fronteira da frente de carbonatação);

D_1 e D_2 = constantes de difusividade em ambos os lados da descontinuidade;

c_1 = concentração de CO_2 no ambiente entorno; e

c_2 = concentração de CO_2 dentro do material.

Estas equações solicitam a difusividade de CO_2 no concreto e a concentração de CO_2 capaz de ser assimilada pelo concreto estudado, obtidas por correlações em ensaios adicionais, e a concentração de CO_2 em ataque na superfície (entorno), parâmetro de ensaio. É medida a concentração de CO_2 em diferentes estágios de carbonatação na descontinuidade que define a frente de carbonatação, com o que por fim se calcula por média o coeficiente k .

Com os coeficientes k tabelados para concretos de várias características, pode-se aplicar facilmente a relação abaixo.

$$X = k * \sqrt{t} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

X = profundidade de carbonatação, em mm;

k = coeficiente de carbonatação, em $\text{mm/ano}^{1/2}$; e

t = tempo decorrido (anos).

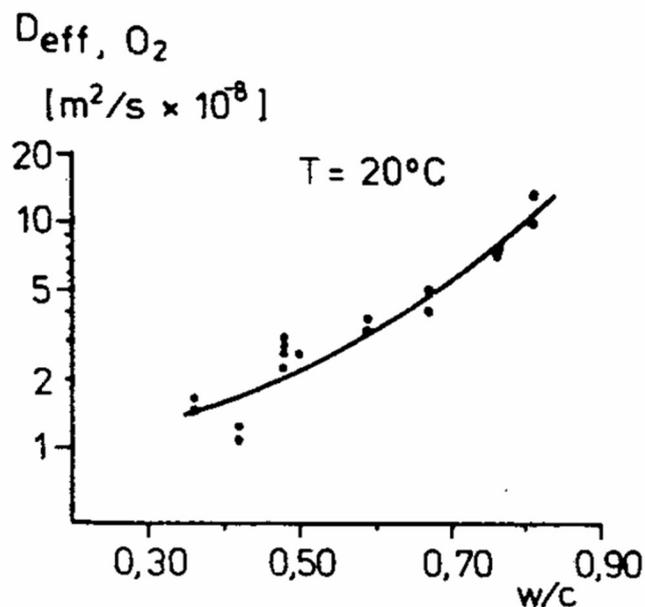
A facilidade na aplicação do modelo decorre de que os coeficientes k são fornecidos *a priori* em tabelas, resultado de vários experimentos realizados por Tuutti e expandidos por outros autores. Alternativamente, é bastante usual para estruturas existentes que seja feita a tomada de medidas reais de profundidade de carbonatação e, juntamente com a idade da estrutura, calculado um coeficiente k individualizado, a partir do qual a relação acima é usada para extrapolar a carbonatação prevista acumular para as idades futuras da peça individualmente. Este uso alternativo será apresentado neste trabalho.

Tuutti embasa seu modelo amplamente em considerações qualitativas. A lista de suposições em que o modelo se embasa inclui que a difusão é o mecanismo preponderante no transporte de agentes corrosivos, que a difusividade de CO_2 no concreto pode ser aproximada pela difusividade de O_2 no mesmo (Figura 1), que não há sinergia entre a carbonatação e o ataque por cloretos ou outros agentes, que a proporção do avanço da frente para a raiz quadrada do tempo fornece uma envoltória superior para a velocidade de carbonatação, além de outras desconsiderações como o teor de adições pozolânicas no concreto, as condições de execução e cura e o estado de fissuração em seu efeito na corrosão. Quase todas estas suposições são comentadas e defendidas por Tuutti em seu trabalho. No entanto, a validade das suposições do modelo veio a ser recorrentemente contestada por estudos posteriores.

Por exemplo, Cafange (2011) cita algumas limitações do modelo, apontando, por exemplo, que o modelo apresenta resultados divergentes com os observados em ensaios sobre estruturas situadas externamente, sem proteção contra as intempéries (Papadakis et al., 1989 apud Cafange, 2011).

A relação por raiz quadrada é, contudo, um limite superior para a penetração da frente de carbonatação, em outras palavras o menor tempo de iniciação possível é obtido quando avaliamos a vida útil da estrutura. Resulta disso que esta teoria pode ser utilizada na maioria dos casos. (Tuutti, 1982, p. 33)

Figura 1 – Coeficiente de difusão de O_2 em função da relação água cimento para cimento Portland comum.



Fonte: Tuutti, 1982.

De fato, o autor declara não pretender formular uma previsão precisa da vida útil das estruturas de concreto armado. Ao invés, propõe fornecer uma alternativa à prática consagrada na época de previsão da vida útil por adivinhações (Tuutti, 1982, p. 144).

No decorrer da fase de propagação, os agentes corrosivos consomem gradualmente a espessura da armadura. A taxa de corrosão da armadura na fase de propagação é modelada por Tuutti em função da umidade relativa na rede porosa do concreto, o que é correlacionado com a composição do concreto e a umidade relativa do ambiente, e a temperatura média de serviço. O trabalho fornece diversos ábacos com relações obtidas experimentalmente para a taxa de corrosão em diversas condições.

No “estado final”, Tuutti explora um aço em que o processo corrosivo já está instaurado. Durante a corrosão, ocorre a deposição de produtos insolúveis nos poros, o que com o tempo vai levando à diminuição da porosidade do concreto e à diminuição da taxa de corrosão, que pode vir a cessar em equilíbrio. Tuutti comenta ainda sobre uma possível realcalização do concreto e reconstituição da camada passivadora do aço, porém declara o processo muito complexo e fora do escopo de modelagem.

Finalmente, Tuutti descreve como a formação e abertura de fissuras e a formação de depósitos de produtos da corrosão na superfície da estrutura devem ser

tomados como “últimos avisos” antes da falha. Com isso, Tuutti disserta sobre a medida da espessura destas fissuras e aparecimento de depósitos como indicativos de uma espessura máxima de corrosão do aço a ser tolerada na fase de propagação, fornecendo ábacos para a correlação destas medidas em diversas condições.

O princípio portanto é de que danos visíveis na superfície do concreto na forma de fissuras ou descoloração indicam que a corrosão na armadura avançou tanto que medidas de reparo são urgentemente necessárias, em outras palavras, que a vida útil de serviço da estrutura pode ser considerada terminada. (Tuutti, 1982, p. 103)

Na prática, Tuutti pretende que se meça a espessura das fissuras nas regiões críticas mais solicitadas da estrutura (centro de vãos de viga, por exemplo) e se use gráficos fornecidos por ele para estimar a profundidade máxima de corrosão da armadura e compará-la com uma perda de seção máxima tolerável.

O tempo decorrido a partir do momento que a primeira fissura se torna visível na região da armadura até que o dano seja severo e a capacidade portante da estrutura seja significativamente reduzida é curto. É presumido que as partes mais carregadas e críticas foram atacadas. O critério para o estado final de corrosão, portanto, consiste na observação de fissuras na região da armadura, correspondentes a espessuras em torno de 0,1 – 0,2 mm. (Tuutti, 1982, p. 95)

A metodologia de previsão da vida útil de Tuutti considera em adição o tempo da fase de iniciação somado ao tempo admissível da fase de propagação. O estado limite da fase de iniciação é o atingimento da profundidade da armadura pela frente de carbonatação. O estado limite da fase de propagação é a observação da abertura de fissuras ou do surgimento de depósitos de produtos de corrosão na superfície da estrutura, correlacionados a uma espessura de corrosão da armadura (perda de seção da armadura) a ser permitido atingir na fase de propagação. A soma do tempo a decorrer nestas fases compõe a vida útil a ser admitida para a estrutura. Vale observar que a descrição da vida útil da estrutura por Tuutti é determinística, não havendo consideração pela confiabilidade das entradas e do resultado.

No futuro que se seguiu à publicação do trabalho, consolidou-se na comunidade um entendimento divergente, em que a previsão da vida útil se deve dar considerando somente o tempo da fase de iniciação (para concreto em situação não

saturada), sendo conservador em relação a Tuutti. Por esse motivo, e para permitir a comparação com o modelo de Possan (2010), será aplicado neste trabalho apenas a fase de iniciação como contributiva para a vida útil da estrutura.

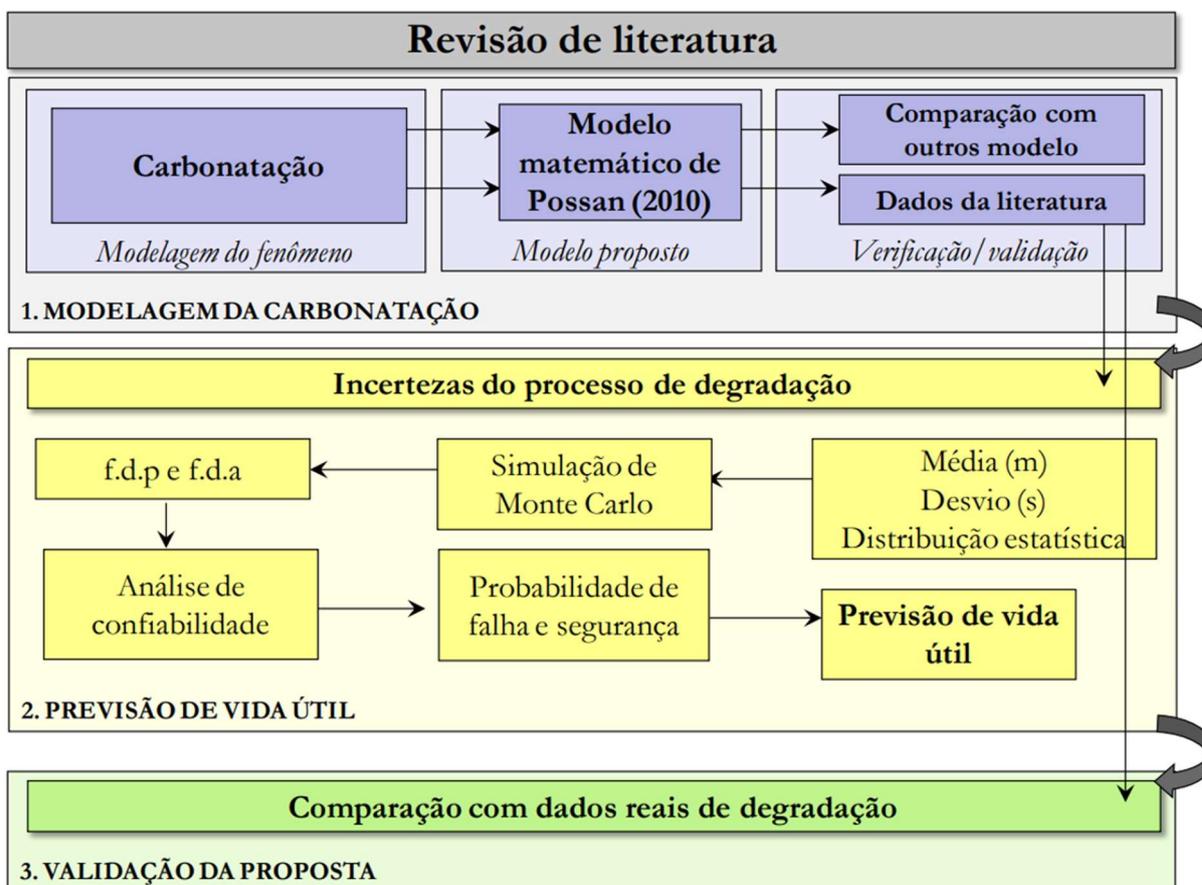
3.7 MÉTODO DE POSSAN (2010)

3.7.1 Modelo de carbonatação

A tese de doutorado de Edna Possan apresentada em 2010 para a UFRGS representou um importante passo para a inovação da pesquisa científica no campo de patologia em concreto. O modelo fez recurso no seu desenvolvimento de um método ainda hoje pouco usado na engenharia acadêmica, qual seja, o de grupos focais. O modelo de Possan destaca-se por requerer dados de obtenção prática sem recurso a laboratórios, por permitir a aplicação tanto com abordagem determinística quanto semiprobabilística e por integrar noções atuais de confiabilidade e desempenho de estruturas, em compasso com a tendência mundial na engenharia.

A elaboração do modelo por Possan (Figura 2) teve por etapas primeiramente o levantamento de um banco de dados referente ao efeito dos fatores intervenientes na carbonatação por meio do método de grupos focais; a produção de um modelo matemático para a carbonatação com base concomitantemente no levantamento anterior e em considerações físico-químicas do processo; a validação do modelo matemático por referência à literatura; a aplicação do modelo matemático com recurso a métodos de análise probabilística visando a determinação da vida útil considerando a variabilidade nos parâmetros do modelo; e, por fim, a validação da metodologia na sua integralidade por meio da comparação dos resultados de vida útil previstos no modelo probabilístico com resultados de outros modelos da literatura. Vale apontar que, ao contrário do trabalho de Tuutti, a validação do método de Possan se deu exclusivamente por comparações dentro da literatura, sem a execução de ensaios autorais em escala.

Figura 2 – Delineamento da pesquisa.



Fonte: Possan, 2010.

Na etapa inicial, o método de grupos focais foi executado em se reunindo um grupo de especialistas na área de carbonatação e se lhes interrogando segundo o Método Delphi, em que um questionário padronizado foi apresentado a todos de maneira coletiva, propondo a produção de dados a partir da discussão interativa entre todos os participantes. Os grupos são formados idealmente com 4 a 12 integrantes, em sintonia com a famosa regra das duas pizzas de Jeff Bezzos, em que grupos devem ter ao máximo um número de pessoas que possa ser servido com duas pizzas. (Hart, 2023). Nesta etapa, foram levantados os efeitos dos fatores intervenientes no processo de carbonatação, os quais compuseram o banco de dados que foi utilizado posteriormente na determinação das constantes de ajuste da modelagem matemática.

Na etapa seguinte, prosseguiu-se à formulação do modelo matemático no que se produziram equações parciais representando a contribuição de cada fator de acordo com as relações físico-químicas conhecidas na literatura. As constantes de ajuste das equações parciais foram determinadas aplicando as equações no banco de dados levantados na primeira etapa com o auxílio da regressão múltipla não-linear.

O modelo é formulado compondo as equações parciais em uma única relação final com todos os fatores apropriados.

Dois fatores (tipo de cimento e condição de exposição), por serem dificilmente descritos em termos probabilísticos, têm seus efeitos considerados como modificadores dos efeitos de outros fatores, por meio de coeficientes, que foram obtidos aplicando as equações parciais, já com as constantes obtidas por regressão, novamente no banco de dados. Estes coeficientes ficam desta forma tabelados para referência posterior em função do tipo de cimento e da condição de exposição (Tabela 1).

As variáveis (resistência do concreto à compressão, teor de adições, teor de CO₂, umidade relativa e profundidade da frente de carbonatação) que foram escolhidas como permitindo representar tanto de forma determinística quanto probabilística ficam na formulação como variáveis típicas (não tabeladas). A equação modelo resultante e a tabela de coeficientes são como seguem (Equação 4 e Tabela 1).

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} * \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} * \exp \left[\left(\frac{k_{ad} * ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} * CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} * (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] * k_{CE} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

k_c = coeficiente referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 1);

k_{fc} = coeficiente referente à resistência à compressão axial do concreto, modificado pelo tipo de cimento utilizado;

t = idade do concreto, em anos;

ad = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = coeficiente referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz –, modificado pelo tipo de cimento utilizado;

UR = umidade relativa média, em %*0,01;

k_{UR} = coeficiente referente à umidade relativa, modificado pelo tipo de cimento utilizado;

CO_2 = teor de CO₂ da atmosfera, em %;

k_{CO_2} = coeficiente referente ao teor de CO₂ do ambiente, modificado pelo tipo de cimento utilizado; e

k_{CE} = coeficiente referente às condições de exposição da estrutura.

Tabela 1: Coeficientes da equação modelo de Possan.

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições ambientais		Condições de exposição da estrutura	
	Cimento	f_c	Adição	CO ₂	UR	Proteção à chuva	k_{ce}
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{CO_2}	k_{UR}		
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300	Ambiente interno	1,30
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300	Protegido da chuva	
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100	Ambiente externo	1,00
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300	Protegido da chuva	
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300	Ambiente externo	0,65
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000	Desprotegido da chuva	
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300		

Fonte: Possan, 2010.

Possan (2010) valida a construção da equação modelo testando os dados obtidos nas entrevistas. A validação do modelo matemático em si ocorre de duas formas: pela análise de sensibilidade dos fatores formulados em comparação qualitativa com a previsão da literatura, e pela comparação quantitativa da modelagem determinística com dados e resultados de outros pesquisadores. Por utilizar conjuntamente da experiência e de pesquisas anteriores de especialistas e dos conhecimentos científicos das leis da natureza que regem os fenômenos estudados, o modelo produzido por Possan pode ser considerado combinado empírico-analítico.

3.7.2 Abordagem determinística para previsão da vida útil

Conforme apresentado, a equação modelo pode ser avaliada em abordagem determinística ou em abordagem probabilística. Na abordagem determinística, as variáveis são descritas por um único valor de entrada cada, considerados representativos do histórico da estrutura em serviço, e a profundidade de carbonatação resultante é um valor único para cada idade, sem informação sobre sua confiabilidade.

O desenvolvimento da abordagem determinística é direto e não requer um exemplo além da sua aplicação direta no estudo de caso apresentado no próximo capítulo.

A abordagem probabilística requer um tratamento diferenciado e é descrita a seguir.

3.7.3 Abordagem probabilística para previsão da vida útil

Prosseguindo com a previsão de vida útil, o modelo matemático é submetido a uma análise probabilística que permite considerar a variabilidade e incerteza das variáveis de entrada. A análise probabilística visa determinar a probabilidade da profundidade de carbonatação ultrapassar o cobrimento da armadura em certa idade, caracterizando a despassivação da mesma, dita situação de falha. O estado limite de serviço que determina a vida útil pode ser caracterizado assim como a idade da estrutura depois da qual a probabilidade de despassivação da armadura ultrapassa um valor admissível.

A abordagem probabilística consiste em manter algumas variáveis em descrição determinística (tipo de cimento, condição de exposição e teor de adições), enquanto outras são permitidas variar de acordo com uma distribuição (resistência à compressão, teor de CO₂ e umidade relativa), restando o tempo como variável independente.

Nas abordagens probabilísticas de fenômenos de degradação, costuma-se representar a situação de falha por meio de uma função de estado-limite $g(t)$, para a qual, para cada idade da estrutura, valores positivos indicam a segurança e valores negativos indicam a falha (Equação 5). No caso da carbonatação, a função de estado-limite característica é a que segue abaixo (Equação 6).

$$g(t) \mid \begin{cases} < 0, \text{ caso em falha} \\ \geq 0, \text{ caso em segurança} \end{cases} \quad \text{Equação 5}$$

$$g(t) = c - y(t) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

c = profundidade do cobrimento da armadura no concreto (mm); e

$y(t)$ = profundidade da frente de carbonatação ao longo do tempo (mm).

O cobrimento c pode ser avaliado também em termos probabilísticos.

Ao final, obtém-se uma distribuição de probabilidade de possíveis vidas úteis para a estrutura. Os procedimentos para se obter esta distribuição serão discutidos à parte no próximo item.

Procede-se então com a análise de confiabilidade. A análise de confiabilidade busca dar razão para a escolha de uma vida útil de projeto em função da confiança que se tem de que esta vida útil escolhida será atingida. A abordagem probabilística anterior poderia ser incluída neste esforço, sem prejuízo ao conceito. Para isso, considerações foram feitas por especialistas para determinar qual a confiabilidade desejada para a estimativa de durabilidade das estruturas (*fib*, 2010).

A confiabilidade de um resultado costuma ser descrito pelo Índice de Confiabilidade β associado. O índice de confiabilidade, em termos simples, é a distância absoluta entre a média de uma distribuição normal e o valor correspondente à fronteira de falha ($g(t) = 0$), em quantidades de desvio padrão (Equação 7). O índice de confiabilidade é apresentado na Tabela 2 abaixo.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = -\left(\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Φ = função de probabilidade acumulada normal padrão.

P_f = probabilidade de falha;

μ_g = média da função de estado-limite; e

σ_g = desvio padrão da função de estado-limite.

Tabela 2: Probabilidade de falha Pf versus índice de confiabilidade β .

Índice de Confiabilidade, β	Probabilidade de falha, Pf%	N° de defeitos por milhão
0,00	0,50	500000
0,25	0,40	401294
0,50	0,31	308538
1,00	0,16	158655
1,50	0,067	66807
2,00	0,023	22750
3,00	0,0013	1350
4,00	0,000032	32
4,50	0,0000034	3
5,00	0,00000029	0,3

Fonte: autoria própria.

Algumas aplicações exigem avaliar probabilidades de falha muito pequenas. O Método Seis Sigma consagrado na engenharia de qualidade busca controlar o desempenho de processos a fim de garantir a produção sem rejeições dentro de uma amplitude de 6 desvios padrão para mais e para menos do valor alvo de uma variável de controle, também dito limite central de especificação (Equação 8). Suponha que um processo tem uma variabilidade intrínseca inevitável. À medida que o processo foge do controle, a média realizada para a variável de controle se desloca do limite central, ocasionando o aumento da probabilidade de itens produzidos abaixo do limite inferior de especificação e acima do limite superior de especificação (Figura 3).

$$LIE = LCE - 6 * \sigma$$

Equação 8

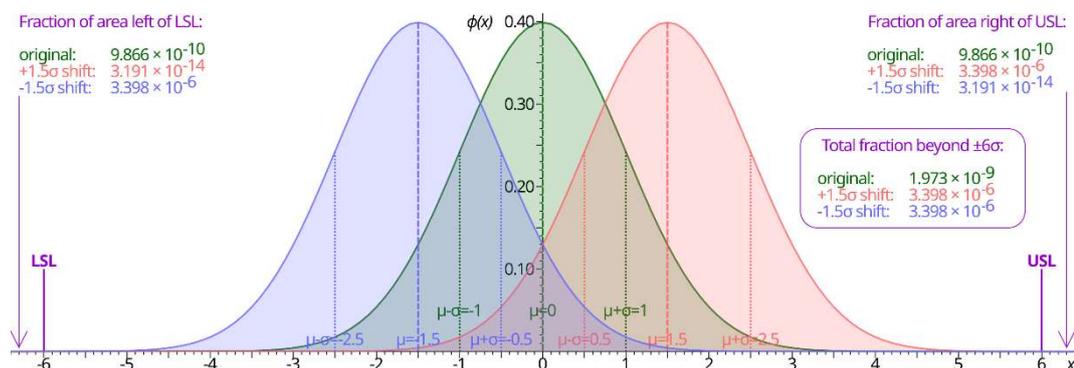
Onde:

LIE = limite inferior de especificação;

LCE = limite central de especificação; e

σ = desvio padrão do processo.

Figura 3 – A distribuição normal subjaz as premissas estatísticas do Método Seis Sigma.



Fonte: Saporito et al., 2023.

A probabilidade de um item ser produzido abaixo do limite de especificação é a inversa da função acumulada de probabilidade para o valor limite, para a média e desvio padrão do processo. Supondo uma distribuição normal para a variabilidade do processo, não é difícil de encontrar que um deslocamento acima de 1,5 desvios padrão na média realizada do processo para abaixo do limite central traz a probabilidade de produção de itens abaixo do limite inferior logo acima de uma parte por milhão. Isso equivale a uma probabilidade de falha de 0,0000034, ou um índice de confiabilidade de 4,5.

Portanto, o Método Seis Sigma garante não ocorrer defeitos em um milhão de unidades produzidas por um processo controlado com uma margem de 1,5 desvios padrão de deslocamento do limite central de especificação com um índice de confiabilidade de 4,5. Neste caso se justifica o uso do índice para descrever a probabilidade de falha.

Na engenharia civil, a confiabilidade requerida para sistemas estruturais é da mesma ordem. O Model Code 2010 (*fib*, 2010) fornece uma tabela com índices de confiabilidade recomendados para o atingimento dos Estados Limites de Durabilidade e Estados Limites Últimos de estruturas (Tabela 3).

Tabela 3: Índices de confiabilidade β alvo recomendados para projeto de estruturas, com relação aos períodos de referência especificados.

Limit states	Target reliability index β	Reference period
Serviceability		
reversible	0.0	Service Life
irreversible	1.5	50 years
irreversible	3.0	1 year
Ultimate		
low consequence of failure	3.1	50 years
	4.1	1 year
medium consequence of failure	3.8	50 years
	4.7	1 year
high consequence of failure	4.3	50 years
	5.1	1 year

Fonte: *fib*, 2010.

O índice de confiabilidade adotado pela autora para determinação da vida útil prevista é $\beta = 0,84$, correspondente a uma probabilidade de falha de 20%, segundo referência da ISO 13823 (2008). Mais comentários sobre confiabilidade podem ser encontrados em sua tese (Possan, 2010).

3.7.4 Método de Monte Carlo

No item anterior, comentamos sobre a necessidade de avaliar uma equação em que algumas de suas variáveis são permitidas variar de acordo com uma distribuição. Idealmente, quando a prioridade é avaliarmos a variabilidade dos parâmetros de um modelo, deve-se proceder com um plano de investigação experimental das variáveis pertinentes a fim de assertar com precisão a variabilidade da situação real.

No entanto, várias situações impedem isso. Por exemplo, quando se quer avaliar de forma expedita a vida útil restante de uma edificação e não se dispõe de recursos para realizar um plano extenso de investigação, ou quando em situação de projeto não há edificação concreta que se investigar, ou quando a intenção é avaliar em si o modelo desenvolvido, seja para estudar a validade das premissas do modelo ou para comparar com outros modelos propostos.

Neste ensejo, surge a importância dos métodos de simulação. Uma simulação consiste na geração de um espaço amostral fictício que se confia representar

adequadamente a variabilidade de um parâmetro real, isto é, um espaço amostral que se espera seria semelhante ao encontrado caso os ensaios fossem feitos.

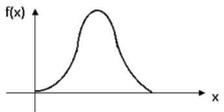
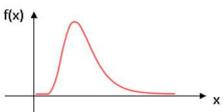
Método de Monte Carlo é algo difícil de definir. Textos introdutórios no assunto tratam o termo como um grande grupo de esforços de resolver problemas em sistemas estocásticos com o uso de números aleatórios (Kalos e Whitlock, 2008). Sistemas estocásticos são aqueles cuja sequência de estados é subordinada a eventos aleatórios. Uma breve exploração de como o termo é usado em diferentes bibliografias mostra a abrangência do método.

Possan (2010) nos apresenta uma equação modeladora do avanço y da frente de carbonatação. Algumas das variáveis são representadas considerando sua variabilidade, isto é, são tratadas como variáveis aleatórias. Isso é feito por se encontrando uma função de distribuição de probabilidade (f.d.p) que represente a variabilidade da variável.

Primeiro, é necessário encontrar a forma de distribuição mais adequada (Figura 4). Na tese, a autora fez isso consultando a literatura e validando as propostas lá encontradas na medida de sua aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov com bases de dados de experimentos. Encontrou-se para cada variável aleatória a seguinte correspondência (Possan, 2010):

- Resistência à compressão: distribuição normal;
- Teor de CO₂: distribuição normal;
- Umidade Relativa: distribuição normal; e
- Cobrimento: distribuição lognormal.

Figura 4 – Funções de densidade de probabilidade típicas em análise estatística.

Distribuição	Função densidade de probabilidade	Representação gráfica	Parâmetros	Intervalos
Normal ou Gaussiana	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$		μ, σ	$-\infty < x < +\infty$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{\alpha x \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right]}$		μ, σ	$-\infty < x < +\infty$ $x > 0, \sigma > 0$

Fonte: Possan, 2010.

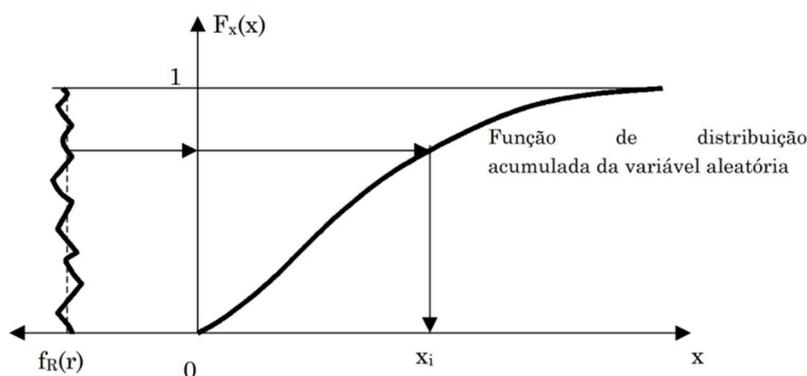
A lei de distribuição de cada variável solicita a média e o desvio padrão que se espera observar para a variável na situação de estudo. Valores típicos de média e desvio padrão para cada variável foram obtidas pela autora por consulta à literatura. Eles também podem ser obtidos com um programa reduzido de ensaios.

A função de probabilidade acumulada (f.p.a) de cada variável é obtida por se integrando a f.d.p em seu domínio. As funções tradicionais representadas na tabela acima estão convenientemente registradas na maioria dos *softwares* estatísticos, não havendo empecilho para se trabalhar com elas.

A geração do espaço amostral fictício se procede por se gerando uma lista de números aleatórios n uniformemente distribuídos entre 0 e 1. Em aplicação, isto pode ser feito no Excel pelo uso da função =RAND(). Há dúvidas quando à qualidade do gerador de números randômicos aplicado pelo Excel, em especial para aplicações sensíveis como criptografia, mas sem dúvidas não há prejuízo para os níveis de confiabilidade exigidos aqui. O algoritmo usado na geração de números aleatórios no Excel é uma variante do algoritmo de Mersenne Twister, o mesmo algoritmo usado no *software* comercial (*ModelRisk*) que será apresentado no próximo capítulo, o qual foi empregado para validar os resultados da planilha em Excel elaborada para este trabalho.

A geração de amostras fictícias consiste em aplicar cada número aleatório n_i na inversa da f.p.a que rege a variável, obtendo-se um valor X_i para a variável. Este procedimento garante que, para uma quantidade suficientemente grande de valores X simulados, a frequência do espaço amostral convirja para a função de distribuição de probabilidade. Este processo se chama de transformação inversa (Figura 5).

Figura 5 – Método de transformação inversa para a geração das variáveis aleatórias.



Fonte: Melchers, 1987 apud Andrade, 2001.

O valor simulado X_i pode então ser aplicado diretamente na equação modelo, resultando em um valor y_i correspondente para a variável dependente. Ao final de muitas simulações, é gerado uma distribuição discreta de valores y . O histograma de frequências de valores y é equivalente à f.d.p do resultado para um domínio discreto com um número suficientemente grande de simulações. Este histograma pode ser acumulado para gerar a f.p.a discreta correspondente. A f.p.a do resultado pode ser avaliada para encontrar o valor y que representa a condição de falha de acordo com um índice de confiabilidade estipulado.

Nas aplicações em modelos de avanço de degradação, resta ainda a variável independente tempo. Duas maneiras de lidar com esta variável são apresentadas alguns parágrafos adiante.

No caso de um modelo que emprega diversas variáveis, o que se simula são vetores \dot{X} de valores para as variáveis de entrada. Cada componente do vetor é simulado usando um valor aleatório n independente. Isso implica que para uma quantidade de simulações $\#X$ e uma quantidade de variáveis $\#X$, será necessária uma quantidade de números aleatórios $\#n$ gerados por =RAND() igual a $\#X * \#X$.

No Excel em inglês, a geração de números aleatórios n_i e a transformação inversa para se obter um valor simulado X_i de uma variável com distribuição normal de média μ e desvio padrão σ é realizada pela função =NORM.INV(RAND() ; μ ; σ).

No caso de uma distribuição lognormal de uma variável com média μ e desvio padrão σ , como será aplicado no estudo de caso para o cobrimento, temos que fazer a conversão indicada nas Equações 9 e 10 abaixo e usar a função

=LOGNORM.INV(RAND(); μ^* ; σ^*).

$$\mu^* = \ln\left(\frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}}\right) \quad \text{Equação 9}$$

$$\sigma^* = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)} \quad \text{Equação 10}$$

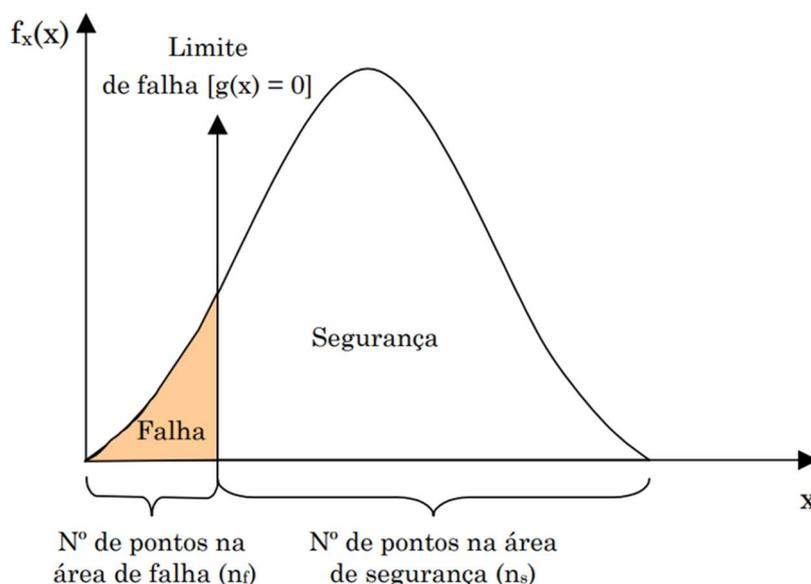
Ao contrário de outros *softwares* de mercado, o Excel não permite a fixação de sementes para a geração de seus números aleatórios, apesar de se basear em um método em que esta é uma das principais vantagens. A alternativa para fixar uma semente é usar programação em Visual Basic ou outras extensões no Excel, ou a

criatividade. Caso seja de interesse rastrear a geração de números aleatórios para se preservar a reprodutibilidade do modelo, recomenda-se primeiro gerar a lista de números aleatórios e fixá-la por se copiando e colando como valor texto no Excel, para depois chamar cada valor em referência matricial na função acima.

Implementações do método de Monte Carlo encontradas em outros trabalhos expressam o resultado do método não pelo histograma de frequências de \mathbf{y}_d (f.d.p discreta de \mathbf{y}), mas na medida de uma probabilidade \mathbf{P}_f de falha. Esta probabilidade é obtida a partir da relação entre a quantidade de simulações fora da faixa de segurança ($\mathbf{g}(\mathbf{x}) < 0$) e a quantidade total de simulações.

Em soluções automatizadas deste processo, o valor de \mathbf{P}_f é obtido com recurso a uma função indicadora $\mathbf{I}(\mathbf{y})$, que modula a condição de segurança em um sinal 1 (falha) ou 0 (segurança), permitindo a contagem automatizada das simulações fora da segurança pela comparação, uma a uma, das simulações com a condição de segurança. Dessa forma, a entrega final do método é a probabilidade \mathbf{P}_f de falha (Figura 6).

Figura 6 – Representação gráfica dos estados de falha e segurança.



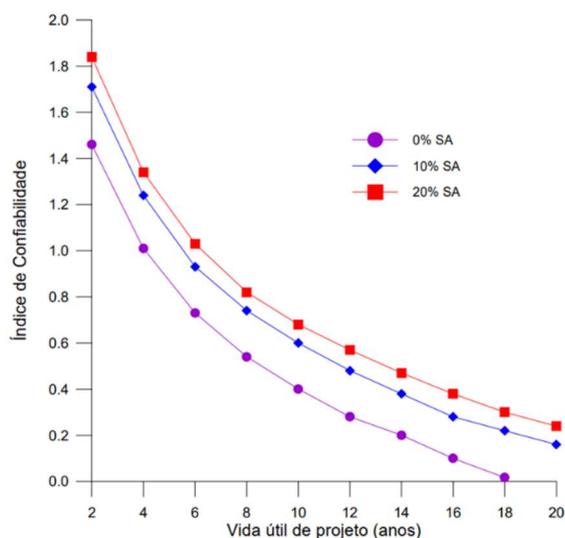
Fonte: Andrade, 2001.

No caso da degradação do concreto, há duas maneiras de lidar com a variável independente tempo. Andrade (2001) estuda o acúmulo de cloretos na solução porosa do concreto, em um modelo onde $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ é a concentração de cloretos na profundidade da armadura e o estado-limite é o atingimento de uma concentração crítica que

ocasiona a despassivação. Andrade (2001) avalia t em níveis (por exemplo, em passos de 2 anos), milhares de simulações são feitas para cada nível, entregando valores de y que podem ser comparados com a função estado-limite, a função indicadora $I(y)$ é aplicada em cada simulação de um nível e a probabilidade de falha é calculada para cada nível.

O gráfico da função de probabilidade de falha acumulada versus idade é gerado então de forma discreta pela avaliação da probabilidade de falha em níveis de tempo, dispensando a geração de um histograma de densidade de probabilidade para y . Lembre-se que a probabilidade de falha pode ser representada bijetivamente pelo índice de confiabilidade (Figura 7). A vida útil de final de análise é então obtida observando um índice de confiabilidade mínimo tolerável.

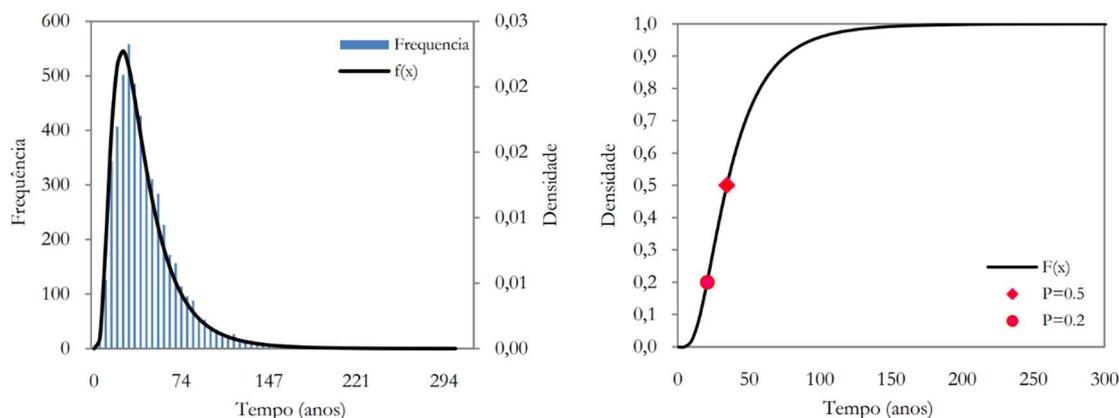
Figura 7 – Efeito da adição de sílica ativa (SA) no índice de confiabilidade para o cimento CP IV ARI.



Fonte: Andrade, 2001.

A implementação do método de Monte Carlo por Possan (2010) usa uma abordagem diferente. Neste caso, a função estado-limite (Equação 6) é inserida dentro da equação modelo (Equação 4) em se fazendo y igual ao cobrimento, e os fatores são rearranjados de forma que calculamos para cada simulação a idade t_d em que a frente de carbonatação se iguala ao cobrimento. Isto gera um histograma de frequência de idades t_d , que pode ser acumulado para a função de probabilidade acumulada, de onde se aplica o índice de confiabilidade mínimo tolerável para obter finalmente a vida útil de final de análise (Figura 8).

Figura 8 – Histograma de frequências de vida útil e f.p.a associada para um exemplo.



Fonte: Possan, 2010.

O método de Monte Carlo possui limitações. As duas principais limitações dizem respeito ao tempo de processamento, que se torna excessivamente custoso para modelos complexos à medida que se aumenta o número de simulações, e a variabilidade do resultado. Diversos ajustes são propostos ao método a fim de diminuir a variabilidade do resultado (Kalos e Whitlock, 2008).

Em nota, Andrade (2001) comenta que distorções podem ocorrer no resultado caso coeficientes de variabilidade excessivamente grandes sejam escolhidos para as variáveis de entrada. Andrade aponta que isso na maioria dos casos ocasiona o aumento tanto da média quanto do coeficiente de variabilidade da vida útil em final de análise. O efeito de se aumentar a variabilidade do resultado em Monte Carlo, no entanto, em muito ultrapassa o ganho na média, sendo fortemente desaconselhado abusar desta relação.

Um último detalhe. Por vezes, a geração de valores amostrais fictícios nos entrega valores fora do domínio natural da variável. Por exemplo, valores negativos de resistência à compressão ou umidades relativas acima de 100%. *Softwares* comerciais normalmente têm a opção de limitar o alcance das simulações, mas não há essa opção no Excel. Isso pode ser remediado fazendo uso da Distribuição Truncada. Em aplicação, isso equivale a usar a fórmula a seguir em notação em inglês.

```
=NORMINV( NORMDIST( MinX ; Mean ; StDev ; TRUE )  
+ RAND() * (NORMDIST( MaxX ; Mean ; StDev ; TRUE )  
- NORMDIST( MinX ; Mean ; StDev ; TRUE )) ;  
Mean ; StDev )
```

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Daqui em diante, será apresentada a aplicação dos métodos e conceitos estudados. Num primeiro momento, o esforço será para obter os dados necessários para a aplicação dos métodos. O estudo de caso tem base em um estudo real em uma edificação de Porto Alegre. Por isso, pouca informação poderá ser transcrita aqui em função da confidencialidade dos relatórios. Outros dados que precisaram ser estimados terão sua obtenção devidamente registrada.

Estando os dados em mãos, procede-se à aplicação efetiva dos métodos individualmente. O método de Tuutti é de aplicação simples e não requererá mais explicações. O método de Possan em abordagem determinística também é trivial e será de aplicação direta. A abordagem probabilística é um pouco mais complicada e terá uma descrição detalhada do seu desenvolvimento. O objetivo é que o leitor possa replicar a aplicação dos métodos com referência somente a este trabalho se assim o desejar.

Por fim, as previsões de vida útil de cada método serão apresentadas em comparativo sinteticamente para posteriormente os resultados serem discutidos. Em caráter adicional, optou-se por registrar também a aplicação da planilha produzida neste trabalho em um exemplo apresentado na tese de Possan (2010) a fim de avaliar a validade dos resultados produzidos pela planilha.

4.1 PROPOSTA DE ESTUDO DE CASO

Este trabalho propõe estimar a vida útil restante de uma construção existente com base nos métodos de Tuutti (1982) e de Possan (2010). A construção em estudo situa-se na cidade de Porto Alegre, próximo ao centro histórico e à margem do Guaíba. Ela foi construída em 1973 e tem estrutura em concreto armado. Do que se dispõe de informações, sabe-se que a resistência característica à compressão no projeto é de 12 MPa e a espessura prescrita para o cobrimento é de 30 mm, mais conservadora que a prescrição de 20 mm da NB-1 – Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado (ABNT, 1960) então em vigor.

Os componentes estruturais ensaiados incluem pilares externos, que se sabem desprotegidos às intempéries. O estudo ainda discrimina as peças em relação à sua orientação solar, havendo peças orientadas para o Oeste (em direção ao Guaíba),

para o Norte e para o Leste. Os métodos de obtenção do cobrimento e da profundidade de carbonatação incluem o uso do paquímetro e do indicador fenolftaleína.

No entanto, infelizmente a quantidade de amostras é reduzida (há no total 18 entradas para o cobrimento e 103 para a profundidade de carbonatação, distribuídos em 4 grupos de peças) e avaliar os métodos para as peças individualmente geraria uma variabilidade que condenaria o esforço preditivo. Por esta razão, foi decidido para fins deste trabalho acumular todas as amostras em um único componente estrutural fictício que se pretende representativo do sistema estrutural como um todo e que servirá para a exposição da aplicação dos métodos estudados.

4.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E ESPESSURA DE COBRIMENTO

A profundidade atual de carbonatação das estruturas estudadas foi medida diretamente nas estruturas para comparar a previsão do método de Possan (2010) com o que se verifica de fato. A obtenção deste dado se deu por medição direta com o uso de um indicador de acidez.

A espessura de cobrimento foi obtida por medição direta com paquímetro na oportunidade da abertura de uma janela de inspeção feita nos pilares durante a medição da profundidade de carbonatação.

As espessuras de cobrimento encontradas para as peças estudadas são como segue (Tabela 4). Os valores são condizentes com a prescrição da então vigente NB-1 (ABNT, 1960), sendo 20 mm para vigas ao ar livre, de fato bastante inferiores à prescrição atual.

Tabela 4: Espessura de cobrimento medida *in loco*.

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

Fonte: autoria própria.

O ensaio para se obter a profundidade de carbonatação consiste em perfurar uma abertura pela qual se pode aspergir o indicador de acidez fenolftaleína. Primeiramente, com o uso de uma furadeira de alta potência foi feito um furo guia de

pequeno diâmetro para balizar o posicionamento da serra copo. A posição do furo foi escolhida de forma a evitar atingir a armadura ou estribos e não ultrapassar a provável altura da linha neutra da viga, minimizando o prejuízo à capacidade portante da estrutura durante o ensaio.

Em seguida, foi encaixado um pino guia e a serra copo na furadeira e feito o corte inicial do cilindro até uma pequena profundidade, centralizado no furo guia. O pino guia da furadeira foi retirado e o restante da furação com a serra copo foi executado, até a profundidade da armadura. O miolo de concreto que permaneceu no furo foi retirado com o auxílio de um formão e martelo e a superfície interna do cilindro exposto foi limpa para facilitar a visualização do indicador.

A solução de fenolftaleína foi preparada na relação 1:49:50 (fenolftaleína, álcool e água, respectivamente). O indicador de acidez foi aspergido no interior do cilindro exposto. A viragem do indicador para a cor rosa, indicando a camada básica de concreto não carbonatado, é quase imediata. A medição da profundidade de carbonatação foi feita com o auxílio do paquímetro e a leitura foi registrada.

Após a medição, o furo foi preenchido com graute estrutural devidamente preparado, a fim de evitar comprometer a capacidade estrutural da viga e de proteger a armadura da corrosão, sem gerar diferenciais internos de potencial significativos. Os resultados são como seguem (Tabela 5). Vale apontar que algumas instâncias de medição de profundidade de carbonatação mostraram o atingimento da armadura pela frente carbonatada, sugerindo possivelmente o término da vida útil do sistema estrutural.

Tabela 5: Profundidade de carbonatação medida em ensaio.

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

Fonte: autoria própria.

4.3 CONDIÇÃO DE EXPOSIÇÃO

A condição de exposição da estrutura é crucial para o desenvolvimento da carbonatação. De fato, em regra os códigos de construção prescrevem os critérios de desempenho como função dependente da condição de exposição. O Eurocode EN

206 (CEN 2013, apud *fib*, 2010) determina para a carbonatação 4 classes de exposição, SC1 seco ou permanentemente molhado, XC2 molhado ou raramente seco, XC3 moderadamente úmido, XC4 ciclos de molhagem e secagem. As normas brasileiras encerram as ações ambientais no tocante à degradação simplesmente em uma classificação de agressividade ambiental geral, sendo 4 classes (I, II, III e IV) correspondentes a agressividades fraca, moderada, forte ou muito forte, não havendo distinção adicional quanto à exposição às intempéries para estruturas.

Como dito, a condição de exposição de todas as estruturas ensaiadas é externa desprotegida das intempéries, sendo o caso em que ocorre menor carbonatação. Um estudo mais aprofundado talvez verificasse influência da orientação solar e da orientação com relação ao lago. Porém, nenhuma destas orientações são apreciadas pelos modelos estudados e esta descrição basta.

4.4 TIPO DE CIMENTO

O tipo de cimento usado na construção estudada é informação que não se encontra em registro formal. Em se considerando a época em que o edifício foi erigido, pode-se supor que o concreto teria sido produzido em obra com betoneira ou manualmente, virado com enxada e dosado a balde, técnicas que eram permitidas pela então vigente NB-1 (ABNT, 1960) para obras de pequena importância e quando permitido pela Fiscalização (supõe-se as secretarias municipais de obras ou afins), sendo os insumos comprados à varejo nas casas de construção.

Em meados dos anos 70, em Porto Alegre imperavam nos mercados os cimentos produzidos pela fábrica da Votorantim em Esteio. O cimento produzido até então era na sua grande maioria um cimento Portland comum sem adições. Para fim de aplicação dos métodos de estimativa de vida útil deste trabalho, precisamos associar o tipo de cimento a uma das classificações atuais prescritas na NBR 16697 (2018). O cimento mais semelhante hoje tipificado é o CP I. Isso vai de encontro com a relação apresentada pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento em relatório de 2013 (Tabela 6), no qual se apresenta a fração que cada tipo de cimento representava na produção total do país para cada ano, em que os cimentos daquela época foram apropriadamente enquadrados como CP I.

Tabela 6: Produção anual nacional de cimento por tipologia.

Tipo de cimento	Ano										
	1960	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
CPI	95,5	89,7	80,8	73,2	75,0	2,9	1,2	2,0	0,2	0,2	0,1
CPII	-	-	-	-	-	74,1	79,7	65,0	66,5	63,1	61,1
CPIII	3,8	7,6	11,4	10,1	12,3	10,9	6,5	17,5	14,4	15,2	15,4
CPIV	-	2,1	7,5	16,2	12,5	9,4	5,8	6,6	11,6	13,4	14,8
CPV	-	-	-	-	0,02	2,6	6,7	5,3	7,3	8,1	8,6
Branco	-	-	-	-	0,17	0,12	0,05	0,2	-	-	-

Fonte: SNIC, 2013.

4.5 TEOR DE ADIÇÃO

Pelo mesmo raciocínio apresentado anteriormente, em se tratando de cimento CP I, pode-se supor com razão que não há adições pozolânicas nos concretos. De fato, a construção ocorreu pouco depois de quando pela primeira vez produziu-se um cimento pozolânico em 1969, com cinzas volantes da termelétrica de Charqueadas, sendo improvável que se tenha usado adições pozolânicas então. Uma publicação da IBRACON na revista Concreto Edição 73 de 2014 (Tabela 7) apresenta um quadro com a evolução da normatização dos cimentos no Brasil e aponta os cimentos da época como carentes de adições pozolânicas.

Tabela 7: Evolução da normatização dos cimentos Portland comum e composto no Brasil.

	Ano	Tipo de cimento	Classe	Quantidade de adições na produção	Unidade	Resistência mínima		
						3 dias	7 dias	28 dias
Cimento Portland comum	1937	CP	250	0	(kgf/cm ²)	80	150	250
			250	0	(kgf/cm ²)	80	150	250
	1973	CP	320	0	(kgf/cm ²)	100	200	320
			400	0	(kgf/cm ²)	140	240	400
			250	10% escória	(kgf/cm ²)	80	150	250
	1977	CP	320	10% escória	(kgf/cm ²)	100	200	320
			400	0	(kgf/cm ²)	140	240	400
			250	10% escória	(kgf/cm ²)	80	150	250
	1988	CPS CPE CPZ	25, 32 e 40 para cada tipo	5% material carbonático 10% escória 10% material pozolânico	MPa	Mantidos os limites de 1977, em MPa		
			25	0	MPa	8	15	25
32 40			0	MPa	10 15	20 25	32 40	
1991	CPI	25	0	MPa	8	15	25	
		32	0	MPa	10	20	32	
		40	0	MPa	15	25	40	
		25	5% escória ou 5% material pozolânico ou 5% material carbonático	MPa	8	15	25	
Cimento Portland composto	1991	CP II-E	25	6% a 34% escória e até 10% material carbonático	MPa	8	15	25
			32	6% a 34% escória e até 10% material carbonático	MPa	10	20	32
			40	6% a 34% escória e até 10% material carbonático	MPa	15	25	40
	1991	CP II-Z	25	6% a 14% material pozolânico e até 10% material carbonático	MPa	8	15	25
			32	6% a 14% material pozolânico e até 10% material carbonático	MPa	10	20	32
			40	6% a 14% material pozolânico e até 10% material carbonático	MPa	15	25	40
1991	CP II-F	25	6% a 10% material carbonático	MPa	8	15	25	
		32	6% a 10% material carbonático	MPa	10	20	32	
		40	6% a 10% material carbonático	MPa	15	25	40	

Fonte: IBRACON, 2014.

4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão de projeto é informada como sendo igual a 12 MPa. Em se considerando a época que a obra foi construída, é improvável que houvesse então um controle de qualidade sofisticado da produção *in loco* de concreto. Considerando também que a NBR 12655 (ABNT, 2015) recomenda desvios padrão em função da classe de resistência do concreto (Tabela 8), sendo a condição C de preparo do concreto correspondente a resistências entre 10 e 15 MPa, optou-se pela adoção de um desvio padrão de 7,0.

Tabela 8: Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão MPa
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: ABNT, 2015.

Tabela 9: Resistência à compressão das peças estudadas.

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

Fonte: autoria própria.

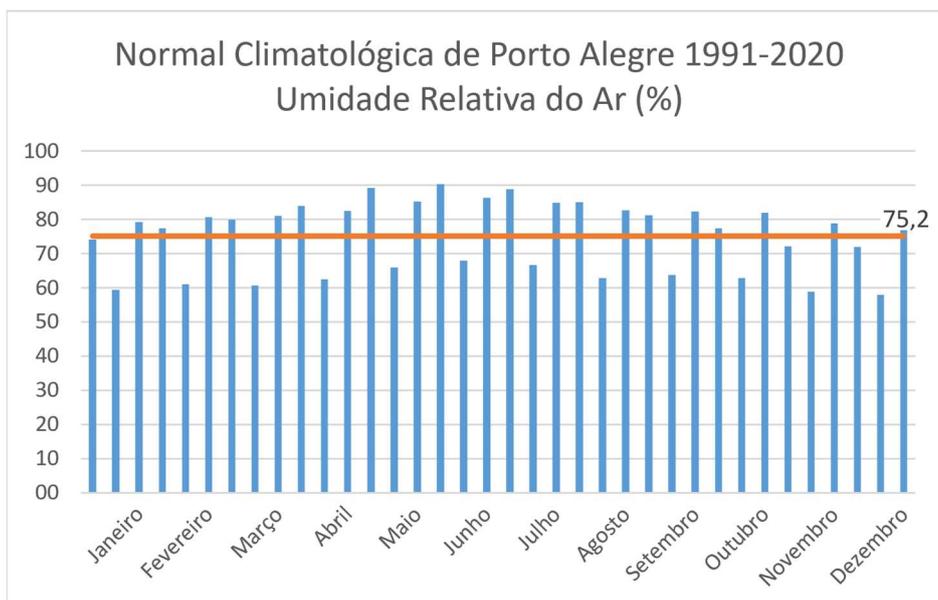
4.7 UMIDADE RELATIVA

Um estudo aprofundado que solicitasse grande confiabilidade nos dados de entrada incluiria um programa de medições de umidade relativa idealmente ao longo de um ano todo imediatamente na superfície da peça estudada, de forma a caracterizar precisamente o microclima que age sobre a peça no local em que se estuda a carbonatação.

Não compete a este trabalho, no entanto, arrogar este nível de precisão para os dados. Como foi dito, a prioridade é a exposição da aplicação dos métodos e o fundamento por trás deles. Posto isso, optou-se por considerar a umidade relativa

para fins de aplicação do método de Possan (2010) de acordo com os dados registrados na Normal Climatológica de 1990 à 2020 para a cidade de Porto Alegre (Figura 9), fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia, resultando nos valores abaixo (Tabela 10).

Figura 9 – Normal climatológica de Porto Alegre 1991-2020 da umidade relativa do ar.



Fonte: INMET.

Tabela 10: Umidade relativa.

Umidade Relativa (%)	
Média	75,2
Desvio Padrão	9,82

Fonte: autoria própria.

4.8 TEOR DE CO₂

O teor de CO₂ não consta nas anotações de ensaio. Stoco (2022) analisou dados coletados durante o ano de 2019 em uma estação meteorológica no centro de São Paulo, encontrando uma média em torno de 420 partes por milhão de gás carbônico atmosférico com desvio padrão de 21,81 partes por milhão. O autor cita outros trabalhos em grandes cidades que obtiveram resultados semelhantes.

Tabela 11: Teor de CO₂

Teor de CO ₂ (%)	
Média	0,042
Desvio Padrão	0,0022

Fonte: autoria própria.

4.9 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TUUTTI (1982)

O método de Tuutti (1982) para a previsão da vida útil de uma estrutura de concreto armado usa um modelo de carbonatação em que o avanço da frente de carbonatação se dá em razão da raiz quadrada do tempo, acertado por um coeficiente empírico. Como dito anteriormente na exposição do modelo, convém a este trabalho considerar apenas a fase de iniciação como contributiva para a vida útil da peça. Portanto, a aplicação do método se resume em encontrar o valor do coeficiente que ajusta o modelo de Tuutti à realidade da estrutura estudada.

As profundidades de carbonatação medidas em campo foram mencionadas anteriormente. Considerando que a edificação estudada foi construída em 1973, ela tem hoje 51 anos. Revertendo a equação acima para estes valores, encontramos o coeficiente de carbonatação para o sistema estrutural. Aplicando a equação de Tuutti novamente com o coeficiente apropriado e fazendo a profundidade de carbonatação igual à espessura do cobrimento, encontramos a vida útil prevista para o sistema estrutural. Os resultados estão na Tabela 12 abaixo. Os valores utilizados foram as médias, representativas na abordagem determinística.

Tabela 12: Vida útil prevista pelo método de Tuutti.

	Profundidade de carbonatação medida <i>in loco</i> (mm)	Idade atual (anos)	Coeficiente de carbonatação	Cobrimento (mm)	Vida útil prevista (anos)
Sist. Estrutural	21,73	51	3,04	31,29	106

Fonte: autoria própria.

4.10 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE POSSAN (2010)

O método de Possan (2010) para a previsão da vida útil de uma estrutura de concreto armado consiste na aplicação de uma equação modelo para o avanço da frente de carbonatação na estrutura em que algumas variáveis são fixadas em níveis tabelados (tipo de cimento e condição de exposição) e as outras variáveis são permitidas representar de forma determinística ou probabilística (teor de adições, resistência à compressão, umidade relativa, teor de CO₂ e profundidade de carbonatação).

O método pode ser aplicado de forma determinística, atingindo uma previsão de vida útil sem consideração pela confiabilidade das entradas, ou de forma probabilística, incluindo em apreciação a confiabilidade dos dados de entrada.

No caso determinístico, as variáveis são descritas por uma única entrada, e a equação retorna um valor exato para a profundidade de carbonatação em determinada idade que pode ser comparado diretamente com a espessura de cobrimento. Neste caso, a vida útil prevista é a idade exata em que a profundidade de carbonatação ultrapassa a espessura do cobrimento.

No caso probabilístico, as variáveis são descritas por duas entradas (média e desvio padrão), e a equação deve ser aplicada diversas vezes em um espaço amostral para gerar uma função de densidade de probabilidade de ocorrência de falha em função da idade. Para isso, deve-se recorrer a um método de análise probabilística como o método de Monte Carlo para geração do espaço amostral.

No método de Monte Carlo, um grande número de combinações de possíveis entradas para as variáveis são geradas em conformidade com a variabilidade de cada variável. Estas combinações são alimentadas na equação modelo para calcular a profundidade de carbonatação associada a cada combinação. Isso nos leva à possibilidade que cada profundidade de carbonatação tem de ser atingida. A possibilidade de ocorrência da falha pode ser aproximada então pela proporção de combinações geradas que satisfaz a condição de falha em relação ao número total de combinações testadas. Quanto maior o número de simulações, maior a precisão desta estimativa.

Neste caso, a vida útil prevista é a idade para a qual a probabilidade que a profundidade de carbonatação ultrapasse a espessura de cobrimento excede um valor máximo tolerável.

Os dados de entrada para o método são:

- Tipo de cimento
- Condição de exposição
- Teor de adições
- Teor de CO₂
- Umidade Relativa
- Resistência à compressão
- Cobrimento

4.10.1 Abordagem determinística

Resumindo os dados de entrada apresentados nas últimas seções, temos o que segue na Tabela 13.

Tabela 13: Resumo dos dados de entrada para abordagem determinística.

Sistema Estrutural	
Tipo de cimento	CP I
Teor de adição	Não há
Condição de exposição	Externo desprotegido
Teor de CO₂ (%)	0,042
Umidade Relativa (%)	75,2
Resistência à compressão (MPa)	12
Cobrimento (mm)	31,29

Fonte: autoria própria.

Fazendo referência à Tabela 13 de coeficientes proposta por Possan (2010), os parâmetros de entrada na equação modelo ficam como segue.

Tabela 14: Dados de entrada para aplicação na equação modelo de Possan.

Sistema Estrutural	
kc	19,8
kfc	1,7
fc	12
kad	0,24
ad	0
kco2	18
CO2	0,042
kUR	1300
UR	0,752
kce	0,65

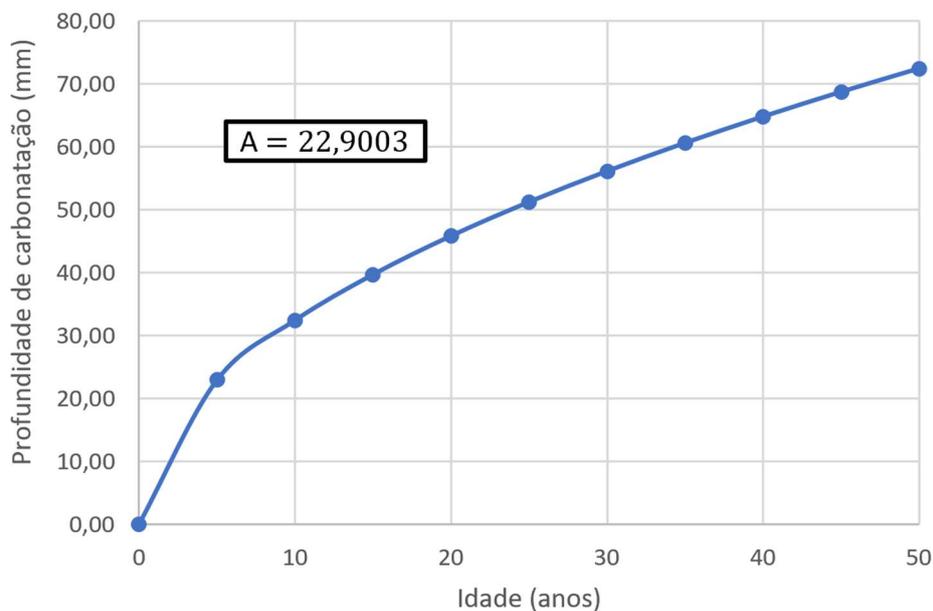
Fonte: autoria própria.

Introduzindo os parâmetros na equação modelo, produzimos uma curva relacionando a profundidade de avanço da frente de carbonatação com o avanço da idade (Figura 10). Para referência, a equação foi simplificada para a forma reduzida abaixo (Equações 11 e 12), sendo o valor do coeficiente “A” mencionado ao lado do gráfico.

$$A = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} * \exp \left[\left(\frac{k_{ad} * ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} * CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} * (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] * k_{CE} \quad \text{Equação 11}$$

$$y = A * \left(\frac{t}{20}\right)^{1/2} \quad \text{Equação 12}$$

Figura 10 – Profundidade de carbonatação com o avanço da idade, abordagem determinística.



Fonte: autoria própria.

Usando a Equação 16 diretamente para calcular a idade prevista para a frente de carbonatação atingir a espessura de cobrimento, encontramos a seguinte previsão de vida útil (Tabela 15). A carbonatação média foi obtida fazendo t igual à 51 anos na equação modelo junto do A obtido. Vale ressaltar que as vidas úteis previstas calculadas aqui e nos itens seguintes representam aquela que tem início na construção da edificação, não sendo a vida útil remanescente, a qual pode ser encontrada subtraindo de si a idade atual da edificação.

Tabela 15: Vida útil prevista pelo método de Possan em abordagem determinística.

	Vida Útil Prevista (anos)	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação medida <i>in loco</i> (mm)
Sistema Estrutural	37	36,57	21,73

Fonte: autoria própria.

4.10.2 Abordagem probabilística

Resumindo os dados cuja obtenção fora descrita nos itens anteriores:

Tabela 16: Parâmetros de entrada para abordagem probabilística.

	Sistema Estrutural		
	Média	Desvio Padrão	Distribuição
kc	19,8	-	-
kfc	1,7	-	-
fc	12	7,0	Normal
kad	0,24	-	-
ad%	0	0	-
kco2	18	-	-
CO2%	0,042	0,0022	Normal
kUR	1300	-	-
UR	0,752*100%	9,82%	Normal
kce	0,65	-	-
Cobrimento(mm)	31,29	11,93	Lognormal
LN(cobrimento)	3,3754	0,3684	-

Fonte: autoria própria.

O primeiro passo é gerar o espaço amostral fictício por meio de simulações. Como exemplo, para uma simulação da espessura de cobrimento, limitada no intervalo [10 ; 80] mm, escrevemos para cada simulação

$$= \text{LOGNORM.INV}(\text{LOGNORM.DIST}(10; 3,3754; 0,3684; \text{TRUE}) + \text{RAND}() * (\text{LOGNORM.DIST}(80; 3,3754; 0,3684; \text{TRUE}) - \text{LOGNORM.DIST}(10; 3,3754; 0,3684; \text{TRUE})));$$

De forma similar com as outras variáveis. Com um vetor de valores amostrais para as variáveis e usando os coeficientes da Tabela 16, calculamos o coeficiente **A** para simplificar a operação. Então, geramos um valor amostral limitado para o cobrimento e aplicamos a Equação 12 com este valor e o coeficiente **A** respectivo para encontrar a idade de falha t_d correspondente. Uma linha de simulação está na Figura 11.

Figura 11 – Uma linha na planilha de simulações pelo método Monte Carlo.

i	Fc (Mpa)	UR (%)	CO2 (%)	A	c (mm)	td (anos)
1	10,2	78,7	0,0407	25,6877	35,4	38

Fonte: autoria própria.

Após $i = 15000$ simulações (tempo de processamento não maior que um minuto), temos 15 mil valores de idade de falha. Usamos um procedimento simples para gerar o histograma de frequências desses valores. Construímos uma coluna de cestas (*bins*) correspondentes aos intervalos em que queremos dividir o domínio da variável tempo, por exemplo, de um em um ano. Construímos uma segunda coluna ao lado em que cada célula realizará a contagem de quantos valores de t_d são iguais ou inferiores ao valor da cesta chamado na célula ao lado. Em aplicação, isso é feito pela função

=FREQUENCY(Coluna dos t_d fixada ; Coluna dos *bins* não fixada)

Esta segunda coluna representa os valores $\Phi(t)$ da frequência acumulada de cada *bin*, isto é, representa a função de probabilidade acumulada da idade de falha.

Para apresentação, o histograma de frequências, isto é, a função de densidade de probabilidade discreta das idades de falha, pode ser obtido desacumulando os valores $\Phi(t)$ (pegando um valor e diminuindo de seu antecessor). A curva de probabilidade acumulada pode ser traçada para cada *bin* pegando o valor de sua frequência e dividindo pelo número total de simulações, o que entrega um valor em porcentagem de 0 a 100% de probabilidade de falha. O índice de confiabilidade pode ser obtido como exposto anteriormente caso seja de interesse (não é neste caso, haja vista a ordem de grandeza relativamente grande da probabilidade de falha).

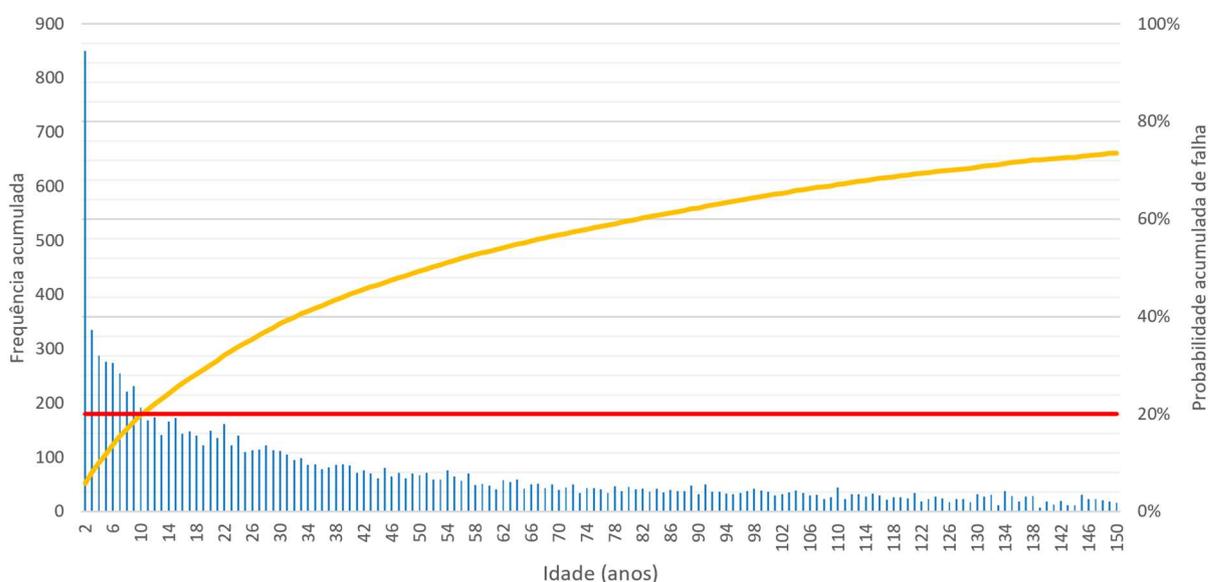
Um comentário importante: os esforços de aplicar o modelo de Possan (2010) evidenciam intuitivamente que ele é muito sensível a valores extremos. A aplicação do método em *softwares* comerciais evidencia o mesmo, mostrando ser um problema do modelo e não de sua implementação.

Acredita-se não comprometer a qualidade da análise probabilística estabelecer limites de amplitude para as variáveis. Em especial, Possan (2010) demonstra pela análise de sensibilidade que os fatores mais influentes no modelo são a resistência à compressão e a espessura do revestimento. Em nossa aplicação, será estabelecido um limite de domínio de [5 ; 60] MPa para a resistência e um limite de [10 ; 80] mm para a espessura de revestimento. A umidade relativa também está naturalmente limitada entre [0,1 ; 100] %.

Os gráficos obtidos a partir da planilha em Excel produzida para este trabalho estão acompanhados dos gráficos produzidos usando o *software* comercial *ModelRisk*

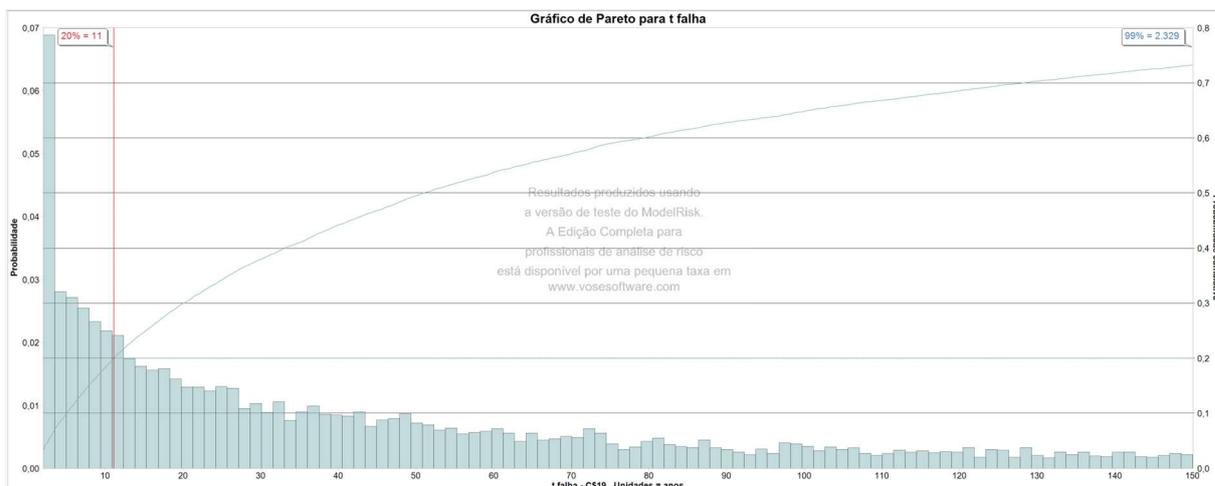
da empresa Vose, visando validar a implementação do método de Monte Carlo (Figuras 12 a 15). Os gráficos no *ModelRisk* foram produzidos a partir de 15 mil simulações (tempo de processamento em torno de 5 minutos) e os mesmos dados de entrada e limites de domínio usados no Excel. Ressalta-se que ambas as simulações produziram exatamente o mesmo resultado de vida útil com os Algarismos Significativos Considerados (nenhuma casa decimal, ou seja, unidades de ano). As linhas vermelhas nos gráficos das Figuras 12 e 14 destacam o corte de 20% de probabilidade de falha.

Figura 12 – Histograma de frequências e f.p.a da abordagem probabilística com destaque em vermelho para o corte de 20% de probabilidade de falha.



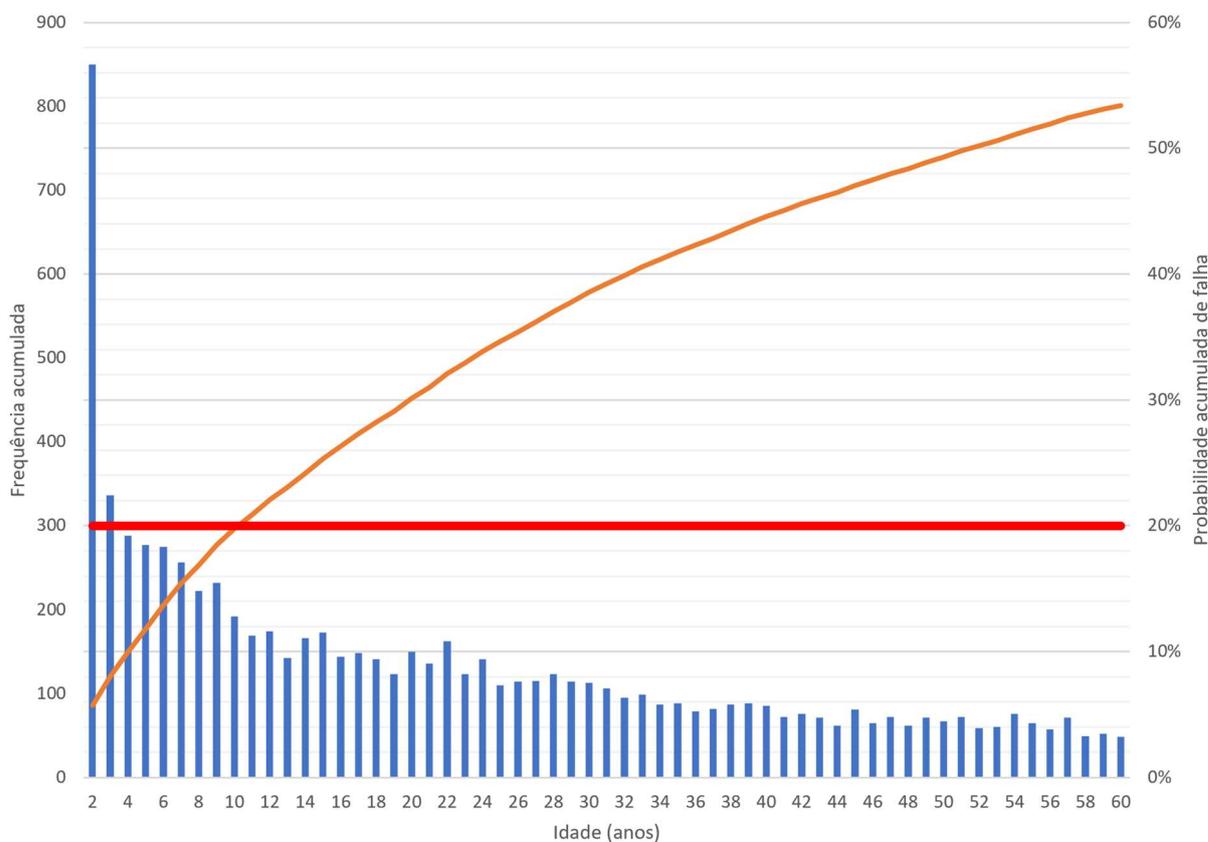
Fonte: autoria própria.

Figura 13 – Reprodução da simulação anterior no *software ModelRisk* da Vose.



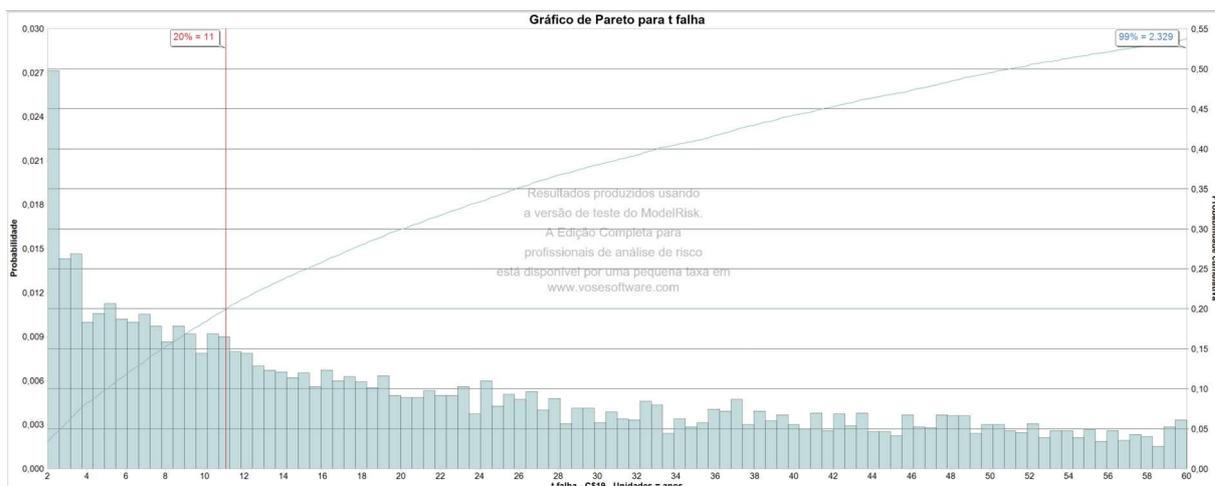
Fonte: autoria própria.

Figura 14 – Janela aproximada do gráfico da Figura 12.



Fonte: autoria própria.

Figura 15 – Janela aproximada do gráfico da Figura 13.



Fonte: autoria própria.

Observando os resultados, em especial a coluna calculada para a curva de probabilidade de falha em porcentagem (Figura 16), concluímos que a probabilidade de falha ultrapassa os 20% na idade de 11 anos, sendo esta portando a vida útil de final de análise. A carbonatação média foi obtida fazendo t igual a 51 anos na equação modelo junto da média dos coeficientes **A** obtidos. Abaixo na Figura 34 estão reproduzidas as linhas correspondentes às cestas relevantes para evidenciar o corte de 20% da idade prevista de vida útil em final de análise.

Figura 16 – Resultado da simulação probabilística.

bins	freq acum	freq norm	%acum
2	808	808	5%
3	1157	349	8%
4	1449	292	10%
5	1709	260	12%
6	1949	240	13%
7	2191	242	15%
8	2434	243	16%
9	2634	200	18%
10	2838	204	19%
11	3025	187	20%
12	3219	194	22%
13	3393	174	23%
14	3568	175	24%

Fonte: autoria própria.

Tabela 17: Vida útil prevista pelo método de Possan em abordagem probabilística.

	Vida Útil Prevista (anos)	Profundidade de carbonatação média (mm)	Profundidade de carbonatação medida <i>in loco</i> (mm)
Sistema Estrutural	11	38,37	21,73

Fonte: autoria própria.

4.11 COMPARAÇÃO

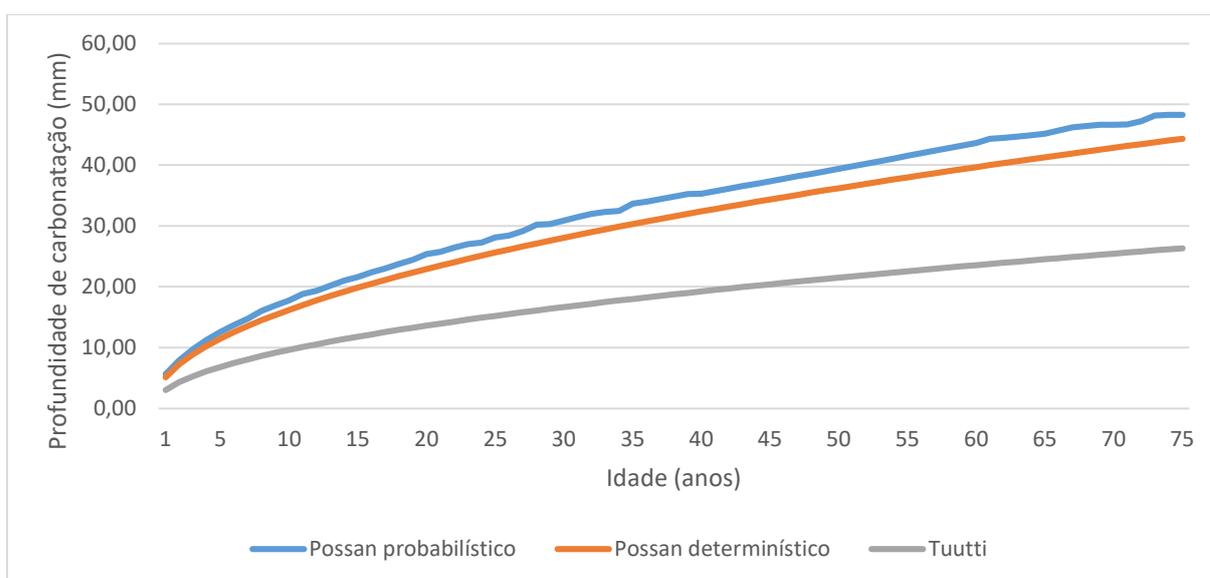
A seguir, temos os resultados compilados (Tabela 18). Aqui apenas se reúnem os resultados para referência rápida. No capítulo seguinte, os resultados são comentados.

Tabela 18: Previsões de vida útil pelos diferentes métodos.

	Vida Útil de Prevista (anos)			
	Idade atual (anos)	Tuutti	Possan, determinística	Possan, probabilística
Sistema Estrutural	51	106	37	11

Fonte: autoria própria.

Figura 17 – Sobreposição das modelagens do avanço da frente de carbonatação segundo o modelo de Possan (2010) em abordagem probabilística e determinística e o modelo de Tuutti (1982).

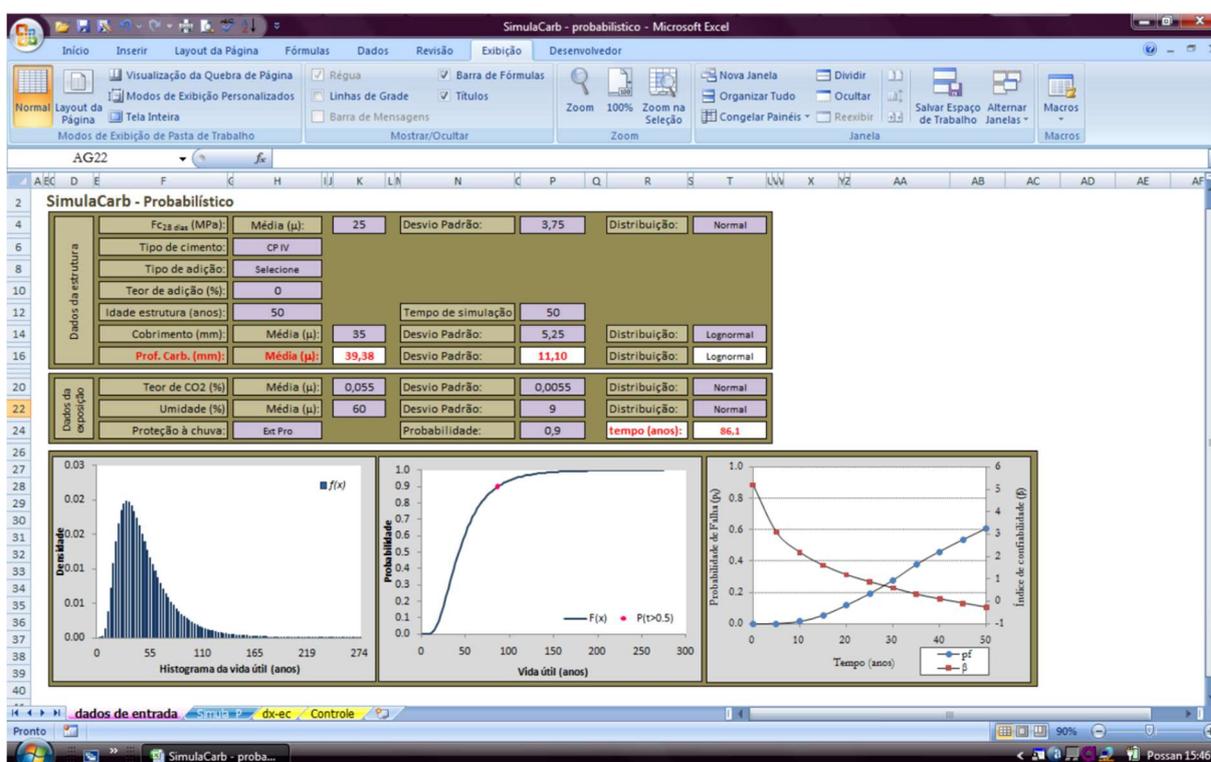


Fonte: autoria própria.

4.12 APLICAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO COM DADOS DE POSSAN (2010)

Por último, para firmar a validade dos dados entregues pela implementação do método de Possan na planilha produzida para este trabalho, será realizado uma simulação utilizando dados fornecidos na tese da autora, cujos resultados também estão lá fornecidos. Trata-se da aplicação registrada no Apêndice C da tese, reproduzido abaixo na Figura 18. A aplicação com a planilha do trabalho está nas Figuras 19 e 20 e a aplicação com o *software ModelRisk*, para referência, está na Figura 21.

Figura 18 – Tela de simulação.



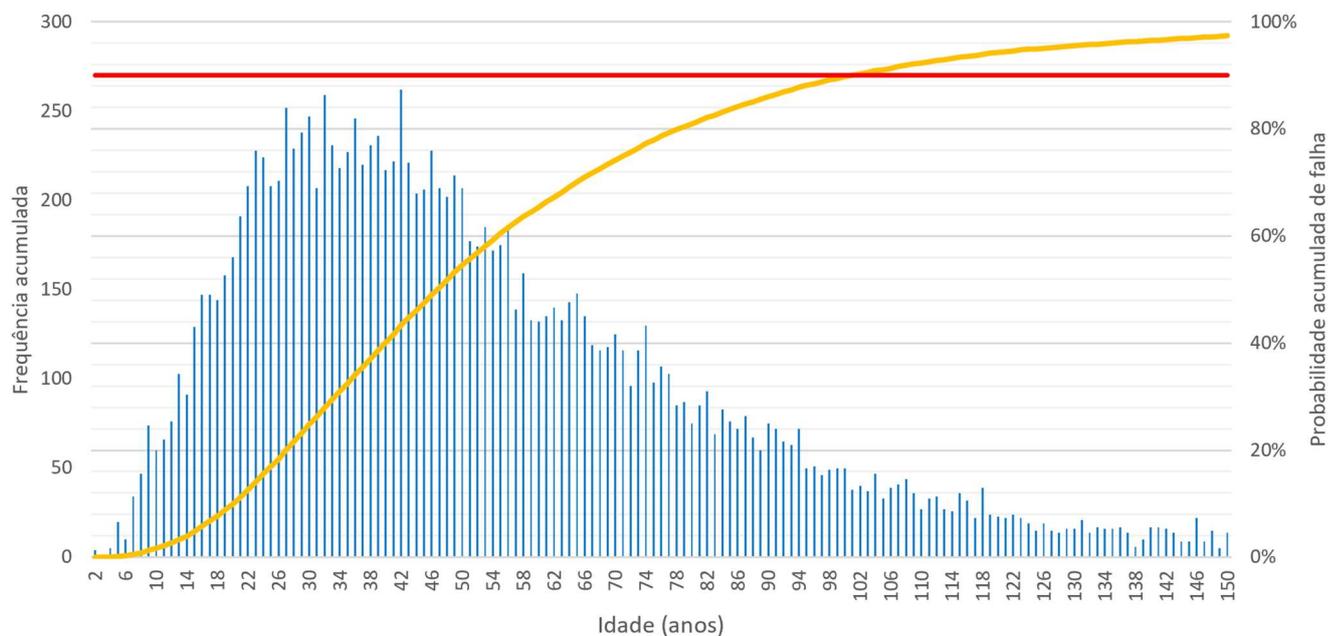
Fonte: Possan, 2010.

Figura 19 – Resultado da simulação probabilística, segunda aplicação.

bins	freq acum	freq norm	%acum
90	12899	81	86%
91	12952	53	86%
92	13010	58	87%
93	13060	50	87%
94	13107	47	87%
95	13164	57	88%
96	13221	57	88%
97	13279	58	89%
98	13328	49	89%
99	13385	57	89%
100	13437	52	90%
101	13481	44	90%
102	13533	52	90%
103	13577	44	91%
104	13621	44	91%
105	13653	32	91%
106	13688	35	91%

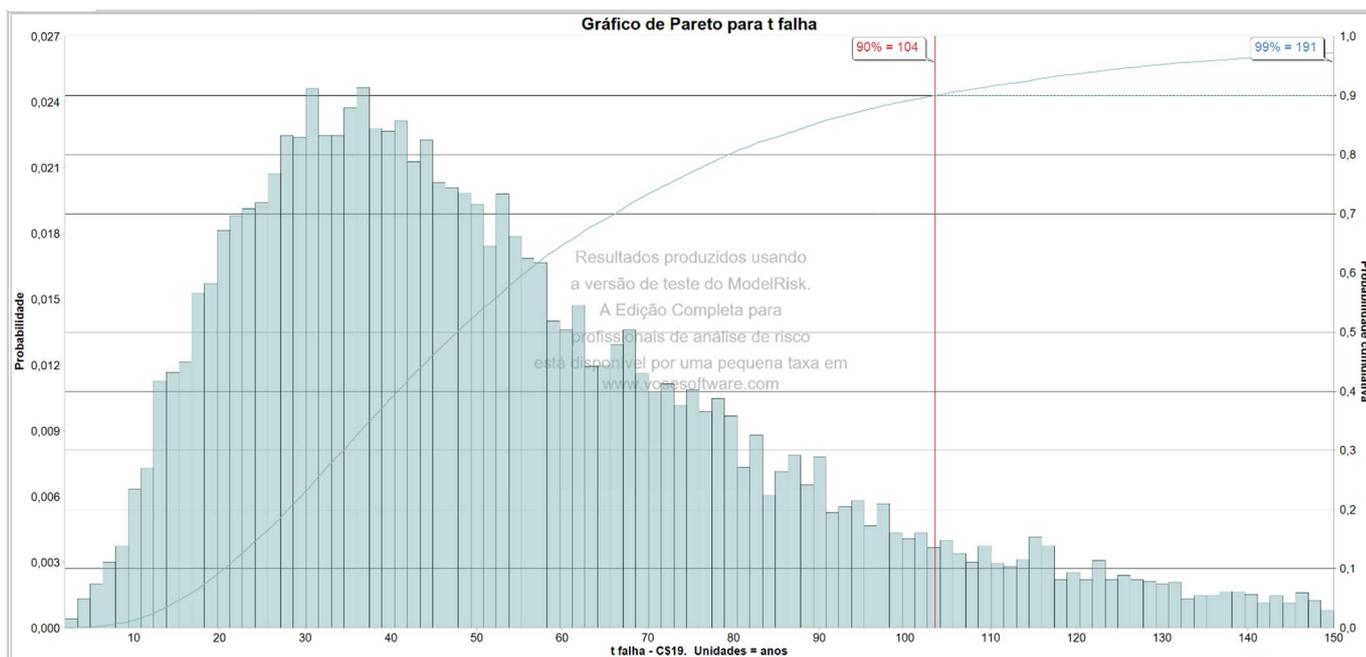
Fonte: autoria própria.

Figura 20 – Histograma de frequências e f.p.a da segunda aplicação com destaque em vermelho para o corte de 90% de probabilidade de falha.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 – *Software ModelRisk* para a segunda aplicação.



Fonte: autoria própria.

Como se vê, o resultado na tese entrega 86,1 anos de vida útil para P_f de 90%, enquanto a aplicação na planilha e no *ModelRisk* entregam 100 anos e 104 anos, respectivamente. Os resultados são considerados satisfatórios, evidenciando a validade da implementação do método na planilha produzida para o trabalho.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Como visto, os resultados acabaram bastante díspares. Considerando que os ensaios *in loco* apresentaram algumas incidências de profundidade de carbonatação atingindo a armadura, é razoável considerar que a vida útil da edificação está próxima do término. Dessa forma, seria esperado encontrar nas aplicações dos modelos previsões próximas da idade atual da edificação, ou seja, 51 anos.

O modelo de Tuutti (1982) se propõe conservador. De fato, o próprio autor comenta que seu modelo deve fornecer uma envoltória superior para a durabilidade das estruturas, isto é, ele fornece sem dúvidas uma idade que não será ultrapassada sem falhas de desempenho (item 5.6).

Na aplicação do estudo de caso, no entanto, verificou-se que o modelo de avanço da frente de carbonatação por Tuutti (1982) apresentou a maior previsão de vida útil, com 106 anos, que se julga arrojada para a situação atual de deterioração da estrutura. Já foi mencionado que o modelo de Tuutti (1982) apresenta discordâncias com medições de ensaios sobre estruturas em situação externa desprotegidas das intempéries (Papadakis et al., 1989 apud Cafange, 2011), caso deste estudo.

Além disso, acredita-se que este resultado é consequência de se supor, na aplicação do modelo, como representativo do sistema estrutural uma peça fictícia com cobertura e profundidade de carbonatação iguais às médias dos valores medidos nos ensaios.

Na realidade, a falha do sistema estrutural depende da falha não da maioria de seus componentes, como fica implícito pela adoção dos valores médios, mas apenas de um único componente seu. Portanto, a abordagem probabilística que descreve as variáveis com uma probabilidade de não ser excedida deve entregar resultados mais conservadores.

O modelo de Possan apresentou resultados que se acredita serem inferiores ao que deveria ter-se encontrado, indicando 37 anos de vida útil a partir da construção em abordagem determinística e 11 anos em abordagem probabilística.

A baixa resistência à compressão da edificação fica compensada pela situação externa desprotegida e o uso de cimento Portland comum com alta reserva alcalina. Caso o tipo de cimento fosse outro ou analisássemos uma peça em situação interna,

teríamos encontrado uma vida útil muito menor do que a esperada para esta edificação.

Em uma modelagem determinística expedita, alterando o coeficiente de exposição para 1,3 para situação interna ocasiona a diminuição da vida útil de 37 anos para 9 anos. Em outra modelagem, retornando a exposição para situação exterior desprotegida e fazendo o tipo de cimento igual a CPIV, também baixamos para 11 anos de vida útil. Os resultados foram confirmados pelo *ModelRisk*.

Existe uma forte crença de que isso se deve a uma inadequação intrínseca do modelo. Como visto, o modelo de Possan foi construído em cima de uma base de dados obtida pela técnica de grupo focal e os coeficientes de ajuste empírico que calibram o modelo foram assertados em referência fechada a esta base de dados (item 3.7.1). Observando os dados utilizados nos Apêndices A e B da tese (Possan, 2010), as resistências à compressão variam entre 20 e 60 MPa. Portanto, o modelo, por construção, necessariamente ocasionará distorções com parâmetros fora desta faixa, caso do objeto de estudo.

Esta distorção é enormemente potencializada quando se faz a abordagem probabilística. No caso determinístico, o deslocamento do valor ideal que gera a distorção é apenas a diferença entre as médias. No caso probabilístico, os valores da cauda inferior agregam uma distorção muito maior, causando que a distorção desenvolva uma relação não linear com o deslocamento do valor ideal. Em consequência, os valores simulados na cauda inferior da distribuição distorcem exageradamente o resultado para abaixo do valor real.

Em testes feitos durante a confecção deste trabalho, vários valores de entrada e vários limites de variabilidade foram testados a fim de observar o comportamento do modelo, em especial a fim de verificar se a implementação dele na planilha em Excel apresentava erros. Em que pese a falta de rigor metodológico, foi possível se convencer de que o modelo apresenta uma sensibilidade a valores extremos proibitiva para sua aplicação em situações fora da faixa de construção pela base de dados do grupo focal. Testes feitos com recurso ao *software ModelRisk* reforçam esta conclusão.

Um teste em particular foi feito com dados fornecidos diretamente na tese de Possan (2010) em seu Apêndice C, registrado neste trabalho (item 4.12). Nesta aplicação, que convenientemente tem parâmetros de entrada dentro da faixa de

construção do modelo, os resultados deram mais satisfatórios. Fica reforçado novamente a conclusão.

Em resumo, o que fica concluído neste trabalho é o que segue:

- O método de Tuutti (1982) e o método de Possan (2010) em abordagem determinística e probabilística podem ser inseridos na rotina de investigação de edificações existentes;
- O procedimento de aplicação destes métodos ficou registrado no decorrer deste trabalho;
- Os procedimentos de estimativa dos dados que não foram obtidos diretamente em ensaios também foram registrados;
- No estudo de caso, o método de Tuutti (1982) resultou na maior previsão de vida útil, seguido do método de Possan (2010) em abordagem determinística e do método de Possan (2010) em abordagem probabilística;
- O método de Tuutti (1982) considera as médias dos cobrimentos e profundidades de carbonatação obtidos em ensaios, não contemplando a ocorrência de falhas localizadas em alguns componentes como possivelmente comprometendo o desempenho do sistema como um todo, além de apresentar inadequações para estruturas em condição externa desprotegida das intempéries;
- O método de Possan é adequado para aplicações com parâmetros dentro dos domínios de construção do modelo, ocasionando distorções à medida que se afasta desta faixa;
- Estas distorções são potencializadas pela aplicação em abordagem probabilística;

- Apesar das limitações de cada método, no escopo deste trabalho o método que melhor representou o estado de deterioração da estrutura estudada foi o método de Possan (2010) em abordagem determinística.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 365: Service-Life Prediction – State-of-the-Art Report**. ACI manual of concrete practice, Detroit, 2000.

ANDRADE, J. J. de O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575: Edifícios habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

CAFANGE, D. M. P. J. **Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland**. Tese de Mestrado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON (*fib*). **CEB-FIP Model Code for Concrete Structures (2010)**. CEB, Lausanne, 2010.

HART, J. **Jeff Bezos Describes His Perfect Meeting**. Entrepreneur, 2023. Disponível em: <https://www.entrepreneur.com/business-news/jeff-bezos-meeting-agenda-no-slideshows-two-pizza-rule/467145>. Acesso em: 11 ago. 2024.

IBRACON. **Revista Concreto & Construções 73**. Revista Oficial da Ibracon, São Paulo, 2014.

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

JAGAMOHAN, M. **Global cement production 1995-2023**. Statista, 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A. **Monte Carlo Methods**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2008. Disponível em: <https://phyusdb.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/03/monte-carlo-methods-second-revised-and-enlarged-edition.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2024.

LACOR. **Ensaio Acelerados de Corrosão**. LUME, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <https://videos.ufrgs.br/lume/arquivos/ensaios-acelerados-de-corrosao/view>. Acesso em: 11 ago. 2024.

MENEZES, S. **FONTES DE INFORMAÇÃO: definição, tipologia e confiabilidade**. Blog da BIBENG, 2021. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/bibeng/fontes-de-informacao-definicao-tipologia-confiabilidade/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

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

SAPORITO, A.; TASSONE, C.; IORIO, A. Di; SARACENO, M. B.; BRESSAN, A.; PINI, R.; MONGELLI, F.; REGINA, D. LA. **Six Sigma can significantly reduce costs of poor quality of the surgical instruments sterilization process and improve surgeon and operating room personnel satisfaction**. Scientific Reports, 13, 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf. Acesso em: 11 ago. 2024.

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

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.