



**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA PREVISÃO DA VIDA
ÚTIL QUANTO A CORROSÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO**

VITÓRIA
2017



FELIPE COSTA CORONA
WAGNER KLIPPEL DOMINICINI
WAGNER OLIVEIRA MARQUES

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA PREVISÃO DA VIDA
ÚTIL QUANTO A CORROSÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO**

Projeto de pesquisa desenvolvido para
apresentação de Trabalho de Conclusão do
Curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras
Civis para obtenção do grau de especialista.
Orientador: Prof. M.Sc. Leonardo Roncetti.

VITÓRIA
2017

RESUMO

Atualmente para a sociedade o tema desenvolvimento sustentável está em evidência, e neste diapasão a indústria da Construção Civil é fortemente afetada, tendo como um dos assuntos mais abordados a durabilidade das construções. As estruturas de concreto se degradam por vários mecanismos, tendo sua vida útil reduzida caso não sejam adotadas medidas de manutenção corretivas e preventivas. Esta degradação compromete o desempenho da estrutura, uma vez que as propriedades físicas e químicas do concreto são alteradas em função das características de seus componentes e das respostas destes aos condicionantes do meio ambiente. Diversos estudos apontam a corrosão como uma das manifestações patológicas de maior incidência e maiores custos de reparo, uma vez que sua permanência pode significar risco à estabilidade da edificação. Assim, este trabalho apresenta um *software* de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, capaz de prever o tempo necessário para a despassivação da armadura, seja por ação de cloretos ou de CO₂, de uma forma prática, com interface amigável e aplicável na definição do plano de manutenção de estruturas já existentes, onde poucos ensaios e dados sobre a estrutura estão disponíveis. Os *softwares* foram desenvolvidos com uma interface de fácil manipulação, com dados de entrada obtidos de maneira rápida e barata, que servem para auxiliar o planejamento de manutenções de estruturas de concreto armado, aliados à intenção de utilizar os resultados para balizar tomadas de decisões, respeitando sempre as limitações descritas.

Palavras-chave: software, previsão de vida útil, corrosão, concreto armado, íons cloreto, carbonatação do concreto.

FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL QUANTO A CORROSÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Por

FELIPE COSTA CORONA
WAGNER KLIPPEL DOMINICINI
WAGNER OLIVEIRA MARQUES

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Vitória (ES) 18 de fevereiro de 2017.

Leonardo Roncetti da Silva, Prof. M.Sc.

Lucas de Carvalho Sthel, Esp.

Mayra Moreira de Almeida, M.Sc.

Stela Cristina Verus Assumpção, Esp.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
1.2. OBJETIVOS	11
1.2.1. Objetivo Geral	11
1.2.2. Objetivos Específicos	11
1.3. HIPÓTESE.....	12
1.4. JUSTIFICATIVAS	12
1.4.1. Tecnológicas.....	12
1.4.2. Econômicas.....	12
1.4.3. Sociais.....	12
1.4.4. Ecológicas.....	13
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	13
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. A DESPASSIVAÇÃO DA ARMADURA E O FENÔMENO DA CORROSÃO	14
2.1.1. Produtos de Corrosão.....	14
2.1.2. A Despassivação da Armadura	15
2.1.3. Processo de Corrosão.....	18
3. PREVISÃO DA VIDA ÚTIL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	20
3.1. NÍVEIS DE MODELAGEM	20
3.2. CONTAMINAÇÃO POR ÍONS CLORETOS	22
3.2.1. Coeficiente de difusão	24
3.2.2. Concentração superficial.....	27
3.2.3. Concentração limite de cloretos.....	30
3.3. CARBONATAÇÃO	32
4. METODOLOGIA.....	35
4.1. SOFTWARE “PENETRA” (PENETRAÇÃO DE CLORETOS).....	35
4.1.1. Interface “Penetra”.....	36
4.2. ESTUDO DE CASO (PENETRAÇÃO DE CLORETOS)	41

4.3.	SOFTWARE “CARBONA” (CARBONATAÇÃO)	42
4.3.1.	Interface “Carbona”	42
4.4.	ESTUDO DE CASO (CARBONATAÇÃO)	46
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
5.1.	SOFTWARE “PENETRA” (PENETRAÇÃO DE CLORETOS)	48
5.2.	SOFTWARE “CARBONA” (CARBONATAÇÃO)	53
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Pourbaix simplificado. Potencial x pH para o sistema Fe-H ₂ O a 25°C.	15
Figura 2 - Modelo simplificado para vida útil associada à corrosão.....	18
Figura 3 - Esquema simplificado: modelo da corrosão da armadura do concreto (CEB, 1984).	19
Figura 4: Níveis de modelagem segundo o CEB (1997).....	22
Figura 5 - Análise de regressão dos dados de penetração do cloreto observados em certo período de exposição.	25
Figura 6 - Distintas zonas de agressividade às estruturas de concreto.....	28
Figura 7: Representação do avanço de carbonatação no tempo.....	33
Figura 8 - Software - Janela inicial.	37
Figura 9 - Software - Perfil de cloretos.....	37
Figura 10 - Software - Adicionar Perfil de Cloretos.	38
Figura 11 - Software - Pontos medidos e Curva ajustada.	39
Figura 12 - Software - 2 ou mais perfis adicionados.	39
Figura 13 - Software - Análise de Resíduos.	40
Figura 14 - Estudo de caso - Perfil de cloretos	41
Figura 15 – Software Carbona - Janela inicial.....	43
Figura 16 – Software Carbona - Perfil de carbonatação.	44
Figura 17 – Software Carbona - Pontos medidos e Curva ajustada.	45
Figura 18 – Software Carbona - 2 ou mais perfis adicionados.	45
Figura 19 – Software Carbona – exemplo de relatório final.	46
Figura 20 - Estudo de caso - Perfil de cloreto.....	48
Figura 21 - Estudo de caso - Janela principal	49
Figura 22 - Estudo de caso - Análise de resíduos	50
Figura 23 - Estudo de caso - Determinação D e Cs	50
Figura 24 - Estudo de caso - Efeito do tempo.....	51
Figura 25 - Estudo de caso - Previsão de vida útil.....	52
Figura 26 - Estudo de caso - Perfil de carbonatação.....	53
Figura 27 - Estudo de caso – Janela inicial.....	53
Figura 28 - Estudo de caso – Relatório final.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de normas para teor total de concreto. 32

Tabela 2 - Estudo de caso - Perfil de cloretos 41

Tabela 3 - Estudo de caso - Perfil de carbonatação 47

1. INTRODUÇÃO

O atual processo de mudança de paradigma da sociedade em relação ao sistema físico-ecológico dá força ao tema de desenvolvimento sustentável e, conseqüentemente, a indústria da construção civil é fortemente afetada, tornando a durabilidade das construções um dos assuntos mais discutidos. Estruturas duráveis impactam a sustentabilidade de duas formas: através da conservação de energia, matérias-primas e recursos naturais; e pela redução na quantidade de resíduos gerados. Além do notável fator econômico, uma vez que tem grande influência no custo do ciclo de vida.

Diversos são os fatores de degradação das estruturas de concreto armado, destacando-se as movimentações térmicas, as movimentações higroscópicas, a atuação de sobrecargas, a deformabilidade excessiva da estrutura, os recalques de fundação, a retração, as reações expansivas e a corrosão. A deterioração do concreto compromete o desempenho de uma estrutura, uma vez que o concreto, por ser um material instável ao longo do tempo, tem suas propriedades físicas e químicas alteradas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente.

Especial atenção deve ser dada para a corrosão das armaduras, um dos problemas mais frequentes e que geram custos mais elevados de reparo. O estudo intensivo sobre as corrosões de armaduras inicia na década de 70, quando o efeito dos cloretos foi notado mais evidentemente. Entretanto, apesar de ter sido extensivamente estudado durante as últimas três décadas, muitas questões permanecem não resolvidas (ANDRADE, 2009).

Helene (1993) traz uma análise da importância econômica da corrosão de armaduras no mundo, com levantamentos nos Estados Unidos e Espanha sobre a incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto e seus impactos. Skainy (1987) apud Helene (1993) aponta que, em 1985, o volume de recursos manipulados pela construção civil nos Estados Unidos foi de 300 bilhões de dólares, sendo os custos de reparos estimados em 50 bilhões de

dólares/ano, representando cerca de 16% do total do setor. Em todos os estudos apresentados, a corrosão se mostrou uma das manifestações patológicas de maior incidência e maiores custos de reparo.

No Brasil observa-se situação similar aos casos internacionais. Dal Molin (1988), em levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul, destaca que, apesar da incidência de corrosão de armaduras nas edificações estudadas ser da ordem de 11% do total de patologias encontradas, ao se considerar apenas as manifestações patológicas graves, com implicações na segurança estrutural, esta cifra sobe ao patamar de 40%, sendo a de maior incidência entre estas. Além disso, a autora salienta que a corrosão de armaduras demanda uma atitude imediata de recuperação e, normalmente, onerosa, uma vez que sua permanência pode significar risco à estabilidade da edificação.

Consequentemente, há um esforço mundial para modelar matematicamente o fenômeno de corrosão das armaduras e seus fatores intervenientes, possibilitando a estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado a fim de orientar adequadamente as atividades de projeto e manutenção. Pode-se, desta forma, projetar com base na durabilidade, associando o tempo às características da estrutura e do meio no qual ela está inserida, e não somente na resistência mecânica e segurança estrutural.

Apesar de ser um tema muito estudado desde a década de 70, existem muitas lacunas no conhecimento dos processos de corrosão de armaduras. Uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil já foi desenvolvida, entretanto, a existência de um grande número de fatores intervenientes, a falta de um entendimento preciso sobre os modelos físicos que abrangem esses fatores e a dificuldade na obtenção de parâmetros de entrada exatos, de estruturas reais e ao longo de grandes períodos, são enormes obstáculos encontrados em sua modelagem (ANDRADE, 2009). Assim, ainda não há uma abordagem amplamente aceita, sendo que esses modelos ainda não conseguiram alcançar efetivamente o mercado. Atualmente, a maior parte dos modelos é utilizada

estritamente no meio acadêmico, uma vez que necessita de grande variedade de dados de entrada de obtenção complexa.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A partir de dados e ensaios realizados nas estruturas de concreto armado, existem métodos simples e capazes de fornecer a vida útil dessas estruturas?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um *software* de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, capaz de prever o tempo necessário para a despassivação da armadura, seja por ação de cloretos ou de CO₂. Este deve ser prático, com interface amigável e aplicável na definição do plano de manutenção de estruturas já existentes, onde poucos ensaios e dados sobre a estrutura estão disponíveis.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, deve-se:

- Realizar extensa revisão bibliográfica, envolvendo o fenômeno de corrosão e os principais modelos de penetração de agentes agressivos;
- Selecionar os modelos a serem utilizados, considerando sua facilidade de aplicação;
- Desenvolver o software com base no modelo selecionado;
- Aplicar o programa desenvolvido utilizando dados da literatura.

Este trabalho colaborará também com o entendimento do fenômeno de corrosão em estruturas de concreto, além de servir como base para o desenvolvimento de futuros modelos, cada vez mais precisos na reprodução da realidade.

1.3. HIPÓTESE

Através de modelos matemáticos já existentes, com dados de campo e um programa de computador de fácil execução, será possível estimar a vida útil de estruturas de concreto armado, expostas a ambientes favoráveis a corrosão de suas armaduras, seja pela ação de cloretos ou por carbonatação.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

O desenvolvimento de um *software* que auxiliará a previsão de vida útil e o plano de manutenções de estruturas de concreto armado pode ser considerado uma justificativa tecnológica. Modelos matemáticos, obtidos da literatura, são aqui utilizados em um programa de fácil uso e seus resultados podem balizar o plano de manutenção das estruturas.

1.4.2. Econômicas

Com a previsão da vida útil das estruturas de concreto será possível fazer um planejamento para manutenções e intervenções, prologando assim sua durabilidade, reduzindo o emprego de materiais e mão de obra e evitando gastos mais elevados no futuro.

1.4.3. Sociais

O planejamento e a redução de manutenções e intervenções serão extremamente vantajosos para a sociedade. As pessoas poderão se programar para custear e se realocarem caso sejam necessárias intervenções em suas construções. Da mesma forma, obras públicas poderão ter suas manutenções mais assertivas, tirando maior proveito do projeto inicial.

1.4.4. Ecológicas

Com a redução de manutenções e intervenções, a produção de resíduos de construção será menor, assim como a utilização de insumos para os reparos. As estruturas poderão potencializar sua vida útil, tornando a construção mais sustentável.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa é classificada como pesquisa aplicada, pois abrange estudos elaborados com a finalidade de resolver problemas identificados na sociedade (GIL, 2010). A metodologia aplicada é um estudo de caso, para o qual se faz necessária uma revisão bibliográfica sobre o tema.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 5 capítulos. No **Capítulo 1** são apresentados o problema de pesquisa e seu objetivo, bem como as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

No **Capítulo 2** é apresentada a revisão bibliográfica, com definições, procedimentos teóricos e diretrizes sobre o processo de corrosão nas estruturas de concreto armado e o estado da arte sobre a modelagem da vida útil em estruturas de concreto armado, discutindo os principais conceitos e alguns modelos existentes.

No **Capítulo 3** descreve-se a metodologia da pesquisa, identificam-se as abordagens empregadas no desenvolvimento do *software* e detalham-se os dados da literatura a serem utilizados para demonstrar a utilização do programa.

No **Capítulo 4** são apresentados os resultados, exemplos de uso do programa e as respectivas análises.

No **Capítulo 5** são apresentadas as considerações finais acerca desta pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A DESPASSIVAÇÃO DA ARMADURA E O FENÔMENO DA CORROSÃO

De um modo geral, a corrosão de armaduras é a deterioração de um material com o meio ambiente, oriundo de reações danosas de natureza química ou eletroquímica, relacionado ou não a ações físicas ou mecânicas (HELENE, 2014). A corrosão de natureza química, também conhecida como oxidação, acontece em meio não aquoso, isto é, é proveniente da reação dos átomos de ferro com o oxigênio da atmosfera (reação gás-metal), formando uma película de óxido de ferro contínua e uniforme na superfície da armadura. Processo este que é considerado muito lento, segundo Helene (1993), e que se torna significativo apenas em temperaturas elevadas. Segundo o autor, no caso de armaduras embutidas no concreto, o fenômeno é de natureza eletroquímica e seus efeitos degenerativos levam a um comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo.

2.1.1. Produtos de Corrosão

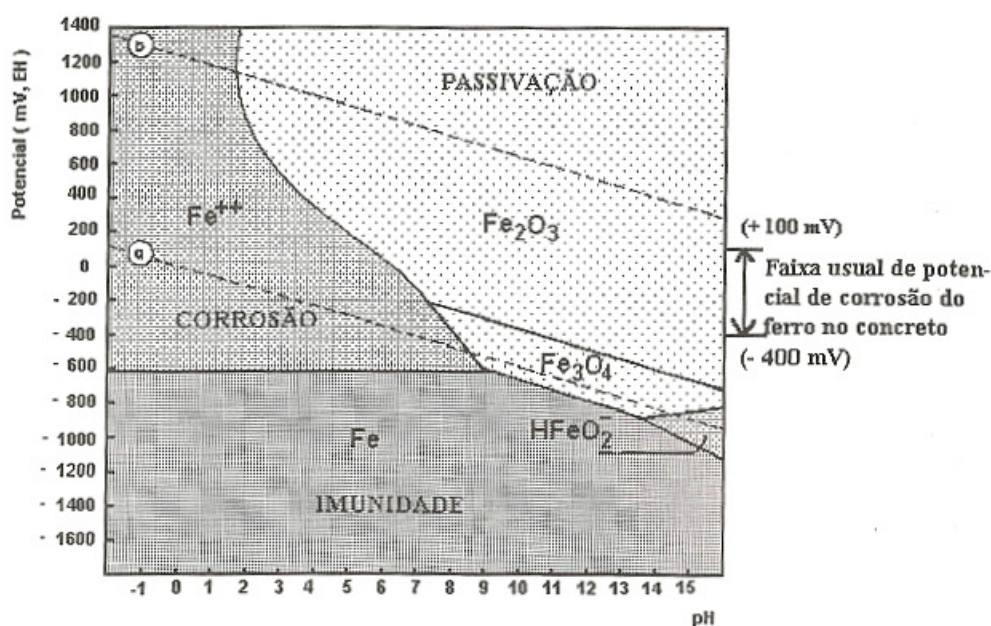
Os metais são encontrados na natureza na forma de compostos, como óxidos e hidróxidos. Após o processo metalúrgico, esses metais passam a adquirir o estado metálico, porém, ao entrarem em contato com o meio ambiente, passam a reagir espontaneamente, retornando ao estado anterior, que apresenta um menor estado de energia.

A corrosão das armaduras é afetada pelo produto de corrosão resultante, podendo, a depender do produto formado, ser inibida significativamente. O produto de corrosão formado pode constituir um filme superficial compacto e aderente, inibindo o processo corrosivo, sendo denominado filme passivo ou camada passivadora (RIBEIRO et al., 2014).

Na estrutura de concreto armado, a armadura de aço encontra-se em um meio altamente alcalino ($\text{pH} > 12$), produzido pelo hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2),

hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH). Como pode ser observado através do diagrama de Pourbaix (Figura 1), para as faixas de potencial e de pH nas quais o aço geralmente se encontra, estará presente na superfície da armadura um filme compacto e aderente, que atua como uma barreira entre o meio corrosivo e a superfície do aço, tornando a armadura protegida contra a corrosão (RIBEIRO et al., 2014; CASCUDO, 1997).

Figura 1 - Diagrama de Pourbaix simplificado. Potencial x pH para o sistema Fe-H₂O a 25°C.



Fonte: CASCUDO (1997).

2.1.2. A Despassivação da Armadura

A corrosão em estruturas de concreto armado é um processo eletroquímico que requer a presença de um eletrólito, uma diferença de potencial e oxigênio. Entretanto, o processo de corrosão só terá início uma vez despassivada a armadura, ou seja, quando a fina camada de óxidos que envolve a armadura for rompida (RIBEIRO et al., 2014). Assim, a passivação é definida como a zona onde a taxa de corrosão é aproximadamente nula.

Uma das grandes vantagens do concreto armado está na proteção conferida à armadura, pois este exerce tanto uma proteção física quanto química. A primeira se dá através do cobrimento de concreto, que dificulta a entrada de agentes agressivos externos. Já a segunda, ocorre devido às reações de hidratação

dos silicatos de cálcio - silicato tri cálcico (C3S) e silicato bi cálcico (C2S) - do cimento, que liberam hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), uma base forte que, dissolvida nos poros, confere o caráter alcalino do concreto, juntamente com o hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. Este meio altamente alcalino ($\text{pH} > 12,6$) mantém a armadura no estado passivo, funcionando como proteção química contra a corrosão (HELENE, 1986).

A despassivação da armadura acontece principalmente devido a dois mecanismos: carbonatação e ação de cloretos. A carbonatação consiste na neutralização dos hidróxidos da pasta de cimento pelo ataque de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, reduzindo seu pH para um valor em torno de 9 e, assim, causando a perda generalizada do filme protetor (HELENE, 1986). Já a despassivação por ação de cloretos pode ocorrer mesmo para valores de pH consideravelmente altos, superiores a 11,5. Neste caso, ocorre um acúmulo de cloretos na região da armadura até que, ao se atingir uma quantidade crítica de íons cloreto na solução dos poros, decorre uma quebra localizada da camada passivadora (RIBEIRO et al., 2014).

Apesar da corrosão por carbonatação ocorrer de forma generalizada, o dano associado a ela usualmente se manifesta na forma de fissuração e deslocamento do cobrimento antes que uma redução significativa da seção da barra tenha ocorrido. Já no caso da ação de cloretos, pode-se ter como resultado uma perda extrema da área seccional da armadura antes que qualquer outra forma de deterioração possa ser detectada. Assim, o mecanismo de corrosão mais estudado e que causa maiores prejuízos é a corrosão por ação de cloretos.

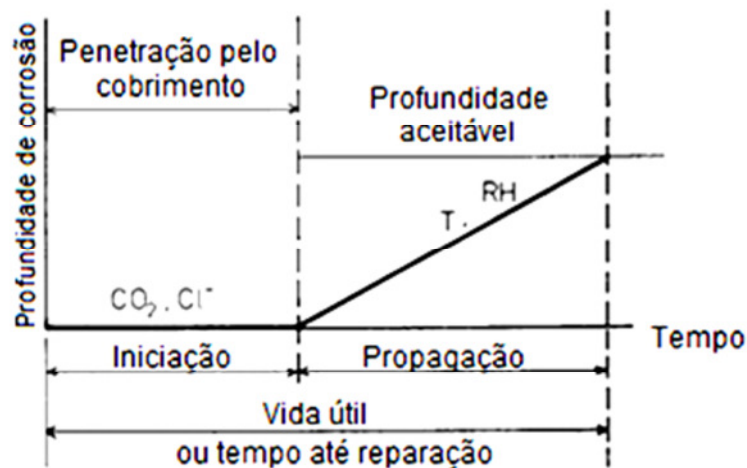
A durabilidade das estruturas está intrinsecamente ligada ao conceito de vida útil. Dentre as diversas definições, destaca-se aquela apresentada por Andrade (1992, p.23), em que considera vida útil como “aquela durante a qual a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigíveis”.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), entende-se como vida útil de projeto o período de tempo no qual as características das estruturas de concreto se mantêm, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção determinados pelo projetista e construtor, além de executar reparos necessários provenientes de danos acidentais.

A associação dos conceitos de vida útil e de durabilidade é inevitável. Conhecidas, ou estimadas, as características de deterioração do material concreto e dos sistemas estruturais, entende-se como durabilidade o parâmetro que relaciona a aplicação destas características a uma determinada construção, individualizando-a pela avaliação da resposta que dará aos efeitos da agressividade ambiental, e definindo, então, a vida útil da mesma (SOUZA; RIPPER, 1998).

Um modelo simplificado, puramente qualitativo, para vida útil associada à corrosão foi proposto por Tuutti (1982) e, desde então, vem sendo utilizado por praticamente a totalidade dos estudos. Nele, o processo de corrosão é dividido em duas etapas (Figura 2). O período de iniciação, que compreende o período de tempo até a despassivação da armadura, é normalmente o período mais longo e sua duração depende da taxa de penetração de íons cloreto no concreto e de CO_2 e da profundidade do cobrimento. O período de propagação, quando tem início o processo de corrosão propriamente dito, é considerado como o tempo entre a despassivação da barra de aço e o momento em que um grau inaceitável de corrosão é atingido, marcando o fim da vida útil da peça. Este período é consideravelmente mais curto e sua previsão é bastante complexa, devido à quantidade de fatores intervenientes e à dificuldade de obtenção de parâmetros de entrada precisos. Assim, é comum considerar o fim do período de iniciação como o fim da vida útil.

Figura 2 - Modelo simplificado para vida útil associada à corrosão.



Fonte: Adaptado de Tuutti (1982).

2.1.3. Processo de Corrosão

Após a despassivação da armadura, inicia-se a corrosão, um processo eletroquímico com a formação de um anodo e um catodo, que, para que ocorra necessita de:

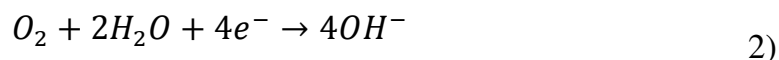
- Um condutor metálico conectando o anodo e o catodo (barra de aço);
- Um eletrólito, para a movimentação dos íons (solução nos poros do concreto);
- Diferença de potencial; e
- Gás Oxigênio (O_2).

O processo de corrosão, como descrito por Martín-Pérez (1999) e representado na Figura 3, é iniciado com o estabelecimento de uma diferença de potencial, causado por heterogeneidades físicas e/ou químicas na superfície do metal. Devido a essa diferença de potencial ocorre a oxidação (perda de elétrons) do ferro no anodo, ou seja:

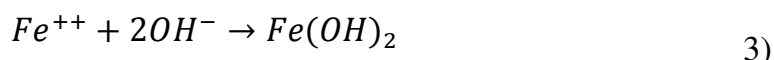


Assim, os íons de ferro ficam dissolvidos na solução dos poros do concreto, enquanto os elétrons liberados no anodo movem-se pela barra até o catodo,

provocando a redução (ganho de elétrons) do oxigênio dissolvido nos poros, caso haja quantidade suficiente de umidade e oxigênio:

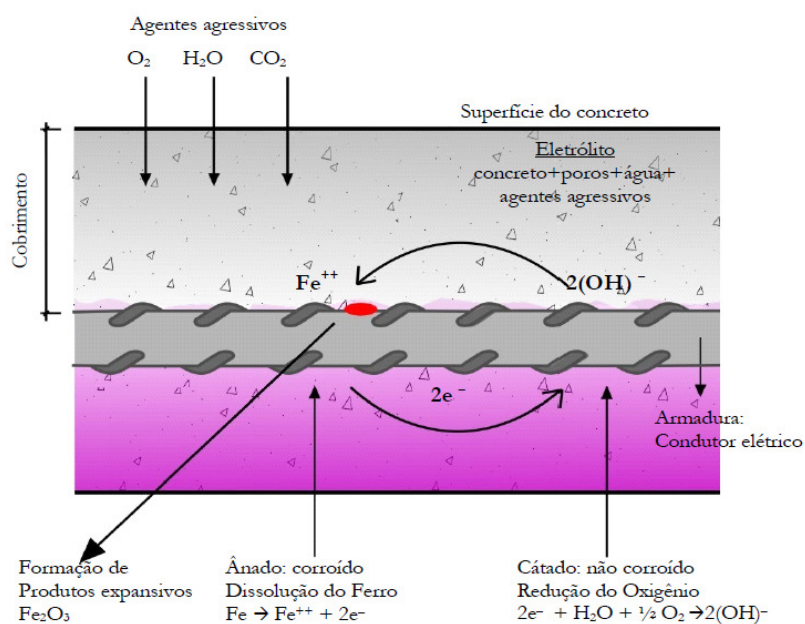


Após a redução do oxigênio, ocorre a migração dos íons hidroxila liberados no catodo em direção ao anodo, onde se combinam com os íons de ferro dissolvidos para formar hidróxido de ferro:



Caso haja quantidade suficiente de oxigênio nos locais anódicos, o hidróxido de ferro pode ser oxidado em outros produtos de corrosão. O processo corrosivo reduz a seção de aço presente no elemento, que terá sua resistência reduzida. A oxidação dos íons de ferro é acompanhada de um expressivo aumento de volume dos produtos de corrosão, em até seis vezes (RIBEIRO et al., 2014). Esta expansão gera tensões de tração no concreto, que, ao ultrapassarem a resistência à tração do material, ocasionam a perda de aderência na interface aço/concreto, fissuração e deslocamento do mesmo.

Figura 3 - Esquema simplificado: modelo da corrosão da armadura do concreto (CEB, 1984).



Fonte: POSSAN (2010).

3. PREVISÃO DA VIDA ÚTIL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

3.1. NÍVEIS DE MODELAGEM

Helene (2004) apresenta e descreve os quatro principais métodos de análise da durabilidade das estruturas como:

- Com base nas experiências anteriores

Presente desde as primeiras normas sobre estruturas de concreto armado, no início do século XX. Consiste em abordar a durabilidade de forma qualitativa, especificando certas exigências construtivas para assegurar a vida útil. Baseia-se em resultados anteriores, não oferecendo informações sobre a vida útil das estruturas.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda adota como principal ferramenta esse método, deixando apenas como opcional o método determinista, mais avançado. Essa norma apresenta cobrimentos mínimos e qualidades mínimas do concreto de cobrimento, tendo por objetivo a durabilidade.

- Com base em ensaios acelerados

Método introduzido pelos americanos em 1978, na norma ASTM E 632 (ASTM, 1978). É considerado de difícil aplicação direta no projeto de estruturas de concreto. Entretanto, considerando a evolução de métodos de ensaio acelerados, o autor considera possível que, futuramente, venha a ser mais utilizado no projeto e construção de estruturas de concreto.

- Através de métodos deterministas

Permite a avaliação da vida útil expressa em número de anos e não mais em critérios apenas qualitativos de adequação da estrutura a certo grau de exposição. Ou seja, o maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos, gases e íons nos meios porosos, como o concreto, possibilitaram

associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos.

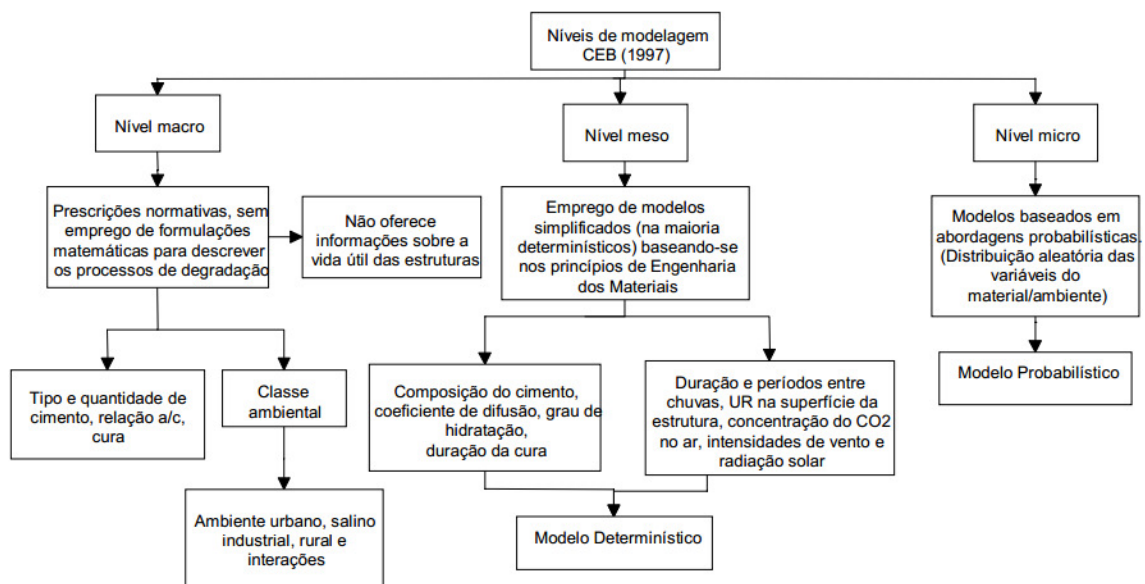
- Através de métodos estocásticos ou probabilistas

Mais realístico, nele, admite-se distribuições normais para as ações agressivas e log-normal ou normal para as resistências da estrutura a essas ações de deterioração. Assim como nos métodos anteriores, também há níveis de profundidade dos estudos. Os mais simples combinam métodos deterministas com probabilistas. Os intermediários consideram teoria das falhas e os mais aprofundados consideram o conceito de risco, considerando o custo do prejuízo causado.

Através deste método pode-se encontrar a espessura de cobrimento adequada para conferir certa probabilidade de ocorrência a uma determinada idade, por exemplo, o término da vida útil de projeto. Ou seja, é possível, por exemplo, determinar o cobrimento médio de concreto que deve ser adotado para que aos 50 anos de idade exista uma pequena probabilidade de a armadura apresentar-se despassivada.

Uma publicação do CEB (1997) *apud* Andrade (2001) sumariza as considerações relevantes aos níveis de modelagem de vida útil das estruturas de concreto (Figura 4).

Figura 4: Níveis de modelagem segundo o CEB (1997).



Fonte: ANDRADE (2001).

Para se tentar estabelecer um modelo confiável para predição da vida útil das estruturas, é necessária uma definição precisa do material e do meio ambiente, além de resultados de ensaios acelerados de durabilidade. Entretanto, os parâmetros intervenientes nas diversas formas de deterioração são difíceis de serem modelados. Isto devido ao seu elevado número e complexidade, à interação entre os mesmos, à variação de características do material com o tempo, como no caso da porosidade do concreto, e à grande correlação desses parâmetros com as condições climáticas, de modelagem complexa. Além disso, a obtenção de dados de campo apresenta um custo elevado, pois a quantidade de dados necessária para minimizar a grande variabilidade existente no processo é alta (MEHTA, 1994, apud ANDRADE, 2001).

Assim, apesar dos avanços ocorridos nesta linha de pesquisa, determinados modelos ainda são complexos, pouco práticos e de utilidade discutível. Ademais, mais trabalhos devem ser realizados a fim de validar esses modelos.

3.2. CONTAMINAÇÃO POR ÍONS CLORETOS

Entre as fontes mais comuns de contaminação de cloretos no concreto estão aditivos ou agregados contaminados e a penetração de soluções de sais de degelo

ou de água do mar através do cobrimento, que funciona como uma proteção física, dificultando a entrada de agentes agressivos externos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Andrade (1992), ainda que os cloretos livres solúveis em água sejam os únicos que podem provocar a corrosão nas armaduras, é adequado também determinar o teor de cloretos totais, uma vez que parte dos cloretos combinados podem ficar disponíveis provenientes da carbonatação ou elevação de temperatura.

A difusão de cloretos ocorre devido à existência de um gradiente de concentração de cloretos entre a superfície exposta e a solução nos poros da matriz cimentícia. Frequentemente, modelos de penetração de cloretos consideram apenas este mecanismo de entrada (COSTA e APPLETON, 1999; STEWART e MULLARD, 2007; HASSAN *et al.*, 2010; SAASSOUH e LOUNIS, 2012; SHAFEI *et al.*, 2012; NOGUEIRA e LEONEL, 2013; MUTHULINGAM e RAO, 2014), entretanto, sua adoção considera um meio saturado e, assim, previsões para meios parcialmente saturados, sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, subestimam o fluxo de cloretos. A grande maioria dos modelos utiliza a 2ª lei de Fick (Equação 4) para consideração desse mecanismo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad 4)$$

Onde C é a concentração de cloretos na profundidade x, no tempo t e D é o coeficiente de difusão de cloretos.

Evidências experimentais mostram que a suposição sugerida por Crank (1975), na qual o coeficiente de difusão (D) é constante, não está correta. Esta variação do coeficiente de difusão no tempo leva a grandes implicações para previsões de longo prazo da penetração de cloretos e, assim, um valor constante pode levar a graves erros (COSTA e APPLETON, 1999).

Uma das soluções mais simples da segunda lei de Fick é a Equação 5, com concentração superficial constante e coeficiente de difusão dependente do tempo (GJORV, 2015).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \right] \quad 5)$$

Após o advento do computador digital, foi possível a resolução de grandes sistemas de equações e, assim, muitos métodos numéricos obtiveram utilidade prática, como é o caso do Método dos Elementos Finitos (MEF), um método numérico aproximado para solucionar equações diferenciais com boa precisão. Dessa forma, muitos trabalhos utilizam o MEF para resolver a Equação 4 (MARTÍN-PÉREZ, 1999; MEIJERS *et al.*, 2001; LIN *et al.*, 2010; SHAFEI *et al.*, 2012; TAVARES, 2013; MUTHULINGAM e RAO, 2014). Em alguns trabalhos, o período de iniciação é modelado através de um conjunto de três equações diferenciais parciais, que descrevem o transporte de calor, umidade e cloretos no concreto (MARTÍN-PÉREZ, 1999; MEIJERS *et al.*, 2001; MEIJERS *et al.*, 2005; LIN *et al.*, 2010; SHAFEI *et al.*, 2012; MUTHULINGAM e RAO, 2014).

3.2.1. Coeficiente de difusão

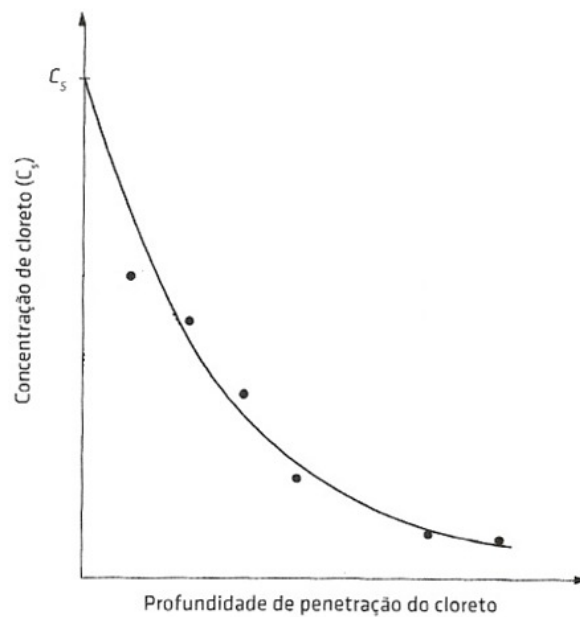
Geralmente, o coeficiente de difusão é determinado a partir de um coeficiente de referência, medido em laboratório e influenciado por vários parâmetros internos - dosagem, cura, composição química do aço e concreto (SHAFEI *et al.*, 2012) -, multiplicado por uma série de funções multiplicativas. Na maioria dos trabalhos essas funções modelam a influência da temperatura, da umidade relativa e do tempo de exposição (MARTÍN-PÉREZ, 1999; HASSAN *et al.*, 2010; LIN *et al.*, 2010; SHAFEI *et al.*, 2012; PPAKONSTANTINO e SHINOZUKA, 2013; TAVARES, 2013; MUTHULINGAM e RAO, 2014), resultando em uma equação na forma da Equação 6.

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad 6)$$

Onde $D_{c,ref}$ é o coeficiente de difusão de referência, medido à temperatura e idade especificados, $f_1(T)$ considera a influência da temperatura, $f_2(te)$ do grau de hidratação e $f_3(h)$ da umidade relativa dos poros.

O coeficiente de difusão também pode ser obtido com base na análise de regressão de dados observados de penetração de cloreto (Figura 5), obtidos de ensaios em estruturas existentes.

Figura 5 - Análise de regressão dos dados de penetração do cloreto observados em certo período de exposição.



Fonte: Gjorv (2015).

i. Efeito da temperatura

O efeito da temperatura no coeficiente de difusão é, geralmente, estimado através da equação de Arrhenius (Equação 7), que expressa a variação da velocidade de uma reação química com a temperatura.

$$f_1(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad 7)$$

Onde U é a energia de ativação do processo de difusão de cloretos (kJ/mol), R é a constante dos gases (kJ/K . mol), T_{ref} é a temperatura de referência na qual o coeficiente de difusão foi medido (K) e T é a temperatura no concreto (K).

A sensibilidade térmica de uma reação é indicada pela energia de ativação, que é a quantidade de energia necessária para que uma reação ocorra. Reações com grandes valores de U são lentas, enquanto reações com valores pequenos de energia de ativação são rápidas. Page *et al.* (1981) sugere valores para a energia de ativação do processo de difusão em pastas de cimento de 41,8 +- 4,0 , 44,6 +- 4,3 e 32,0 +- 2,4 para relações água/cimento de 0,4 , 0,5 e 0,6, respectivamente.

Poucos dados de energia de ativação estão disponíveis na literatura. Dos estudos realizados, a maior parte não utiliza concretos, mas sim pastas de cimento. Além disso, há grande variação nos valores obtidos, sendo as diferenças entre os métodos utilizados para medir os coeficientes de difusão um dos fatores responsáveis. Dousti *et al.* (2013) apresentam estudos da energia de ativação da difusão de cloretos já efetuados ao longo das últimas décadas e analisa a influência da temperatura de exposição na difusão de cloretos em concretos contendo sílica ativa e zeolita natural, concluindo que a energia de ativação varia também de acordo com as adições empregadas.

ii. Efeito do tempo de exposição

O envelhecimento do concreto, a depender do tipo de cimento, leva a uma queda significativa no coeficiente de difusão com o tempo devido à hidratação do cimento e, portanto, desconsiderar esse mecanismo pode levar a previsões muito conservadoras do tempo de corrosão (ANDRADE *et al.*, 2011). A dependência com o tempo pode ser considerada através da Equação 8:

$$f_2(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^\alpha \quad 8)$$

Onde t_{ref} é o tempo no qual foi determinado o coeficiente de difusão de referência (s), t é o tempo de exposição (s) e α é o fator de redução com a idade. Bamforth (1998) *apud* Martín-Pérez (1999) propõe valores de α de 0,264 para concretos de cimentos Portland comum, 0,699 para concretos com cinzas volantes e 0,621 para concretos com escória granulada de alto-forno. Vale

ressaltar que, para aumentar a confiabilidade das previsões de vida útil, são necessários mais estudos abordando o fator de redução “ α ” para diversos tipos e teores de adições.

iii. Efeito da umidade

O efeito da umidade no coeficiente de difusão tem grande importância uma vez que o processo de difusão só ocorre na presença de água nos poros. Assim, Saetta *et al.* (1993) *apud* Martín-Pérez (1999) propõe que a redução na difusividade com a perda de umidade pode ser expressa por:

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1+h_c)^4} \right]^{-1} \quad 9)$$

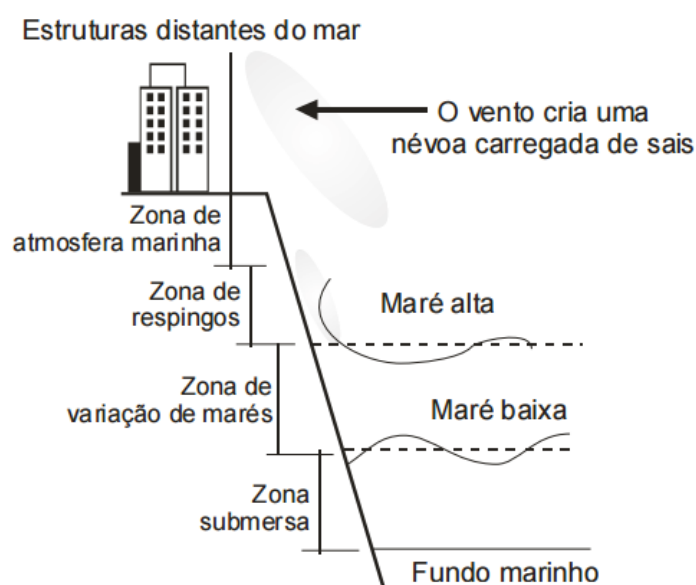
Onde h é a umidade relativa nos poros do concreto e h_c é a umidade na qual D_c cai para o valor intermediário entre seu valor máximo e mínimo, Bazant e Najjar (1971) *apud* Martín-Pérez (1999) assume este valor como 0,75 para o concreto em secagem.

3.2.2. Concentração superficial

A concentração superficial de cloretos é comumente considerada como um valor constante, entretanto, Costa e Appleton (1999) salientam que ela é variável no tempo e esta aproximação pode ocasionar grandes erros para previsões de longo prazo. De fato, Andrade *et al.* (2006) demonstram a importância da concentração superficial comparando oito modelos de difusão, cinco numéricos e três analíticos. Os resultados indicam que a concentração superficial assume papel muito mais significativo do que o coeficiente de difusão, tema que costuma atrair um número muito maior de estudos, o que está em consonância com as análises paramétricas realizadas por Hassan *et al.* (2010) e Stewart e Mullard (2007). Os autores concluem afirmando que um fator crucial é ter uma lei de evolução da concentração superficial consistente.

Além disso, é também de grande importância a definição da condição de exposição (Figura 6), uma vez que um concreto em área constantemente submersa pode atingir um equilíbrio, mantendo constante sua concentração superficial de cloretos e que esta concentração em estruturas em contato com água do mar segue a seguinte ordem: zona de maré > zona de respingos > zona atmosférica (COSTA e APPLETON, 1999; LIMA *et al.*, 2006; ANN *et al.*, 2009). Já a qualidade do concreto, ao contrário das condições de exposição, não afeta significativamente a concentração superficial de cloretos (COSTA e APPLETON, 1999).

Figura 6 - Distintas zonas de agressividade às estruturas de concreto.



Fonte: Adaptado de Lima et al. (2006).

Uji *et al.* (1990) propõem uma expressão para a condição de contorno em que a concentração superficial tende a aumentar com o tempo de serviço da estrutura, de acordo com uma função linear da raiz da idade do concreto, ou seja:

$$C_s = S\sqrt{t} \quad [\% \text{ do peso do concreto}] \quad 10)$$

Onde S é um coeficiente dependente do tipo de estrutura e zona de exposição ($1/\sqrt{s}$) e t é o tempo de exposição (s). Os intervalos de valores encontrados pelos autores para S foram de $(5.31-16.6 \times 10^{-6} \text{ } 1/\sqrt{s})$ para a zona de

respingos, $(18.2\text{--}23.5 \times 10^{-6} \text{ 1}/\sqrt{\text{s}})$ para a zona de maré e $(1.56\text{--}5.57 \times 10^{-6} \text{ 1}/\sqrt{\text{s}})$ para a zona atmosférica.

Em outra abordagem, proposta por Collins e Grace (1997), após um aumento inicial, a concentração superficial atinge um valor limite, tornando-se constante (Equação 11). Segundo os autores, a magnitude deste limite está relacionada com o sistema cimentício e com a porosidade da camada superficial.

$$C_s = C_s^{ult} \cdot \frac{t}{t + T_{Cs}} \quad [\% \text{ do peso do concreto}] \quad 11)$$

Onde $C_{s,ult}$ é a concentração superficial final, constatada pelos autores como 0,6% para um concreto de cimento Portland comum, com uma relação água cimento de 0,4 e teor de cimento de 450 kg/m³, t é o tempo de exposição (dias) e T_{Cs} é um parâmetro que regula a taxa de acúmulo de cloretos na superfície do concreto (dias).

Ann *et al.* (2009) analisaram quatro aproximações para a concentração superficial: como um valor constante, como uma evolução linear, como uma evolução proporcional à raiz quadrada do tempo e como uma evolução proporcional à raiz quadrada do tempo com um valor inicial diferente de zero. Como resultado desta análise, foi evidenciado que o modelo constante resulta em altas concentrações de cloreto para pequenas idades, enquanto as aproximações com incremento exibem baixa taxa de ingresso de cloretos para pequenas idades e concentrações mais elevadas do que as reais para períodos longos de tempo, quando ultrapassam o valor do modelo não dependente do tempo. Ademais, os autores observam que, imediatamente após a exposição, certa concentração de cloretos (2.0–2.5% em relação à massa de cimento) é forçada para a camada superficial, porém, os três primeiros modelos não contemplam este valor inicial, sendo necessário um ajuste, resultando no quarto modelo, que gera previsões mais realistas do tempo para corrosão (Equação 12).

$$C_s = C_0 + k\sqrt{t} \quad [\% \text{ peso de cimento}] \quad 12)$$

Onde k é a constante sob uma condição de acúmulo linear, t o tempo de exposição e C_0 é o acúmulo inicial de cloretos na superfície.

Song *et al.* (2008) também apresentam modelo que considera um acúmulo inicial de cloretos na superfície que, em seguida, aumenta com o tempo de exposição, a partir da Equação 13.

$$C_s = C_0 + \alpha \ln t \text{ [% peso de cimento]} \quad 13)$$

Onde C_0 é a concentração superficial em um tempo determinado (*e.g.* 28 dias) e α um valor constante determinado pelos autores como $0.977\%/\exp(\text{ano})$ para os dados utilizados.

3.2.3. Concentração limite de cloretos

A concentração limite de cloretos pode ser definida como a concentração necessária para a despassivação da armadura. Apesar de haver muitos estudos nesse tema, não há um valor preciso, sendo encontrada grande dispersão entre os valores na literatura. Um dos motivos para tanto é a dependência deste limite em muitos parâmetros, como: composição do cimento e sua capacidade de combinar cloretos, uso de adições minerais, relação água/cimento, cura, grau de hidratação, pH da solução dos poros, características do aço, condição da interface aço/concreto, umidade, presença de oxigênio, temperatura, procedimentos experimentais adotados, fonte da penetração de cloretos, entre outros.

Outra dificuldade para a definição de um valor limite é a discordância quanto à representação do mesmo. Embora a relação Cl^-/OH^- leve em consideração o papel inibitivo dos hidróxidos e, portanto, seja considerada uma maneira mais precisa de expressar a concentração crítica de cloretos, há uma dificuldade em medir a concentração de OH^- no concreto. Então, por serem de mais fácil determinação, as representações a partir da concentração de cloretos livres e total por massa de cimento são largamente empregadas.

Alonso *et al.* (2000) encontraram valores de $1,24 \pm 3,08\%$ e $0,39 \pm 1,16\%$, por massa de cimento, para conteúdo total de cloretos e cloretos livres, respectivamente, e na faixa de $1,17 \pm 3,98$ para relação Cl-/OH-. Glass e Buenfeld (1997), a partir de análise na literatura, reportam valores de 0,17 a 2,5% para quantidade total de cloretos em relação à massa de cimento.

Entretanto, não são numerosos os estudos em campo, sendo estes geralmente realizados em laboratório. Assim, resultam, geralmente, valores críticos maiores do que os que seriam obtidos em experimentos nas condições de exposição de campo. Meira *et al.* (2014) encontraram que a concentração limite em relação ao total de cloretos varia entre 1,82 e 2,45 (% da massa de cimento) e entre 0,88 e 1,58 (% da massa de cimento) para experimentos em laboratório e em campo, respectivamente. Contudo, os autores afirmam que essa diferença entre resultados de laboratório e campo podem ser representadas por uma correlação linear e, assim, seria possível extrapolar resultados de experimentos em laboratório, que requerem menor tempo, para condições de exposição de campo.

Diante da grande variabilidade de resultados, a tendência é que sejam adotados valores conservadores com o objetivo de atender à maioria dos casos. Nesse sentido, para estruturas em concreto armado, Durar (1997) *apud* Figueiredo e Meira (2013) apresenta um limite de 0,4% de cloretos totais, em relação à massa de cimento, e EHE (2008) orienta, para condições normais, a adoção de um valor de 0,6% de cloretos totais em relação à massa de cimento. Entretanto, vale ressaltar que a concentração crítica de cloretos deverá ser estabelecida de acordo com as características particulares de cada estrutura.

A Tabela 1 apresenta os limites de cloretos totais permitidos no concreto por algumas Normas Internacionais, citada por Helene (1993).

Tabela 1: Limites de normas para teor total de concreto.

País	Norma	Limite Máximo de Cloretos		Referente a (ao)
		Concreto armado	Concreto protendido	
Brasil	NBR 6118	0,05%	–	Água de amassamento
	NBR 7197	–	0,05%	
	NBR 9062	–	0,05%	
Espanha	EH - 88	0,40%	–	Cimento
	EP - 80	–	0,10%	
Estados Unidos	ACI - 222	0,20%	0,08%	Cimento
	ACI - 201	0,20%	0,08%	
	ACI - 318	0,30% ambiente normal 0,15% ambiente com cloreto 1,0% ambiente seco	0,06%	
Europa	CEB	0,05%	0,025%	Concreto
	CEB-FIP	0,4%	0,20%	Cimento
	ENV 206	1,0% concreto simples 0,40% concreto armado	0,20%	
Japão	JSCE SP-2	0,60 kg/m ³	0,30 kg/m ³	Concreto

Fonte: HELENE (1993).

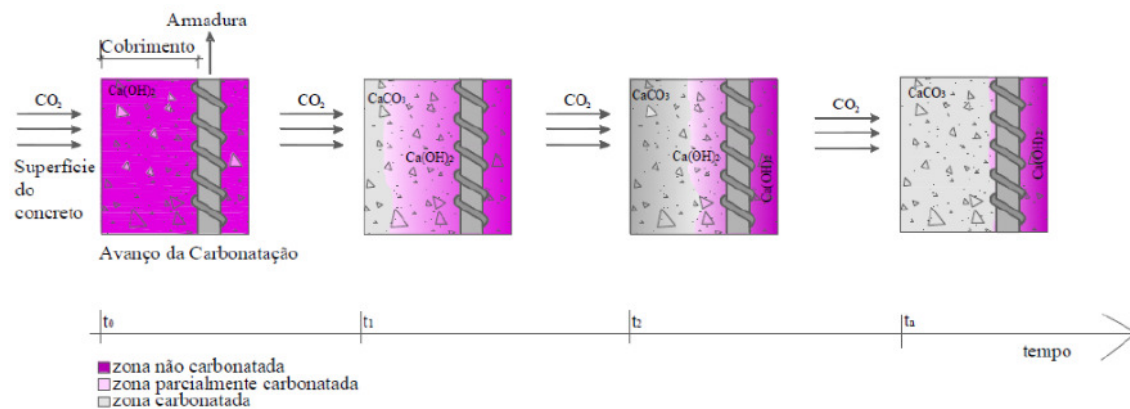
3.3. CARBONATAÇÃO

As reações de hidratação do cimento Portland produzem cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H), em torno de 70% de seu volume, responsáveis pela resistência do concreto, que são resistentes e insolúveis na presença de água. Além disso produzem o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂), estes relativamente solúveis em água corrente.

O concreto produzido com o cimento Portland comum é bastante alcalino, apresentando um pH > 12, situação que auxilia na proteção de corrosão das armaduras, exceto no caso de ataque por cloretos. Nessas condições se diz que as armaduras se encontram passivadas, com importante depósito sobre suas superfícies de hidróxidos de sódio, potássio e, principalmente, cálcio e magnésio. Sabe-se que o ar é composto por diversos gases, ou seja, oxigênio, nitrogênio, gás carbônico e outros de menor proporção. Com a penetração de ar nos poros do concreto, através de fissuras ou em espaços oriundos da lixiviação da cal hidratada, ocorre o contato do CO₂ do ar com o Ca(OH)₂ e o Mg(OH)₂. Em meio úmido, ocorrem reações químicas que darão origem ao carbonato de cálcio (CaCO₃) e o carbonato de magnésio (MgCO₃). A transformação dos hidróxidos em carbonatos recebe o nome de carbonatação.

Este processo causa a redução brusca do pH do concreto, a níveis abaixo de 9, onde a camada passivadora começa a se desmanchar e consequentemente reduz a proteção das armaduras, criando condições favoráveis ao início do processo corrosivo (Figura 7).

Figura 7: Representação do avanço de carbonatação no tempo.



Fonte: Adaptado de POSSAN (2010).

A velocidade de carbonatação depende principalmente da temperatura e umidade relativa do ar, porosidade e incidência de fissuras no concreto, tipo de meio ambiente/teor de CO_2 do ar. Como as reações de carbonatação dependem da presença de água e de oxigênio, a frente de carbonatação avançará com maior velocidade nos casos em que os poros possam estar parcialmente ocupados por ar e parcialmente por água.

De acordo com Possan (2010), a tendência mundial de aumento das emissões de CO_2 na atmosfera, traz consequências diretas às estruturas de concreto em ambiente urbano. Isso porque a profundidade de carbonatação aumenta com a elevação do CO_2 no meio ambiente, que afeta diretamente o ciclo de vida das estruturas e reduzindo a durabilidade e vida útil das mesmas.

Segundo o modelo de TUUTTI (1982), a estimativa de carbonatação dos concretos pode ser efetuada pela equação convencional da raiz quadrada do tempo, que é uma simplificação da primeira lei de Fick, mostrada na equação 14.

$$e_c = k\sqrt{t} \quad (14)$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação (mm);

k = coeficiente de carbonatação, que depende da difusividade do CO₂, do gradiente de concentração do CO₂ e da quantidade retida de CO₂, em mm/ano^{1/2};

t = tempo decorrido (anos).

4. METODOLOGIA

O programa da pesquisa será dividido em duas etapas:

- Desenvolvimento dos *softwares* (ação de cloretos e carbonatação) para predição do período de iniciação em estruturas de concreto armado; e
- Estudo de caso demonstrando a utilização dos *softwares* desenvolvidos.

4.1. SOFTWARE “PENETRA” (PENETRAÇÃO DE CLORETOS)

Esta seção fornece uma visão geral do *software* desenvolvido e apresenta o modelo utilizado. O programa foi desenvolvido utilizando Visual Basic for Applications (VBA) em ambiente Microsoft Excel. Possui interface amigável e janelas de entrada de dados que permitem a manipulação de todos os parâmetros considerados.

Os modelos matemáticos foram selecionados de forma a deixar o programa o mais simples possível, necessitando-se de poucos dados de entrada, que podem ser obtidos a partir de ensaios rápidos e de baixo custo.

A difusão ocorre devido à existência de um gradiente de concentração de cloretos entre a superfície exposta e a solução nos poros da matriz cimentícia. Este trabalho emprega um modelo de penetração de cloretos em estruturas de concreto armado por difusão, baseado na 2ª Lei de Fick, através da solução apresentada na Equação 5. Este modelo prevê a evolução da concentração de cloretos com o tempo, assim como o tempo necessário, em determinada situação, para que o limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido.

Este modelo considera a concentração superficial como constante no tempo e o coeficiente de difusão dependente dele. Assim, o modelo proposto possibilita, além da escolha de um coeficiente de difusão constante, a consideração do efeito do tempo de exposição (grau de hidratação), através da Equação 8.

Os principais dados de entrada do *software* são o coeficiente de difusão (D), a concentração superficial (Cs) e o coeficiente de influência da idade (α). Tais parâmetros são determinados automaticamente através de análise de regressão dos perfis de cloreto obtidos de ensaios em estruturas existentes. Esta análise é feita automaticamente pelo *software* ao inserir-se os dados dos perfis. Para os valores de concentração de cloretos dados em % de peso de concreto, seu equivalente em peso de cimento pode ser obtido a partir do teor de cimento no concreto (kg/m³), segundo a Equação 15.

$$C_s (\% \text{ de peso de cimento}) = C_s (\% \text{ de peso de concreto}) \cdot (2300 / \text{teor de cimento (kg/m}^3)) \quad 15)$$

A qualidade do ajuste realizado pelo *software* pode ser verificada através da análise de resíduos e do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, ambos disponíveis na janela do programa.

4.1.1. Interface “Penetra”

O programa possui uma interface amigável e possibilita a rápida resolução de problemas com variados parâmetros de material e condições ambientais. Para tanto, segue-se os seguintes passos:

- Entrada de dados de perfis de cloreto e determinação dos parâmetros principais;
- Verificação da qualidade do ajuste;
- Geração de relatório / Pós-processo.

i. Janela inicial

A Figura 8 exibe a janela inicial do programa e os campos para entrada de dados. O coeficiente de difusão, a concentração superficial e o coeficiente de influência da idade podem ser inseridos neste momento ou pode-se escolher “obter valores a partir de perfil de cloretos”.

Figura 8 - Software - Janela inicial.

PENETRA		X
PROJETO:		
PEÇA:		COORD.:
RESP.:		DATA:
Coef. de difusão (D) e Concentração superficial (Cs) D: m²/s Cs: % peso de cimento ☐ Obter valores a partir de perfil de doretos Efeito do tempo (alfa) alfa: 0 ☐ Obter valor a partir de perfil de doretos ☐ Desconsiderar		
Cobrimento:		cm
Concentração crítica:		% peso de cimento
Vida útil de projeto:		anos
Limpar Gerar Relatório		

ii. Perfis de cloreto

Ao se selecionar a opção “obter valores a partir de perfil de cloretos” a janela se expandirá, adotando a forma apresentada na Figura 9. Nesta janela é possível adicionar ou remover um perfil e verificar a qualidade do ajuste da curva através de análise de resíduos.

Figura 9 - Software - Perfil de cloretos.

PROJETO:

PEÇA:

RESP.:

COORD.:

DATA:

Coef. de difusão (D) e Concentração superficial (Cs)

D:

m²/s

Cs:

% peso de cimento

☒ Obter valores a partir de perfil de cloretos

Efeito do tempo (alfa)

alfa:

0

☐ Obter valor a partir de perfil de cloretos

☐ Desconsiderar

Cobrimento:

cm

Concentração crítica:

% peso de cimento

Vida útil de projeto:

anos

Limpar

Gerar Relatório

PERFIL DE CLORETOS

ID	IDADE	X1	C1	X2	C2	X3	C3	X4
Adicionar Perfil Remover Perfil Análise de resíduos								

Ao escolher a opção “Adicionar Perfil”, será exibida a janela apresentada na Figura 10. Nesta, deve-se informar a idade da estrutura no momento do ensaio, a unidade das concentrações obtidas e os valores de concentração encontrados para cada profundidade do cobrimento. A análise de regressão para determinação do coeficiente de difusão e da concentração superficial é feita utilizando o método dos mínimos quadrados. Este método requer uma estimativa inicial desses parâmetros. Assim, com base nos dados inseridos, o software adotará valores iniciais para o coeficiente de difusão e para a concentração superficial, de modo a facilitar a convergência da análise de regressão.

Figura 10 - Software - Adicionar Perfil de Cloretos.

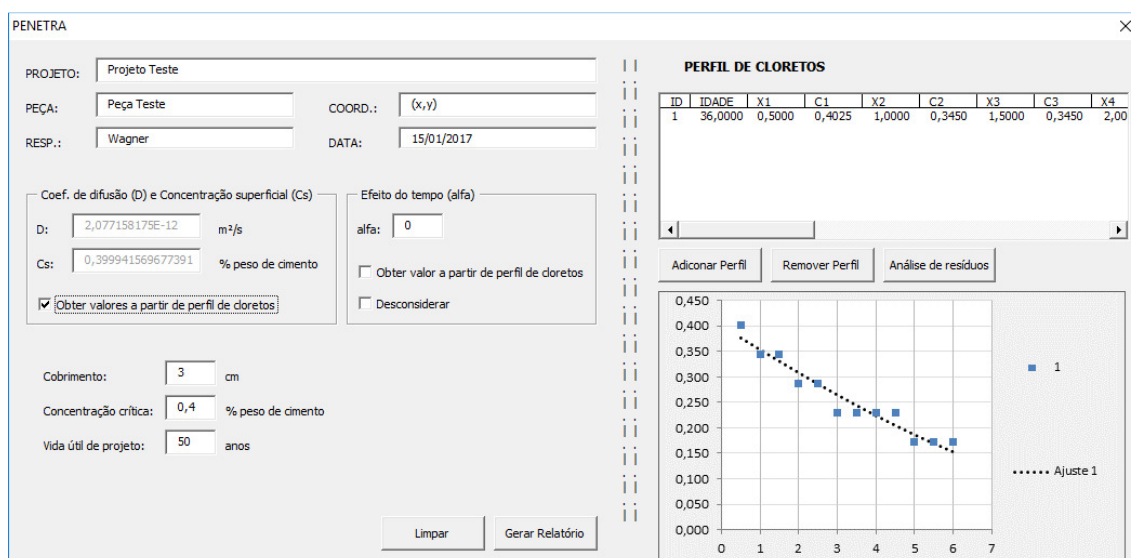
The dialog box titled "Adicionar Perfil de Cloretos" contains the following elements:

- Idade:** A text input field followed by the label "anos".
- Unidade da concentração de cloretos:** A group box containing two radio buttons:
 - ☒ % peso de cimento
 - ☐ % peso de concreto
- Depth-Concentration Pairs:** A list of 12 pairs of input fields, each labeled from x1 to x12 (depth in cm) and C1 to C12 (concentration in %).

Label	Unit	Label	Unit
x1:	cm	C1:	%
x2:	cm	C2:	%
x3:	cm	C3:	%
x4:	cm	C4:	%
x5:	cm	C5:	%
x6:	cm	C6:	%
x7:	cm	C7:	%
x8:	cm	C8:	%
x9:	cm	C9:	%
x10:	cm	C10:	%
x11:	cm	C11:	%
x12:	cm	C12:	%
- Estimativa inicial:** A group box containing two input fields:
 - D: [] cm²/ano
 - Cs: [] %
- Adicionar:** A button at the bottom right of the dialog box.

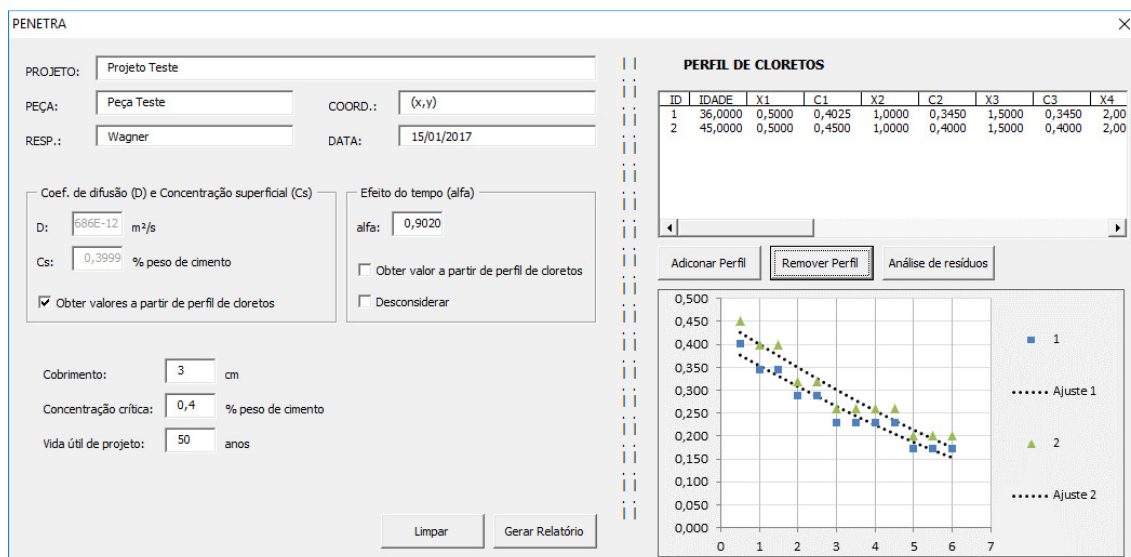
Para cada perfil adicionado, o programa irá plotar no gráfico os pontos medidos e a curva ajustada para esses pontos (Figura 11). Os valores de coeficiente de difusão e concentração superficial encontrados estarão informados nos campos “D” e “Cs”, à esquerda.

Figura 11 - Software - Pontos medidos e Curva ajustada.



Caso o número de perfis adicionados seja igual ou superior a dois, o coeficiente de influência da idade (α) será determinado, também através do método dos mínimos quadrados (Figura 12).

Figura 12 - Software - 2 ou mais perfis adicionados.

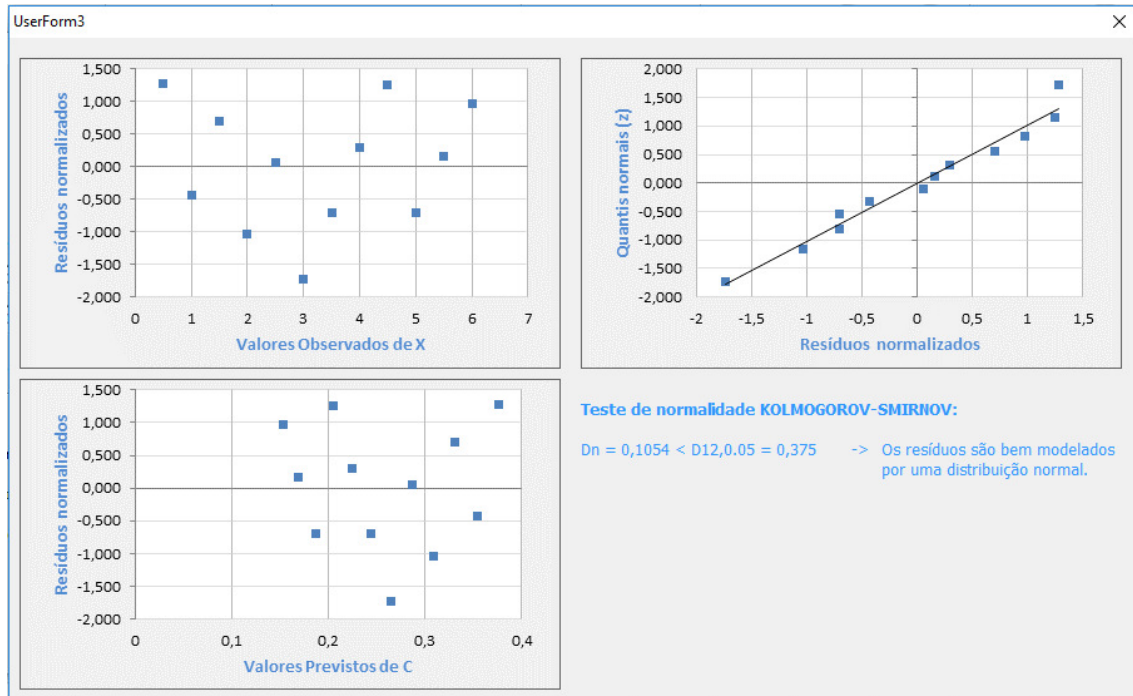


iii. Qualidade do ajuste

O programa disponibiliza duas formas de verificar a qualidade do ajuste obtido. Ao selecionar um dos perfis de cloreto adicionados e escolher a opção “Análise de resíduos” a janela apresentada na Figura 13 será exibida. Nesta janela estão disponíveis 3 gráficos para análise de resíduos e o resultado do teste

de normalidade Kolmogorov-Smirnov, que indica se os resíduos são bem modelados por uma distribuição normal.

Figura 13 - Software - Análise de Resíduos.



iv. Relatório

Ao fim da entrada de dados é possível gerar o relatório final. Neste relatório estará disponível um resumo de todas as informações fornecidas, os valores de coeficiente de difusão, concentração superficial e coeficiente de influência da idade encontrados e, por fim, uma análise da estimativa de vida útil da estrutura.

O pós-processo consiste basicamente de dois gráficos. O primeiro com o tempo no eixo das abscissas e a concentração de cloretos no eixo das coordenadas. Este gráfico permite determinar quando a concentração de cloretos atingirá o valor limite, caracterizando a despassivação da armadura e o final da vida útil da estrutura. O segundo gráfico apresenta a profundidade no eixo das abscissas e a concentração de cloretos, após a vida útil de projeto informada pelo usuário, no eixo das coordenadas. Ou seja, este gráfico traz o perfil de cloretos estimado para uma determinada vida útil. Através dele pode-se observar qual

seria o cobrimento adequado para aquela vida útil de projeto e, principalmente, quando deverão ser feitas intervenções na estrutura.

Um exemplo de relatório completo será apresentado no estudo de caso presente no próximo capítulo.

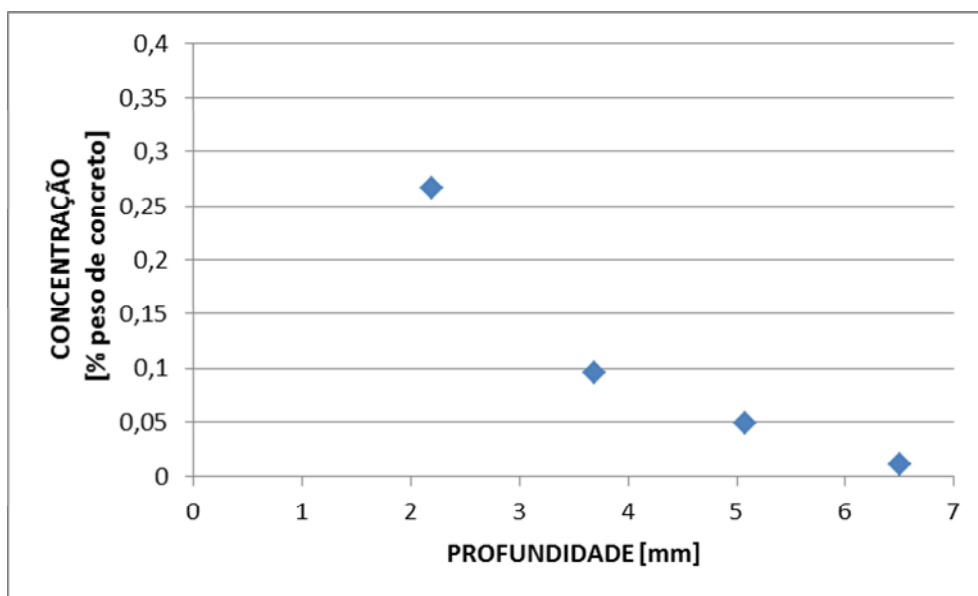
4.2. ESTUDO DE CASO (PENETRAÇÃO DE CLORETOS)

Para demonstrar a utilização do programa, adotou-se um perfil de cloreto (amostra 30N) apresentado por Costa *et al.* (2013). O ensaio foi realizado em uma plataforma petrolífera *offshore* em ambiente marinho e clima tropical, após 25 anos de serviço. Os dados de concentração de cloretos são apresentados na Tabela 2 e na Figura 14.

Tabela 2 - Estudo de caso - Perfil de cloretos.

x (mm)	C (%)
2,19	0,267
3,69	0,0962
5,08	0,0491
6,5	0,0107

Figura 14 - Estudo de caso - Perfil de cloretos.



Segundo o autor, o cobrimento mínimo das armaduras é de 5 centímetros e o teor de cimento médio é de 526 kg/m³.

4.3. SOFTWARE “CARBONA” (CARBONATAÇÃO)

Assim como o “Penetra”, o *software* “Carbona” também foi desenvolvido em VBA, no Microsoft Excel. Sua interface é simples e direta, com apenas uma janela de entrada de dados e um botão para o cálculo que gera o relatório final.

Os dados de entrada podem ser obtidos facilmente através de ensaios rápidos, como o Ensaio de Carbonatação por aspersão de fenolftaleína. Vale ressaltar que este programa analisa somente a carbonatação, excluindo outros fatores, como os cloretos, por exemplo.

O coeficiente de carbonatação k empregado na Equação 14, em geral, é obtido a partir de uma verificação da estrutura em um dado tempo t . Então, assume-se esse coeficiente como constante no tempo, fazendo a previsão da profundidade carbonatada.

São necessários apenas três dados de entrada para obtenção de uma estimativa: a idade da estrutura em anos (t), a profundidade carbonatada da estrutura em mm (e_c) e uma estimativa do coeficiente de carbonatação em $\text{mm/ano}^{1/2}$ (k).

Como o modelo utilizado é de formulação simples, não é analisada a qualidade do ajuste realizado pelo software.

4.3.1. Interface “Carbona”

“Carbona” possui interface amigável e pode ser utilizado rapidamente com a inserção de apenas um perfil de carbonatação.

i. Janela inicial

A Figura 15 exibe a janela inicial do programa e os campos para entrada de dados. A idade, a profundidade de carbonatação e a estimativa do coeficiente de carbonatação são inseridos quando se adiciona um perfil.

Figura 15 – Software Carbona - Janela inicial.

CARBONA - Previsão de vida útil devido à carbonatação. X

PROJETO:

RESPONSÁVEL: DATA:

PEÇA: COORDENADAS:

PERFIL DE CARBONATAÇÃO

ID	IDADE	Ec1	Ec2	Ec3	Ec4	Ec5	Ec6	Ec7	Ec8	Ec9	Ec10	Medidas	Ec

Adicionar Perfil Remover Perfil

COBRIMENTO DE CONCRETO: mm

Calcular

Coef k de carbonatação
Vida útil de projeto

Sair

ii. Perfis de carbonatação

Ao clicar em “Adicionar Perfil”, uma janela se abrirá (Figura 16), sendo possível inserir um novo perfil de carbonatação com os dados descritos anteriormente. Assim como no “Penetra”, a análise de regressão para determinação do coeficiente de carbonatação é feita utilizando o método dos mínimos quadrados.

Figura 16 – Software Carbona - Perfil de carbonatação.

Perfil de carbonatação

Idade: anos

Ec1: mm Ec6: mm

Ec2: mm Ec7: mm

Ec3: mm Ec8: mm

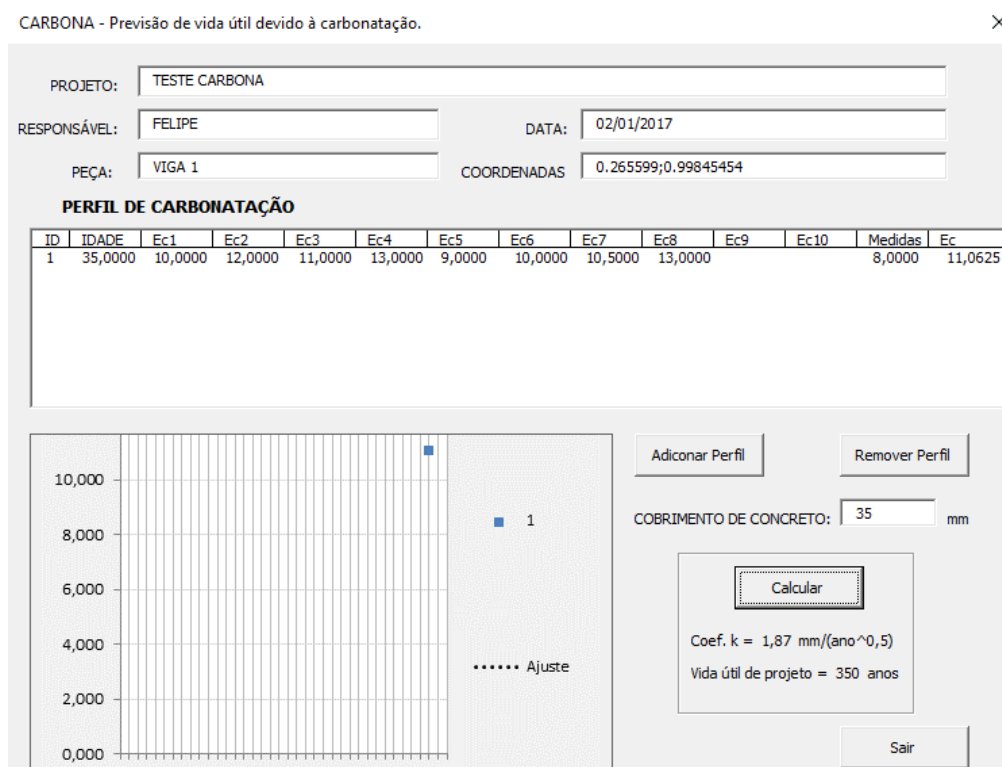
Ec4: mm Ec9: mm

Ec5: mm Ec10: mm

Coef. k estimado: mm/(ano^{0,5})

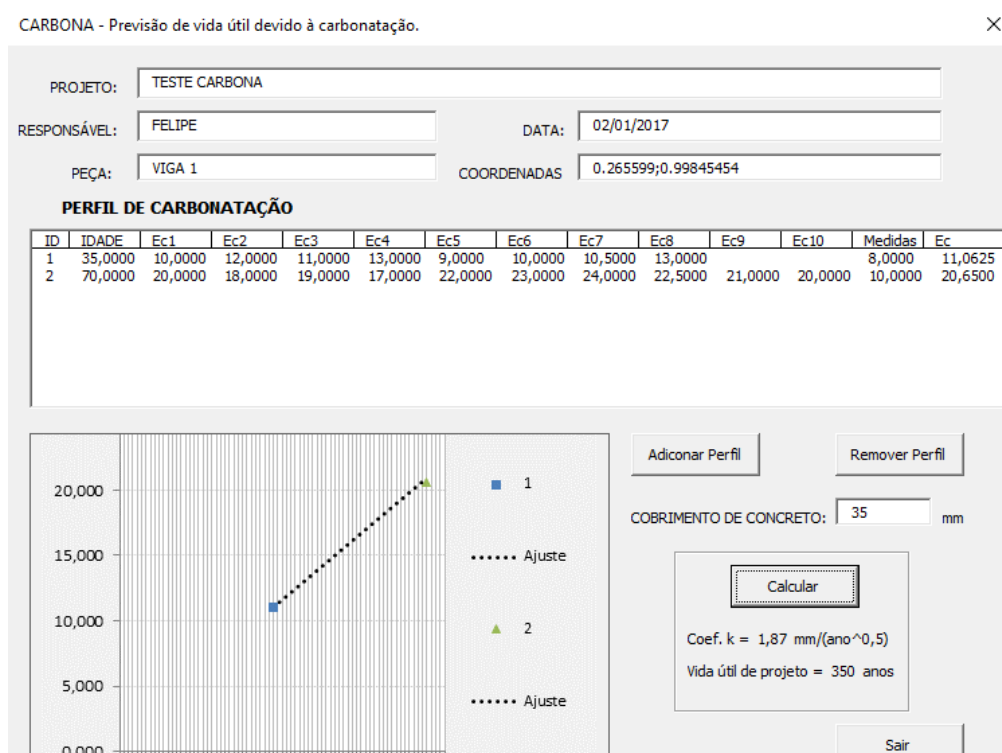
Para cada perfil adicionado, o programa irá plotar no gráfico a média das profundidades carbonatada de acordo com o tempo e a curva ajustada para essas medidas (Figura 17). Os valores de coeficiente de carbonatação e o tempo de vida útil restante será informado após inserir o cobrimento de concreto da estrutura, em mm, e, posteriormente, clicando em “Calcular”.

Figura 17 – Software Carbona - Pontos medidos e Curva ajustada.



O programa funciona com apenas um perfil inserido, porém, o ajuste de curva só é observado inserindo-se dois ou mais perfis (Figura 18).

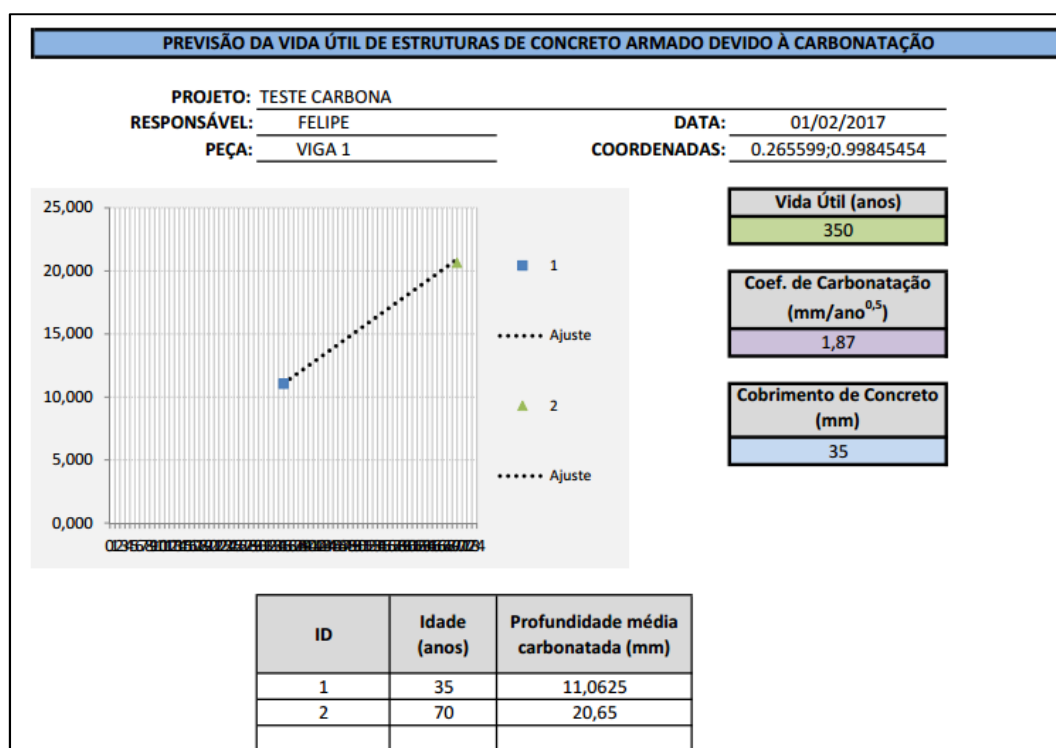
Figura 18 – Software Carbona - 2 ou mais perfis adicionados.



iii. Relatório

Ao clicar em “Calcular” é gerado automaticamente um relatório final (Figura 19), onde estará disponível um resumo de todas as informações fornecidas e os valores de coeficiente de carbonatação e uma estimativa de vida útil da estrutura. O relatório ainda possui o gráfico gerado no programa, onde tem-se o tempo no eixo das abscissas e a profundidade carbonatada média no eixo das ordenadas. Pode-se, então, determinar a vida útil da estrutura através do coeficiente k ou pelo gráfico quando for atingido o cobrimento de concreto da estrutura.

Figura 19 – Software Carbona – exemplo de relatório final.



4.4. ESTUDO DE CASO (CARBONATAÇÃO)

Para demonstrar a utilização do programa, adotou-se um perfil de carbonatação apresentado por Sahuinco (2011). O ensaio foi realizado em uma ponte no interior de Minas Gerais, após 8 anos de serviço. Os dados de carbonatação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estudo de caso - Perfil de carbonatação.

Área	Profundidade furo (mm)	e _{co2} min (mm)	e _{co2} max (mm)	e _{co2} médio (mm)
A1	37,00	9,50	12,60	11,05
A2	35,62	10,30	13,60	11,95
A3	33,55	5,89	11,36	8,63
A4	22,08	5,83	12,09	8,96
A5	70,00	13,41	14,01	13,71
A6	30,91	16,90	17,30	17,10
A7	29,80	8,20	11,51	9,86
A8	38,84	8,32	13,29	10,81
A9	31,25	10,10	15,15	12,63
A10	80,00	16,10	16,80	16,45
A11	67,00	13,70	13,93	13,82
Média				12,27

Segundo o autor, o cobrimento mínimo das armaduras é de 2,5 centímetros de um concreto com $f_{ck} > 16$ MPa e coeficiente de carbonatação de $3,96 \text{ mm/ano}^{1/2}$.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, são realizados estudos de casos para demonstrar o funcionamento dos softwares apresentados no capítulo anterior.

5.1. SOFTWARE “PENETRA” (PENETRAÇÃO DE CLORETOS)

A Figura 20 exibe os dados de entrada do perfil de cloreto utilizado. As concentrações estão em “% de peso de concreto” e serão convertidas automaticamente pelo programa para “% de peso de cimento”.

Figura 20 - Estudo de caso - Perfil de cloreto.

Adicionar Perfil de Cloretos

Idade: 25 anos

Unidade da concentração de cloretos

☐ % peso de cimento Teor de cimento:

☒ % peso de concreto 526 kg/m³

x1:	2,19 cm	C1:	0,267 %
x2:	3,69 cm	C2:	0,0962 %
x3:	5,08 cm	C3:	0,0491 %
x4:	6,5 cm	C4:	0,0107 %
x5:	cm	C5:	%
x6:	cm	C6:	%
x7:	cm	C7:	%
x8:	cm	C8:	%
x9:	cm	C9:	%
x10:	cm	C10:	%
x11:	cm	C11:	%
x12:	cm	C12:	%

Estimativa inicial

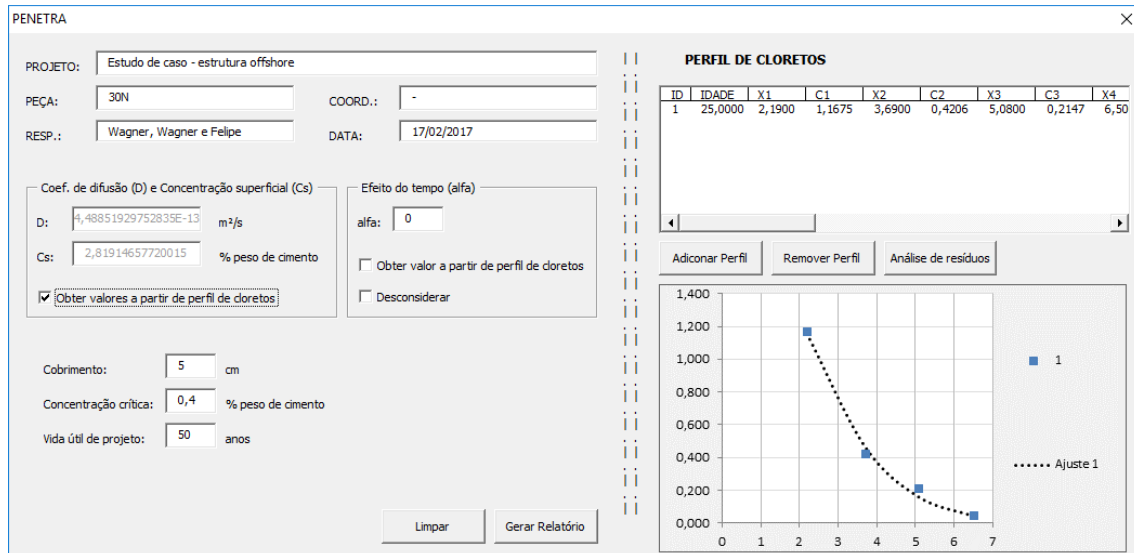
D: 0,4 cm²/ano Cs: 0,6 %

Adicionar

Podem-se observar, na Figura 21, todos os dados de entrada do programa. Como foi utilizado o perfil de cloreto em apenas uma idade (25 anos), o programa não pôde calcular a influência da idade no coeficiente de difusão,

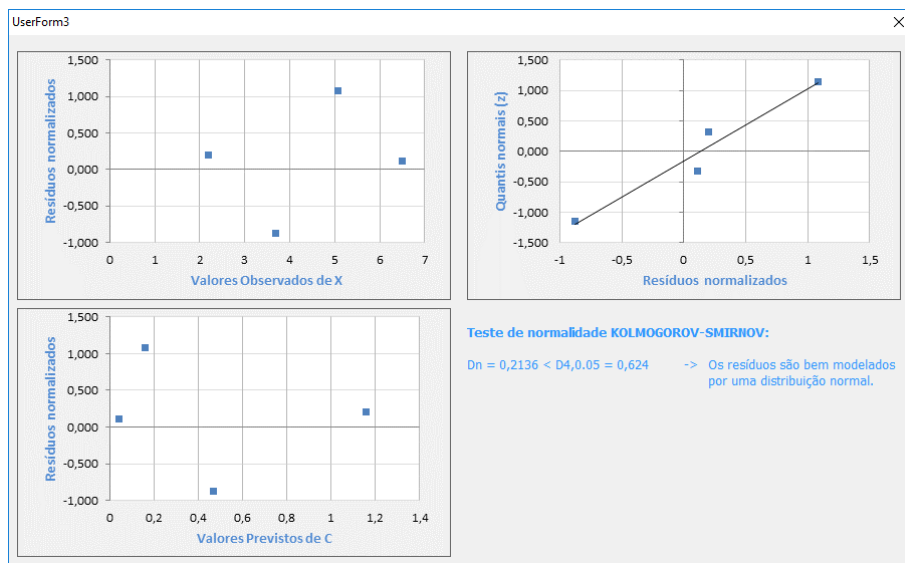
explícita através do coeficiente α . Desta forma, o coeficiente de difusão é considerado como constante ($\alpha=0$).

Figura 21 - Estudo de caso - Janela principal.



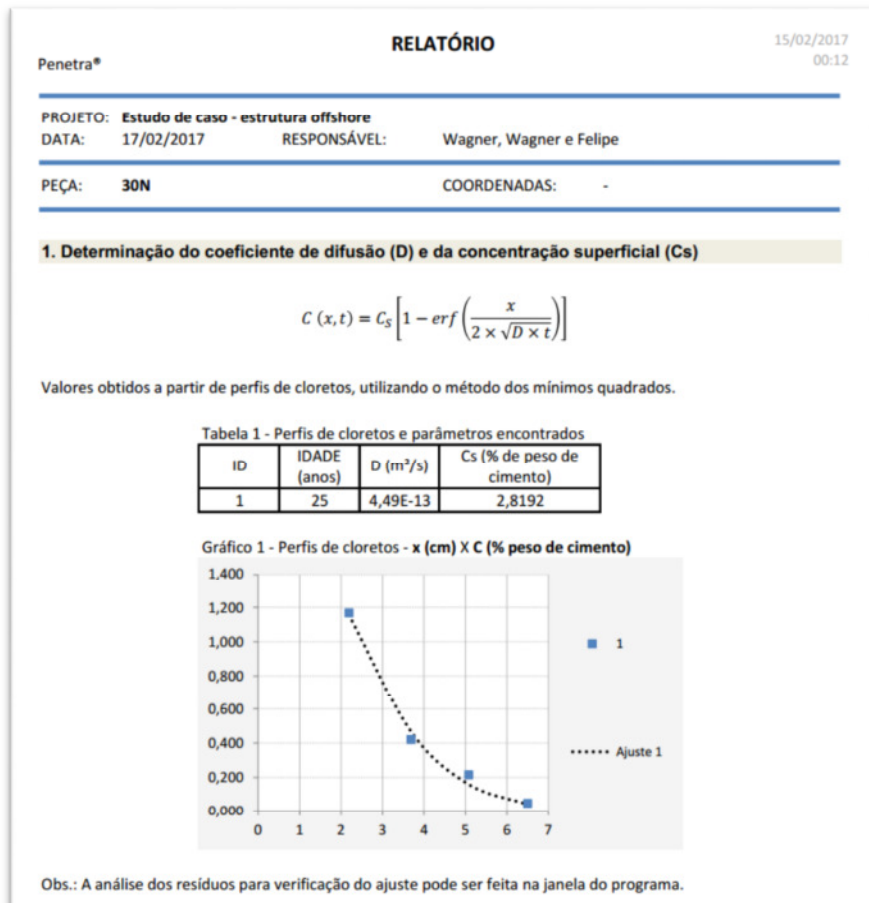
Para verificar a qualidade do ajuste da curva aos dados experimentais, pode-se selecionar o perfil de cloreto adicionado e clicar na opção “Análise de resíduos”, sendo exibida a janela da Figura 22. Nela, percebe-se, nos gráficos da esquerda, que os resíduos normalizados estão distribuídos de forma aleatória e, no gráfico da direita, que estão se aproximando de uma reta. Além disso, o resultado do teste Kolmogorov-Smirnov apresentado é satisfatório, indicando que os resíduos são bem modelados por uma distribuição normal. Desta forma, o ajuste obtido é considerado satisfatório.

Figura 22 - Estudo de caso - Análise de resíduos.



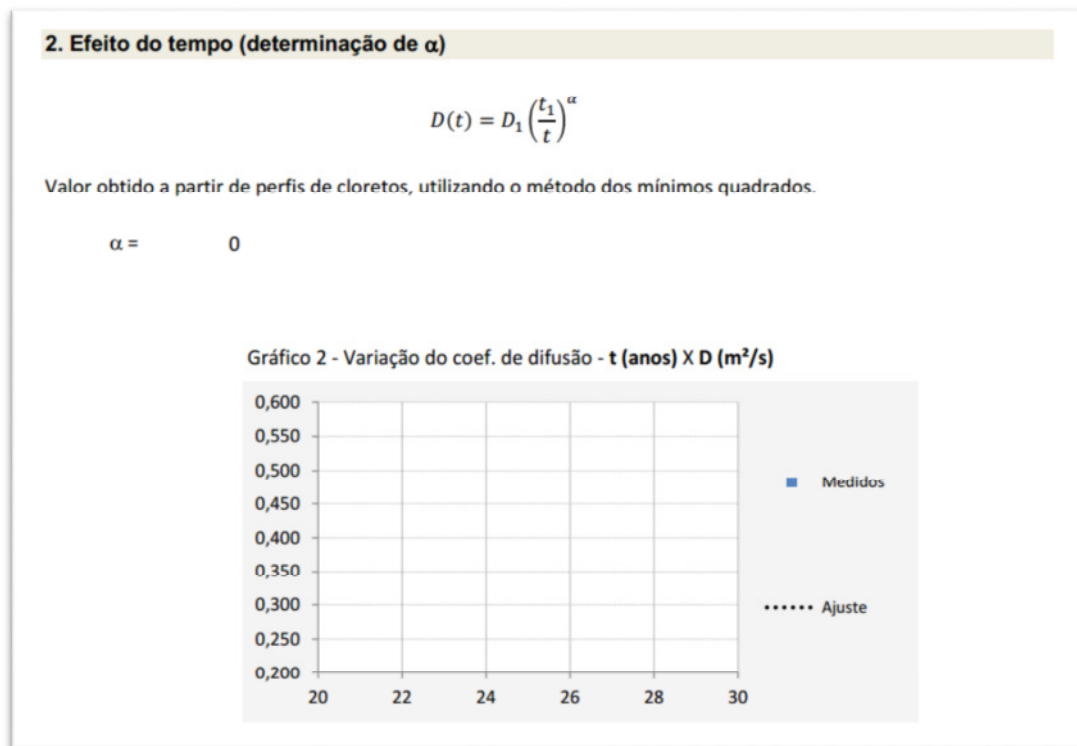
Pode-se, então, gerar o relatório com a estimativa de vida útil. A Figura 23 mostra o primeiro item do relatório, que consiste em um resumo da determinação do coeficiente de difusão e da concentração superficial.

Figura 23 - Estudo de caso - Determinação D e Cs.



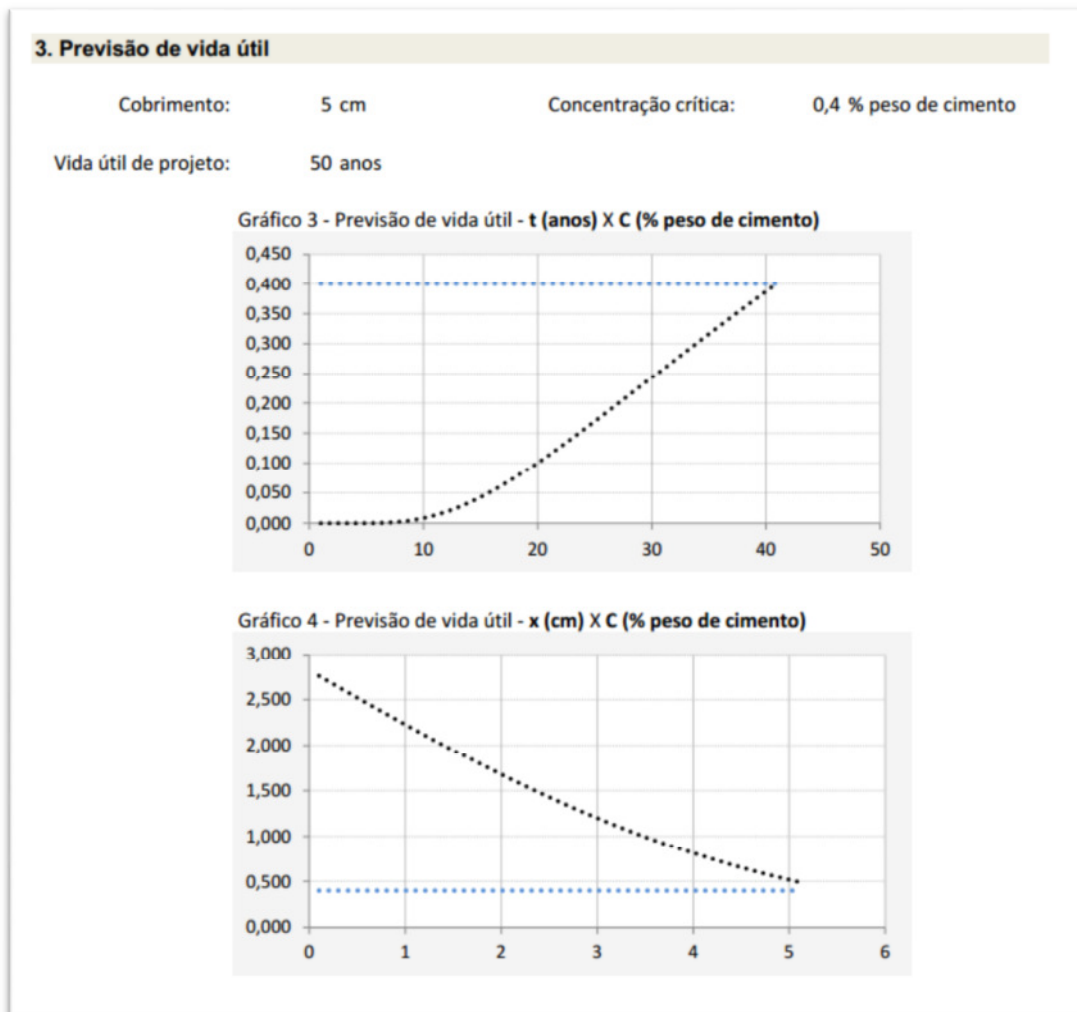
A Figura 24 apresenta o efeito do tempo no coeficiente de difusão, segundo item do relatório. Como dito anteriormente, neste estudo de caso o coeficiente de difusão foi considerado constante ($\alpha=0$).

Figura 24 - Estudo de caso - Efeito do tempo.



O último item do relatório (Figura 25) traz a previsão de vida útil, que é composta por dois gráficos. No primeiro, observa-se que a vida útil estimada para essa peça (tempo para a despassivação da armadura) é de 41 anos. Ou seja, 16 anos após a retirada do perfil de cloretos utilizado. No segundo, apresenta-se o perfil de cloretos para a idade de 50 anos, uma vez que esta era a vida útil de projeto fornecida pelo usuário. Neste gráfico, tem-se a concentração de cloretos para cada valor de profundidade até a armadura (5 cm).

Figura 25 - Estudo de caso - Previsão de vida útil.



5.2. SOFTWARE “CARBONA” (CARBONATAÇÃO)

Na Figura 26, têm-se os dados do estudo de caso da Tabela 3 inseridos como perfil de carbonatação.

Figura 26 - Estudo de caso - Perfil de carbonatação.

Perfil de carbonatação

Idade: 8 anos

Ec1: 11,05 mm Ec6: 17,10 mm

Ec2: 11,95 mm Ec7: 9,86 mm

Ec3: 8,63 mm Ec8: 10,81 mm

Ec4: 8,96 mm Ec9: 12,63 mm

Ec5: 13,71 mm Ec10: 16,45 mm

Coef. k estimado: 3,96 mm/(ano^{0,5})

Adicionar Cancelar

Neste estudo de caso foi realizado apenas um perfil de carbonatação, com 8 anos de idade. Por tanto, no gráfico gerado na janela inicial do programa (Figura 27) não é possível visualizar a linha de ajuste.

Figura 27 - Estudo de caso – Janela inicial.

CARBONA - Previsão de vida útil devido à carbonatação.

PROJETO: PONTE MG-SP

RESPONSÁVEL: DNIT DATA: 01/07/2011

PEÇA: TUBULÕES COORDENADAS:

PERFIL DE CARBONATAÇÃO

ID	IDADE	Ec1	Ec2	Ec3	Ec4	Ec5	Ec6	Ec7	Ec8	Ec9	Ec10	Medidas	Ec
1	8,0000	11,0500	11,9500	8,6300	8,9600	13,7100	17,1000	9,8600	10,8100	12,6300	16,4500	10,0000	12,1150

Adicionar Perfil Remover Perfil

COBRIMENTO DE CONCRETO: 25 mm

Calcular

Sair

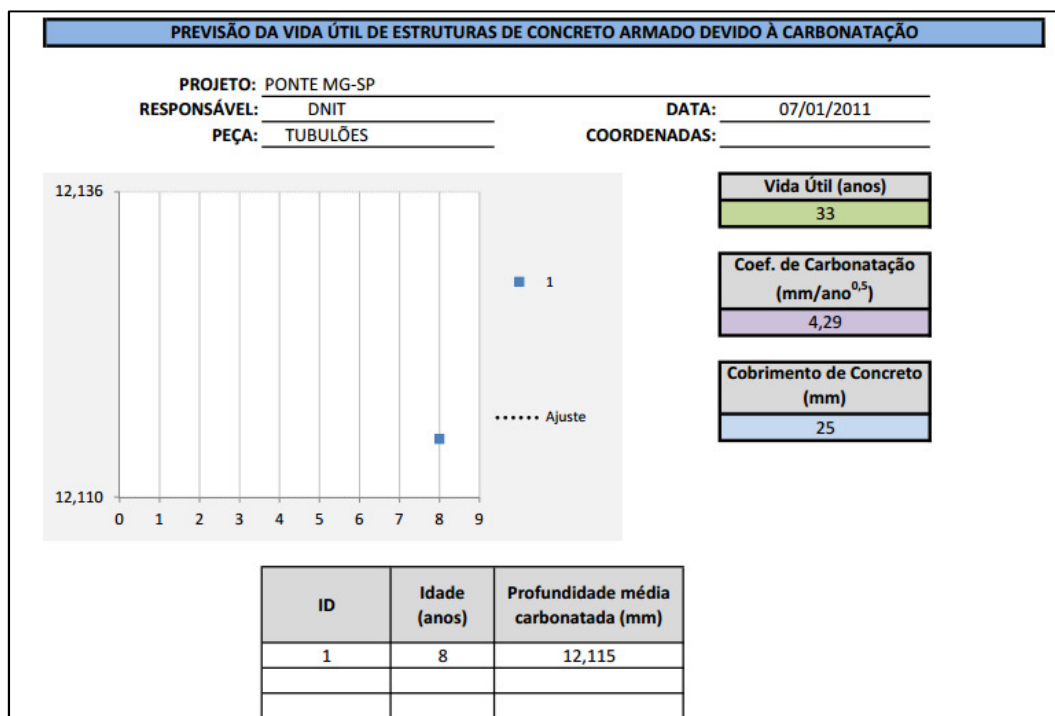
12,110

1

..... Ajuste

Após clicar em “Calcular” foi gerado o relatório representado na Figura 28.

Figura 28 - Estudo de caso – Relatório final.



O coeficiente de carbonatação encontrado foi superior ao previsto pelo autor do teste, o que é pior para estrutura, pois quanto maior o coeficiente k , menor será o tempo de vida útil.

A vida útil estimada para a estrutura em teste foi de apenas 33 anos, uma vida útil muito curta para uma ponte. O autor do teste relatou grande quantidade de fissuras e outras manifestações patológicas na ponte, logo, como em apenas 8 anos as estruturas estão muito desgastadas pode-se dizer, mesmo sabendo que a ponte sofre vários tipos de ações além da carbonatação, que a previsão de vida útil por carbonatação não está tão longe da realidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item são feitas as considerações finais sobre a resolução deste trabalho, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi atingido com sucesso. Foram desenvolvidos dois programas de fácil manipulação, com dados de entrada obtidos de maneira rápida e barata, para auxiliar o projeto e o planejamento de manutenções de estruturas de concreto armado. Além disso, a utilização destes programas foi demonstrada a partir de dados reais, retirados da literatura.

Para a utilização do *software* “Penetra”, que avalia a penetração de cloretos, é necessário informar a espessura do cobrimento de concreto, a idade da estrutura e perfis de cloreto da estrutura existente, obtidos através de ensaios simples de laboratório. A partir destas informações e da definição de uma concentração limite de cloretos para a despassivação da armadura, o programa retorna gráficos informando a evolução da concentração de cloretos na região da armadura, a previsão de vida útil e o perfil de cloretos ao longo do cobrimento para determinada idade.

Já para a utilização do *software* “Carbona”, que analisa a carbonatação de estruturas de concreto, é necessário informar apenas a espessura do cobrimento de concreto, a idade da estrutura e a espessura carbonatada, obtida através da aspersão de fenolftaleína. Com essas informações, o programa informa a previsão de vida útil, ou seja, o tempo para a despassivação da armadura por carbonatação.

Os dois programas também podem ser utilizados para o projeto de novas estruturas. Para tanto, ao invés de informações adquiridas de estruturas existentes, deve-se informar parâmetros que dependem do ambiente, dos materiais e da execução da nova estrutura (coeficiente de difusão, concentração superficial e coeficiente de efeito da idade do concreto, para o caso de cloretos, e

coeficiente “k” para carbonatação). Estes parâmetros podem ser obtidos através de ensaios laboratoriais mais complexos ou adotados como valores de referência da literatura.

É importante ressaltar que, devido ao grande número de fatores intervenientes, de alta complexidade, os programas não têm a intenção de fornecer resultados precisos e devem ser usados apenas para balizar as tomadas de decisões, respeitando sempre as limitações descritas e avaliando a particularidade de cada estrutura e do ambiente em que ela está inserida.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desdobramentos futuros dessa pesquisa podem incluir a consideração do fenômeno de convecção, de grande importância para peças não saturadas, sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, além da combinação de cloretos com os produtos de hidratação do cimento.

Devido às diversas fontes de incertezas, considerar o tempo para o fim da vida útil como um parâmetro determinístico não é o mais apropriado. Assim, pode-se partir do modelo aqui apresentado para construir um modelo probabilístico, mais realista.

Outra recomendação é a modelagem do efeito combinado de carbonatação e corrosão por cloretos.

Com o amadurecimento da pesquisa e à medida que se ganhe conhecimento no tema, pode-se abranger, também, o período de propagação, com maior número de fatores intervenientes e de modelagem mais complexa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5732. Cimento Portland Comum, 1991.

_____. NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2014.

_____. NBR 11578. Cimento Portland Composto. 1991.

_____. NBR 15575. Edificações Habitacionais – Desempenho, 2013.

ALONSO, C. et al. **Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar**. Cement and Concrete Research, 30, pp. 1047-1055, 2000.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, C. et al. **Comparison of chloride models: the importance of surface concentration**. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 16 p, 2006.

ANDRADE, C. **Reinforcement corrosion: Research needs. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds)**. 8 p. 2009.

ANDRADE, C. et al. **Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices**. Journal of Nuclear Materials, 412, pp. 209-216, 2011.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos**, 2001, 277p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANN, K. Y. et al. **The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures.** Construction and Building Materials, 23, pp. 239-245, 2009.

BARBOSA, M. C. **Estimativa da Vida Útil de Estrutura de Concreto Armado Imediatamente após sua Execução,** 2009, 170p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão das armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas.** 1º ed., São Paulo: Ed. Pini, 1997. 237 p.

COLLINS, F.; GRACE, W. **Specifications and testing for corrosion durability of marine concrete: the Australian perspective.** In ACI International Conference on Durability of concrete, pp. 757-776, 1997.

COSTA, A.; APPLETON, J. **Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration.** Materials and Structures, 32, pp. 252-259, 1999.

COSTA, A. **Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures.** Construction and Building Materials, 43, pp. 217-224, 2013.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion.** London: Oxford University Press, p. 414, 1975.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado – análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Dissertação de Mestrado, 220 p, 1988.

DOUSTI, A. et al. **Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite.** Construction and Building Materials, 49, pp. 393-399, 2013.

EHE-08. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. **Instrucción del Hormigón Estructural**, 2008.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. **Corrosão das armaduras de concreto**. Boletim Técnico ALCONPAT, n. 6, p. 28, 2013.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**. 1ª Edição. São Paulo: PINI, 2008.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 240p.

GLASS, G.K.; BUENFELD, N.R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science, Vol. 39, nº 5, pp. 1001-1013, 1997

HASSAN, J. E. et al. **Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress**. Engineering Structures, 32, pp. 3279-3287, 2010.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. Ed. Pini, 45 p, 1986.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993, 231f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **A Nova NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: II Seminário de Patologia das Construções, Porto Alegre, 2004. Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. Porto Alegre: LEME/UFRGS, v.1. p.1-30, 2004.

LIMA, M. G. et al. **Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho - importância dos estudos envolvendo microclima**. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO), 13 p, 2006.

LIN, G. et al. **Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments**. Cement & Concrete Composites, 32, pp. 571-579, 2010.

MARTÍN-PÉREZ, B. **Service life modelling of r.c. highway structures exposed to chlorides**. University of Toronto, Thesis, 168 p, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIJERS, S. J. H. et al. **Computational modelling of chloride ion transport in reinforced concrete**, HERON, 46, pp. 207-216, 2001.

MEIJERS, S. J. H. et al. **Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles-and carbonation**. Materials and Structures, 38, pp. 145-154, 2005.

MEIRA, G. R. et al. **Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone**. Construction and Building Materials, 55, pp. 289-298, 2014.

MIRANDA, A. L. M.. **Previsão de Vida Útil das Estruturas de Concreto com Base nos Parâmetros da Nbr 6118:2014 Utilizando Softwares**, 2014, 71p. Trabalho de Curso (Graduação) – Programa de Graduação em Engenharia Civil: Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, UniCEUB - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

MUTHULINGAM, S.; RAO, B. N. **Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment**. Corrosion Science, 82, pp. 304-315, 2014.

NAKAMURA, J.; FARIA, R. **Intervenções corretivas estendem a vida útil das estruturas de concreto armado.** Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/201/artigo302536-1.aspx>>. Acesso em 02/01/2017.

NOGUEIRA, C. G.; LEONEL, E. D. **Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress.** Engineering Failure Analysis, 31, pp. 76–89, 2013.

PAGE, C. L. et al. **Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes.** Cement and Concret Research, 11, pp. 395-406, 1981.

PAPAKONSTANTINOU, K. G.; SHINOZUKA, M. **Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects.** Engineering Structures, 57, pp. 306-326, 2013.

POSSAN, E. **Modelagem da Carbonatação e Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano**, 2010, 265p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado - Teoria, Controle e Métodos de análise.** Elsevier, 272 p, 2014.

SAASSOUH, B.; LOUNIS, Z. **Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods.** Cement & Concrete Composites, 34, pp. 1082-1093, 2012.

SAHUINCO, M. **Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto**, 2011, 170p. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SHAFEI, B. et al. **Prediction of corrosion initiation in reinforced concrete members subjected to environmental stressors: A finite element framework.** Cement and Concrete Research, 42, pp. 365-376, 2012.

SONG, H. et al. **Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments.** Cement & Concrete Composites, 30, pp. 113-121, 2008.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 1ª edição, São Paulo: Ed. Pini, 1998. 19 p.

STEWART, M. G.; MULLARD, J. A. **Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures.** Engineering Structures, 29, pp. 1457-1464, 2007.

TAVARES, F. **Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete.** Universidad Politécnica de Madrid, Tesis, 166 p, 2013.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469 p, 1982.

UJI, K., MATSUOKA, Y., and MARUYA, T. **Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride.** In C. Page, K. Treadaway, and P. Bamforth (Eds.), Corrosion of Reinforcement in Concrete, pp. 258–267. Essex, England: Elsevier Applied Science, 1990.