



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
EDUARDO CORRÊA MARTINS

**INVESTIGAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO CONTENDO DIFERENTES
TEORES DE SÍLICA E RELAÇÕES ÁGUA CIMENTO DISTINTAS COM VISTAS À
DURABILIDADE**

Tubarão
2020

EDUARDO CORRÊA MARTINS

**INVESTIGAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO CONTENDO DIFERENTES
TEORES DE SÍLICA E RELAÇÕES ÁGUA CIMENTO DISTINTAS COM VISTAS À
DURABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Rennan Medeiros

Tubarão
2020

EDUARDO CORRÊA MARTINS

**INVESTIGAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO CONTENDO DIFERENTES
TEORES DE SÍLICA E RELAÇÕES ÁGUA CIMENTO DISTINTAS COM VISTAS À
DURABILIDADE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 30 de novembro de 2020.

Professor e orientador Rennan Medeiros, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Maurício A. Büchele Motta, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Eng. André Mendes Mello
Laboratório de Engenharia Civil (LEC)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Aos que me ajudaram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me fortalecido nesses anos de estudos.

Aos meus pais Luiz Cesar Martins e Selma C. Martins, por toda educação e suporte para chegar até aqui.

À minha esposa Simone R. Martins, que sempre esteve presente nas horas mais difíceis, me encorajando a nunca desistir deste sonho.

À minha amada filha Isabel R. Martins, que nunca fez questão de esquecer que eu devo estudar.

Ao meu professor e orientador Rennan Medeiros, que exerceu um papel fundamental para a conclusão deste Trabalho.

À todos que me incentivaram, em especial aos meus amigos Danilo “Dão” Martins de Medeiros e Juliano “Carrasco” da Costa Azevedo.

*“O verdadeiro homem mede a sua força quando se defronta com o obstáculo.”
(Antoine de Saint-Exupéry).*

RESUMO

A durabilidade das estruturas está diretamente relacionada à qualidade do revestimento da armadura e a sua espessura. Face a isto, surge na indústria da construção civil a preocupação com a durabilidade do concreto, visto que um dos problemas mais preocupantes é a deterioração do concreto causado pela corrosão das armaduras. Este processo de corrosão depende principalmente, de dois fatores - distância entre a barra e o ambiente externo onde há presença de agentes agressores (revestimento) e a porosidade deste revestimento (governada, principalmente, pela relação a/c). Com o objetivo geral de investigar a qualidade do concreto com diferentes teores de sílica e diferentes relações água/cimento, foi desenvolvido um programa de pesquisa onde delineou-se uma estratégia em duas etapas principais, sendo a primeira o estudo e embasamento teórico através de investigação bibliográfica baseada em normas e nos autores que são referências no tema da proposta de estudo. Já a segunda etapa, trata-se de pesquisa experimental, que assim como na primeira foi fundamentada em bibliografia especializada e em ensaios laboratoriais, como ensaios de penetração acelerada dos íons de cloreto C 1202 (ASTM, 2019), de absorção de água e ensaios para determinação da resistência à compressão. Com base nos resultados obtidos neste programa experimental, para as condições de ensaios, variáveis e materiais adotados, pode-se verificar que quanto maior a relação água/aglomerante, menor a resistência à compressão e maior a penetração e a difusão de cloretos, constatando-se ainda que o emprego da sílica ativa trouxe maiores benefícios ao concreto com relação à durabilidade proporcionando maior proteção física às armaduras das estruturas de concreto.

Palavras-chave: Qualidade do concreto. Durabilidade. Vida Útil. Adições minerais. Sílica.

ABSTRACT

The durability of the structures is directly related to the quality of the reinforcements coating and its thickness. In view of this, there is concern in the construction industry about the durability of concrete, since one of the most worrying problems is the deterioration of concrete caused by corrosion of reinforcements. This corrosion process depends mainly on two factors - the distance between the bar and the external environment where there is the presence of aggressor agents (covering) and the porosity of this cover (mainly governed by the water/cement relation). With the general objective of investigating the quality of concrete with different silica contents and different water/cement relations, a research program was developed where a strategy was outlined in two main stages, the first being the study and theoretical basis through bibliographic research based on standards and authors who are references in the theme of the study proposal. The second stage, on the other hand, is an experimental research, which, as in the first one, was based on specialized bibliography and laboratory tests such as accelerated penetration tests of C 1202 chloride ions (ASTM, 2019), water absorption and tests to determine compressive strength. Based on the results obtained in this experimental program, for the test conditions, variables and materials adopted, it can be verified that the higher the water/agglomerant relation, the lower the compressive strength and the greater the penetration and diffusion of chlorides, also verifying that the use of active silica brought greater benefits to concrete in relation to durability providing greater physical protection to the reinforcements of concrete structures.

keywords: Concrete quality. Durability. Useful life. Mineral additions. Silica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras	21
Figura 2 – Evolução do fenômeno da corrosão	24
Figura 3 – Organograma principal da pesquisa	34
Figura 4 – Ensaio de compressão axial	39
Figura 5 – Ensaio de absorção de água	40
Figura 6 – Ensaio de migração de cloreto acelerado, previsão e verificação da durabilidade em 50 anos	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vida Útil de Projeto (VUP)	20
Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	31
Tabela 3 – Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.....	32
Tabela 4 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m ³ de concreto. a) traço em massa. b) traço em volume. c) Propriedades tecnológicas do concreto	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado	25
Quadro 2 - Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras	30
Quadro 3 – Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação	30

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a/c	Água/ cimento
a/ag	Água/ aglomerante
CA	Componentes e elementos estruturais de concreto armado
(Ca (OH) ₂)	Hidróxido de Cálcio
(Cl -)	Íon cloreto
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Componentes e elementos estruturais de concreto protendido
CSH	Silicato de Cálcio hidratado
H ₂ O	Água
ISSO	Organização Internacional para Padronização
K ₂ CO ₃	Carbonato de Potássio
Kgf	Unidade de medida de força
KOH	Hidróxido de Potássio
Mpa	Unidade de medida de pressão
Na ₂ CO ₃	Carbonato de Cálcio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Técnica
pH	Potencial Hidrogeniônico
UR	Umidade relativa
VU	Vida útil
VUP	Vida útil de Projeto

LISTA DE SÍMBOLOS

k – coeficiente de penetração de cloretos ($m.s^{-1/2}$)

t – Tempo

x – Profundidade atingida por um determinado teor de cloretos no tempo t (m)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reação simplificada da carbonatação com o hidróxido de cálcio	26
Equação 2 – Reação simplificada da carbonatação com hidróxidos de sódio e potássio.....	26
Equação 3 – Equação para determinar a Vida Útil das estruturas de concreto	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVO	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	18
2.2	VIDA ÚTIL	20
2.3	MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS	23
2.3.1	Corrosão das armaduras	23
2.4	QUALIDADE DO COBRIMENTO.....	27
2.4.1	Cobrimento com adições minerais.....	28
2.4.2	Cobrimento com diferentes relações de água/cimento.....	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	PROGRAMA DE PESQUISA	33
3.1.1	Materiais	34
3.1.2	Produção do concreto.....	35
3.1.3	Ensaio de migração de cloreto acelerado	37
3.1.4	Previsão de vida útil	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	RESULTADO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL.....	39
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	40
4.3	RESULTADO DOS ENSAIOS DE MIGRAÇÃO DE CLORETO ACELERADO.....	40
4	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto armado, entretanto, diversos fatores contribuem para que sua durabilidade seja garantida. Pode ser destacado o correto cobrimento da armadura que é a espessura de concreto entre a barra de aço e a camada externa do elemento, fazendo-se necessário o uso de espaçadores os quais devem ser posicionados adequadamente com o intuito de proteger a armadura contra os agentes externos agressores.

O mecanismo de corrosão das armaduras de estruturas de concreto depende, principalmente, de dois fatores - distância entre a barra e o ambiente externo onde há presença de agentes agressores (cobrimento) e a porosidade deste cobrimento (governada, principalmente, pela relação a/c) (HELENE, 1993; RIBEIRO *et al.*, 2014).

A porosidade do concreto pode ser melhorada com o uso de adições minerais como cinza volante, metacaulim, sílica ativa entre outros. Este refinamento nos poros proporciona mais dificuldade aos agentes agressores alcançarem as armaduras, proporcionando assim, maior vida útil ao elemento estrutural.

1.1 JUSTIFICATIVA

A durabilidade das estruturas está diretamente relacionada à qualidade do cobrimento da armadura e a sua espessura, logo, a preocupação com a durabilidade do concreto armado é de extrema importância para a indústria da construção civil, sendo que um dos problemas mais preocupantes é a deterioração do concreto causado pela corrosão das armaduras. Isso implica sérios riscos à estrutura, como perda da seção das armaduras, fissuração do concreto, baixa aderência entre barra e concreto, flechas, estrutura com deformações excessivas, destacamento de concreto de cobrimento, e por fim, risco de colapso parcial ou total da estrutura.

Quando não se observa as características do concreto, como a espessura e a qualidade da camada de cobrimento em relação a agressividade do meio, tem-se uma maior incidência na corrosão das armaduras.

1.2 OBJETIVO

Neste item estão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos destacados para esta pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral investigar a qualidade do concreto com diferentes teores de sílica e diferentes relações água cimento com vistas à durabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Fazer uma revisão bibliográfica abordando assuntos relacionados ao tema em estudo, com intuito de fundamentar teoricamente o desenvolvimento da pesquisa;
- b) Investigar a influência da variação na relação água cimento nas propriedades de durabilidade do concreto;
- c) Determinar o comportamento de concretos contendo diferentes teores de sílica ativa quanto a propriedades de durabilidade;
- d) Estimar a profundidade de penetração de cloretos nos diferentes concretos com diferentes relações água cimento e teores de sílica considerando 50 anos de uso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos de durabilidade e vida útil do concreto armado, além dos mecanismos de degradação de estruturas, destacando-se ainda o uso adições minerais frente a vida útil das estruturas de concreto.

2.1 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Há muitas versões para definição de durabilidade do concreto armado, porém, a mais aceitável atualmente é referente à capacidade de resistência dos elementos frente as ações ambientais sofridas.

A durabilidade de estruturas de concreto armado é de extrema importância tanto para os indivíduos que usufruem do imóvel, como para as construtoras. O fator durabilidade proporciona segurança no âmbito econômico, diminuindo consideravelmente os custos futuros com manutenção, levando em consideração o zelo à vida de seus habitantes e usuários.

Para Bolina, Tutikian e Helene (2019), é notável que as edificações em algum momento de sua vida útil começam a mostrar sinais de anormalidade, precisando de alguma forma retomar a sua integridade e funcionalidade do momento que foram construídas. Dessa forma, surge no início dos anos 1980, o conceito de durabilidade, o qual é inserido na rotina da construção civil internacional. Tal conceito foi definido pela *ISO 6241: performance standards in building – principles for their preparation and factors to be considered* (Padrão de desempenho em construções – princípios para sua preparação e fatores a serem considerados), que de forma inédita correlaciona o comportamento dos sistemas e sua interação com o meio ambiente, uso operação e manutenção, fazendo com chegassem a conclusão de que as edificações não duram para sempre. Logo, Medeiros, Andrade e Helene (2011), afirmam que não é uma propriedade intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto, pois a mesma estrutura pode ter diferentes desempenhos sob determinadas condições ambientais.

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014) a durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), na literatura técnica encontra-se uma diretriz geral que destaca que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores conhecidos como regra dos **4C**, sendo eles: composição ou traço do concreto,

compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura, cura efetiva do concreto na estrutura e cobrimento das armaduras.

Conforme Takata (2009, p.78), “uma determinada estrutura cumpre seu papel devidamente, quando mantém sua integridade no decorrer de sua vida útil. Essa integridade está relacionada ao desempenho estrutural e à durabilidade”.

Sob o ponto de vista de Mehta e Monteiro (2014), o conceito de durabilidade está diretamente relacionado à vida útil, visto que uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade. Ainda conforme Possan e Demoliner (2013), a durabilidade refere-se às características dos materiais, à forma de como são expostos e utilizados ao longo da vida útil da edificação, e a deterioração destes, é decorrente das alterações das propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície como no seu interior, em sua maioria por consequência da agressividade do meio ambiente.

Com o passar dos anos, a durabilidade do concreto vem aumentando, contudo, não só devido a demanda do mercado, mas também com relação ao desenvolvimento de componentes que atinjam especificações sem o comprometimento das propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Uma garantia na durabilidade da estrutura não só por exigências normativas, mas por vantagens econômicas e sustentáveis, é cada vez mais requisitado por profissionais envolvidos em projetos e execução (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Com um maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos, teve-se uma evolução no estudo da durabilidade das estruturas de concreto, possibilitando através de modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos associados ao tempo. Como consequência, tornou-se viável uma avaliação da vida útil sendo expressa em número de anos, com critérios não apenas qualitativos de adequação da estrutura a um certo grau e exposição (HELENE, 2004).

Barreto (2014) descreve que a durabilidade de estruturas de concreto armado está condicionada às características do concreto de cobrimento das armaduras e de sua espessura. Desta forma, as falhas na obtenção do cobrimento são de fato a maior influência na corrosão precoce de armaduras e conseqüentemente a principal forma de deterioração de estruturas de concreto armado.

2.2 VIDA ÚTIL

Com relação à Vida Útil (VU), a ISO 13823:2008 a define como o intervalo efetivo de tempo que uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Do mesmo modo a NBR 6118 (ABNT, 2014), considera vida útil de projeto, como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Além dessas, a NBR 15575 (ABNT, 2013), que trata sobre o Desempenho de edificações, define Vida Útil como o intervalo de tempo compreendido entre o início da operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender as exigências do usuário pré-estabelecidas. Essa norma também especifica o valor teórico para a Vida Útil de Projeto (VUP), para cada um dos sistemas que o compõem não inferiores aos estabelecidos (Tabela 1), sendo que devem ser elaborados para terem uma durabilidade compatível com a (VUP).

Tabela 1 – Vida Útil de Projeto (VUP)

Sistema	VUP mínima em anos
Estrutura	≥ 50 Conforme ABNT NBR 8681-2003
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

Fonte: Adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013).

Segundo Bolina, Tutikian, Helene (2019), a VUP não é período em que a edificação poderá ser usada ou não terá nenhum dano, mas sim um período temporal teórico mínimo onde sejam atendidas as condições de desempenho definidas em projeto. Assim, essas condições devem ser satisfeitas por um intervalo de tempo igual ou maior do que esse mínimo exigido por norma, o que vai depender da qualidade incorporada à fase de produção ou dos cuidados produzidos na fase de uso da edificação.

Dessa forma, a vida útil deve ser analisada de forma ampla, visto que nesse processo estão envolvidos projeto, execução, materiais, uso, operação e manutenção sob um enfoque de

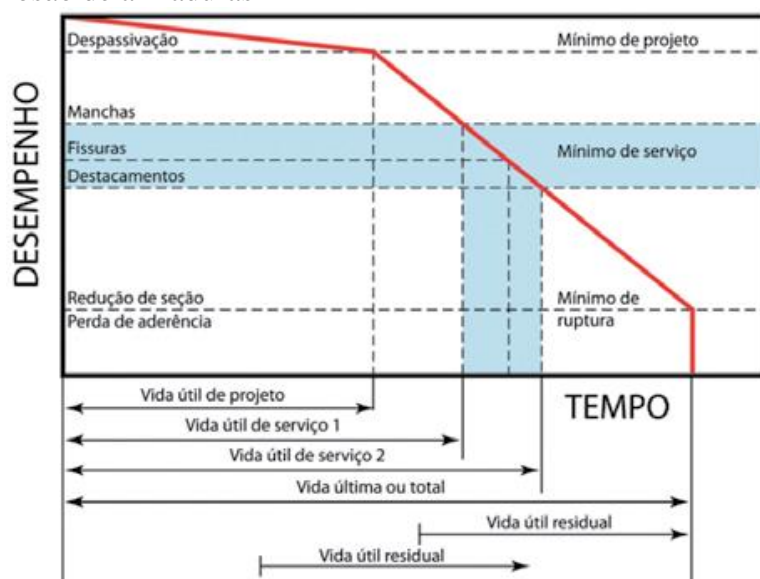
desempenho, qualidade e sustentabilidade. Embora se tenha inúmeras definições de vida útil, as normas atualmente em vigor deixam falhas em relação a sua aplicação prática (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011)

Na afirmação de Branco, Paulo e Garrido (2013), nas construções há dois conceitos de Vida Útil que podem ser considerados, um funcional e outro estrutural. Porém, segundo eles a Vida Útil Estrutural deve ser sempre maior que a Vida Útil Funcional, visto que os investimentos devem ser recuperados em períodos inferiores à primeira. “A Vida Útil Funcional pode garantir a rentabilidade do investimento, enquanto a Vida Útil Estrutural assegura que a estrutura suporta essa situação pelo menos durante aquele período” (ANDRADE, 1992; RINCON, 1997; TUTIKIAN, 2011, apud. BRANCO; PAULO; GARRIDO, 2013, p. 4).

Branco, Paulo e Garrido (2013), descrevem que a Vida Útil Estrutural ou Vida Útil de Projeto está associada às condições de segurança e de utilização da estrutura, de forma a evitar situações de colapso, deformações excessivas, dentre outros, dependendo fundamentalmente do comportamento das ações e dos materiais ao longo da vida da construção.

Helene (2004), ressalta que há diferentes situações e suas correspondentes vidas úteis (Figura 1), que considera a corrosão da armadura como a mais importante e mais conhecida cientificamente, além de manifestar-se com maior frequência, porém no seu conceito a deterioração leva em consideração todos os mecanismos.

Figura 1 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras



Fonte: Helene (1997, p.10).

Em concordância com Helene (2004), apresenta-se a interpretação dos dados da figura 1, onde:

- a) Vida útil de projeto: quando a armadura é atingida por frentes de carbonatação ou cloretos tem-se o intervalo de tempo denominado período de iniciação, onde ocorre a despassivação, não que a partir desse momento haverá corrosão importante apesar que em sua grande maioria isso ocorra. No entanto, em se tratando de segurança, é esse intervalo de tempo que se deve adotar no projeto estrutural.
- b) Vida útil de serviço: quando ocorre o aparecimento de manchas na superfície do concreto ou ocorrem fissuras no cobrimento ou ainda seu destacamento, tem-se então esse intervalo de tempo. Porém dependendo de certas situações e de suas exigências, é definido o tempo que a vida útil de serviço terminou. Em certas situações, manchas de corrosão ou fissuras são inadmissíveis e outras que somente com o desprendimento e queda de pedaços de concreto.
- c) Vida útil última ou total: nesse período tem-se o tempo em que a estrutura começa a entrar em colapso ou ruptura, sendo parcial ou total. Com a seção resistente da armadura ficando afetada ou sua aderência com o concreto comprometida poderia ocorrer um colapso da estrutura de modo total ou parcial.
- d) Vida útil residual: é o intervalo de tempo em que as funções de uma estrutura ainda podem exercer o seu papel. Podendo ter três diferentes modos de interpretações para a vida útil residual. Uma curta, até que a armadura comece a sua despassivação, outra quando se tem o aparecimento de manchas, fissuras e/ou desprendimento do concreto, e a última longa quando os elementos estruturais não exercem mais a sua capacidade resistente, podendo haver um colapso.

Carmona e Helene (1986), fazem uma comparação entre a normalização nacional e a brasileira, sendo que nessa questão sua pesquisa pode ser considerada bem completa e atualizada. Foram estudadas seis normas, ficando claro que a normalização estrangeira é a mais exigente no que se refere à espessura de concreto de cobrimento à armadura. Como os fenômenos de penetração de agentes agressivos é proporcional à raiz do tempo, a durabilidade da estrutura está diretamente relacionada à espessura de concreto de cobrimento. Sendo assim, ao dobrar a espessura de cobrimento, consegue-se multiplicar a vida útil por quatro. Portanto, a normalização nacional que segue o padrão de espessura de cobrimento menor que a estrangeira, está na verdade aceitando uma menor vida útil de projeto (apud. HELENE, 2004).

2.3 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS

A principal causa de degradação das estruturas de concreto armado está associada a corrosão da estrutura, sendo desencadeada por íons cloreto e carbonatação, considerando que vários estudos foram realizados a fim de modelar matematicamente a vida útil de uma estrutura. Com o processo corrosivo analisado desde a iniciação até a etapa de propagação, a estimativa de vida útil pode ser abordada por dois modelos, um de forma determinista e outro probabilista. O primeiro estima uma degradação máxima ou média tanto para iniciação como para propagação da corrosão. Já o modelo probabilista analisa os fatores envolvidos no fenômeno de degradação, sendo considerado a probabilidade de ocorrência e a variabilidade do processo a ser considerado (ANDRADE et al., 2009).

Corroborando do mesmo pensamento, Possan (2010), esclarece que a deterioração das armaduras de concreto armado é causada principalmente por íons cloreto e carbonatação, que favorecem a manifestação da corrosão nas armaduras. Ainda acrescenta que Dal Molin (1998), Aranha (1994) e Andrade (1997), respectivamente, verificaram que as regiões sul, norte e nordeste do Brasil são as que mais sofrem com danos devido à corrosão, que chega em torno de 14 a 64%, sendo esta a principal forma de degradação nestas regiões.

2.3.1 Corrosão das armaduras

A corrosão ou deterioração das armaduras de concreto armado está relacionada com a durabilidade dos materiais estruturais empregados, reduzindo os níveis de segurança e ocasionando uma menor vida útil estrutural.

Sob o ponto de vista de Branco, Paulo e Garrido (2013, p.6), “de fato os problemas da durabilidade dos materiais estruturais são os mais importantes e correspondem em geral à deterioração do concreto ou à corrosão das estruturas metálicas ou das armaduras de concreto armado”.

Medeiros, Andrade e Helene (2011), consideram que o cobrimento das armaduras é de fundamental importância quando se trata de vida útil, da mesma forma que o processo de execução acarreta resultados que influenciam na qualidade dessa camada. Portanto é indispensável que o projeto e execução do cobrimento sejam feitos de forma correta e adequada para que se possa garantir o desempenho projetado para a estrutura.

Takata (2009), afirma que a fase de montagem de formas, armaduras e escoramentos é a que mais gera patologias, ocasionadas pelo mau posicionamento e

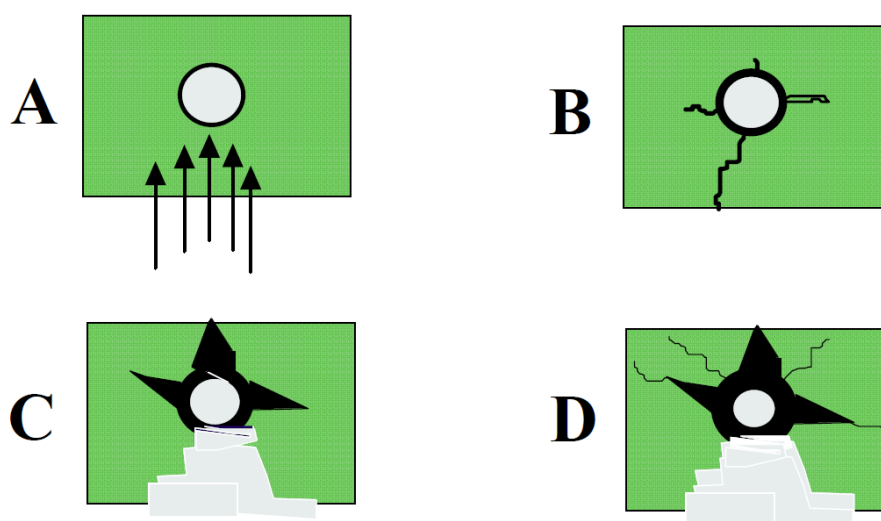
conservação das formas, assim como falhas na fixação e travamento. Para que haja êxito na montagem e posterior concretagem, é necessário o correto posicionamento das armaduras, obedecendo os espaçamentos mínimos, detalhes construtivos, taxas limites de armadura, assim como as áreas onde ocorrem o cruzamento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), nas regiões onde o cobrimento do concreto não é executado de forma compatível com o projeto, ocorre a conseqüente formação de óxi-hidróxidos de ferro, decorrentes da corrosão gradual. Estes acabam ocupando volumes de 3 a 10 vezes maiores do que o original do aço da armadura, e podem causar pressões de expansão superiores a 15 MPa (apud ADAMATTI, 2016)

Adamatti (2016), ainda explana que a princípio essas tensões provocam a fissuração do concreto em uma direção paralela à armadura corroída, contribuindo para a ocorrência da carbonatação e a penetração do CO₂ e de outros agentes agressivos, o que pode originar o lascamento.

A Figura 2 representa as fases da evolução da deterioração das estruturas de concreto ocasionadas pela deterioração das armaduras

Figura 2 – Evolução do fenômeno da corrosão



Fonte: Helene (2004, p.12).

Helene (2004), descreve a seguir sobre essas fases da evolução da deterioração das estruturas devido à corrosão das armaduras:

Os agentes agressivos levam um tempo para penetrarem no concreto e despassivarem a armadura. A fase A representa esse intervalo de tempo que varia por muitas razões, uma face quase sempre se comporta diferente de outra face, visto que, enquanto em uma pode ocorrer a despassivação, a outra pode nada sofrer. “Por outro lado esse é o período de tempo que corresponde ao que se conhece por “concreto armado”, uma vez que a concepção de

estruturas de concreto armado pressupõe uma armadura passivada indefinidamente dentro de um concreto alcalino eternamente” (HELENE, 2004, p. 12).

A fase representada na letra *B* é o período de tempo entre a despassivação e o surgimento de fissuras superficiais, ocasionadas pela expansão dos produtos da corrosão, sendo que depende das condições em que o concreto armado está exposto, sendo a umidade relativa do ambiente e a umidade de equilíbrio do concreto torna-se o fator principal.

A fase *C* ocorre quando já se tem o desprendimento do concreto, o que se torna um alto risco para as pessoas ou para os bens que a estrutura protege, ficando claro que a obra não pode se deteriorar/envelhecer de tal maneira sem que o engenheiro não interceda.

Helene (2004), ainda afirma que a fase *D* é uma situação em que para alguns autores e na literatura ainda é considerada como vida útil, em que ocorreria uma perda de até 25% na seção do aço. A partir deste momento a estrutura entraria em colapso. Entretanto, aceitar essa redução da seção da armadura, é o mesmo que negligenciar algum tipo de catástrofe, visto que antes mesmo desta redução algo mais grave já poderia ter ocorrido.

No quadro 1 estão expostos os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.

Quadro 1 – Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado

Agressividade do ambiente		Consequência sobre a estrutura	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície do concreto	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH Corrosão de armaduras Fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescência, manchas brancas	Redução do pH Corrosão de armaduras Degradação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura UR baixa (< 50%)	Fissuras	Fissuração Corrosão de armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras	Redução do pH Corrosão de armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (> 20°C e < 50°C) com UR > 75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH Degradação superficial Corrosão de armaduras
Concentração salina, Cl	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação e corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras
Álcali-agregado	Composição do concreto umidade, UR > 95%	Fissuras Gel ao redor do agregado graúdo	Expansão → fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras

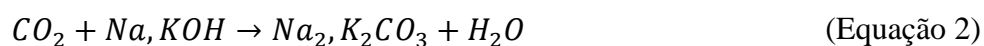
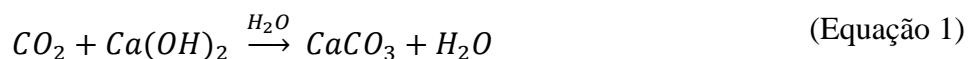
Fonte: Medeiros, Andrade e Helene (2011, p. 784).

“Conforme muitos autores afirmam (ANDRADE, 2001; GENTIL, 1996; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993), existem dois agentes básicos que podem levar ao início do processo corrosivo: o gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera – que origina o fenômeno conhecido como carbonatação – e os íons cloreto (Cl⁻)” (ADAMATTI, 2016, p. 19).

De acordo com Helene (1997), citado por Branco, Paulo e Garrido (2013), os modelos para simular a degradação dos materiais em função das condições ambiente, nas estruturas de concreto, foram desenvolvidos fundamentalmente para a carbonatação e para o ataque dos cloretos.

Possan (2010, p. 66) ressalta que a “carbonatação é um dos principais fenômenos físico-químico que pode limitar a vida útil das estruturas de concreto armado”, sendo que se enquadram entre os principais fatores para ocorrência desse fenômeno, a presença de adições minerais, a relação água/aglomerante, a porosidade, a dosagem, o processo e o tempo de cura, a resistência à compressão, fatores internos do concreto como idade, agregado, aglomerante e grau de hidratação, além das condições ambientais como temperatura, umidade relativa, concentração de CO₂ e tempo de exposição (FERREIRA, 2013).

As reações de carbonatação ocorrem com os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)₂), de sódio e de potássio, produzindo os respectivos carbonatos. As Equações (Equação 1) e (Equação 2) representam de forma simplificada essas reações químicas. Além dessas reações de carbonatação, também ocorre a carbonatação do CSH (silicato de cálcio hidratado), que forma além do carbonato de cálcio, também um gel de sílica, com estrutura porosa, facilitando o avanço futuro da carbonatação (BAKKER, 1988; TAYLOR, 1997, apud. MEIRA, 2017).



Como afirma Helene (2004), a corrosão pode ser classificada quanto ao seu aspecto e distribuição podendo-se chamar de corrosão generalizada e corrosão localizada, sendo a primeira aquela que ocorre em toda uma região da barra, e a segunda é mais rara, geralmente resultante de ação de cloretos ou fissuras podendo estar associada a despassivação pontual do aço.

O processo de corrosão associada aos íons cloretos inicia-se quando estes penetram no concreto e ao aproximar-se da armadura, em conjunto com água e oxigênio, rompem pontualmente a capa passivadora. A maioria das teorias que explicam esse fenômeno considera

que a ruptura da capa passiva é algo dinâmico, com ciclos de despassivação e repassivação, até que a primeira ocorra de forma definitiva (MEIRA, 2017, p. 31).

A penetração dos cloretos, segundo Helene (2004), pode ocorrer através de quatro mecanismos básicos: permeabilidade, absorção capilar, migração por efeito de campos elétricos e a difusão que é um processo espontâneo de transporte de massa em um sistema físico-químico por efeito de gradientes de concentração.

Marsh (2003), citado por Barreto (2014), considera que a corrosão prematura na armadura de concreto é provavelmente decorrente do fracasso na obtenção do cobrimento. Estando por sua vez, a principal causa de degradação das estruturas de concreto armado está associada a corrosão da estrutura

Segundo Barreto (2014), pesquisas indicam que o cobrimento mínimo normatizado não tem sido alcançado em sua totalidade nas atuais obras que adotam esta solução estrutural, tratando-se de um problema crônico e não esporádico.

2.4 QUALIDADE DO COBRIMENTO

A durabilidade das estruturas de concreto é função da qualidade do concreto e isso depende especialmente da relação água /cimento, assim como da espessura e qualidade do concreto de cobrimento da armadura. Contudo, materiais como as adições minerais podem influenciar de forma positiva na qualidade do concreto, assim como agregados contaminados, dentre outros podem influenciar de forma negativa. Logo, torna-se indispensável a análise de durabilidade para os concretos, sobretudo para aqueles que contenham resíduos e subprodutos (DIETRICH, 2015).

O cobrimento é uma das principais medidas de proteção das estruturas de concreto armado, sobretudo com relação à prevenção da corrosão das armaduras. Dois aspectos devem ser considerados, como a qualidade do concreto e a espessura do cobrimento. É necessário que a camada superficial dos elementos estruturais tenha uma qualidade adequada do concreto (BRANDÃO, 1998).

Irassar et al. (1999, apud. Hoffmann, 2001), consideram que a propagação de cloretos é gerida principalmente pela relação água/cimento, pela presença de adições minerais, pelo tipo e consumo de cimento, utilização de aditivos, tempo e temperatura de exposição durante a cura, temperatura e umidade relativa durante o processo de difusão, tempo de exposição e concentração do agente agressivo.

O emprego de pozolanas como a sílica ativa nos concretos de cimento Portland vêm apresentando melhorias às propriedades do concreto, seja no estado fresco, seja no estado

endurecido, sendo indicada como solução para problemas de penetração de cloretos (KULAKOWSKI, 1994; VIEIRA et al., 1998; FERREIRA et al., 1998; entre outros, apud. HOFFMANN, 2001).

2.4.1 Cobrimento com adições minerais

Há anos as adições minerais vêm sendo utilizadas em cimentos e suas propriedades analisadas por pesquisadores com os mais diversos objetivos, como aumentar a resistência à compressão do concreto, modificação de propriedades, diminuição nos custos de produção de concretos e argamassas, além de estudos para a correta destinação para resíduos industriais.

“A utilização de adições minerais, além de proporcionarem melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, também proporcionam modificações no comportamento do concreto diante do processo de carbonatação”. (FERREIRA, 2013, p. 24)

Ainda segundo Ferreira (2013, p. 32), “as adições minerais de natureza pozolânica empregadas no concreto possuem dois mecanismos básicos com efeito na pasta de cimento e na estrutura interna do concreto: o efeito fíler (ação física) e o efeito pozolânico (ação química)”.

Considerando o efeito fíler, Mehta e Monteiro (2008) relatam que a incorporação de adições minerais em substituição parcial de cimento melhora a microestrutura do concreto, pois as pequenas partículas proporcionam o refinamento de poros. Com este resultado físico, os grãos menores proporcionam o empacotamento dos poros, o que diminui a permeabilidade do concreto, bem como diminuem o efeito parede na zona de transição, gerando o aumento da compacidade nessas regiões de interface pasta-agregado (apud. FERREIRA, 2013).

O efeito pozolânico se dá pela reação química entre as adições minerais e os produtos de hidratação do cimento. Ela é facilitada pela dissociação da sílica amorfa (proveniente dessas adições), produzindo sílica na solução de poros, que então reage com o hidróxido de cálcio para formar gel de C-S-H. (CASTRO, 2007)

Isaia (1999, apud. Ferreira, 2013), diz que de forma geral as adições minerais possuem esses dois tipos de ações, contudo para o efeito da carbonatação é indispensável conhecer qual deles predomina de acordo com o tipo de adição, dependendo ainda da relação água/aglomerante, do teor de adição e da eficiência da cura realizada.

Castro (2007), em sua pesquisa mostra que a incorporação das adições minerais de elevada reatividade traz como consequência um aumento da resistência à compressão dos

concretos, além disso, estes apresentam maior resistência à penetração de íons cloretos quando comparados ao concreto de referência (sem adições), visto que, enquanto os concretos de referência ficaram, em média, na faixa de alta penetrabilidade, os concretos com adições ficaram nas faixas de baixa e muito baixa penetrabilidade. Ainda segundo Castro (2007), a utilização das adições minerais melhorou as características da superfície do concreto, segundo analisado nos resultados de resistividade elétrica superficial, que é uma das principais propriedades controladoras do processo eletroquímico que leva ao fenômeno da corrosão das armaduras, os concretos com adições ficaram com resistividade maior do que o concreto de referência.

Dessa forma, Castro (2007), demonstra através os resultados obtidos para as variáveis, materiais e condições de ensaio adotadas, que concretos produzidos com adição de sílica ativa, metacaulim, ou outra adição de elevada reatividade, oferecem um alto potencial para a durabilidade, tanto à ação do gás carbônico, como à ação de cloretos e à resistividade elétrica superficial.

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), deve-se dar preferência a certos tipos de cimento Portland, a adições minerais e a aditivos mais adequados para resistir à agressividade ambiental, em função da natureza dessa agressividade. Ainda segundo os autores, para que haja maior resistência à lixiviação, deve-se dar preferência aos cimentos com adições tipo CP III e CP IV. Para reduzir o risco de reações álcali-agregado os cimentos pozolânicos tipo CP IV são os mais indicados. Para diminuir a penetração de carbonatação são preferíveis os cimentos tipo CP I e CP V sem adições. E para reduzir a penetração de cloretos deve dar prioridade aos cimentos com adições tipo CP III e CP IV com adição extra de sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz.

Referente à corrosão de armaduras e referente à deterioração do concreto, quando não há valores de ensaios experimentais nos concretos que realmente serão utilizados na estrutura, é possível adotar a classificação orientativa, apresentada no Quadro 2 e 3 respectivamente.

Quadro 2 - Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras

Classe de concreto	Classe de resistência	Máxima relação a/c	Deterioração por carbonatação	Deterioração por cloretos
			Teor de adições	Teor de adições
Durável	$\geq C50$	$\leq 0,38$	$\leq 10\%$ de pozolana, metacaulim ou escória de alto-forno	$\leq 20\%$ de pozolana ou metacaulim $\leq 65\%$ de escória de alto-forno aço galvanizado ou inox
Resistente	C35 C40 C45	$\leq 0,50$	$\leq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\leq 15\%$ de escória de alto-forno	$\leq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\leq 35\%$ de escória de alto-forno aço galvanizado ou inox
Normal	C25 C30	$\leq 0,62$	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Fonte: Medeiros, Andrade e Helene (2011, p. 787).

Quadro 3 – Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação

Classe de concreto	Classe de resistência	Deterioração por carbonatação		Deterioração por lixiviação
		Teor de C ₃ A no cimento anidro	Teor de adições	Teor de adições
Durável	$\geq C50$	$\leq 5\%$	$\geq 20\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 65\%$ escória de alto-forno	$\geq 20\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 65\%$ de escória de alto-forno
Resistente	C35 C40 C45	$\leq 5\%$	$\geq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 35\%$ de escória de alto-forno	$\geq 10\%$ de pozolana ou metacaulim $\geq 35\%$ de escória de alto-forno
Normal	C25 C30	$\leq 8\%$	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Fonte: Medeiros, Andrade e Helene (2011, p. 787).

2.4.2 Cobrimento com diferentes relações de água/cimento

A relação água/aglomerante afeta de forma direta as propriedades microestruturais do concreto sendo relacionada com a porosidade e com as propriedades mecânicas do concreto endurecido, especialmente na espessura de cobrimento que se encontra em contato com as fôrmas no momento de moldagem. Quando se aumenta a relação água/aglomerante por consequência se tem o aumento da porosidade, aumentando dessa forma também a difusão de gases para o interior dos poros da pasta de cimento hidratada, que resulta em uma maior velocidade de carbonatação dos concretos (PAPADAKIS, 1991 apud. FERREIRA, 2013).

Corroborando com o autor supracitado, Oliveira (2007, p. 83), diz que “assim como as adições minerais, a relação da variação água/aglomerante propicia concretos com várias propriedades relacionadas à sua durabilidade, tais como: permeabilidade a líquidos e gases, resistividade elétrica, absorção de água, dentre outras”.

O item 7.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014), estabelece critérios mínimos de qualidade para o f_{ck} e a relação água/cimento (a/c) do concreto utilizado em obra, levando em consideração as condições ambientais as quais a estrutura é exposta, conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤65	≤60	≤55	≤45
	CP	≤60	≤55	≤50	≤45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥20	≥25	≥30	≥40
	CP	≥25	≥30	≥35	≥40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 18)

Em casos de condições especiais de exposição do concreto a norma define os requisitos mínimos para máxima relação água/cimento e resistência característica mínima, que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de fck (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: NBR 12655 (ABNT 2015, p. 12)

Quanto à influência da relação água/aglomerante, tanto no estudo de carbonatação quanto no estudo de cloretos, Castro (2007), verificou o comportamento esperado, onde as relações água/aglomerante menores produziram os concretos de melhor desempenho.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, descreve-se como foi elaborado o programa de pesquisa. São apresentados os métodos adotados, os equipamentos e os materiais utilizados para a realização dos ensaios.

3.1 PROGRAMA DE PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa foi traçado uma estratégia em que se organiza o programa de pesquisa em duas etapas principais, sendo a primeira o estudo e embasamento teórico através de investigação bibliográfica baseada em normas e nos principais autores, os quais são referências no tema da proposta de estudo. E a segunda etapa, trata-se de pesquisa experimental, que assim como na primeira, será fundamentada em bibliografia especializada e em ensaios laboratoriais.

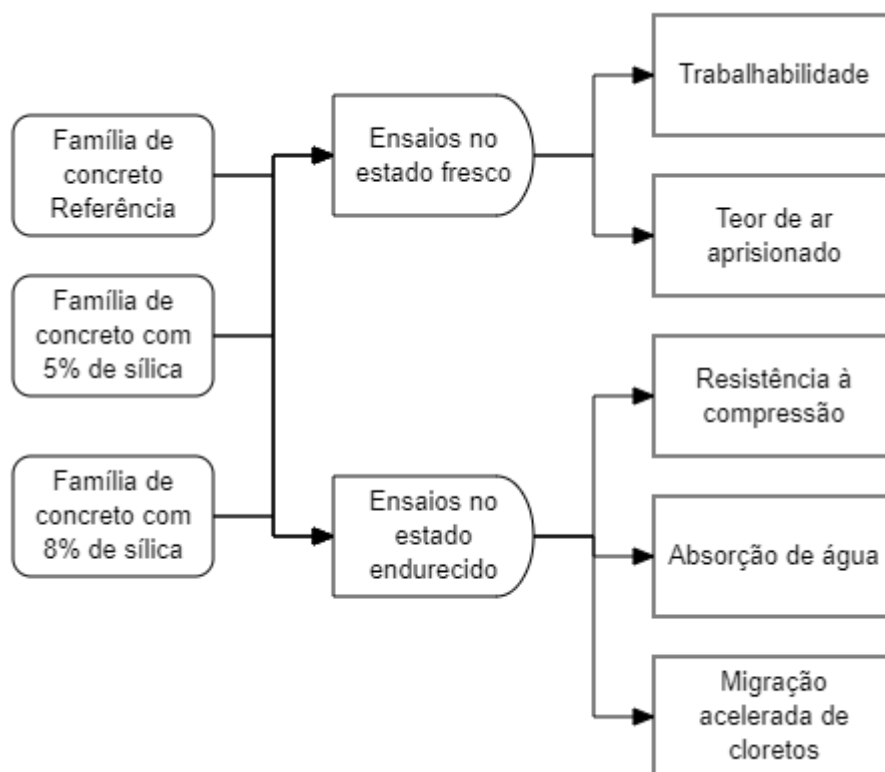
É importante ressaltar como afirma Possan (2010), que existem vários trabalhos na literatura destinados ao estudo para o entendimento e modelagem dos fatores que influenciam na durabilidade de estruturas de concreto armado, e conseqüentemente a vida útil das mesmas, onde destacam-se no cenário nacional (HELENE, 1993; DA SILVA, 1998; ANDRADE, 2001) e internacional (MORINAGA, 1990; UJI et al. 1990; CEB 238; dentre outros). Essas formulações são geralmente baseadas no modelo de Tuutti (1982) que propõe dois períodos para o processo de degradação (iniciação e propagação) que são modelados separadamente.

Com relação à modelagem da degradação do concreto, a autora supracitada ainda explica que no Brasil, destacam-se as formulações apresentadas por Carmona (2004) para iniciação da corrosão por carbonatação, por Andrade (2001) para o período de iniciação por cloretos e Da Silva (1998) para propagação de cloretos.

Uma vez que a pesquisa procura investigar o a eficiência de concreto com diferentes relações água cimento e diferentes teores de sílica ativa, buscou-se referencias em trabalhos nacionais relacionados ao tema, destacando-se as pesquisas formuladas por Oliveira (2007), Castro (2007), Adamatti (2016), Barreto (2014), e Andrade (2001), que por sua vez propõem o uso de ensaios acelerados de migração de cloretos e de carbonatação para estimar a vida útil de estruturas de concreto.

Para melhor compreensão da pesquisa é apresentado na Figura 3 um organograma das etapas a serem abordadas.

Figura 3 – Organograma principal da pesquisa



Fonte: Autor (2020).

A figura 3 apresenta os procedimentos principais do desenvolvimento desta pesquisa de forma organizada. Esses procedimentos são mais bem discutidos nos itens a seguir deste capítulo.

3.1.1 Materiais

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP IV 32 - Pozolânico do tipo cinza volante, produzido pela empresa Itambé, pois este cimento é o mais utilizado na região do estudo.

Foi utilizada a areia fina de quartzosa e areia de britagem de granito como agregado miúdo. Estes agregados foram utilizados com a umidade natural, por ser a condição mais adequada para simular situações cotidianas nas centrais de concreto. E como agregado graúdo a pedra britada originária de rocha granítica. A areia fina é proveniente de cava da região de Içara/SC, e os materiais provenientes de britagem de rocha são provenientes de Imbituba/SC. Foi utilizado ainda o aditivo redutor de água MiraFlow 973 produzido pela *Grace Products Corporation*.

3.1.2 Produção do concreto

No processo de produção do concreto foi realizada a pesagem dos materiais, feita a mistura em uma betoneira de 120 litros de capacidade e de eixo inclinado. A preparação das misturas foi executada da seguinte maneira.

Para que a água no concreto não fosse absorvida pela parede da betoneira que estava seca, ela foi umedecida por dentro com água, ligada por 20 segundos com a boca para baixo, tirando todo excesso.

Foram colocados todos os materiais secos e ligada por 1 minuto para fazer a mistura, em seguida com a betoneira em movimento, coloca-se em torno de 50 % da água e mistura por mais 1,5 minutos.

Na sequência foi acrescentado o aditivo e mais uma parte de água e misturou-se por mais 1,5 minutos. Foi adicionada água para o abatimento inicial desejado e feita a mistura por mais 3 minutos, totalizando 7 minutos.

Em seguida foi feito o slump inicial, abatimento pelo tronco de concreto, de 80 ± 20 mm – sendo um concreto da classe S50 da NBR 8953 (ABNT, 2015). Se o abatimento não fosse o desejado, realizava-se uma correção de adição de água.

Com o slump inicial ajustado, realizava-se o transporte do concreto como uma simulação, com a betoneira ligada e uma inclinação horizontal por 15 minutos. Na sequência era determinado o abatimento do concreto, analisando a perda de abatimento. Realizava-se a correção para um abatimento final de 140 ± 20 mm – sendo um concreto da classe S100 da NBR 8953 (ABNT, 2015).

Com o restante do concreto, os corpos de prova de 100 x 200 mm, como estabelecidos pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Durante o período de cura, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida em condições de 23 ± 2 °C de temperatura e com umidade relativa maior que 95%, estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os ensaios de compressão axial foram realizados seguindo o estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2019) nas idades de 7, 28 e 63 dias, utilizando três corpos de prova para cada idade. Realizou-se ensaio com a utilização da prensa EMIC PCE 150, essa exerceu uma força vertical sobre o corpo de prova até seu rompimento. Com o processo realizado em suas determinadas idades, se obteve os resultados necessários para a formulação dos resultados e discussões. Aos 28 dias foram realizados ensaios de absorção de água segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), utilizando três corpos de prova.

Para os ensaios em questão foram utilizados nove traços distintos conforme a tabela 4.

Tabela 4 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m³ de concreto. a) traço em massa. b) traço em volume. c) Propriedades tecnológicas do concreto

a)									
Traço	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cimento Portland - CP IV	180	285	425	158	250	367	150	240	356
Sílica ativa	-	-	-	14	20	30	23	35	51
Areia de Britagem	565	525	398	565	525	461	565	525	398
Areia Fina	395	326	2674	395	326	327	395	326	2674
Brita 1	1044	1085	1157	1044	1085	1090	1044	1085	1157
Água	205	191	190	205	191	190	205	191	190
Aditivo	1.30	2.50	2.40	1.30	2.50	2.40	1.30	2.50	2.40
b)									
Traço	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cimento Portland - CP IV	58	92	137	51	81	118	48	77	115
Sílica ativa	-	-	-	7	9	14	11	16	24
Areia de Britagem	213	198	150	213	198	174	213	198	150
Areia Fina	148	123	1005	148	123	123	148	123	1005
Brita 1	390	405	432	390	405	407	390	405	432
Água	205	191	190	205	191	190	205	191	190
Aditivo	1	2	2	1	2	2	1	2	2
c)									
Traço	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a/c mássico	1.14	0.67	0.45	1.19	0.71	0.48	1.18	0.69	0.47
a/c volumétrico	3.53	2.08	1.39	4.02	2.37	1.60	4.24	2.47	1.65
α mássico (%)	52%	51%	75%	52%	51%	52%	52%	51%	75%
α volumétrico (%)	52%	50%	75%	52%	50%	51%	52%	51%	75%
m	11.13	6.79	9.95	11.65	7.17	4.73	11.58	7.04	10.39
H (%)	9.4%	8.6%	4.1%	9.4%	8.7%	8.4%	9.4%	8.6%	4.1%
Teor de pasta volumétrico(%)	26.0%	28.2%	17.2%	26.0%	28.1%	31.6%	26.1%	28.3%	17.2%
Teor de ar (%)	2.1%	1.5%	1.8%	1.9%	2.1%	2.2%	2.2%	2.3%	1.7%
Slump final (mm)	140	140	140	140	140	140	140	140	140

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 4c, demonstra que os traços 1, 4 e 7 possuem as maiores relações de água/aglomerante, enquanto os traços 3, 6 e 9 possuem as menores, sendo os traços 1, 2 e 3 são de referência (sem adições).

De acordo com Tutikian e Helene (2011), quando se utiliza concretos especiais e sustentáveis, com altos teores de adições minerais, é necessário a modificação na determinação do teor de argamassa, quando se realiza a substituição em igualdade de massa, por conta do aumento volumétrico de pasta decorrente das diferenças de massas específicas.

Onde:

$m = a + p$ = relação agregados secos/cimento em massa em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa em kg/kg;

a/c = relação água/cimento em massa em kg/kg;

α = teor de argamassa seca na mistura seca deve ser constante para uma determinada família para assegurar a mesma coesão do concreto fresco, em kg/kg;

H = relação água/materiais secos deve ser constante para uma determinada família para assegurar o mesmo abatimento, em kg/kg.

3.1.3 Ensaio de migração de cloreto acelerado

O ensaio foi executado para a avaliação da penetração acelerada do cloreto em concretos com relações água/cimento distintas. O método utilizado foi o especificado pela C 1202 (ASTM, 2019), que consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico, de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura no centro de um recipiente sendo vedado ambos os lados. Um lado contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3 M, e o outro lado uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração.

A corrente elétrica que induz o ânion cloretos a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico é originada pela diferença de potencial entre meias-células com valor de $60 \pm 0,1$ V. Ela é registrada em intervalos de sessenta minutos por meio de amperímetros, tendo o ensaio uma duração de seis horas.

No 28º dia foi montado o aparato elétrico que viabiliza o ensaio. Para cada traço foram utilizados 3 corpos de prova. Os ensaios de migração de cloretos tiveram seis horas de duração. Foi necessária para a emissão da corrente uma fonte alimentadora (DC POWER SUPPLY, minipa MPL 3303M) e para medir a corrente passante foram utilizados seis multímetros (ICEL manaus, MD 1500) registrando a corrente a cada uma hora.

Com o ensaio realizado da penetração acelerada dos íons de cloreto C 1202 (ASTM, 2019), os corpos de prova foram rompidos à compressão diametral e, em seguida, foi aspergido nitrato de prata, verificando profundidade da penetração de cloretos.

3.1.4 Previsão de vida útil

Com base nos ensaios acelerados pode-se determinar a vida útil das estruturas de concreto utilizando a equação 3.

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

x = profundidade atingida por um determinado teor de cloretos no tempo t (m)

t = tempo (s)

k = coeficiente de penetração de cloretos ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$)

O valor de k pode ser determinado tanto para penetração de cloretos k_{Cl} quanto para carbonatação k_{CO_2} . Para a penetração de cloretos, aceita-se que a corrosão iniciará quando o teor de cloretos ficar maior que 0,3% (CALÇADA, 2004). Já a corrosão por carbonatação se inicia quando o pH ao redor da barra de aço ficar menor que 9 (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Assim, com base nestas relações foram estimados os prazos de vida útil para os diferentes concretos empregados, considerando as espessuras de cobrimento estabilidade pelo NBR 6118 (ABNT, 2014) para as diferentes classes de agressividade.

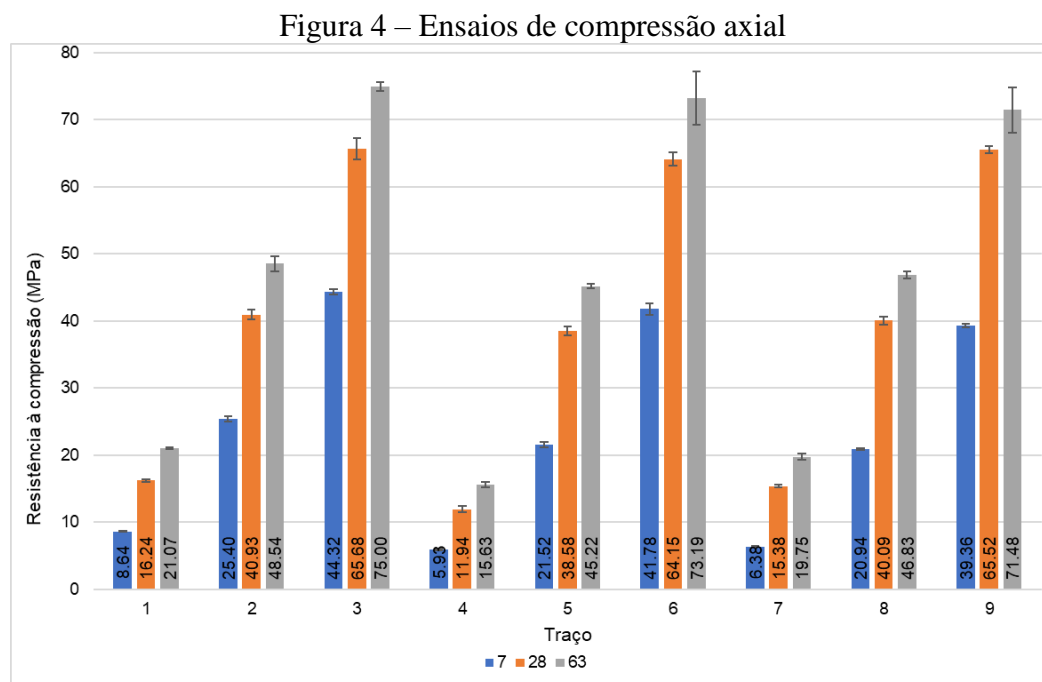
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os ensaios de penetração dos cloretos, ensaio de absorção de água e, também aqueles referentes aos ensaios de determinação da resistência à compressão.

Os ensaios seguiram os mesmos padrões e foram realizados de forma independente para cada um dos 9 traços investigados. Isso foi feito com intuito de comparar as propriedades da mistura sem adições minerais, denominada referência, com as demais, assim como investigar a relação água/cimento.

4.1 RESULTADO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL

Seguindo o estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2019), a figura 4 mostra os resultados das médias dos ensaios de compressão axial realizados nas idades de 7, 28 e 63 dias. As barras de erros representam o coeficiente de variação em porcentagem.

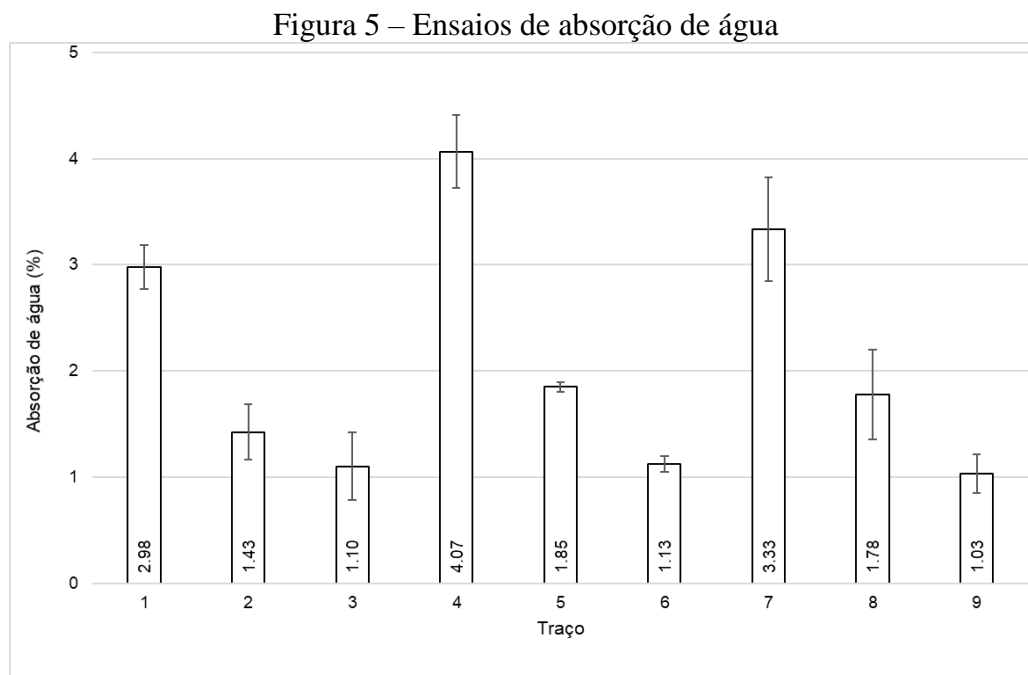


Fonte: Autor (2020).

Com base nos resultados apresentados observa-se que a resistência nas relações água cimento mais baixas (traços 3; 6; 9) a influência foi pequena. Porém nos traços com a/c alta (1; 4; 7) houve uma pequena redução nas idades iniciais que se manifestou menor em idades mais avançadas. Além disso, quando analisamos a relação a/ag, é notável que as menores relações apresentaram maior resistência à compressão axial em todas as idades.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água realizados para os 9 traços investigados nesta pesquisa. A figura 5 ilustra os resultados absorção representados pelas barras, contendo o desvio padrão de cada traço representado pela barra de erros.



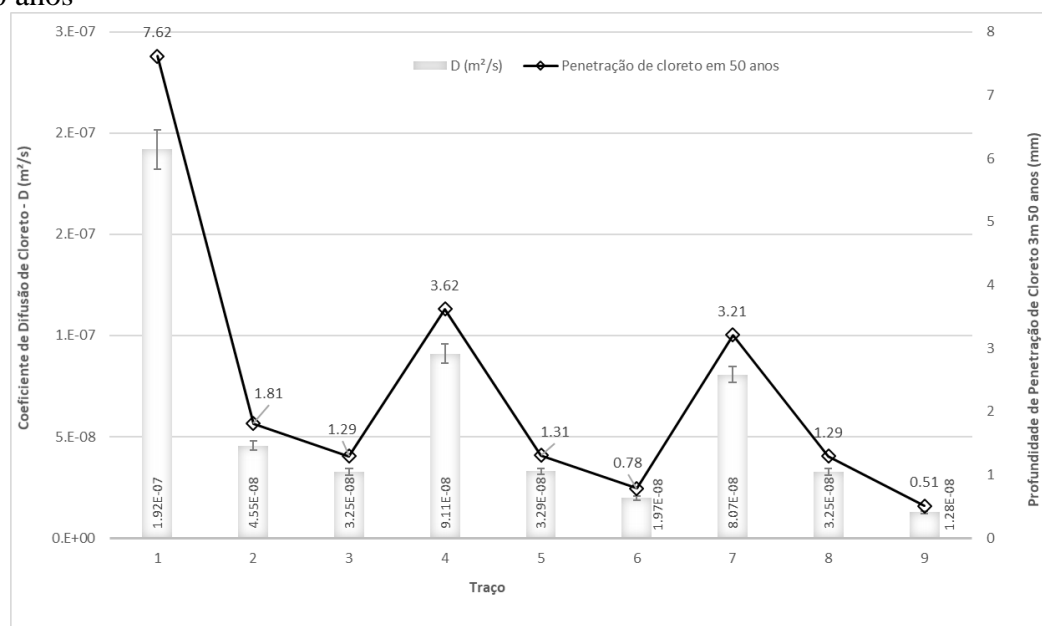
Fonte: Autor (2020).

Com base nos dados apresentados na figura 5, pode-se observar que a absorção de água é menor nos traços onde se tem a menor proporção da relação água/cimento, e menor absorção ainda quando além dessa relação, se tem a adição de sílica ativa.

4.3 RESULTADO DOS ENSAIOS DE MIGRAÇÃO DE CLORETO ACELERADO

Após a realização do ensaio de migração de cloretos foram determinadas as penetrações de cloretos para cada um dos 9 traços. Os resultados dos coeficientes de migração de cloreto foram calculados de acordo com o estabelecido pela ASTM C 1202. A profundidades de penetração foram determinadas considerando 50 anos de uso do concreto em condições de exposição a cloretos. Estes resultados podem ser observados na figura 6.

Figura 6 – Ensaio de migração de cloreto acelerado, previsão e verificação da durabilidade em 50 anos



Fonte: Autor (2020)

Observa-se na figura 6 que com a redução da relação água/aglomerante há uma redução na porosidade, tornando a estrutura da pasta mais fechada, dificultando a passagem dos íons através do concreto. Assim, observa-se que o aumento do teor de adição de sílica ativa nos traços onde as relações água/cimento são menores proporcionou um maior refinamento na estrutura dos poros do concreto e uma microestrutura mais fechada, dificultando a entrada dos íons cloreto para o interior do concreto.

Portanto, a figura 6 apresenta os resultados da frente de penetração de cloreto para os diferentes traços produzidos e os resultados de previsão da frente de cloretos são para 50 anos, idade mínima de durabilidade estabelecida pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

4 CONCLUSÃO

Inúmeros estudos sobre problemas relacionados à qualidade do revestimento e à durabilidade das estruturas de concreto armado indicam que uma das principais causas das manifestações patológicas verificadas são decorrentes de falhas ao longo do seu processo produtivo e durante sua utilização, bem como o uso de materiais inadequados.

Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo investigar a qualidade do concreto destinado a estruturas frente ao desempenho requerido, visto que o fator durabilidade proporciona segurança na esfera econômica, diminuindo consideravelmente gastos futuros com manutenção, levando em consideração a segurança de seus habitantes e usuários.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizados ensaios laboratoriais, apresentando métodos avaliativos dos indicadores de durabilidade, sendo: ensaios de compressão axial, ensaios de absorção de água e de migração de cloreto acelerado, para previsão de vida útil e durabilidade de 50 anos, por modelos matemáticos conceituados. Foram utilizados diferentes traços de concreto como os de referência (sem adições) e traços com adição de sílica ativa – com teores de 5 e 8%, todos com relação a/ag distintas.

Ao longo dos experimentos, foi possível constatar que quanto maior a relação a/ag, menor a resistência à compressão e maior a penetração e a difusão de cloretos. Constatou-se ainda que para todas as relações a/ag a resistência à compressão aumenta conforme a idade evolui e o coeficiente de cloretos diminui.

Observou-se também que a utilização da sílica ativa trouxe melhorias ao concreto, o qual mostrou-se mais eficiente com relação a durabilidade, reduzindo o coeficiente de difusão de cloretos. Já o aumento da resistência à compressão não foi significativo.

Sendo assim, a substituição parcial do cimento por sílica ativa, proporcionou uma maior capacidade de proteção à penetração de íons cloreto resultando em uma maior durabilidade das estruturas de concreto. Desta forma, avalia-se de forma positiva a incorporação da sílica ativa, visto que o objetivo desta adição é proteger a pasta de forma mais significativa contra a ação de íons cloretos, diminuindo a porosidade e conseqüentemente dificultando a absorção de água.

Portanto, quando não são analisadas as características do concreto, como sua espessura, qualidade da camada de revestimento em relação a agressividade do meio, a probabilidade de ocorrer a corrosão das armaduras é muito maior.

Com base nos resultados obtidos neste programa experimental, para as condições de ensaios, variáveis e materiais adotados, considerando-se as limitações deste estudo, pode-se

constatar que a produção do concreto com baixa relação a/c associada à adição de minerais, no caso do estudo, sílica ativa, podem proporcionar maior proteção física às armaduras das estruturas de concreto e uma maior vida útil.

REFERÊNCIAS

- ADAMATTI, Deise Santos. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: Impacto da Corrosão por Íons Cloreto em Diferentes Condições de Exposição**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/149394>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira *et al.* Previsão da vida útil de estruturas de concreto atacadas pela corrosão das armaduras: panorama atual e perspectivas futuras. In: congresso brasileiro do concreto, 51., 2009, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: IBRACON, 2009. p. 1-15. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283732656_Previsao_da_vida_util_de_estruturas_de_concreto_atacadas_pela_corrosao_das_armaduras_panorama_atual_e_perspectivas_futuras>. Acesso em: 07 jun. 2020.
- ANDRADE, J.J.O. **Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001, 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2613>>. Acesso em: 14 mar. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. ABNT, Brasil, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projetos de Estruturas de Concreto – Procedimento. ABNT, Brasil, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. ABNT, Brasil, 2015.
- BARRETO, Maria Fernanda Fávero Menna. **Avaliação de desempenho de espaçadores plásticos: proposição e avanço de métodos de avaliação**. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/116603/000966675.pdf?sequen>>. Acesso em: 25 mar. 2020
- BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, p. 320.
- BRANCO, Fernando; PAULO, Pedro; GARRIDO, Mário. **Vida Útil na Construção Civil. Boletins Técnicos Alconpat**: Boletim Técnico 04, Mérida – México, n. 04, p. 1-20, 2013.
- BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1998, 137 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14122017-145657/publico/Dissert_Brandao_AnaMS.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. v. 1. 237p.

CASTRO, A. ; FERREIRA, R. ; LOPES, A. N. M. ; COUTO, A. B. P. ; BRAUN, V. ; CARASEK, H. ; CASCUDO, O. . **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto**. 2007. (Apresentação de Trabalho/Congresso). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it38.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2020.

DIETRICH, Yustane Paula. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 2015, 181 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Espírito Santo, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4004/1/tese_9466_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Mestrado%20PPGEC%20UFES%202015.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

HELENE, Paulo. **Vida útil nas construções de concreto**. In: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, VI, Porto alegre, 1997. **Anais...** Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

HELENE, Paulo. **A Nova NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto** In: II Seminário de Patologia das Construções, 2004, Porto Alegre. **Novos Materiais e Tecnologias Emergentes**. Porto Alegre: LEME.UFRGS, 2004. v.1. p.1/30 – 30/30. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/185.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2020.

MARAN, Ana Paula. **Análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobrimento especificada em lajes de concreto armado**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Curso Pós-graduação em de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127876>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

MATTOS, Hilmar. **Espaçadores para armaduras de concreto: aplicações técnicas**. Artigo (Especialização) – Programa de Pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Curso de Avaliações e Perícias de Engenharia. Belo Horizonte, 2015. 28 f. Disponível em: <https://www.academia.edu/20787425/ESPA%C3%87ADORES_PARA_ARMADURAS_DE_CONCRETO_aplica%C3%A7%C3%B5es_t%C3%A9cnicas>. Acesso em: 20 mai. 2020.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. R. L.. **Concreto: Ciência e Tecnologia: Capítulo 22 - Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2011. 37 p. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2020.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, Adrielli Morais de. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão nas armaduras induzida por cloretos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiás, 2007, 255 f.. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/673/1/dissertacao%20Adrielli.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2020.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28923>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações**: abordagem geral. Revista Técnico-Científica do CREA-PR - ISSN 2358-5420 - 1ª edição, 2013, 14 p. Disponível em: <<http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/14/10>>. Acesso em: 31 mai. 2020.

RIBEIRO, D. V.; HELENE, P. R. L.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENCO, M. Z.. **Corrosão em estruturas de concreto**: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 246 p.

TAKATA, Leandro Teixeira. **Aspectos executivos e a qualidade das estruturas em concreto armado**: estudo de caso. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologias, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4655/3273.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

TUTIKIAN, B. ; HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1283-1325. Disponível em:< <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2020.

TUTIKIAN, B. ; ISAIA, Geraldo C. ; HELENE, Paulo . **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1283-1325. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc53.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2020.

WEBER, Luis Fernando Lucca. **Cobrimento de armadura em estruturas de concreto armado**: análise comparativa entre os valores projetados e executados nas obras do vale do taquari. 2014. 97 f. TCC II (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/643/1/2014LuisFernandoLuccaWeber.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2020.