



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

DANIEL CAMPOS DA ROSA

LEONAM FERREIRA SABINO

**INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS NORMATIZADOS PARA ELEMENTOS DE
CONCRETO ENTERRADOS FRENTE A DURABILIDADE REQUERIDA**

Tubarão

2020

DANIEL CAMPOS DA ROSA
LEONAM FERREIRA SABINO

**INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS NORMATIZADOS PARA ELEMENTOS DE
CONCRETO ENTERRADOS FRENTE A DURABILIDADE REQUERIDA**

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

DANIEL CAMPOS DA ROSA
LEONAM FERREIRA SABINO

**INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS NORMATIZADOS PARA ELEMENTOS DE
CONCRETO ENTERRADOS FRENTE A DURABILIDADE REQUERIDA**

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, 03 de agosto de 2020.

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

Prof. Beatriz Anselmo Pereira, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Maurício Alberto Büchelle Motta, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos pais, por nos apoiarem na nossa trajetória e por nunca terem medido esforços para nos proporcionar um ensino de qualidade durante todo o período escolar, que foi essencial para alcançarmos esse sonho.

Ao nosso orientador, professor Rennan Medeiros, pela excelente orientação, que conduziu o nosso trabalho com paciência e dedicação, contribuindo sempre em todo o esse período de trabalho e pesquisa, e também a todos os colaboradores do laboratório de Eng. Civil, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos nossos familiares e amigos, por todo apoio e compreensão durante esse período tão importante de formação acadêmica.

“Aprender é, de longe, a maior recompensa”

(William Hazlitt).

RESUMO

A durabilidade passou a ganhar importância à medida que as estruturas constituídas de concreto armado passaram a apresentar problemas relacionados a degradação de seus materiais constituintes, e tornou-se necessário buscar as causas desses problemas, que estão relacionados a agressividade do ambiente onde a estrutura de concreto está inserida. Com isso, esta pesquisa teve como objetivo investigar os parâmetros normatizados para elementos de concreto enterrado frente a durabilidade e vida útil requerida. Para isso, foi estruturada a investigação em duas etapas, a primeira etapa foi constituída na confecção de traços de concreto enterrado, com base na norma NBR 6122 (ABNT, 2019), para concretos de estaca hélice contínua, cada um contendo diferentes aditivos, como sílica ativa, metacaulim e aditivo cristalizante. Na segunda etapa foi realizado ensaio acelerado de penetração de cloretos e ataque ácido por imersão, onde foi utilizado método de previsão de vida útil, para avaliar a durabilidade frente aos parâmetros requeridos, e comparar o desempenho de cada traço para um ambiente com agressividade severa. Com os resultados da etapa 2, foi possível concluir que o traço contendo sílica ativa obteve o melhor desempenho, e que alguns traços não cumpriram os parâmetros requeridos, revelando que ainda necessitam melhores especificações quanto a parâmetros de agressividade do ambiente e ensaios nas normativas brasileiras, para garantir durabilidade e vida útil requeridas para concretos enterrados.

Palavras-chave: Durabilidade; vida útil; concreto enterrado.

ABSTRACT

Durability started to gain value as the structures constituted of reinforced concrete started to show problems related to the degradation of its constituent materials, and it became necessary to look for the causes of these problems, which are related to the aggressiveness of the environment where the concrete structure is inserted. Thus, this research aimed to investigate the standardized parameters for buried concrete elements in view of the required durability and lifespan. For this, the investigation was structured in two steps, the first step was constituted in the making of buried concrete traces, based on the NBR 6122 standard (ABNT, 2019), for helix continuous cutting pile concrete, each containing different additives, such as microsilica, metakaolin and crystallizing additive. In the second step, an accelerated chloride penetration test and acid attack by immersion were carried out, where a life expectancy method was used to estimate the durability against the required parameters, and to compare the performance of each trace for an environment with severe aggressiveness. With the results of step 2, it was possible to conclude that the trace containing microsilica obtained the best performance, and that some traces didn't reach the required parameters, showing that they still need better specifications regarding parameters of environmental aggressiveness and tests for the Brazilian standards, to guarantee durability and the required lifespan for buried concrete.

Keywords: Durability. Lifespan. Buried concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de classes de exposição atuando conjuntamente em componentes típicos em regiões litorâneas.....	27
Figura 2 – Exemplos de classes de exposição atuando conjuntamente em componentes típicos em regiões interioranas	28
Figura 3 – Exemplos de classes de exposição simultaneamente aplicáveis em uma casa residencial.....	28
Figura 4 - Esquema de um cubo de material sólido atravessado por poros retos e paralelos de raio R (a) e raio r (b)	33
Figura 5 - Esquema do processo de difusão do concreto	35
Figura 6 - Representação de cilindro de concreto exposto a água do mar	36
Figura 7 - Formação dos cristais no interior do concreto (a) Concreto não tratado; (b) início da formação dos cristais; (c) cristalização final	37
Figura 8 - Formação de cristais na fissura.....	38
Figura 9 - Organograma das etapas	43
Figura 10 – Corpos de prova moldados	46
Figura 11 – Aplicação de nitrato de prata nos corpos de prova	47
Figura 12 – Fotos ensaio acelerado penetração cloretos dos traços 1-9.	48
Figura 13 - Fotos ensaio de imersão do ataque ácido de ácido clorídrico dos traços 1-9.....	50
Figura 14 – Resultados do ensaio de penetração de cloretos	52
Figura 15 – Resultados do ensaio de ataque químico por ácido clorídrico.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – VUP para os níveis mínimo, intermediário e superior para a estrutura da edificação residencial.....	21
Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal da armadura.....	22
Tabela 3 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto, para estruturas em concreto armado	23
Tabela 4 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos	23
Tabela 5 - Características recomendadas para concreto exposto a soluções aquosas agressivas	24
Tabela 6 – Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto	24
Tabela 7 – Valor do cobrimento mínimo, requisitos relativos à durabilidade das armaduras de concreto armado de acordo com a EN 10080.....	30
Tabela 8 – Valores do cobrimento mínimo da Tabela 6 acrescidos da tolerância de execução $\Delta c = 10$ mm	31
Tabela 9 – Propriedades físicas dos Cimento Portland CP V – ARI e CP IV – 32 RS	40
Tabela 10 - Propriedades químicas dos Cimento Portland CP V – ARI e CP IV – 32 RS.....	41
Tabela 11 – Características do aditivo <i>Mira flow 973</i>	41
Tabela 12 – Características do aditivo cristalizante Penetron.....	41
Tabela 13 – Propriedades dos agregados utilizados	41
Tabela 14 - Composição química por fluorescência de raio-X das adições	42
Tabela 15 - Características físicas e capacidade de fixação do CaOH_2 das adições	42
Tabela 16 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m ³ de concreto. a) traço em massa. b) traço em volume. c) Propriedades tecnológicas	44
Tabela 20 – Previsão do ingresso de cloreto através do coeficiente de penetração de cloreto os diferentes traços, feitos com a base na norma NBR 6122 (concreto produzido)	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental.....	22
Quadro 2 - Classes de exposição em função das condições ambientais	25
Quadro 3 – Valores limite das classes de exposição para o ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas.....	27
Quadro 5 – Classes indicativas de resistência	29
Quadro 6 – Classe estrutural com base nos períodos de utilização e exemplos de situações ..	29
Quadro 7 – Classificação estrutural recomendada.....	30

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – American Concrete Institute
ASTM – American Society for Testing and Materials
CP – Cimento Portland
EN – European Standards
IBRACON – Instituto dos Auditores Independentes do Brasil
NP – Norma Portuguesa
NBR – Norma Brasileira
pH – Potencial Hidrogeniônico
EN – European Standards
VUP – Vida útil de Projeto

LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1) Coeficiente de permeabilidade.....	34
(Equação 2) Taxa de transferência de massa.....	34
(Equação 3) Reação de cristalização.....	38
(Equação 4) Calculo da previsão de vida útil	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVO	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO	20
2.1.1	Especificações das normas brasileiras	20
2.1.2	Especificações das normas europeias	25
2.2	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO	31
2.2.1	Ataque por ácido	32
2.2.2	Estrutura Dos Poros	32
2.2.3	Permeabilidade	34
2.2.4	Difusão	34
2.2.5	Absorção Capilar	35
2.3	TÉCNICAS DE PROTEÇÃO DE ESTURURAS DE CONCRETO	35
2.3.1	Aditivos Cristalizantes	36
3	METODOLOGIA	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO DO CONCRETO EM ESTRUTURAS ENTERRADAS	39
3.2	MATERIAIS	40
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
3.3.1	Etapa 1	43
3.3.2	Etapa 2	46
3.3.2.1	Ataque de cloretos	46
3.3.2.2	Ataque ácido	49
3.3.2.3	Método de previsão de vida útil	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	RESULTADOS ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS	52
4.2	RESULTADOS ENSAIO DE ATAQUE QUÍMICO	53
4.3	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	54
5	CONCLUSÃO	56

REFERÊNCIAS.....	58
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Desde que o concreto armado começou a ser empregado na construção civil, no final do século XIX, pouco se conhecia quanto a durabilidade dessas estruturas até as últimas décadas. Acreditava-se que estas estruturas tinham uma durabilidade ilimitada, e a durabilidade não era considerada como um fator importante na elaboração de projetos estruturais. A durabilidade passou a ganhar importância à medida que as estruturas constituídas de concreto armado passaram a apresentar problemas relacionados a degradação de seus materiais constituintes. Segundo Andrade e Silva (2005), o dano ao concreto armado, seja pela sua deterioração natural pelo passar do tempo, ou por fatores não previstos em projeto, pode gerar diversos tipos de manifestações patológicas que comprometem o desempenho das estruturas, prejudicando tanto a sua capacidade mecânica e funcional, quanto a estética da edificação. Além disso, os custos de manutenção e recuperação de uma estrutura de concreto armado danificada demanda expressivas cifras, podendo ultrapassar a faixa de 40% em relação ao custo de execução de uma edificação, além dos prejuízos sociais (MEIRA; PADARATZ, 2002).

Com isso, começou a surgir a necessidade de entender os mecanismos de deterioração do concreto armado, que sofrem diversos problemas patológicos ao longo do tempo, não apenas em razão de falhas no projeto e na execução, mas também pelo ciclo de vida da estrutura – já que ela envelhece com o tempo. Outro ponto importante a ser considerado é a interação dos materiais (concreto e aço) com o ambiente em que a estrutura se localiza, sendo que esta interação depende da propriedade dos materiais, da forma estrutural, do cobrimento da armadura, do grau de agressividade do ambiente, que podem reduzir drasticamente o desempenho, durabilidade e conseqüentemente a sua vida útil. Por isso, é importante que os engenheiros civis conheçam as causas, os mecanismos dos sintomas da degradação dessas estruturas, bem como os respectivos meios de prevenção da manifestação desses problemas patológicos, para que as edificações possam ser concebidas, projetadas e executadas de tal forma que se tornem mais duráveis, seguras e confiáveis, com custos de manutenção aceitáveis e com a máxima vida útil possível.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, onde o microclima exerce influência decisiva na classificação de agressividade do ambiente, onde se consideram microclimas de agressividade mais branda em ambientes internos secos e regiões de clima seco, e os microclimas mais agressivos em regiões de clima úmido com umidade

relativa média do ar maior que 65% bem como em ambientes quimicamente agressivos. A superestrutura tem exposição a diversos microclimas que possuem grande influência na durabilidade do concreto armado, assim como a infraestrutura tem exposição aos agentes agressivos do solo, podendo sofrer corrosão da armadura devido a presença de cloretos, sulfatos e ácidos se expostos a solos contaminados com elevados nível do lençol freático, onde não só os agentes nocivos da água degradam a estrutura, mas também o movimento da água em contato com estes elementos estruturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o avanço tecnológico na construção civil, torna-se possível estudos mais específicos para estabelecer o tipo de concreto que deverá ser utilizado em cada situação, variando o tipo de cimento, relação água e cimento, espessura do cobrimento da armadura.

Do ponto de vista da exposição do material ao meio ambiente, Helene (2001) indica certos tipos de cimento Portland, adições e aditivos mais adequados ao uso em ambientes agressivos. Do ponto de vista da maior resistência à lixiviação são preferíveis os cimentos com adições tipo CP II e CP IV; para minimizar o risco de reações álcali-agregado são preferíveis os cimentos pozolânicos tipo CP IV; para reduzir a profundidade de carbonatação são preferíveis os do tipo CP I e CP V e para reduzir a penetração de cloretos são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III e CP IV, assim como adição extra de microssílica e cinza de casca de arroz.

Para o comitê 201.2R do *American Concrete Institute*, a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente de trabalho (ACI, 1994). As normas de projeto e execução de estruturas estabelecem parâmetros a serem seguidos com o intuito de *garantir* a durabilidade das estruturas. Contudo, não há especificação em relação aos ensaios que devem ser realizados para aferir esta durabilidade. Assim, existem dúvidas em relação a real durabilidade dos concretos utilizados, por exemplo, enterrados. Por isso, esta pesquisa se propõe a investigar os indicadores de durabilidade dos concretos utilizados para concepção de elementos estruturais a serem utilizados em fundações, considerando mecanismos de deterioração por ataques – ácidos e cloretos.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

Investigar os critérios de durabilidade existentes para estruturas enterradas frente a vida útil requerida para estas estruturas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar as tipificações definidas nas normas ABNT e EN quanto para garantia de durabilidade de estruturas de concreto enterradas;
- Investigar as propriedades de concretos produzidos de acordo com as especificações das normas frente aos métodos de ensaios para determinação da durabilidade do concreto;
- Comparar o desempenho de aditivos cristalizantes, e de adições minerais para reforçar a matriz de concretos para estruturas enterradas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para classificar uma estrutura de concreto enterrada é recomendado saber em qual o ambiente a mesma se encontra, para determinar o tipo de ação. A norma nacional NBR 12655 (ABNT, 2015) apresenta três tipos de ambientes, o marinho, o urbano e o industrial e suas determinadas classes de agressividade, e algumas recomendações específicas para durabilidade de concretos enterrados e os limites de agentes agressivos no solo. O ambiente urbano tem sua classe de agressividade não muito elevada, e os ambientes marinho e industrial têm sua classe de agressividade elevada, devido à grande quantidade de agentes agressivos presentes no solo, na água e no ar (ISAIA, 2011).

Dentro de um ambiente agressivo para o concreto, como um ambiente marinho ou industrial, os elementos que ficam enterrados podem estar expostos aos ataques de agentes químicos, que ficam em determinada proporção, diluídos na água presentes na parte solúvel do solo, já que o concreto não pode ser atacado por substâncias sólidas, a não ser por impacto (ACI, 2008). Os agentes químicos nocivos penetram no concreto pelo mecanismo de absorção capilar, onde os agentes agressivos presentes no meio aquoso penetram no concreto a partir do fluxo desse líquido, pelo efeito de tensão superficial atuante nos poros capilares.

Segundo a norma internacional EN 206-1 (EN, 2007) e a norma nacional NBR 12655 (ABNT, 2015), são considerados determinados componentes para definir o grau da agressividade da água, como a determinação do pH da água, teor de magnésio, amônia, íons sulfatos, e também do grau de agressividade dos solos, como a determinação do grau de acidez e teor de sulfatos em função da massa. Com isso, as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015) estabelecem os requisitos mínimos do projeto de concreto armado, de acordo com a classe de agressividade do ambiente, para que atinja as características necessárias de desempenho e durabilidade para alcançar a vida útil necessária.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), no ambiente marinho, a água salgada é o principal agente responsável por processos físicos e químicos de degradação. Os agentes agressivos presentes no ambiente marinho podem causar tanto a corrosão da armadura, quanto a corrosão do concreto (matriz e cimento). Isso se explica pelo fato de que, na água do mar é possível se encontrarem todos os elementos naturais conhecidos da tabela periódica, cada um em uma determinada proporção. A influência dele na durabilidade das estruturas de concreto depende do microclima ou zona no qual ele se encontra, que podem ser: zona de atmosfera marinha, zona de respingo, zona de variação de maré e zona submersa que é a região onde a estrutura de concreto encontra-se totalmente submersa.

Os ambientes marinho e industrial geram um grande perigo para o desempenho e durabilidade das estruturas enterradas, como apresentado anteriormente, devido à grande quantidade de agentes agressivos que podem atacar o concreto armado. Por isso é de grande importância a análise de tais situações e se o concreto está dentro dos parâmetros estabelecidos nas normas.

2.1 DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO

Nada é eterno tudo vai degradar, perde a capacidade de atender o que o usuário precisa. Um material se degrada, pois, no meio ambiente que inclui usuários tem fatores de degradação que reage com material, com produto componente fazendo com que ele perca a capacidade alterando suas propriedades. A engenharia está estudando esses fenômenos para se ter uma maior durabilidade.

Em função dos crescentes problemas de degradação precoce observados nas estruturas, das novas necessidades competitivas e das exigências de sustentabilidade no setor da construção civil, observa-se, nas últimas duas décadas, uma tendência mundial no sentido de privilegiar os aspectos de projeto voltados a durabilidade e a extensão da vida útil das estruturas de concreto armado e pretendido (CLIFTON, 1993, p.611).

Durabilidade depende de diferentes fatores ligados a fase de um projeto, produção e caracterização dos insumos, preparação do concreto, execução da estrutura. Por exemplo, uma ponte que apresenta vários tipos de agressividade na mesma estrutura, um concreto usado na infraestrutura pode ser diferente de um concreto usado na mesoestrutura, pois a fundação está em contato diretamente com água, isso exige um maior cobrimento da armadura.

Para a NBR 6118 (ABNT, 2014), item 5.1.2.3, durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais prevista e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. No item 6.1 prescreve que “as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil”.

2.1.1 Especificações das normas brasileiras

A norma de desempenho de estruturas de concreto NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece uma vida útil de projeto (VUP) de no mínimo 50 anos, e 75 para níveis superiores de durabilidade quando se trata de estruturas principais, conforme a tabela 1, e as normas que

definem as especificações e recomendações necessárias para se obter a durabilidade adequada para atingir essa vida útil de projeto mínima do elemento estrutural são a NBR 6118 (ABNT, 2014) de projeto de estruturas de concreto, e a NBR 12655 (ABNT, 2015) de preparo, controle, recebimento e aceitação de concreto de Cimento Portland.

Tabela 1 – VUP para os níveis mínimo, intermediário e superior para a estrutura da edificação residencial

Parte da edificação Exemplos	Exemplo	VUP (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura principal	Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos	≥50	≥63	≥75

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2013, p.24).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece quatro tipos de classe de agressividade ambiental (CAA), e a partir do tipo escolhido, são definidos a relação de água cimento, o cobrimento nominal da armadura e a classe do concreto, visando garantir proteção física, mecânica e química das armaduras durante a vida útil da estrutura. Quando atendidos esses critérios estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade estrutural da estrutura será em função das características e especificações do concreto, onde a norma NBR 12655 (ABNT, 2015) define uma relação água/cimento máxima, resistência a compressão mínima, um consumo mínimo de cimento, e também uma classificação de agressividade do solo em função da quantidade de sulfato solúvel em água presente no terreno e o teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto. Conforme o quadro 1.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1 2}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹	Grande
		Industrial ^{1 2}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1 3}	Elevado
		Respingos de maré	

Notas do quadro 1:

¹ pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

² pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65% partes da estrutura protegidas da chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

³ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p.17).

Se determina o cobrimento do elemento de acordo com a respectiva classe de agressividade. Para garantir o cobrimento mínimo, deve-se considerar no projeto o cobrimento nominal, que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução de igual a 10mm. O cobrimento nominal é a distância da superfície externa da armadura até a face do elemento de concreto armado. Conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal da armadura

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ¹	30	30	40	50

Notas da tabela 2:

¹ no trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal > 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, p.20).

De acordo com a classe de agressividade se determina a relação água/cimento, consumo de cimento e a classe de resistência do concreto. Conforme tabela 3.

Tabela 3 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto, para estruturas em concreto armado

Concreto	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
Consumo de cimento por metro cúbico de concreto kg/m ³	≥260	≥280	≥320	≥360

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

Para as soluções aquosas e solos a norma apresenta a condição de exposição em função do teor de sulfatos. O concreto quando exposto a agentes agressivos de sulfato devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos, e atender os parâmetros estabelecidos de relação água/cimento, e à resistência característica a compressão do concreto. Conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄), presente no solo- % em massa	Sulfato solúvel (SO ₄), presente na água- ppm	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal ¹	Mínimo f _{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)- MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Tabela 3	Tabela 3
Moderada ²	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa ³	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,40	40

Notas da Tabela 4:

¹ Baixa relação a/c ou resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

² A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO₄ seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

³ Para condições severa de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015, p.13).

A norma também apresenta critérios para classificação de agressividade do ambiente onde o concreto está inserido, em função da proporção de componentes agressivos nas soluções aquosas. Conforme tabela 5.

Tabela 5 - Características recomendadas para concreto exposto a soluções aquosas agressivas

Condições de exposição em função da agressividade	pH	CO ₂ agressivo mg/L	Íon magnésio mg/L	Íon amônia mg/L	Resíduo Sólido mg/L	Máxima relação água/cimento	Mínimo f_{ck} MPa
Fraca	7 a 6	< 30	< 100	< 100	> 150	Tabela 3	Tabela 3
Moderada	6 a 5,5	30 a 45	100 a 200	100 a 150	150 a 50	0,50	35
Severa	< 5,5	> 45	> 200	> 150	< 50	0,45	40

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015, p.22).

Para proteger as armaduras do concreto, a norma prevê o teor máximo de íons cloreto no concreto endurecido, para as determinadas condições de serviço da estrutura e classe de agressividade. Conforme tabela 6.

Tabela 6 – Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade	Condições de serviços da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl) no concreto (% sobre massa de cimento)
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviços da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviços da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015, p.13).

Porém, a norma NBR 6122 (ABNT, 2019) para projeto e execução de fundações, também recomenda especificações mínimas para as estruturas que mantêm contato com solo, recomendando um consumo de cimento maior do que o especificado na NBR 12655 (ABNT, 2015), por exemplo o consumo de cimento superior a 400 kg/m³ para estaca hélice contínua, não ficando claro os motivos desse elevado consumo, deixando confuso quais recomendações devem ser priorizadas para manter a durabilidade adequada da estrutura.

No Brasil existem variados tipos de exposições ambientais, existindo diversos tipos de climas e microclimas nas diversas regiões do país, onde variam a umidade do ar e também os tipos de solo que expõem a estrutura a diversos tipos de agressividades, sendo estes parâmetros de importância crucial para durabilidade das estruturas, e estando apresentados de forma muito simplificada nas normas nacionais. Por esses motivos, surgem dificuldades de interpretação do que consta nestas normas, por estar sendo apresentada especificações e recomendações de forma simplificada, e com informações divididas em várias normas.

2.1.2 Especificações das normas europeias

Para especificações das normas europeias, se destaca os cobrimentos de armaduras de peças de concreto armado com vista à vida útil e durabilidade e as classes de resistência apresentadas na norma NPEN 1992-1-1 (EN, 2010) e NPEN 206-1 (EN, 2007) de Portugal, com base nas classes de exposição. A seguir o quadro 2 apresenta a nomenclatura e os parâmetros para cada classe de exposição e as figuras 1, 2 e 3 com exemplos das classes de exposição atuando em uma estrutura:

Quadro 2 - Classes de exposição em função das condições ambientais

(Continua)

Descrição da classe	Descrição do Ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposições
1 - NENHUM RISCO DE CORROSÃO OU ATAQUE		
X0	Para concreto sem armadura ou elementos metálicos embebidos; todas as exposições exceto de gelo/degelo, abrase ou ataque químico. Para concreto com armadura ou elementos metálicos embebidos; muito seco.	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar ambiente muito baixa.
2 - CORROSÃO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO		
XC1	Seco ou permanentemente úmido	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar ambiente muito baixa.
XC2	Úmido, raramente seco	Superfícies de concreto sujeitos a contato prolongado com água; Um grande número de fundações.
XC3	Umidade moderada	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar ambiente moderada ou elevada; Concreto exterior protegido da chuva.
XC4	Alternadamente úmido e seco	Superfícies de concreto sujeitos a contato com água; Não incluídas na classe de exposição XC2.
3 - CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS		
XD1	Umidade moderada	Superfícies de concreto expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Úmido, raramente seco	Piscinas; Elementos de concreto expostos a águas industriais contendo cloretos.
XD3	Alternadamente úmido e seco	piscinas; Elementos de concreto expostos a águas industriais contendo cloretos; Pavimentos; Lages de estacionamentos de veículos.

(Conclusão)

Descrição da classe	Descrição do Ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposições
4 - CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS PRESENTES NA ÁGUA DO MAR		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contato direto com a água do mar	Estruturas próximas do litoral ou no litoral.
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas
5 - ATAQUE DE GELO/DEGELO		
XF1	Saturação moderada em água sem produto descongelante	Superfícies verticais de concreto, expostas à chuva e ao gelo
XF2	Saturação moderada em água com produto descongelante	Superfícies verticais de concreto, de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Saturação elevada em água, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de concreto expostas à chuva e ao gelo
XF4	Saturação elevada em água, com produtos descongelantes ou água do mar	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; Superfícies de concreto expostas a pulverizações diretas contendo produtos descongelantes e expostos ao gelo. Zonas sujeitas aos efeitos da rebentação de estruturas marítimas expostas ao gelo.
6 - ATAQUE DE QUÍMICO		
XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo de acordo a EN 206-1 (quadro 3)	Terrenos naturais e água do terreno
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo de acordo a EN 206-1 (quadro 3)	Terrenos naturais e água do terreno
XA3	Ambiente químico altamente agressivo de acordo a EN 206-1 (quadro 3)	Terrenos naturais e água do terreno

Fonte: NP EN 206-1 (2007, p.21).

O quadro acima apresenta as classes de exposição e a descrição de cada ambiente, e exemplos informativos de condições que poderão ocorrer as classes de exposição. Para as finalidades desse trabalho, utiliza-se como base as condições de corrosão induzida por cloretos e por ataque químico.

O quadro 3 apresenta os valores limite das classes de exposição para o ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas.

Quadro 3 – Valores limite das classes de exposição para o ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas

Os ambientes com agressividade química, abaixo classificados, têm como base o solo e a água nele contida, com temperaturas do solo ou da água entre os 5 °C e 25 °C e com velocidades da água suficientemente lentas que possam ser consideradas próximas das condições estáticas. A classe é determinada pelo valor mais elevado para qualquer característica química. Quando duas ou mais características agressivas conduzirem à mesma classe, o ambiente deve ser classificado na classe imediatamente superior, a menos que um estudo especial para este caso específico prove que não é necessário

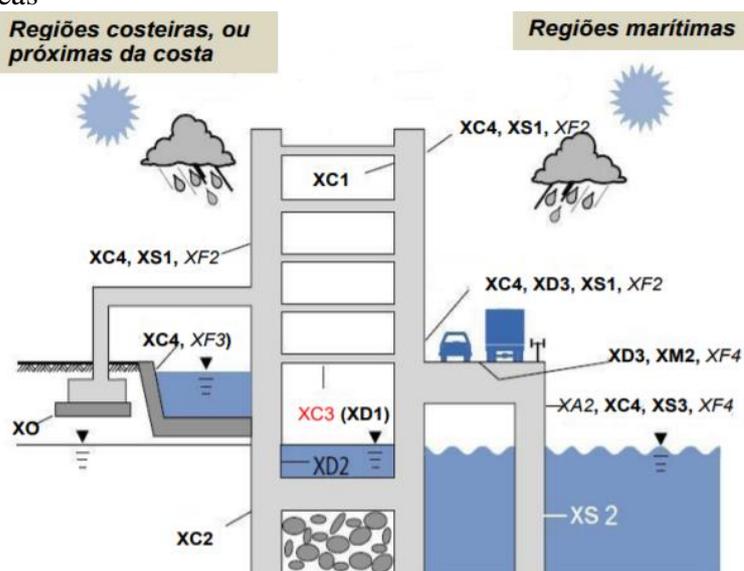
Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
Águas				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 e ≤ 600	≥ 600 e ≤ 3000	≥ 600 e ≤ 3000
pH	ISO 4316	≥ 5,5 e ≤ 6,5	≥ 4,5 e ≤ 5,5	≥ 4,0 e ≤ 4,5
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 15 e ≤ 40	≥ 40 e ≤ 100	≥ 100 até a saturação
Solos				
SO ₄ ²⁻ total ¹ mg/kg	EN 196-2	≥ 2000 e ≤ 3000 ²	≥ 3000 e ≤ 12000 ²	≥ 12000 e ≤ 24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	≥ 200	Não encontrado na prática	

¹ Os solos argilosos com uma permeabilidade abaixo de 10⁻⁵ m/s podem ser colocados numa classe mais baixa.
² O limite de 3000 mg/kg deve ser reduzido para 2000 mg/kg, caso exista risco de acumulação de íons sulfato no concreto devido a ciclos de secagem e molhagem ou à absorção capilar.

Fonte: NP EN 206-1 (2007, p.21).

O quadro apresenta também os métodos de ensaio utilizados para cada agente agressivo abordado, dando a base para os valores encontrados e a sua determinada classificação.

Figura 1 – Exemplos de classes de exposição atuando conjuntamente em componentes típicos em regiões litorâneas

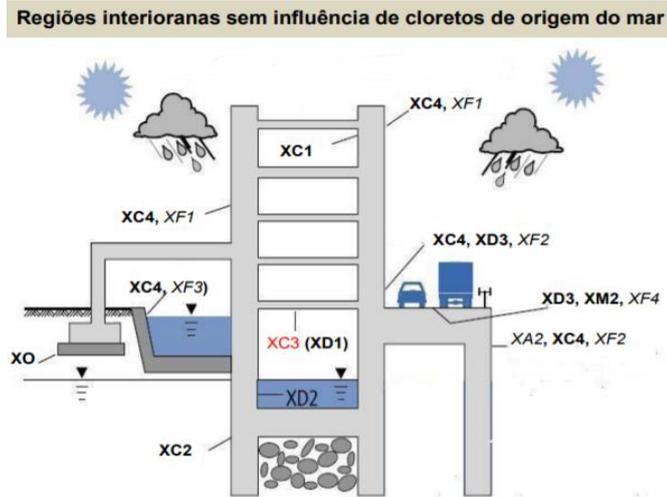


Fonte: CARNAÚBA (2011).

A figura acima exemplifica os diversos exemplos de classe de exposição e em quais partes de uma estrutura ela interage, por exemplo na parte interior da estrutura tem agentes agressivos diferentes da parte exterior ou da parte que fica abaixo do solo ou em contato com a água marinha.

Já a figura 2 apresenta as classes de exposição em uma estrutura situada em regiões interiores.

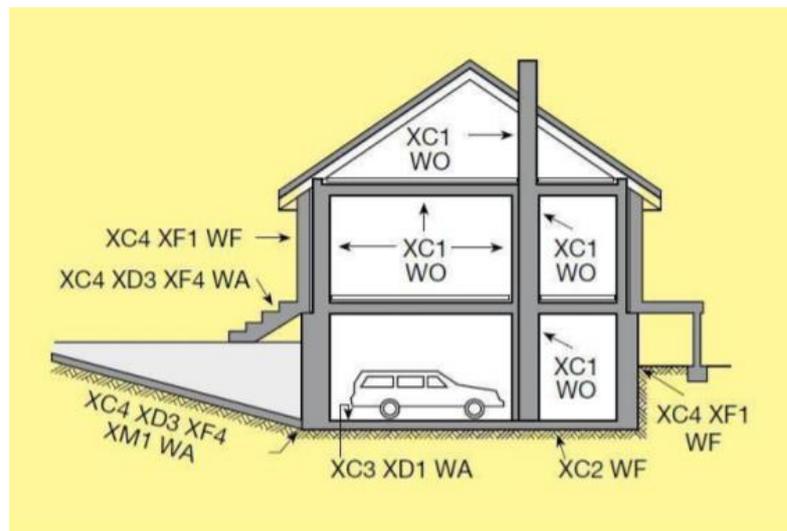
Figura 2 – Exemplos de classes de exposição atuando conjuntamente em componentes típicos em regiões interiores



Fonte: CARNAÚBA (2011).

A figura 3 representa exemplos variados de classe de exposição em uma casa residencial simples.

Figura 3 – Exemplos de classes de exposição simultaneamente aplicáveis em uma casa residencial



Fonte: CARNAÚBA (2011).

A classe estrutural recomendada é S4 (Quadro 6), para peças estruturais com vida útil de no mínimo 50 anos, com as resistências indicativas do concreto armado indicados na no Quadro 5 e as modificações da classe estrutural indicadas no Quadro 7.

O quadro 5 apresenta as classes indicativas de resistência para cada classe de exposição.

Quadro 4 – Classes indicativas de resistência

Corrosão										
Item	Corrosão induzida por carbonatação				Corrosão induzida por cloretos			Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Classe indicativa de resistência	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Danos no betão										
Item	Sem risco	Ataque de gelo/degelo			Ataque químico					
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1		XA2		XA3	
Classe indicativa de resistência	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37		C30/37		C35/45	

Fonte: NP EN 1992-1-1 (2010, p.233).

Pode se observar que os ataques; químico, de sulfato e cloretos, apresentam as classes indicativas de resistência mais altas.

Quadro 5 – Classe estrutural com base nos períodos de utilização e exemplos de situações

Classe estrutural	Perdido de utilização	Exemplos
S1	10 anos	Estruturas provisórias
S2	25 anos	Elementos estruturais substituíveis (aparelhos de apoio)
S3	25 anos	Estruturas agrícolas e similares
S4	50 anos	Estruturas de edifícios e estruturas correntes
S5	100 anos	Estruturas monumentais de edifícios, pontes e outras obras de engenharia civil

Fonte: NP EN 1992-1-1 (2010).

O quadro acima apresenta a VUP de acordo com a forma de uso da estrutura, dando alguns exemplos de uso, nesse caso será abordado a classe S4 de 50 anos como referência, o mesmo tempo de uso que é usado nas normativas brasileiras.

O quadro 7 apresenta a classificação estrutural recomendada de acordo com os critérios estabelecidos, podendo reduzir as classes ou aumentar.

Quadro 6 – Classificação estrutural recomendada

Classe estrutural							
Critério	Classe de exposição de acordo com a tabela						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Tempo de vida útil de projeto de 100 anos	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes
Classe de resistência ^{1 2}	≥C30/37 Reduzir 1 classe	≥C30/37 Reduzir 1 classe	≥C35/45 Reduzir 1 classe	≥C40/50 Reduzir 1 classe	≥C40/50 Reduzir 1 classe	≥C40/50 Reduzir 1 classe	≥C45/55 Reduzir 1 classe
Elemento com geometria de laje (posição das armaduras afetadas pelo processo construtivo)	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe
Geometria especial do controle de qualidade da produção do concreto	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe

Notas do quadro 7:

¹ Considera-se que a classe de resistência e a razão água/cimento estão relacionadas. Poderá considerar-se uma composição especial (tipo de cimento, razão água/cimento, enchimento de finos) a fim de obter uma baixa permeabilidade.

² O limite poderá ser reduzido de uma classe de resistência se a introdução de ar for superior a 4%.

Fonte: NP EN 1992-1-1 (2010, p.60).

A norma apresenta até um critério para VUP de 100 anos, aumentando duas classes para cada classe de exposição.

Para os valores de cobrimento, a norma apresenta a tabela 7, com os valores de cobrimento mínimo para cada classe de exposição em função da classe estrutural, que nesse caso é S4 de VUP de 50 anos.

Tabela 7 – Valor do cobrimento mínimo, requisitos relativos à durabilidade das armaduras de concreto armado de acordo com a EN 10080

Requisito ambiental para C _{min.dur} (mm)							
Classe estrutural	Classe de exposição de acordo com o Quadro 3						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/XA1	XD2/XS2/XA2	XD3/XS3/XA3
S1	10	10	20	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Fonte: NP EN 1992-1-1 (2010, p.60).

A norma NP EN 1992-1-1-2010 também recomenda uma margem de tolerância de execução (Δc) de 10mm para obter o cobrimento nominal que vai ser o cobrimento definitivo de projeto para execução das peças de concreto armado, de acordo com a tabela 8.

Tabela 8 – Valores do cobrimento mínimo da Tabela 6 acrescidos da tolerância de execução $\Delta c = 10$ mm

Classe estrutural	Cobrimento nominal em mm						
	Classe de exposição ambiental						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/XA1	XD2/XS2/XA2	XD3/XS3/XA3
S1	20	20	20	25	30	35	40
S2	20	20	25	30	35	40	45
S3	20	20	30	35	40	45	50
S4	20	25	35	40	45	50	55
S5	25	30	40	45	50	55	60
S6	30	35	45	50	55	60	65

Fonte: NP EN 1992-1-1 (2010, p.62).

Os valores para S4 na tabela 8 para os ambientes mais agressivos se assemelham aos valores de cobrimento da norma brasileira, chegando a 55mm, enquanto o valor máximo da norma brasileira chega a 50mm.

2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO

A durabilidade do concreto é uma propriedade que está diretamente ligada com as estruturas dos poros, como as microfissuras apresentadas na pasta do cimento e com a forma de ingressos e do transporte dos agentes agressivos estejam, no estado gasoso ou líquido.

O processo de substância agressivas no concreto acontecem por diferentes tipos de mecanismos físicos e químicos. Para que esse mecanismo ocorra depende de condições climáticas, do ambiente, velocidade de renovação dos agentes agressivos entre outros. Esses mecanismos na prática podem ocorrer sozinhos ou simultâneos.

Dos diferentes mecanismos de transporte de massa no concreto os mais importantes são a permeabilidade, a difusão, absorção capilar e a migração entre eles. Segundo Kropp (1995), geralmente em condições não saturadas, o mecanismo dominante é absorção capilar. O concreto por ser um material poroso, tem-se uma maior facilidade de corrosão nas armaduras dependendo da relação água/cimento. Se o concreto tiver um fator água/cimento baixo terá menos poros. Os grandes índices de vazios no concreto devido a evaporação da água, poderão ser preenchidos por agentes agressivos.

Segundo Hilsdorf (1995), o método mais confiável e adotado para obter maior durabilidade em relação ao concreto é a resistência do mesmo em relação a penetração de agentes agressivos.

A água é um dos principais meios de transporte para substâncias agressivas através dos poros principalmente para armaduras do concreto, seja ela contaminada ou pura, pois se houver a presença de oxigênio e a despassivação do aço, a mesma permite o processo de corrosão. Se a água tiver com sulfato ela pode gerar uma expansão no concreto formando fissuras e levando a deterioração.

2.2.1 Ataque por ácido

Segundo Calleja (1980), água é fundamental no processo de agressão de origem química, sendo impossível ocorrer o ataque na estrutura sem água.

O ataque por ácido é caracterizado por conversão de compostos de cálcio – hidróxido de cálcio, aluminato hidratado de cálcio e silicato hidratado de cálcio – em sais de cálcio, toda composição depende do tipo de ácido em questão. Todo esse processo, acaba gerando uma transformação de destruição das partes de microestruturas do material pela camada superficial. Para continuar o processo de ataque, vai depender da solubilidade dos sais formados. Se ocorrer a dissolução ou abrasão da camada superficial, outras camadas serão expostas, até a desintegração total da peça.

Quando o concreto está exposto a soluções ácidas, o mesmo sofre severas deteriorações, devido à pasta de cimento. Porém, quando o concreto está exposto a uma solução de ácidos fracos e o mesmo for de baixa permeabilidade, pode resistir principalmente se for ocasional.

Neville (1997) ressalta que os sais na forma sólida não atacam o concreto, porém quando dissolvidos, o mesmo reage com a pasta de cimento hidratado

2.2.2 Estrutura Dos Poros

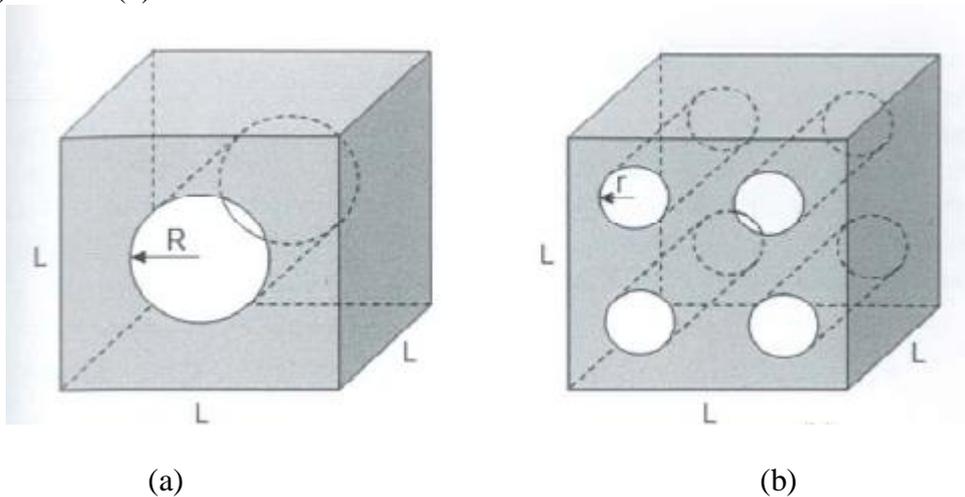
Quando se trata do concreto, existem diversos fatores que podem influenciar em seu resultado. Ao concluir o trabalho feito com concreto umas das principais características que o mesmo deve apresentar é uma boa durabilidade, ou seja, resistir o máximo ao meio ambiente em que o mesmo está exposto.

Para uma boa durabilidade, deve-se ter cuidado com suas características como, a relação água-cimento e a permeabilidade. Quanto menor o nível de permeabilidade, mais resistência se obtém contra agentes agressivos.

O termo estrutura dos poros contempla a conectividade e a tortuosidade. Garboczi (1995) propôs que esse fator seja aplicado através da teoria do tubo. Considerando a escala da microestrutura, os tubos de maiores dimensões têm uma taxa maior de transporte que os menores, e para os tubos bloqueados, a taxa de transporte é nula.

Segundo Silva (2000) para explicar a influência das dimensões dos poros, utiliza-se um cubo com dimensões $L \times L \times L$ atravessando um cilindro de raio R , no caso (a) e para raio r caso (b), conforme indica figura 4. A porosidade no caso (a) é $\pi \times R^2/L^2$ e o coeficiente de permeabilidade $K_a = \pi \times R^4/(8L^2)$. Para os poros cheio com fluido com íons com uma difusividade D_0 , logo $D = D_0 \pi \times R^2/L^2$. Se tiver mais poros no caso (b) conforme figura 4, porém de raios menores $R = R/\sqrt{N}$, em que N é o números de poros, a porosidade será $N(\pi \times R^2/L^2)$, na qual se substituir o raio r resultara a mesma porosidade. A difusividade será a mesma $D = D_0 \times N(\pi \times R^2/L^2) = D_0 \times \pi \times R^2/L^2$. O coeficiente de permeabilidade será menor $K_b = N[\pi \times r^2/(8L^2)] = (1/N)[\pi \times R^4/(8L^2)]$.

Figura 4 - Esquema de um cubo de material sólido atravessado por poros retos e paralelos de raio R (a) e raio r (b)



Fonte: GARBOCZI, (1995).

Apesar de parecer simples o concreto tem uma estrutura complexa, sendo considerada indiretamente quando se realiza os ensaios de permeabilidade, de difusão e migração, ou seja, sem a necessidade de determinação direta (HOUST; WITTMANN, 1994).

2.2.3 Permeabilidade

A permeabilidade trata-se do transporte de um fluido em um meio poroso através de um gradiente de pressão (BUILL; OLLIVER, 1992). O coeficiente de permeabilidade é uma característica do material sendo independente das propriedades do líquido (KROPP et al., 1995).

A água por ser um líquido incompressível para o coeficiente de permeabilidade, é determinado pela equação 1, desenvolvida com base na lei de Darcy.

$$K_w = \frac{v}{t} \times \frac{l}{A} \times \frac{1}{\Delta H} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

K_w = coeficiente de permeabilidade da água (m/s);

v = volume de água (m³) que flui durante o tempo t ;

t = tempo (s);

l = espessura (m);

A = área penetrada (m²);

ΔH = pressão hidrostática (m);

2.2.4 Difusão

A difusão é a transferência de moléculas ou íons livres por um movimento aleatório das soluções existentes nos poros do concreto de regiões de alta concentração para baixa concentrações da substância que difundem. Pode se determinar a taxa de transferência da massa através da unidade de área de uma seção pela equação 2.

$$F = \frac{dm}{dt} \times \frac{1}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

F = fluxo de massa (g/m²×s);

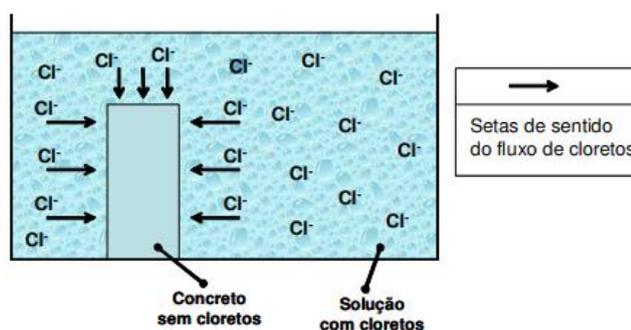
m = massa de substância que flui (g);

t = tempo (s);

A = área (m²).

Ao contrário do que ocorre com o mecanismo de permeabilidade e absorção de água, a difusão precisa da existência de eletrólito e um gradiente de concentração de cloretos e não do fluxo de água como mostra a figura 5 em um corpo-de-prova saturado submerso na solução de cloreto de sódio.

Figura 5 - Esquema do processo de difusão do concreto



Fonte: Medeiros e Helene (2008).

2.2.5 Absorção Capilar

Absorção ou sucção capilar é a propriedade que permite transportar principalmente água no concreto, através dos poros capilares pela tensão superficial. Esse mecanismo é o que mais influência na durabilidade do concreto, principalmente aonde a estrutura fica exposta a chuvas, sujeitos a umidade e secagem.

O concreto é um material muito poroso, devido a essa fragilidade, todos processos e mecanismo que provocam sua deterioração estão ligados a facilidade que água pura ou contaminada se mova através deste material. Se o concreto tiver um cimento mais fino e uma relação água/cimento baixa será um concreto menos poroso, assim diminuindo o índice de vazios. A água no concreto serve para aumentar sua resistência mecânica no processo de cura, mais se tiver um fator de relação água/cimento auto, a água em excesso evapora criando redes de poros aonde será a fragilidade do concreto no estado endurecido.

2.3 TÉCNICAS DE PROTEÇÃO DE ESTURURAS DE CONCRETO

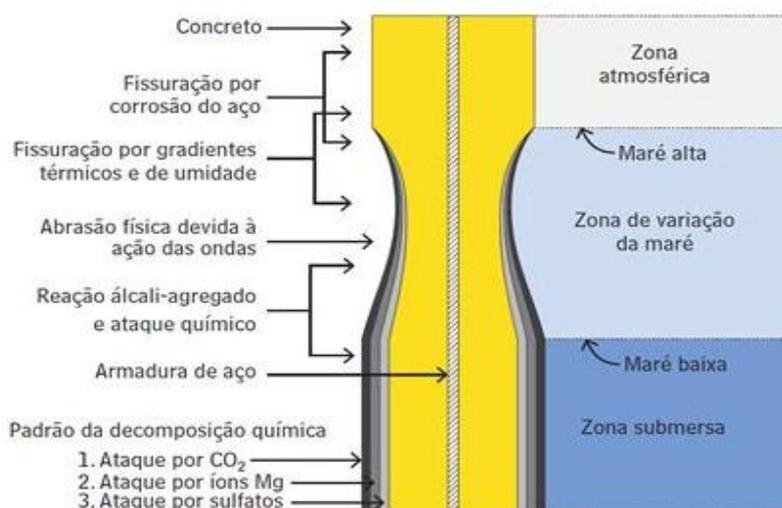
O principal fator de durabilidade está ligado ao cobrimento da armadura e a qualidade do concreto sendo influenciada pela relação água-cimento, pelo tipo de cimento usado e aditivo. "A vida útil da estrutura, por questões de corrosão da armadura, depende muito do cobrimento: reduzi-lo à metade significa reduzir quatro vezes a vida útil. E passar de um fck

de 20 MPa a um fck de 40 MPa pode multiplicar por quatro a vida útil", exemplifica Helene (2009).

Segundo o professor José de Freitas Jr. da UFPR, também cita que o cobrimento é uma das principais formas de alcançar a vida útil de um projeto. Comenta ainda sobre os cuidados de retração, acabamentos de superfície, cura e juntas adequadas na estrutura. Freitas Jr. da outra alternativa também, que seria obter um concreto menos poroso com fck maior, que pode ser obtidos através de aditivos superplastificantes.

Para garantir que o concreto atingiu sua característica de resistência e garantir a correta hidratação de cimento, deve se ter uma cura adequada, pois como mostra a figura 6 dependendo em qual meio a estrutura se encontra, deve-se ter um cuidado especial.

Figura 6 - Representação de cilindro de concreto exposto a água do mar



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Segundo Helene (2009) outros métodos que poderiam ser utilizados além dos mencionados anteriormente para aumentar a resistência do concreto, seria o uso de aditivos redutores de água, inibidores de corrosão, incorporadores de ar, cristalizantes ou adições de metacaulim e sílica ativa. Já para proteções superficiais segundo Freitas Jr. os principais sistemas seria silanos e siloxanos hridrofugantes ou bloqueadores de poros.

2.3.1 Aditivos Cristalizantes

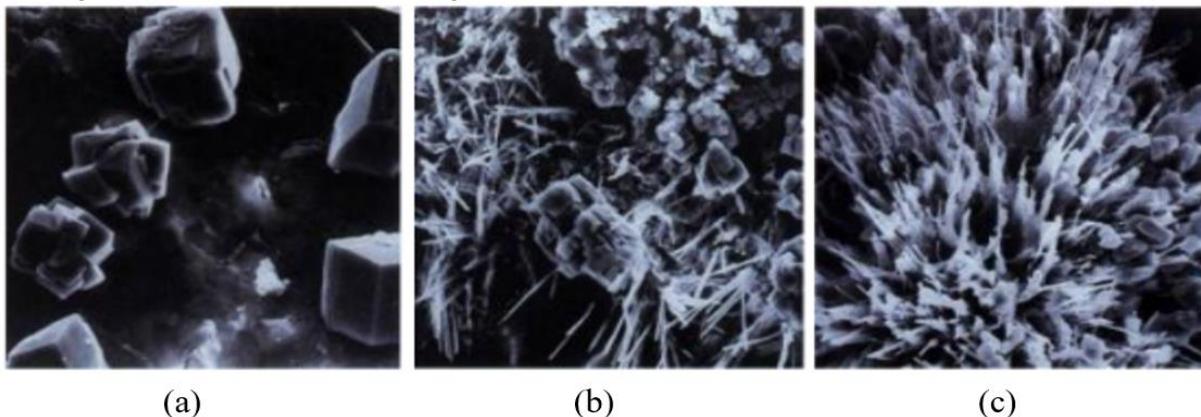
O uso de aditivos impermeabilizantes é indispensável quando se trata de obras enterradas, pois exigem um cuidado especial. Uma estrutura enterrada está sujeita a pressão da água no subsolo, essa pressão nas paredes e lajes de pavimentos profundos gera um grande potencial de infiltrações.

Existem duas maneiras de impermeabilizar uma obra enterrada. A primeira seria por bombeamento permanente, que não seria viável pois teria um gasto elevado com valor energético para manter o equipamento funcionando.

A segunda é o uso de aditivos no concreto que estanquem a água. No qual consiste no uso de aditivos cristalizantes garantindo toda estanqueidade da estrutura, essa seria a opção mais viável. Sua composição de cimento Portland, areia de sílica e materiais químicos, que reagem com elementos de hidratação do cimento e da água, formando cristais.

Takagi e Almeida Júnior e Oliveira (2007) definem o processo de cristalização como físico químico, gerando reações catalíticas através dos ingredientes ativos do cristalizante, e garante que não haja penetração de água por capilaridade, pois a reação de hidratação do cimento em formação de cristais não são solúveis e nem tóxicas em uma profundidade de 50 mm na estrutura de concreto (figura 7).

Figura 7 - Formação dos cristais no interior do concreto (a) Concreto não tratado; (b) início da formação dos cristais; (c) cristalização final



Fonte: Takagi, Almeida Júnior e oliveira (2007).

O tratamento com o uso de aditivos cristalizantes comparado a outros sistemas de impermeabilização, apresenta vantagens, o mesmo é adicionado na própria dosagem do concreto, e forma uma camada cristalina no interior dos poros, que dificulta a passagem de água, permite apenas a passagem do vapor d'água evitando a pressão dentro do concreto como exemplifica Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008).

No sistema de cristalização, se por um momento durante a vida útil da estrutura aparecer fissuras, os cristais se formarão, impedindo uma nova passagem para água, conforme ilustrado na figura 8. Não havendo água em contato com a estrutura, os cristais continuam dormentes, ao aparecer água eles voltar a reagir, protegendo e dando durabilidade a estrutura.

Figura 8 - Formação de cristais na fissura



Fonte: Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008).

Segundo ACI (2010), a reação da figura 8 se descreve através da equação 3. As partículas do cimento e a água reagem com componentes ativos da mistura hidrofílicas cristalinas, gerando silicato de cálcio hidratado, bloqueando os poros e capilares existentes na estrutura interna do concreto. Vale salientar que esse processo de cristalização evolui a longo tempo, sendo assim a redução de permeabilidade não é processo instantâneo.



(Equação 3)

A degradação de estruturas em concreto é um dos temas mais importante no contexto de engenharia civil. Prevenir a entrada de substâncias agressivas através de fissuras na estrutura sem dúvida é um aumento na durabilidade da mesma. Como se pode verificar na figura 8, é exatamente isso que ela nos mostra, o aditivo cristalizante em ação, impedindo a entrada de água na fissura.

3 METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa experimental do tipo exploratório para contribuir com os conhecimentos a respeito da durabilidade de elementos estruturais enterrados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO DO CONCRETO EM ESTRUTURAS ENTERRADAS

Conforme as normas abordadas, os elementos estruturais enterrados estão expostos a degradações induzida por cloretos, ataques químicos, ataque por sulfatos. Vale mencionar que também ocorre a corrosão por carbonatação em elementos enterrados, porém em raras situações, portanto não será abordada nesta pesquisa.

Os ambientes com solos mais propícios para penetração de cloretos no concreto, são os litorâneos (próximos do mar), também em contato direto com a água como piscinas ou água do mar, como as estruturas marítimas, onde tem-se uma maior quantidade de íons cloreto no ambiente e também um teor de umidade relativa maior, fator crucial para penetração dos cloretos na armadura já que o transporte acontece por meio aquoso (por capilaridade, permeabilidade e difusão).

Já os tipos de degradação mais relevantes para as estruturas enterradas, são ataques químicos e ataque por sulfatos nos elementos enterrados de concreto armado, já que são fatores de risco presentes em todos os tipos de solo. Para ambientes com riscos mais altos de se ter degradações no concreto por ataques químicos e ataques por sulfatos, são áreas industriais, como indústrias químicas que liberam efluentes químicos no ambiente, e indústria de fertilizantes e agricultura.

Para os ensaios foram utilizados os parâmetros de concreto da estaca hélice contínua estabelecidos pela NBR 6122 (ABNT, 2019). A estaca hélice contínua é uma estaca de concreto moldada *in loco*, executada mediante a introdução no terreno, por rotação, de um trado helicoidal contínuo. A injeção de concreto é feita pela haste central do trado simultaneamente à sua retirada. A armadura é colocada após a concretagem. O consumo de cimento deve ser superior a 400 kg/m³, o abatimento de *slump test* igual a 22 ± 3 cm, fator água/cimento ≤ 0,6, agregado de areia e pedrisco, e classe de resistência C30, conforme a NBR 6122 (ABNT, 2019).

3.2 MATERIAIS

O cimento utilizado na produção dos corpos de prova foi o CP V – ARI, e o CP IV – 32 RS, que são tipos de cimento recomendados para peças grandes, que é o caso do concreto das estacas de hélice contínua. Os agregados miúdos utilizados foram areia fina de cava provenientes da Tramontim Extração de Areia de Içara – SC, areia de britagem grossa, o agregado graúdo foi brita 0 e pedrisco provenientes da pedreira Lasca Mineração de Imbituba – SC. Como aditivos para fazer as diferentes matrizes cimentícias foram utilizados, sílica ativa (microssílica), metacaulim, aditivo cristalizante e, também, o aditivo redutor de água Miraflow 973 produzido pela *Grace Products Corporation*. As propriedades físicas e químicas de cada material estão nas tabelas 9-15 a seguir.

Tabela 9 – Propriedades físicas dos Cimento Portland CP V – ARI e CP IV – 32 RS

Propriedade		CP V - ARI	Parâmetro ABNT	CP IV-32 RS	Parâmetro ABNT	
Expansibilidade	Quente	mm	0	< 5,0	0,34	< 5,0
	Fria	mm	0	< 5,0	0	< 5,0
Massa específica		g/m ³	3,12	-	2,83	-
Tempos de pega	Início	h:min	03:20	> 1:00	03:40	> 1:00
	Fim	h:min	04:00	< 10:00	04:22	< 12:00
Finura	#200	%	0,0	< 6,0	0,64	< 8,0
	#325	%	0,3	-	3,37	-
	Blaine	cm ² /g	4.470	≥3000	4.290	-
Resistência à compressão	1 dia	MPa	22,7	≥ 14	14,5	-
	3 dias	MPa	38,3	≥ 24	28,1	≥10
	7 dias	MPa	44	≥ 34	34,5	≥20
	28 dias	MPa	52	-	44,6	≥32

Fonte: Autores (2020).

Tabela 10 - Propriedades químicas dos Cimento Portland CP V – ARI e CP IV – 32 RS

Propriedade (%)	Sigla	CP V - ARI	Parâmetro ABNT	CP IV- 32 RS	Parâmetro ABNT
Alumina	Al ₂ O ₃	4,22%	-	10%	-
Sílica	SiO ₂	18,60%	-	29%	-
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,97%	-	4%	-
Óxido de cálcio	CaO	60,28%	-	45%	-
Óxido de magnésio	MgO	3,87%	< 6,5	3%	-
Trióxido de enxofre	SO ₃	3,17%	< 4,5	2%	< 4,5
Perda ao fogo	PF	3,48%	< 6,5	3%	< 6,5
Dióxido de carbono	CO ₂	1,45%	-	-	-
Óxido de cálcio livre	CaO L.	0,79%	-	1%	-
Resíduos insolúveis	RI	0,71%	< 3,5	25%	-
Equivalente alcalino	Eq. Alc.	0,74%	-	1%	-

Fonte: Autores (2020).

Tabela 11 – Características do aditivo *Mira flow 973*

Propriedade	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido alaranjado	Visual
pH	4,5 - 6,5	-
Densidade	1,030 - 1,070	g/cm ³
Teor de sólidos	32,2	%

Fonte: Autores (2020).

Tabela 12 – Características do aditivo cristalizante Penetron

Propriedade	Especificação	Unidade
Aparência	Sólido em pó, cinza	Visual
pH	10 - 13	-

Fonte: Autores (2020).

Tabela 13 – Propriedades dos agregados utilizados

Propriedades		Areia de Britagem	Areia Fina	Brita 0
Módulo de finura		2,93	1,54	5,55
Dimensão máxima característica	mm	4,75	0,6	9,52
Massa unitária em estado solto	kg/m ³	1465	1480	1410
Teor de material pulverulento	%	8,4	0,8	1,4
Impurezas orgânicas e húmicas	ppm	< 300	< 300	< 300
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	0,0	0,0	0,4
Massa específica aparente	g/cm ³	2,575	2,608	2,64
Absorção	%	1,03	0,06	1,21

Fonte: Autores (2020).

Tabela 14 - Composição química por fluorescência de raio-X das adições

MCS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	PF	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	ZrO ₂	Outros*
Metacaulim	52,54	31,16	2,37	0,14	9,31	0,19	1,01	0,08	1,56	0,78	0,87
Silica Ativa	91,83	0,13	1,66	0,69	2,87	1,15	1,37	0,20	-	-	-
Fíler Calcário	1,87	0,15	0,17	0,37	49,00	0,97	0,97	46,51	-	-	-
NBR 12653		≥ 70		≤ 5	≤ 6	≤ 1,5	-	-	-	-	-

Fonte: Autores (2020).

Tabela 15 - Características físicas e capacidade de fixação do CaOH₂ das adições

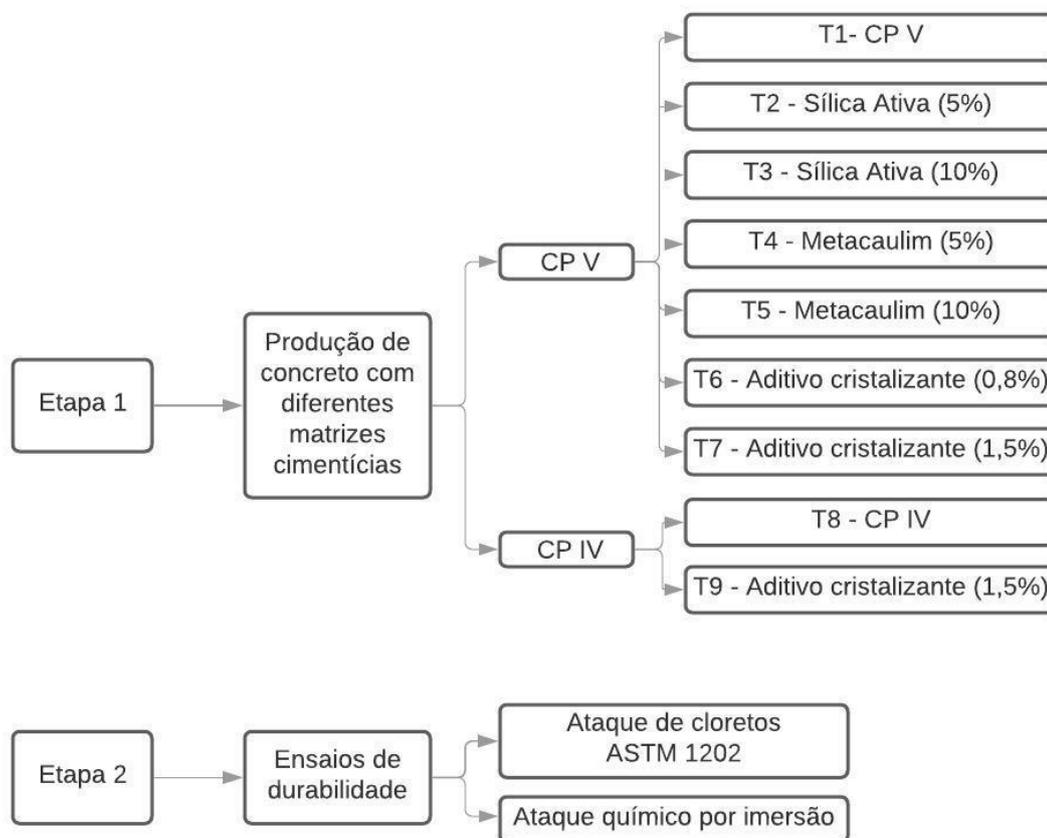
MCS	Massa Específica (g/cm ³)	Área específica BET (m ² /g)	D 10 (µm)	D 50 (µm)	D 90 (µm)	Capacidade de fixação do CaOH ₂
Metacaulim	2,56	17,47	3,10	12,89	27,66	757,91
Silica Ativa	2,15	15,57	4,48	20,65	41,14	595,91
Fíler Calcário	2,70	1,47	4,44	21,43	42,48	361,80

Fonte: Autores (2020).

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foi investigada a durabilidade de concretos constituídos por diferentes matrizes cimentícios expostas aos possíveis microclimas onde elementos de fundações podem ser inseridos. O organograma da figura 9 apresenta as etapas do programa experimental.

Figura 9 - Organograma das etapas



Fonte: Autores (2020).

Os itens 3.3.1 e 3.3.2 trazem a descrição dos ensaios realizados em cada etapa, assim como os traços de concreto utilizados na pesquisa.

3.3.1 Etapa 1

Foram investigadas as combinações de diferentes componentes de matrizes cimentícias para posterior avaliação dos indicadores de durabilidade, nos diferentes microclimas enterrados que os elementos de fundação podem ser inseridos.

Para realização dos ensaios de penetração de cloreto – C 1202 (ASTM, 2019), imersão em ácido clorídrico, de compressão axial – NBR 5739 (ABNT, 2018), foram feitos 9 traços com diferentes matrizes cimentícias, sendo necessário moldar 18 corpos de prova de 10x20cm, tendo 2 unidades de cada traço no molde 10x20cm. Os traços estão descritos na tabela 16.

Tabela 16 – Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m³ de concreto. a) traço em massa. b) traço em volume. c) Propriedades tecnológicas

a)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9
Cimento Portland - CP V	300	285	270	300	300	300	300	-	-
Cimento Portland - CP IV	-	-	-	-	-	-	-	300	300
Filer calcário	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Sílica ativa	-	20	40	-	-	-	-	-	-
Metacaulim	-	-	-	16	32	-	-	-	-
Aditivo Cristalizante	-	-	-	-	-	2,4	4,5	-	4,5
Areia de Britagem	295	290	285	288	282	294	290	285	284
Areia Fina	445	442	441	443	439	444	444	441	440
Brita 0	1015	1010	1005	1008	1002	1014	1015	1005	1005
Água	194	194	194	194	194	194	194	194	194
Aditivo	2,40	2,50	2,65	2,70	2,80	2,45	2,49	2,35	2,37
b)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9
Cimento Portland	97	92	87	97	97	97	97	-	-
Cimento Portland - CP IV	-	-	-	-	-	-	-	105	105
Filer calcário	37	37	37	37	37	37	37	37	37
Sílica ativa	-	9,3	18,6	-	-	-	-	-	-
Metacaulim	-	-	-	5,9	11,9	-	-	-	-
Aditivo Cristalizante	-	-	-	-	-	0,9	1,7	-	1,7
Areia de Britagem	111	109	108	109	106	111	109	108	107
Areia Fina	167	166	166	167	165	167	167	166	165
Brita 1	379	377	375	376	374	378	379	375	375
Água	194	194	194	194	194	194	194	194	194
Aditivo	2	2	2	2	3	2	2	2	2
c)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9
a/c mássico	0,49	0,48	0,47	0,47	0,45	0,49	0,49	0,49	0,49
a/c volumétrico	2,01	2,11	2,23	2,01	2,01	2,01	2,01	1,85	1,85
Alfa mássico (%)	53%	53%	53%	53%	54%	53%	53%	53%	53%
Alfa volumétrico (%)	52%	52%	53%	52%	53%	52%	52%	53%	53%
m	4,39	4,30	4,22	4,18	3,99	4,38	4,37	4,33	4,32
H (%)	9,0%	9,0%	9,1%	9,0%	9,0%	9,0%	9,0%	9,1%	9,1%
Teor de pasta volumétrico (%)	33,4%	33,9%	34,4%	34,1%	34,7%	33,4%	33,5%	34,3%	34,3%
Teor de ar (%)	2,1%	1,5%	1,8%	1,9%	2,1%	2,2%	2,2%	2,3%	1,7%
Slump final (mm)	220	220	220	220	220	220	220	220	220

Fonte: Autores (2020).

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

Primeiramente, a betoneira foi umedecida para que a água do concreto não fosse absorvida pela parede seca da betoneira durante a mistura. Então, a betoneira ficou ligada por 20 segundos com a boca para baixo, tirando todo excesso.

Em seguida, foram colocados todos os materiais secos, que foram misturados por 1 minuto. Logo após, com a betoneira em movimento, colocou-se em torno de 50 % da água, sendo misturado 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 adicionado água para o abatimento inicial desejado e feito a mistura por mais 3 minutos, totalizando 7 minutos.

Posteriormente, foi feito o slump (abatimento pelo tronco de cone) de 220 ± 30 mm – tendo o slump test necessário de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019). Se o abatimento não fosse o desejado, realizava-se uma correção de adição de água, contudo, a quantidade de água adicionada já fazia parte da água de amassamento calculada.

Com o slump inicial ajustado, realizou-se o transporte do concreto como uma simulação, com a betoneira ligada e uma inclinação horizontal por 15 minutos. Na sequência foi determinado o abatimento do concreto, analisando a perda de abatimento. Realizou-se a correção para um abatimento de 220 ± 30 mm – sendo um concreto da classe S220 da NBR 8953 (ABNT, 2015).

Com o restante do concreto, foram moldados 18 corpos de prova, seguindo o estabelecidos pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Durante os 28 dias 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).

Figura 10 – Corpos de prova moldados



Fonte: Autores (2020).

3.3.2 Etapa 2

Nessa etapa serão realizados os ensaios para avaliação da degradação do concreto, e avaliar se as diferentes matrizes cimentícias testadas do concreto armado usado em estruturas enterradas cumprem os requisitos de durabilidade previstos nas normas. Os ensaios realizados serão de penetração de cloretos conforme o método estabelecido pela norma ASTM C 1202, e ataque ácido pelo método de imersão.

3.3.2.1 Ataque de cloretos

Para avaliação de ataque por penetração de cloretos no concreto, foi utilizado o método de penetração acelerado de cloretos nos corpos de prova, estabelecido pela norma ASTM C 1202 (ASTM, 2019), que consiste em acelerar o processo de penetração, através de uma diferença de potencial gerada por uma fonte de tensão.

Inicialmente, se encaixa os corpos de prova de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, em um recipiente de PVC vedado com silicone nos dois lados, um lado se coloca a solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração 0,3N, e no outro, solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 3%, formando dois polos.

Em seguida os dois polos são conectados a uma fonte de tensão de $60\pm 0,1V$, fazendo com que a corrente elétrica crie uma diferença de potencial, gerando o processo acelerado de difusão, que induz os ânions cloretos a se difundir no concreto, tendo o ensaio duração de seis horas.

É necessária uma fonte alimentadora (DC POWER SUPPLY, minipa MPL 3303M) para gerar a tensão, e para medir a corrente foram utilizados seis multímetros (ICEL Manaus, MD 1500), que registram a corrente a cada hora.

O ensaio de ataque de cloretos foi realizado em duas etapas, primeiro fazendo os 5 corpos de prova com os traços distintos, com ensaio de seis horas de duração, depois os últimos 4 corpos de prova, totalizando os 9 traços.

Após o ensaio de penetração acelerada de cloretos, os corpos de prova foram rompidos em compressão diametral utilizando o aparelho de ensaio de resistência a compressão do laboratório, e divididos em 2 partes.

Para obter os resultados, foi utilizado o método colorimétrico por aspensão de nitrato de prata ($AgNO_3$) para identificar a presença de cloretos livres no concreto, que consiste na aplicação da solução de nitrato de prata na superfície diametral do corpo de prova, conforme a figura 11.

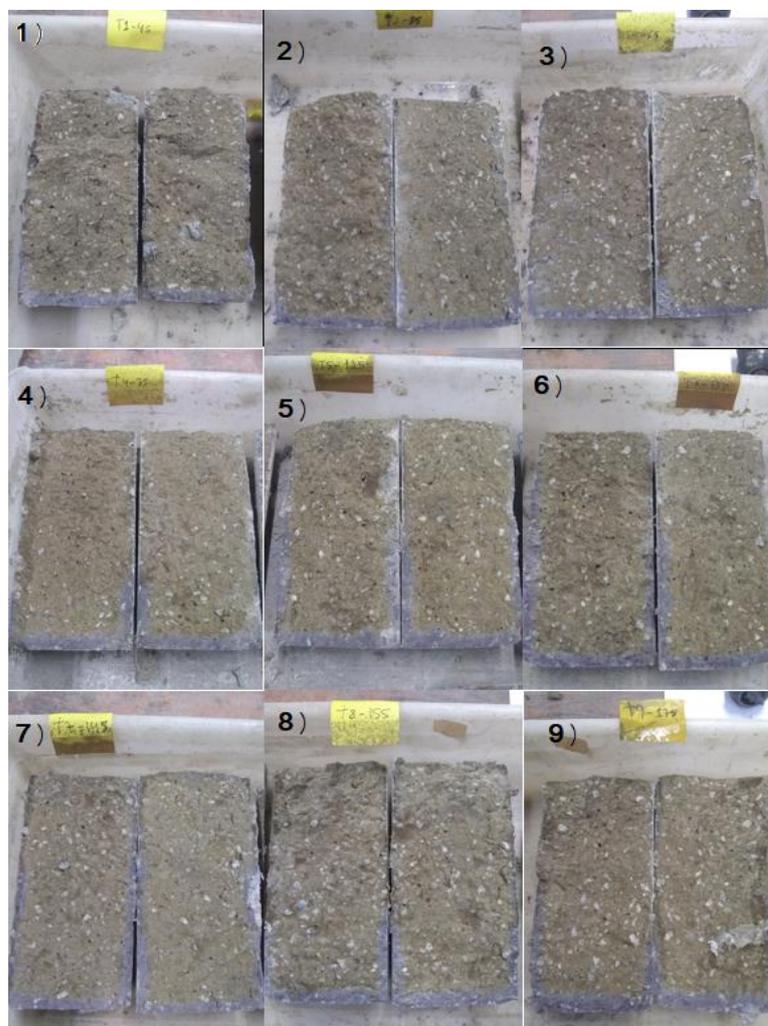
Figura 11 – Aplicação de nitrato de prata nos corpos de prova



Fonte: Autores (2020).

O nitrato de prata cria uma reação fotoquímica que expõem os cloretos livres, formando cloreto de prata, que possui uma coloração cinza e esbranquiçada, e a região sem cloretos, ocorre a formação de óxido de prata, de cor marrom claro, conforme a figura 12.

Figura 12 – Fotos ensaio acelerado penetração cloretos dos traços 1-9.



Fonte: Autores (2020).

Depois é feito a medida da profundidade de penetração com uma régua em milímetros. Como a profundidade tem uma leve variação ao longo do corpo de prova, foram tiradas 3 medidas de cada corpo de prova.

3.3.2.2 Ataque ácido

Para simular o ataque ácido em uma estrutura de concreto enterrado, foi utilizado o método da imersão, onde os corpos de prova de 20x10cm com os 9 traços distintos, foram imersos na solução de ácido clorídrico, com concentração de 5%.

Foram utilizados 9 corpos de prova com traços diferentes, para a solução. Depois dos 28 dias de cura, os corpos de prova ficaram 24h no processo de secagem, após isso ficaram imersos 21 dias nas soluções.

O ataque de ácido ocorre, devido a solução de ácido clorídrico (HCl, 5%) ter pH de aproximadamente 1,5, e quando entra em contato com a superfície do concreto, causa a dissolução da pasta de cimento, e vai penetrando aos poucos na superfície do concreto. De acordo com a tabela 6, a norma NBR 12655 (ABNT, 2015) especifica que o $\text{pH} < 5,5$ caracteriza agressividade severa, portanto, a simulação elaborada no ensaio é de um ambiente de agressividade severa, por exemplo um ambiente industrial.

Após passado os 21 dias de imersão, os corpos de prova foram retirados, e depois foram rompidos diametralmente com a máquina de compressão e divididos em duas partes, para fazer a avaliação profundidade da penetração do ataque ácido no concreto com aplicação de fenolftaleína.

A fenolftaleína, cria uma reação fotoquímica, onde a região que possui pH maior que 9, fica com coloração roxa, mostrando que não está afetada pelo ácido, e a região penetrada pelo ácido não muda a coloração. Em seguida, foram determinadas 3 medidas de profundidade de penetração do ácido de cada corpo de prova, para fazer a análise.

Figura 13 - Fotos ensaio de imersão do ataque ácido de ácido clorídrico dos traços 1-9.



Fonte: Autores (2020).

3.3.2.3 Método de previsão de vida útil

A vida útil das estruturas de concreto enterrados é avaliada em número de anos de acordo com as normas, tanto nacionais quanto internacionais. Helene (2004) apresenta 4 métodos de previsão de vida útil, com base em enfoque determinista; com base em enfoque probabilista; com base em experiências anteriores e com base em ensaios acelerados.

Como o ensaio de penetração de cloretos foi realizado em um curto período de tempo, e a degradação do concreto é relativamente lenta, para aplicar os resultados na prática, foi utilizado o método de previsão de vida útil para ensaios acelerados.

Para determinar a vida útil das estruturas de concreto com base nos ensaios acelerados, utiliza-se a equação 4.

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

(Equação 4)

Onde:

x = profundidade atingida pelos cloretos no tempo t (m)

t = tempo (s)

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

O valor de k será determinado para penetração de cloretos k_{Cl} . Para a penetração de cloretos, a corrosão se inicia quando o teor de cloretos fica maior que 0,3% (CALÇADA, 2004).

Assim, com base nestas relações foram estimados os prazos de vida útil para os diferentes traços de concreto enterrados estabelecidos, para fazer a análise cobrimento e estabilidade, frente as normativas brasileiras e internacionais.

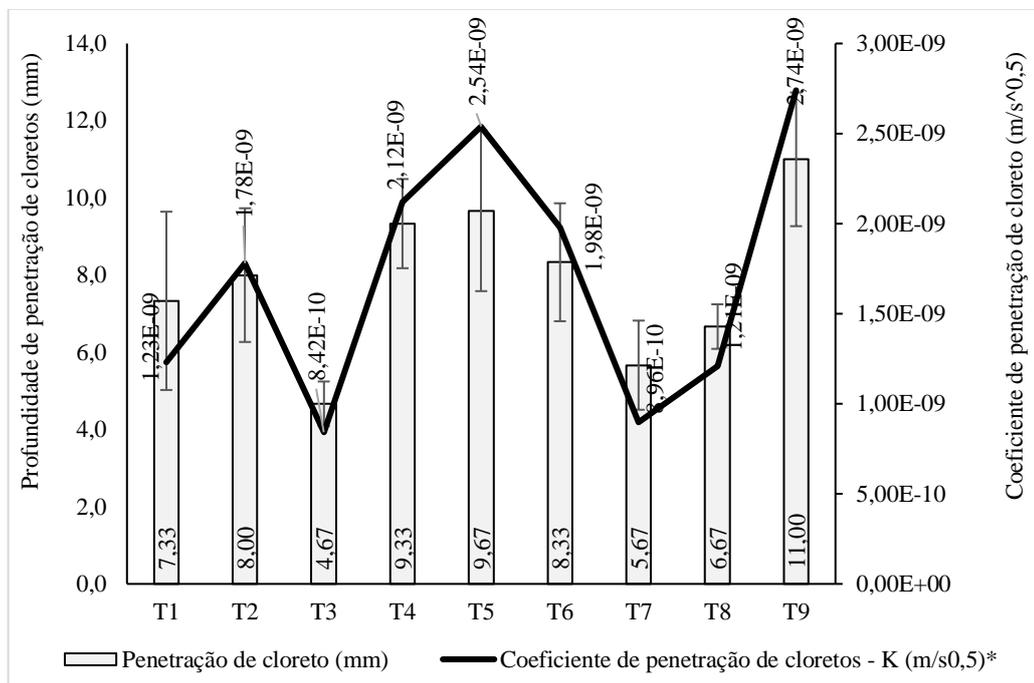
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão discutidos os resultados da etapa 2, onde foram realizados os ensaios de penetração de cloretos acelerado e de ataque ácido por imersão em ácido clorídrico. Com os resultados obtidos, foi aplicado o método de previsão de vida útil para o ensaio acelerado de penetração de cloretos, e com o ataque químico é feita a análise do desempenho de resistência a degradação de cada traço causada no concreto, através da avaliação da profundidade da penetração.

4.1 RESULTADOS ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Após o ensaio acelerado de migração de cloretos, foram determinadas as penetrações de cloretos para cada traço, e utilizando o método de previsão de vida útil. Os resultados obtidos estão em centímetros, conforme a figura 14.

Figura 14 – Resultados do ensaio de penetração de cloretos



Fonte: Autores (2020).

Pode-se observar que o T3, com adição de sílica ativa (10%), obteve o menor coeficiente de penetração, portanto o melhor desempenho, e o T9, com CP IV e aditivo cristalizante, o pior desempenho. A seguir, a tabela 11 apresenta os resultados da frente penetração de cloretos para 50 anos, idade mínima de durabilidade estabelecida pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Tabela 17 – Previsão do ingresso de cloreto através do coeficiente de penetração de cloreto os diferentes traços, feitos com a base na norma NBR 6122 (concreto produzido)

Traço	Coeficiente de penetração de cloretos K (m/s)	Posição da frente de cloreto após 50 anos (cm)
1	1,23E-09	4,889
2	1,78E-09	7,075
3	8,42E-10	3,347
4	2,12E-09	8,427
5	2,54E-09	10,096
6	1,98E-09	7,870
7	8,96E-10	3,562
8	1,21E-09	4,810
9	2,74E-09	10,891

Fonte: Autores (2020).

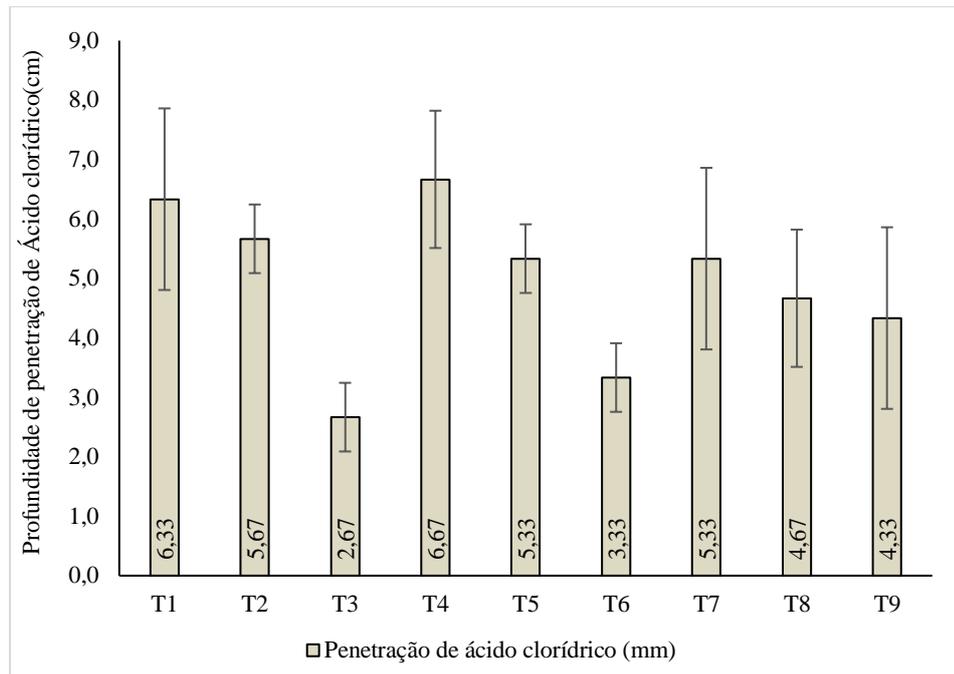
Conforme os dados apresentados na tabela 11, os traços T2 (sílica ativa 5%), T4 e T5 (Metacaulim), T6 (CP V e aditivo cristalizante 0,8%) e T9 (CP IV e aditivo cristalizante 1,5%) passaram dos limites de cobrimentos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). O limite de cobrimento é de 5 centímetros para estruturas enterradas, conforme a norma, para os ambientes que consideram cloretos presentes no solo, portanto, se a frente de cloretos estiver acima desse valor, o concreto não terá garantia de durabilidade conforme os parâmetros normativos. Já os traços T1 (CP V), T3 (sílica ativa 10%), T7 (aditivo cristalizante 1,5%) e T8 (CP IV) cumprem os requisitos, sendo o traço T3 o com melhor desempenho, tendo 3,347 cm de frente de penetração de cloreto.

O traço T3 com sílica ativa 10% obteve melhor desempenho comparado com T2 de sílica ativa 5%. O Traço T7 com CP V e aditivo cristalizante 1,5% apresenta melhor desempenho que o T9 com CP IV e aditivo cristalizante 1,5%. E o traço T8 com somente cimento CP IV apresenta melhor desempenho que o T1 com cimento CP V.

4.2 RESULTADOS ENSAIO DE ATAQUE QUÍMICO

Após o ensaio de ataque químico, foram determinados os traços com melhor desempenho quanto a garantia de durabilidade em um ambiente com solo de alta agressividade. Os resultados obtidos estão em centímetros, conforme a figura a seguir.

Figura 15 – Resultados do ensaio de ataque químico por ácido clorídrico



Fonte: Autores (2020).

Pode-se observar que o T3 com adição de sílica ativa (substituição de 10%), obteve melhor desempenho também para o ensaio de penetração de ácido clorídrico, e o T4 com aditivo de metacaulim o pior desempenho. Os traços T8 e T9 utilizando cimento CP IV obtiveram resultado melhor do que o T1, com cimento CP V, mostrando que tem um melhor desempenho para ataque ácido. O T6, com aditivo cristalizante 0,8%, teve baixa penetração em relação aos outros.

Fazendo uma análise visual da superfície dos corpos de provas, em todos os traços, ficou visível a dissolução da pasta de cimento de cimento causada pelo ataque ácido, formando poros e desprendendo os agregados graúdos do concreto, mostrando o que pode ocorrer em um ambiente agressivo com pH muito baixo (abaixo de 5,5).

Como não existe um método de previsão de vida útil para ensaio de imersão, não tem como concluir se os traços feitos estão cumprindo os parâmetros de durabilidade para vida útil de 50 anos estabelecidos pelas normas.

4.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Com os ensaios foi possível concluir que o melhor desempenho para garantia de durabilidade atingido foi o do traço T3 com aditivo de sílica ativa com substituição de 10%, e os traços ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014)

quanto aos cobrimentos determinados para estruturas enterradas, para um ambiente de solo agressivo com presença de cloretos.

Portanto, verifica-se que a adição de sílica ativa no concreto minimiza a penetração de cloretos e minimiza o ataque ácido se comparada com outras adições, mais eficiente do que o aditivo cristalizante, comumente utilizado e vendido no mercado, para aumentar a resistência a agentes agressivos no concreto enterrado.

A norma NBR 12655 (ABNT, 2015) específica o teor de cloretos e teor ácido de pH para um ambiente agressivo, porém não especifica os ensaios a serem elaborados para determinar esses teores.

5 CONCLUSÃO

A durabilidade das estruturas de concreto enterrado, é um conceito ainda recente para as normas nacionais, onde falta especificações sobre como se comporta o concreto em ambientes agressivos, ou como os ambientes agressivos interagem com concreto enterrado, sendo que existe uma variedade enorme de microclimas no território nacional, e a norma brasileira só classifica poucos tipos de ambientes. Portanto este trabalho de pesquisa teve como intuito verificar os parâmetros normativos quanto a durabilidade e garantia da vida útil, realizando ensaio acelerado de penetração de cloretos e ataque ácido por imersão com diferentes matrizes cimentícias, testando diversas adições, tendo como base o traço de concreto de estaca hélice contínua especificado na norma NBR 6122 (ABNT, 2019) para fundações.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram necessárias duas etapas, a primeira foi para elaboração dos diferentes traços de concreto enterrado, e a segunda, para realização dos ensaios laboratoriais, para avaliação dos parâmetros normativos de durabilidade para garantia da vida útil de 50 anos, e avaliação do traço mais eficiente para concreto enterrado.

Os resultados mostraram que a sílica ativa apresenta um bom desempenho para minimizar a penetração de cloretos, e resistir melhor ao ataque ácido, provando ser uma boa opção para obter uma melhor garantia de durabilidade, em comparação com outros aditivos, como o de aditivo cristalizante, que é vendido no mercado para aumentar a durabilidade, porém não mostrou grande diferença em comparação com concreto sem aditivo, provando não ter tanta efetividade na prática.

Portanto, com base no método de previsão de vida útil usado para penetração acelerada de cloretos, se verifica que traços T2, T4, T5, T6 e T9, feitos com base no traço de concreto estabelecido na norma NBR 6122 (ABNT, 2019), não cumprem os requisitos de durabilidade estabelecidos na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), pois a frente de penetração para vida útil de 50 anos passam dos limites de cobrimento para o ambiente de classe de agressividade IV, o mais agressivo.

A norma de desempenho 15775 (ABNT, 2013) ainda especifica, níveis superiores de durabilidade para vida útil acima de 75 anos, sendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014) e a NBR 6122 (ABNT, 2019) não ditam os parâmetros necessários para alcançar essa vida útil. Já a norma europeia já especifica valores de cobrimento maiores para alcançar vida útil superiores de até 100 anos.

Com isso, se conclui que as normativas brasileiras ainda pecam, quanto aos parâmetros estabelecidos relacionados a durabilidade e garantia de vida útil, faltando mais

detalhes para elaboração de projeto, e concretos mais eficientes, com recomendações de aditivos eficientes, como a sílica ativa, para garantir a segurança das estruturas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE 201.2R. (1994) - **Guide to Durable Concrete**. American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan, 41 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201.2R **Guide to Durable Concrete**. Reported by ACI Committee 201. 2008, p. 1-53.
- ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. Patologia das Estruturas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto - Controle, preparo e recebimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: **Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.
- CALLEJA, J. Durability. In: **INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT**, 7th, Anais ... 1980, v. I. Paris, 1980.
- CARNAÚBA, Marcos F. C. **CONSIDERAÇÕES SOBRE DIRETRIZES PARA A DURABILIDADE DO CONCRETO, COM VISTA À REVISÃO DA NBR 6118:2003**. Maceio - AL, 20, outubro de 2011. Disponível em: < <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2011/06/30-CONSIDERACOES-SOBRE-DURABILIDADE-DO-CONCRETO.pdf>>. Acesso em: 09, outubro de 2019.
- CLIFTON, James R. Predicting the Service Life of Concrete. ACI Materials Journal, v. 90, n. 6, p. 611-16, 1993.
- DA SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. Cataluña: UPC, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de la Construcción), Universidad Politécnica de Cataluña, Espanha, 1998.
- EUROPEAN STANDARD. EN 206-1: **Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade**. Brussels, 2007.
- FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – avaliação de pilares**. Brasília: Unb, 2004. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- G. R. Meira, I. J. Padaratz, “Custos de Recuperação e Prevenção em Estruturas de Concreto Armado: Uma Análise Comparativa”, IX Encontro Nacional de Tecnologia Construída, 2002.
- GEIKER, M.; GRUBE, H.; LUPING, T.; NILSSON, L.-O.; ANDRADE, C. Laboratory tests methods. **RILEM – technical committee 116-PCD – Performance Criteria for Concrete Durability**. Report 12, Bagnaux França, Ed. J. Kropp: H. K. Hilsdorf. Londres: E & FN Spon, 1995. p. 213-257.
- HELENE, P. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001**. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos, 2001.

- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre-Docência), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 231 p.
- HILSDORF, H. K. **Introduction and problem statement**. In: KROPP, J. and HILSDORF, H. K. **Performance Criteria for Concrete Durability**. RILEM REPORT. London: 12. Published by Taylor & Francis, chapter 1, 1995, p. 2-4.
- HOUST. Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste, **Cement and Concrete Research**, v. 24, N1 6, p. 1165-1176, 01994.
- ISAIA, Geraldo C. A Evolução do Concreto Estrutural. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo; IBRACON, 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2014, 751p.
- MEIRA, G.R., PADARATZ, J.D. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, Belo Horizonte. Anais em CD. IBRACON, São Paulo, 2002.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994, 580 p.
- NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. Ed. PINI, 2ª Edição. São Paulo, 1997. 828p.
- NP EN 1991-1-1 (2010). **Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios**. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal, 2010.
- OLLIVER J. P.; MASSAT, M.; PARROT, L. Parameters influencing transport characteristics. **RILEM – Technical Committee 116-PCD – Performance Criteria for Concrete Durability**. Report 12, Bagnaux França, Ed. J. Kropp: H. K. Hilsdorf. Londres: E & FN Spon, 1995. p. 33-96.
- OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. **Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. Anais...Salvador, Ed. IBRACON, 2008.
- TAKAGI, E. M.; ALMDEIRA, W. J.; OLIVEIRA, F. S. **Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2007, Florianópolis. Anais Florianópolis, Ed. IBRACON, 2007.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1997.