



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE
ÍONS CLORETO EM CONCRETOS COM FIBRA NA
CONDIÇÃO SATURADA**

Rafael Almeida Arantes – 11521ECV019

Uberlândia
2020

Rafael Almeida Arantes

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO EM
CONCRETOS COM FIBRAS NA CONDIÇÃO SATURADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr. Antonio Carlos
dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Prof. Dr. Márcio Augusto Reolon Schmidt

Aluno: Rafael Almeida Arantes

Uberlândia
2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me conceder vitalidade e força para superar os momentos de dúvidas e dificuldades durante à graduação. Também agradeço à família, namorada, amigos e professores da graduação de engenharia civil da Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio incondicional prestado e em especial, aos meus pais Ana Márcia e Clóvis Arantes que nunca mediram esforços para que esse sonho se realizasse, mesmo com todas as dificuldades. Agradeço também à técnica Cristiane Pires, do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, por todo o auxílio durante a execução do experimento e ao professor doutor Antônio Carlos dos Santos que se mostrou presente, disponível e compreensível em toda a execução deste trabalho. Sem vocês, isso não seria possível. Por fim, um agradecimento especial ao meu avô e que ele esteja em algum lugar lá de cima vendo o desfecho dessa trajetória acadêmica e o início das novas etapas que estão por vir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho.....	15
Figura 2- Mecanismo de transferência de tenções entre matriz e as fibras.	16
Figura 3 - Concreto reforçado com fibras com compatibilidade dimensional (A) e sem compatibilidade (B).	20
Figura 4 - Fibra de vidro AR em matriz de cimento Portland.	22
Figura 5a e 5b – Fibras de polipropileno do tipo fibrilado e monofilamento.	23
Figura 6 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.	24
Figura 7 - Fibras de sisal.	25
Figura 8 - Esquema adotado no ensaio de dobramento da fibra de aço segundo previsto a norma.....	28
Figura 9 - Fibras trabalham como ponte de transferência de tensões. ...	30
Figura 10 - Ligação da fibra com a matriz cimentícia do concreto.....	31
Figura 11 - Lei de evolução de custos.	34
Figura 12 - Processo de penetração de íons cloretos no interior do concreto armado.	41
Figura 13 - Classes de agressividade ambiental.	46
Figura 14- Pilar sobre o mar, após 10 anos de construção, deterioração por ataque da água.	48
Figura 15 - Proposta original do modelo de Tuutti para corrosão de armaduras.	51
Figura 16 - Correta e errônea extrapolação dos teores do perfil de cloretos.	52
Figura 17 - Difusão de cloretos com perda de fração de cloretos que sofre difusão na direção oposta.	53
Figura 18 - Esquema de célula de migração.	54
Figura 19 - Esquema do processo de difusão de cloretos nos métodos de imersão	56
Figura 20 - Fluxograma de atividades do procedimento experimental ..	57
Figura 21 - Ilustração figurativa de um saco comercial de cimento	59

Figura 22- Agregado graúdo, do tipo brita 1, utilizado para confecção do concreto	60
Figura 23 - Agregado miúdo, do tipo areia média, utilizado para confecção do concreto.....	61
Figura 24 - Aditivo utilizado no experimento	62
Figura 25 - Fibras de aço utilizadas no experimento	63
Figura 26a e 26b - Fabricação dos traços de concreto.....	65
Figura 27 - Imersão dos corpos de prova para o processo de cura.....	67
Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão	67
Figura 29 - Vedação dos corpos-de-prova com resina epóxi.....	69
Figura 30 - Contaminação por <i>NaCl</i> do concreto.....	70
Figura 31 - Desenho esquemático dos furos.	71
Figura 32a e 32b – Extração e obtenção do material pulverulento.....	72
Figura 33 - Amostras extraídas.....	72
Figura 34 - Filtragem das amostras	73
Figura 35 – Amostras filtradas	74
Figura 36 – Soluções com cromato de potássio	74
Figura 37 - Adição do AgNO_3 à solução com K_2CrO_4	75
Figura 38 - Reação do AgNO_3 em contato com a solução com K_2CrO_4	75
Figura 39- Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C20 0,38%.	79
Figura 40 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C20 0,77%.	80
Figura 41 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C25 0,38%.	80
Figura 42- Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C25 0,77%.	81
Figura 43 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C40 0,38%.	81
Figura 44 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C40 0,77%.	82
Figura 45 - Valores máximo, médio e mínimo para a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,38%.....	86

Figura 46 - Valores máximo, médio e mínimo para a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%.....	86
Figura 47 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,38%.....	87
Figura 48 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,77%.....	87
Figura 49 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,38%.....	88
Figura 50 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,77%.....	88
Figura 51 - Diagrama de caixa da concentração superficial "Cs"	89
Figura 52 - Diagrama de caixa da concentração superficial "Cs"	89
Figura 53 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,38%.....	90
Figura 54 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%.....	91
Figura 55 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,38%.....	91
Figura 56 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,77%.....	92
Figura 57 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,38%.....	92
Figura 58 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%.....	93
Figura 59 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão "D"	94
Figura 60 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão "D"	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.....	26
Quadro 2 - Requisitos especificados pela norma ABNT NBR 15530 (2019) para as fibras de aço.....	27
Quadro 3 - Requisitos de forma mínimo das fibras de aço para concreto especificados pela norma.....	27
Quadro 4 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.....	44
Quadro 5- Classes de agressividade ambiental.	47
Quadro 6 - Quantitativo de material utilizado.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços utilizados na dosagem dos concretos.....	58
Tabela 2- Granulometria da brita 1.....	60
Tabela 3 - Granulometria da areia.....	61
Tabela 4 – Levantamento do número de corpos de prova.....	66
Tabela 5 - Resistência à compressão aos 28 dias.....	68
Tabela 6 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C20.....	78
Tabela 7 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C25.....	78
Tabela 8 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C40.....	79
Tabela 9 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C20.....	83
Tabela 10 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C25....	84
Tabela 11 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C40....	85

RESUMO

Existem diversos tipos de patologias em estruturas de concreto que influenciam na durabilidade e vida útil das mesmas, fatores estes essenciais para que às construções desempenhem corretamente às funções de serviço às quais foram projetadas. O ataque químico de íons cloreto é uma dessas patologias mais agressivas ao sistema concreto-aço, principalmente em ambientes marinhos e litorâneos, onde a estrutura é exposta à névoa salina. Este agente nocivo, além de provocar a despassivação da armadura e consequente corrosão, altera também às propriedades e composição iniciais do concreto, o que ocasiona a redução da vida útil da estrutura. Com o intuito de estudar a atuação desta patologia no concreto, propôs-se no trabalho a análise da penetração dos íons cloretos em diferentes classes de resistência, diferentes concentrações de fibras em cada traço e diferentes idades de contaminação. Para o trabalho, realizou-se a investigação experimental para as classes de resistência C20, C25 e C40, em que cada um foram analisados com dois percentuais de fibras de aço diferentes (0,38% e 0,77%); estes corpos de provas contaminados em diferentes intervalos de tempo (223, 251 e 279 dias). Para o estudo da penetração dos íons cloretos, baseou-se na imersão dos corpos de prova de concreto em uma solução salina com concentração de 250 gramas por decímetro cúbico, baseado no Método Acelerado Modificado desenvolvido por Guimarães Helene (2007); e analisou-se aspectos como: teores de cloreto em quatro profundidades diferentes (5,10,15 e 20 milímetros), coeficiente superficial estabelecido por meio dos perfis de cloretos obtidos pelos teores em cada camada; e a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto, o qual indica a capacidade que um específico tipo de concreto tem de resistir à penetração desse agente agressivo. No que diz respeito aos valores encontrados no experimento após a realização das titulações e cálculos dos coeficientes e concentrações; constatou-se que há presença de fibras de aço não apresentou uma influência relevante no processo de penetração dos íons cloretos, assim como as diferentes classes de resistência; sendo o tempo de contaminação o principal fator que interfira neste ataque químico.

Palavras-chave: Concreto, íons cloreto, fibras, difusão.

ABSTRACT

There are several pathologies related to structure of concrete that influence the durability and lifespan of such constructions, which are essential factors to the appropriate performance of these systems in their projectual functions. The chemical attack of ions chloride is one such pathology that is particularly aggressive to steel-concrete systems, especially in coastal environments, where structures are exposed to sea mist. This noxious agent, besides causing the dissipation of armature and eventual corrosion, alters the composition and initial properties of the concrete, which causes the shortening of its lifespan. To study the effects of such pathology on concrete, this project analyzes the penetration of ions chloride in structures with different resistant classes, fiber concentrations in each trace, and different contamination ages. Specifically, the project was conducted with resistant classes C20, C25 and C40, and for each class, two different steel fiber concentrations were used (0.38% and 0.77%); the samples were contaminated in different time intervals (223, 251, and 279 days). For the aforementioned study, the steel-concrete samples were submerged in a saline solution with concentration of 250 grams per cubic centimeter as in the Accelerated Modified Method developed by Helene Guimarães (2007), and the following aspects were investigated: chloride concentration in different depths (5, 10, 15, and 20 milliliters); superficial coefficient determined by chloride profiles obtained by depth concentration; and the diffusion coefficient of ions chloride, which indicates resistance of a specific concrete system to agent penetration. The results from titrations and concentration calculations indicated that neither presence of steel fibers nor the class of resistant influenced the process of chloride ions penetration in concrete samples; contamination time was the main factor to interfere with the chemical attack.

Keywords: Concrete, ions chloride, fibers, diffusion.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
Lista de Figuras.....	4
Lista de Quadros	7
Lista de Tabelas	8
RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1 Introdução	14
1.1 Objetivos.....	18
2 Concreto com Fibra	18
2.1 Tipos de fibras	21
2.1.1 Fibras de Vidro	21
2.1.2 Fibras de Polipropileno.....	22
2.1.3 Fibras Naturais.....	24
2.1.4 Fibras de aço	25
2.2 Concreto Reforçado com Fibras de Aço – CRFA.	28
2.2.1 A matriz de concreto.....	29
2.2.2 Interação da fibra matriz.....	29
2.2.3 Propriedades do CRFA no estado fresco	30
2.2.4 Propriedades do CRFA no estado endurecido	30
3 Mecanismos patológicos em estruturas de concreto.....	32
3.1 Mecanismos de transporte que influenciam na durabilidade do concreto armado	36
3.1.1 Difusão.....	36
3.1.2 Migração iônica	37
3.1.3 Permeabilidade.....	38
3.1.4 Absorção Capilar	38
4 Cloretos.....	40
4.1 Teores Críticos de Cloretos.....	42
4.2 Fatores que influenciam na penetração de íons cloreto no concreto	45
4.2.1 Fatores Ambientais	45
4.2.2 Condições de exposição.....	46

	12
4.2.3 Fatores inerentes ao concreto.....	48
4.3 Estimativa da vida útil	49
4.3.1 Modelo de Tuutti	50
4.3.2 Segunda Lei de Fick	51
4.3.3 Modelo proposto por Guimarães e Helene	53
4.3 Métodos de ensaio para determinação da penetração dos íons cloreto no concreto	54
5 Planejamento e Procedimento Experimental	57
5.1 Materiais empregados na confecção dos concretos.	58
5.1.1 Aglomerante.....	59
5.1.2 Agregado graúdo.....	59
5.1.3 Agregado miúdo	60
5.1.4 Água.....	61
5.1.5 Aditivo	62
5.1.6 Fibras	62
5.2 Produção das amostras de concreto.	63
5.2.1 Contaminação dos corpos de prova	68
5.2.2 Extração das amostras.....	70
5.3 Análise do teor de Cloretos no Concreto	73
5.3.1 Titulação potenciométrica.....	73
5.3.2 Determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto	76
5.3.3 Determinação do perfil de cloretos, da concentração superficial de cloretos (Cs) e do coeficiente de difusão (D)	76
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS TEORES DE CLORETOS E OS RESPECTIVOS PERFIS.....	78
6.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS E DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO.....	83
6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONCENTRAÇÕES SUPERFICIAIS DE ÍONS CLORETO	85

6.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO	90
7 CONCLUSÕES	96
Referências.....	98
ANEXO A – Ficha técnica do aditivo	103
Descrição	103
Usos	103
Modo de utilização.....	103
Compatibilidade.....	103
QUANDO UTILIZAR COMBINAÇÕES DE ADITIVOS, ESTES DEVEM SER ADICIONADOS AO CONCRETO SEPARADAMENTE.....	103
Embalagens.....	103
Estocagem e Validade.....	104
Instruções de Segurança.....	104
Anexo – Tipos de produtos disponíveis e principais características.....	104
ANEXO B – ficha técnica da resina epóxi	106
DESCRIÇÃO:.....	106
UTILIZAÇÃO	106
VANTAGENS:.....	106
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	106
Preparação do Produto	107
Aplicação do Produto.....	107
CONSUMO	108
VALIDADE E ESTOCAGEM.....	108
RECOMENDAÇÕES.....	108
RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA	108
CUIDADOS AMBIENTAIS	108
ANEXO C – RESULTADOS DAS TITULAÇÕES E TEORES DE CLORETO	109
ANEXO D – GRÁFICOS DOS PERFIS DE TEORES DE CLORETO	119

1 INTRODUÇÃO

O concreto é considerado o material estrutural mais utilizado no mundo, fato proporcionado por principalmente a capacitação deste para adequar-se às diversas condições de produção, ao baixo custo e a possibilidade de permitir variações de forma para as estruturas e peças moldadas. No entanto, apesar de toda esta versatilidade, esse material apresenta limitações, um exemplo seria ao caráter frágil e baixa deformação e conseqüente resistência a tração do concreto

simples, baixa relação de resistência e peso, além da demora do tempo de cura para que o material atinja os requisitos ao qual é solicitado.

Para isto, com o desenvolvimento científico e avanços tecnológicos, surgiu-se o concreto armado, onde as limitações do concreto simples quando expostas a esforços de tração, são compensadas pelo esforço de barras de aço. Para MEHTA (1999), estes progressos nos estudos em relação ao concreto têm ocorrido como consequência dois principais motivos: a velocidade de construção dos tempos atuais e a durabilidade do concreto.

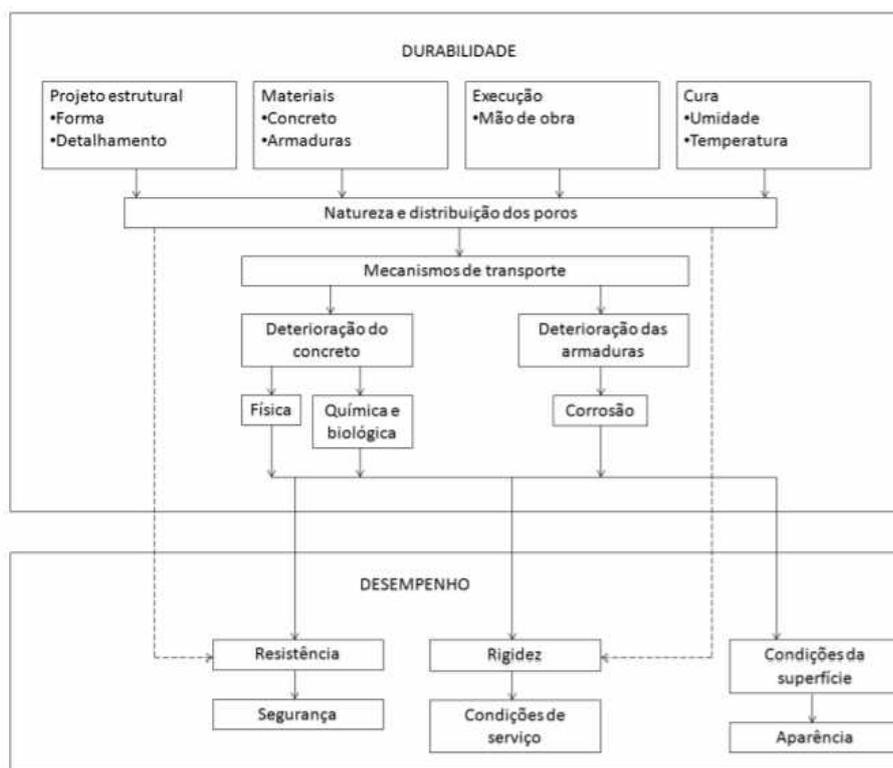
Durante muito tempo, as normas e regulamentos relacionados a concepção do projeto e execução de estruturas de concreto armado, visaram somente as questões de estabilidade e desempenho das estruturas, isto é, o único objetivo era garantir que estas atingissem uma resistência mecânica suficiente para suportar os carregamentos atuantes no decorrer da vida útil, além de promover segurança e conforto aos usuários da edificação. Na concepção de NEVILLE (1997), o concreto armado foi idealizado e admitido como dotado de durabilidade por período de tempo ilimitado.

No entanto, nos últimos anos, rompendo com o paradigma de que concreto resistente era concreto durável, há um crescimento do número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, com enfoque no processo de corrosão das armaduras, resultado do envelhecimento precoce das construções existentes (HELENE, 1997).

No decorrer da vida útil, as estruturas estão expostas à ação de diversos agentes que contribuem de forma geral para uma queda no seu desempenho, um exemplo disso é a diminuição de sua resistência. Assim, buscava-se executar reparos e manutenções que conferissem a estruturas às características originais da mesma.

Com os avanços de estudos na área da construção civil, procurou-se para executar as intervenções estruturais necessárias na estrutura, as causas e origem dos processos de degradação, juntamente o desenvolvimento de estratégias gerais para lidar com estas situações. Neste cenário, o Comité Euro-International du Béton (CEB) com base em estudos elaborou o manual Durable Concrete Structures – Design Guide no intuito de relacionar os conceitos de desempenho com os fatores de durabilidade conforme apresenta a figura 1.

Figura 1- Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho

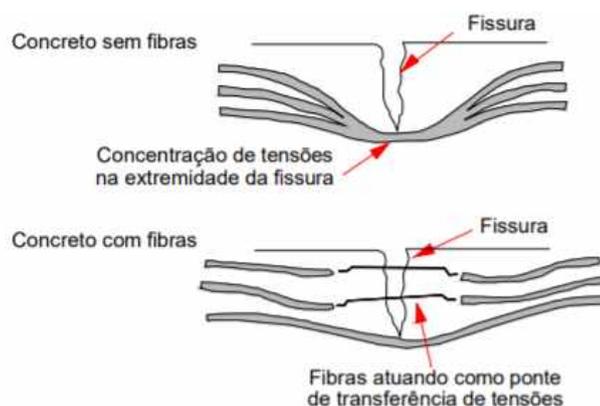


Fonte: CEB adaptado (1989).

Com o avanço do conhecimento acerca das patologias presentes nas estruturas, houve também estudos a respeito de novas possibilidades de reforços do concreto através do uso de fibras. O concreto com fibras, caracterizado por ser um material composto por uma matriz frágil e fibras como reforço, apresenta um comportamento mais adequado a específicas aplicações, já que combina as distintas capacidades dos materiais que lhe deram origem.

A adição de fibras no concreto com resistência, módulo de elasticidade e teores adequados faz com que o material se comporte como pseudodúctil, deixando o caráter frágil ao qual é comumente associado. Fato proporcionado pela fibra ser um meio de transferência de tensões, como mostra a figura 2.

Figura 2- Mecanismo de transferência de tensões entre matriz e as fibras.



Fonte: NUNES; AGOPYAN (1998).

Assim, tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no material, apresentando certa capacidade de resistência após a fissuração. Estas fibras podem atuar nas microfissuras durante o processo de “pega” da pasta de cimento, controlando o surgimento das microfissuras; e também atuar na pasta já endurecida, funcionando como um obstáculo no desenvolvimento de aberturas e do comprimento das fissuras.

Nas últimas décadas, ocorreram grandes avanços nas pesquisas e aplicações dos concretos reforçados com fibras, sendo a utilização deste material cada vez maior em todo o mundo. É fato que a influência das fibras na composição e no comportamento do concreto, também pode afetar na questão da vida útil e durabilidade da estrutura.

Segundo HELENE (1997) o aspecto mais importante no quesito de durabilidade é o conhecimento dos mecanismos de transporte no concreto em que possibilitam a movimentação dos agentes agressivos. Entre os agentes de degradação, os cloretos se apresentam como os mais agressivos, devido à facilidade de penetração destes íons na película de passivação da armadura, possibilitando o início de uma corrosão intensa, do tipo pontual, reduzindo a seção resistente do aço e modificando as propriedades do concreto.

Atualmente, o que se observa na grande maioria das estruturas de concreto armado são projetos de má qualidade, erros e descuidos no processo de execução, poucos ou nenhum controle e critérios em planos de manutenção e conservação da edificação. Esta situação se tornou um problema seja por questões de segurança ou por gastos financeiros excessivos para o tratamento de patologias e manutenção.

Desta forma, o conhecimento das origens, maneiras de manifestação e mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, possibilita uma

intervenção mais ágil, efetiva, segura e econômica para a situação. Sendo a corrosão das armaduras, uma das principais patologias que modificam diretamente a questão da durabilidade e vida útil do concreto e o íon cloreto um dos principais agentes agressivos de deterioração deste compósito, analisou-se no presente trabalho a influência deste em estruturas de concreto com diferentes teores de fibras em sua composição.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é analisar e avaliar por meio de procedimentos experimentais a influência da presença de fibras de aço em diferentes concentrações no processo de penetração de íons cloreto em estruturas de concreto com fibra. Sendo avaliado neste processo, a ação do cloreto de sódio para diferentes traços de concretos e tempos de contaminação distintos a qual a estrutura é exposta. A experiência foi realizada seguindo o método de ensaio Guimarães e Helene em que o grau de concentração de NaCl na solução é de 250 gramas por decímetro cúbico. Mediante a este procedimento teve-se como intuito determinar os coeficientes de difusão a penetração dos íons cloretos em todas as situações abordadas; para assim comparar e realizar uma análise crítica aos resultados encontrados.

2 CONCRETO COM FIBRA

O concreto reforçado com fibras pode ser definido como um compósito, isto é, material que é constituído por no mínimo duas fases distintas principais, sendo neste caso a própria matriz de concreto e as fibras. Estas que podem ser originadas de diferentes materiais, como propileno, vidro, aço, náilon, carbono, entre outros.

O material constituinte da fibra é o que determina sua resistência mecânica e o módulo de elasticidade, fatores estes determinantes na capacidade de reforço deste constituinte na estrutura de concreto. Desta maneira, as fibras podem ser classificadas como de baixo e alto módulo de elasticidade, a primeira classificação determinada quando o módulo de elasticidade da mesma é inferior ao do concreto; um exemplo seria as fibras poliméricas; a segunda quando ocorre o inverso em que o concreto supera a fibra na elasticidade, seria o caso por exemplo das fibras de carbono e aço.

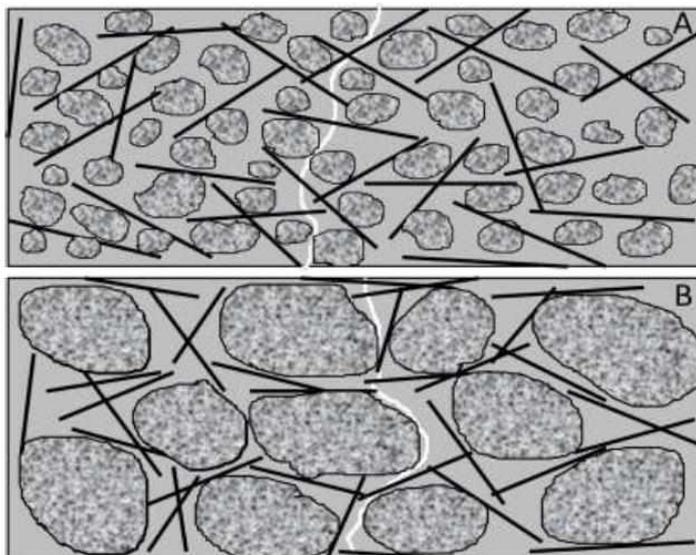
De maneira geral, as fibras também podem ser classificadas como naturais, artificiais ou sintéticas. No caso das artificiais ainda tem se uma subdivisão entre as inorgânicas e as orgânicas (JUNIOR E ROCHA 2011). Há diferenciação entre as mesmas se dá pela composição física e química, propriedades mecânicas e resistência quando em exposição a meios agressivos (VENDRUSCULO, 2003).

A inserção de um teor de fibras de resistência e módulo adequados ao concreto, há uma mudança nas propriedades deste material, em que deixa de ter o caráter frágil ao qual é comumente associado. Tal característica é alterada pelo fato de a fibra funcionar como uma ponte de transferência de tensões pela fissura, assim o material adquire um novo comportamento de pseudo-dúctil ou não frágil, já que há uma grande diminuição da velocidade de dispersão de fissuras na estrutura. Este novo estado, confere uma capacidade de resistência do concreto após o processo de fissuração.

Outro fator determinante para esta resistência, é a influência da geometria da fibra utilizada e conseqüentemente o fator de forma da mesma. Este fator, consiste no valor resultado da divisão entre o comprimento da fibra pelo diâmetro de um círculo que gere a mesma área da seção transversal da fibra estudada. Por ser diretamente proporcional a resistência no processo de pós fissuração, quanto maior o comprimento da fibra maior a capacidade resistente. É válido ressaltar, no entanto, que este aumento de comprimento da fibra para ganho de resistência é limitado de acordo com o comprimento crítico da fibra (L_c).

Uma importante recomendação associada a dimensão das fibras é a de que o comprimento da mesma seja no mínimo duas vezes a dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto. Ou seja, é necessária uma compatibilidade dimensional entre estes materiais, para que as fibras consigam exercer a função de interceptar as fissuras no compósito com maior êxito (MAIDL, 1991). Este processo é de extrema importância já que a ocorrência de fraturas ocorre principalmente na interface entre a pasta e o agregado graúdo, e esta compatibilidade dimensional possibilita que a fibra cumpra sua função na estrutura de concreto. A figura 3 mostra a situação ideal onde existe esta compatibilização e quando não há.

Figura 3 - Concreto reforçado com fibras com compatibilidade dimensional (A) e sem compatibilidade (B).



Fonte: Figueiredo (2011).

De acordo com Strong (2008), a fibra presente na matriz de concreto atua como reforço, já que possibilita um ganho de resistência quanto a fissuração, aumento da rigidez e tenacidade do compósito, além de ser capaz de influenciar e determinar outras propriedades como a condutividades e o coeficiente de expansão térmica da mistura.

2.1 TIPOS DE FIBRAS

Na construção civil existem diversos tipos de fibras que conferem junto ao concreto uma melhoria na aplicabilidade e na função que desempenha esse compósito nas estruturas. Estas podem ser classificadas conforme a constituição de seus materiais ou de acordo com suas propriedades físicas e químicas. A escolha do tipo de fibra a ser utilizada na matriz de concreto é condicionada de acordo com suas propriedades térmicas, acústicas e principalmente mecânicas, sendo a resistência a tração e o módulo de elasticidade alguns destes fatores.

2.1.1 Fibras de Vidro

As fibras de vidro, apesar de ser proveniente de um material frágil, as mesmas possuem propriedades que garantem um bom desempenho no setor, o principal fator que garante esta diferença é o menor número de defeitos microscópicos que a fibra possui perante ao material vidro, o que garante uma maior resistência da primeira (FONTON 2007).

Desta forma, este tipo de fibra garante uma resistência à tração e à vibração, baixo coeficiente de dilatação térmica, o que garante que as propriedades mecânicas não se alterem quando expostas a altas temperaturas, tem-se uma facilidade no processamento para a obtenção da mesma, capacidade de alongamento em rupturas e além disso possui um baixo custo quando comparado aos outros tipos de fibra.

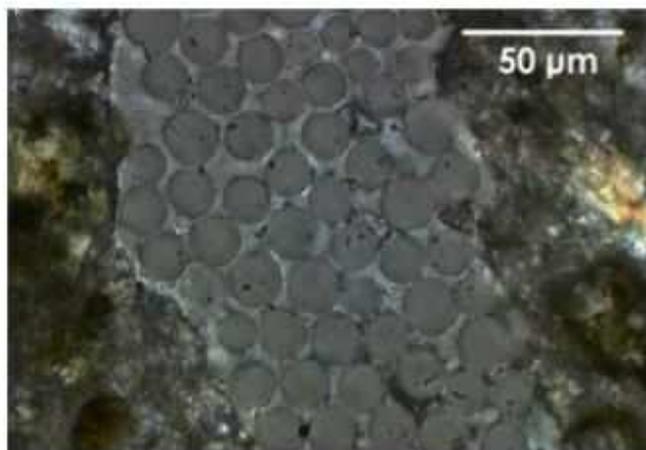
A fibra de vidro convencional, também chamada de tipo E, tem como desvantagem não apresentar uma adequada resistência ao meio alcalino da matriz de concreto que é composto por cimento Portland. Esta situação possibilita uma fragilidade no compósito, já que a fibra perde a capacidade de resistência a tração e de flexibilidade.

Assim, para que o compósito não se torne frágil, PURNELL (2000), propôs a utilização de fibra de vidro álcali resistente ou uma modificação na matriz cimentícia. A fibra de vidro AR, caracteriza-se pela presença de 15% a 20% de óxido de zircônio (ZrO_2) na composição do vidro (TEZUCA, 1986; PARDELA E AGUILA, 1998) e que esta adição possibilita uma resistência ao ataque dos álcalis. Assim, a perda da tenacidade neste tipo de fibra com o concreto ocorra exclusivamente devido à densificação da matriz na interface da fibra com a matriz.

Algumas das desvantagens deste tipo de fibra quando aplicada ao concreto são: baixa resistência à fadiga, baixo módulo de elasticidade e a auto abrasividade.

O concreto reforçado com fibra de vidro possui uma ampla aplicação na construção civil e na indústria de pré-fabricados. Alguns exemplos seria a utilização deste compósito em reservatórios, pavimentos industriais, painéis de fachadas, entre outros. Uma utilidade interessante deste, apesar de ainda pouco conhecida, seria o emprego como forma perdida para concreto armado, já que o concreto reforçado com fibra possui uma eficácia maior na resistência à carbonatação e à penetração dos íons cloretos, quando comparado ao concreto corrente. A figura 4, demonstra interação microscópica das fibras de vidro em matriz de cimento Portland.

Figura 4 - Fibra de vidro AR em matriz de cimento Portland.



Fonte: PURNELL (2001).

2.1.2 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno, produzidas a partir da resina de propileno do tipo homopolímero, possui diversos tamanhos e formas e estes influenciam na função que a fibra desempenha. No geral, estas são divididas em microfibras e macrofibras. A primeira não apresenta função estrutural e interfere principalmente na fase de cura do concreto, onde reduz o índice de fissuras ocorre a retração plástica. Já a segunda, são incorporadas como elementos estruturais. De acordo com a geometria dessas fibras, ainda são divididas em monofilamentadas, multifilamentadas e fita extrusada.

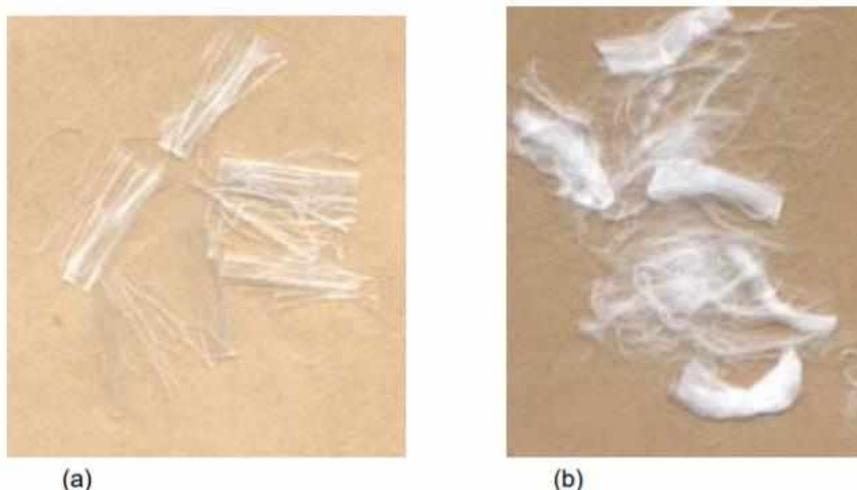
As principais vantagens deste tipo de fibra são: resistência a álcalis, relativo alto ponto de fusão e baixo preço do material. Além de que, por ser um

material sintético, se torna vantajosa quanto a degradação, já que a mesma não sofre de ataques químicos; como é o acaso das fibras de aço perante ao processo de corrosão, das fibras de vidro quanto ao meio alcalino e as fibras vegetais ao ataque de microrganismos. Outra característica que a fibra proporciona ao compósito é a de diminuir o peso da estrutura, já que possui um peso específico bastante inferior ao concreto.

O teor de fibras no compósito irá determinar a capacidade resistente e tenacidade do mesmo, sendo fatores diretamente proporcionais; já que o aumento na quantidade de fibras proporciona um aumento na quantidade de pontes de transferências de tensões nas fissuras. Segundo SHAH (1991), a aplicação de baixos teores apenas evitam a propagação das microfissuras, enquanto altos teores proporcionam também o desvio das mesmas.

MOGRE e PARBAT (2012), ainda afirmam que este alto teor de fibra de polipropileno no concreto, possibilita um aumento na resistência à tração, à flexão, à fadiga, ao impacto, à abrasão, aumento em geral a durabilidade e a tenacidade, e impede o lascamento. Assim, com a utilização de elevadas quantidades da fibra, torna-se necessário para a melhoria da trabalhabilidade do compósito a adição de um super plastificante. A figura 5 a seguir apresenta a fibra de polipropileno do tipo fibrilado (a) e monofilamento (b).

Figura 5a e 5b – Fibras de polipropileno do tipo fibrilado e monofilamento.

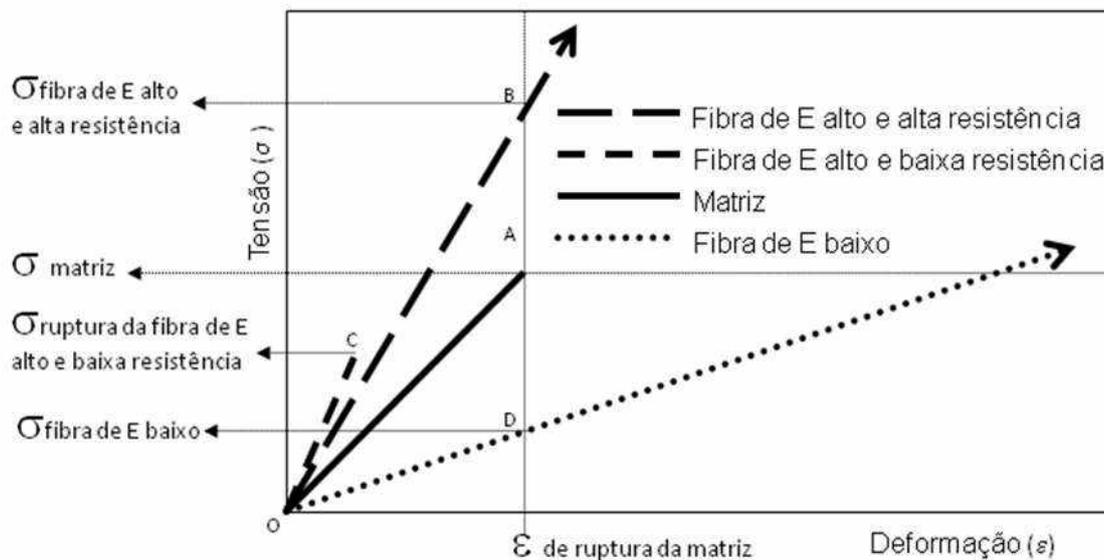


Fonte: FIGUEIREDO (2002).

As desvantagens das fibras de polipropileno ocorrem no âmbito de possuir um baixo módulo de elasticidade, baixa resistência ao fogo, sensibilidade ao oxigênio e à luz do sol e fraca aderência com a matriz cimentícia. (BENTUR E MINDESS, 2007). Devido ao baixo módulo, estas são incapazes de proporcionar

maior rigidez e impedir que a fissuração continue. Como uma característica geral, a fibra que detêm um baixo módulo de elasticidade irá permitir um maior nível de abertura de fissuras quando comparada a uma fibra de alto módulo, para um mesmo nível de sollicitação do conjunto fibra-matriz. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 6:

Figura 6 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.



Fonte: FIGUEIREDO (2016).

2.1.3 Fibras Naturais

O desenvolvimento industrial e tecnológico é acompanhado cada vez mais com a filosofia do desenvolvimento sustentável, sendo a construção civil um dos setores neste viés de abordagem. Por isso, a aplicação de recursos renováveis torna-se uma necessidade, o que estimula o desdobramento de pesquisas acerca de novos materiais para serem aplicados no setor.

Diante deste cenário, têm-se as fibras naturais. Um dos grandes estímulos às pesquisas sobre concretos com reforço de fibras naturais, partiu da grande quantidade disponível no ambiente e pela alta resistência de alguns exemplares, sendo alguns destes as fibras de coco, sisal, bambu e linho. (BENTUR; MINDESS, 2006). Somado a esta grande abundância do material, tem-se o baixo custo na obtenção desta fibra, segundo a organização americana Food and Agriculture Organization (FAO), a grande maioria produção destas fibras decorre de resíduos de subprodutos das indústrias agrícolas, o que torna um ótimo custo benefício do produto para a aplicação do mesmo em matrizes cimentícias.

Outros fatores que promovem atratividade a cerca deste tipo de fibra são: baixa densidade do material o que diminui esta característica do compósito gerado, diminuindo o peso próprio da estrutura; além de serem renováveis e não prejudiciais à saúde. (WEGNER, 2008). De acordo com Levy Neto e Pardini (2006), as fibras naturais ainda proporcionam uma maciez e abrasividade reduzida, gera um baixo consumo de energia de produção e pela facilidade de acesso e obtenção possui um estímulo para o emprego em zonas rurais.

No entanto, este tipo de fibra possui suas desvantagens. Por existir através de mecanismos naturais, podem apresentar grandes variabilidades nas propriedades do material, já que não são resultantes de processos tecnológicos, sendo uma destas a apresentação de seções transversais de geometria distintas e complexas. Além deste fator, a baixa durabilidade da fibra em meio alcalino é algo que limita a aplicação nas matrizes cimentícias (GRAM,1988); a alta sensibilidade a efeitos ambientais, principalmente à altas temperaturas e também por apresentar propriedades mecânicas modestas em relação a outros tipos de fibras. A figura 7 mostra um exemplo de fibra natural, no caso a fibra de sisal.

Figura 7 - Fibras de sisal.



Fonte: Adaptado Silva (2004).

2.1.4 Fibras de aço

A utilização das fibras de aço para concreto no Brasil, iniciou-se na década de 1990, sendo que com o as especificações e conhecimentos acerca da mesma foram evoluindo até os dias atuais, promovendo uma melhoria no desempenho deste concreto e uma execução segura e com critérios internacionais de qualidade.

As fibras de aço são materiais descontínuos produzidos com uma grande variedade de dimensões, formatos e tipos de aço. A ABNT NBR 15530:2007 “Fibras de aço para concreto – Especificação” caracteriza a tipologia e classifica estas fibras, o quadro 1 abaixo apresenta esta classificação quanto a configuração geométrica deste material e ao tipo e a classe que este está inserido.

Quadro 1 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: ABNT NBR 15530:2019.

O Tipo está diretamente relacionado a geometria do perfil longitudinal da fibra. O tipo A é caracterizado por possuir ancoragens nas extremidades, o tipo B por ser proveniente de fibra de aço corrugada e o tipo C por ser originado de fibra de aço reta. A classificação quanto as classes ocorrem de acordo com o tipo de aço utilizado na fabricação das fibras, já que a seção transversal da mesma é dependente deste fator. Na classe 1 se encontram as fibras oriundas de arame trefilado a frio, na classe 2 oriundas de chapa laminada cortada a frio e na classe 3 de arame trefilado e escarificado.

A norma ainda regula dois fatores primordiais da fibra: a geometria e a resistência do aço a qual foi originada. O quadro 2 a seguir apresenta as classes das fibras de acordo com o nível de resistência mínima do aço.

Quadro 2 - Requisitos especificados pela norma ABNT NBR 15530 (2019) para as fibras de aço.

Fibra	Limite de resistência à tração do aço MPa (*) f_u
AI	1000
AII	500
CI	800
CII	500
CIII	800
RI	1000
RII	500

(*) Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente ao da fibra, imediatamente antes do corte

Fonte: ABNT NBR 15530:2019.

Já de acordo com a geometria, busca-se por norma garantir um desempenho mínimo do concreto reforçado com fibra de aço (CRFA), o que ocorre por meio da normatização de fatores de forma (λ) mínimos para as fibras (FIGUEIREDO, 2008). Estes valores estão expostos no Quadro 3 e são diretamente ligados a classe da fibra, ou seja, dependem diretamente do tipo de aço a qual a fibra foi originada. As variações deste fator são restringidas e estabelecidas pela norma de acordo com o tipo da fibra, no intuito de garantir ao máximo uma constância no comportamento do compósito na pós-fissuração.

Quadro 3 - Requisitos de forma mínimo das fibras de aço para concreto especificados pela norma.

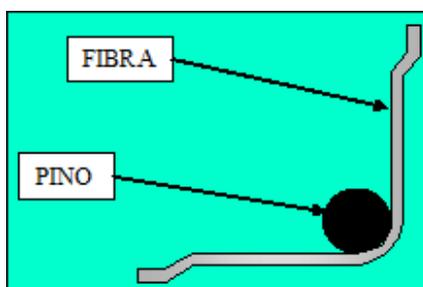
Classe da fibra	Tipo de aço	Fator de forma mínimo λ
I	Fio de aço trefilado	40
II	Chapa de aço cortada	30
III	Fio de aço trefilado e escarificado	30

Fonte: ABNT NBR 15530:2019.

Ainda de acordo com a norma, é necessário a realização de um ensaio de dobramento em no mínimo 10 exemplares escolhidos aleatoriamente de um lote de fibras, em que deve-se verificar manualmente neste processo o dobramento da fibra sobre um pino de 3,2 mm de diâmetro até que a fibra forme um ângulo de 90 graus; este procedimento permite concluir a garantia de uma ductilidade

mínima presente no material para que o compósito não se torne frágil. Este ensaio, é demonstrado pela figura 8.

Figura 8 - Esquema adotado no ensaio de dobramento da fibra de aço segundo previsto a norma.



Fonte: ABNT NBR 15530:2019.

Este tipo de fibra é a mais utilizada em elementos estruturais de concreto, uma das qualidades desta é o alto módulo de elasticidade, que possibilita uma melhora nas características do compósito como o controle de fissuras, tenacidade, resistência ao impacto e à fadiga à flexão. Exemplos onde faz-se a aplicação deste concreto reforçado com fibras de aço são em pisos e revestimentos de túneis, pisos industriais entre outros.

Torna-se importante enfatizar que o emprego destas fibras no concreto, não substituem a necessidade das armaduras convencionais necessárias a estrutura; somente em raros casos em que existe a possibilidade de redistribuir os esforços solicitantes na estrutura, exemplos deste tipo de situação seria o caso dos pisos, pavimentos e radiers apoiados no solo.

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO – CRFA.

O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) emergiu como uma variável capaz de atingir ductilidade durante a tensão e pós-pico de compressão, além de proporcionar um aumento nas propriedades mecânicas e durabilidade. Dentre as vantagens da adição de fibras de aço no concreto, é possível citar: controle da propagação de fissuras dentro da matriz do compósito; aumento das resistências à fadiga, as cargas de impacto e dinâmico; aumento da tenacidade ocasionado pela inibição da amplitude das fissuras; aumento das resistências à compressão e à tração de solos artificialmente cimentados.

Os principais fatores que influenciam estas propriedades mecânicas adquirida pelo CRFA são: características geométricas das fibras; volume, orientação e distribuição destas dentro da matriz de concreto; razão entre a dimensão máxima do agregado empregado e o comprimento da fibra; resistência mecânica do material utilizado como matéria-prima para fabricação das fibras e tensão de aderência entre as fibras e a matriz.

2.2.1 A matriz de concreto

O concreto de cimento Portland é por si só um compósito, formado por três fases principais: a pasta de cimento, os agregados miúdos e os grãos. Este é; apesar de considerado um dos materiais mais versáteis no âmbito da construção civil; frágil, quebradiço, baixa capacidade de alongamento e de resistência a esforços de tração.

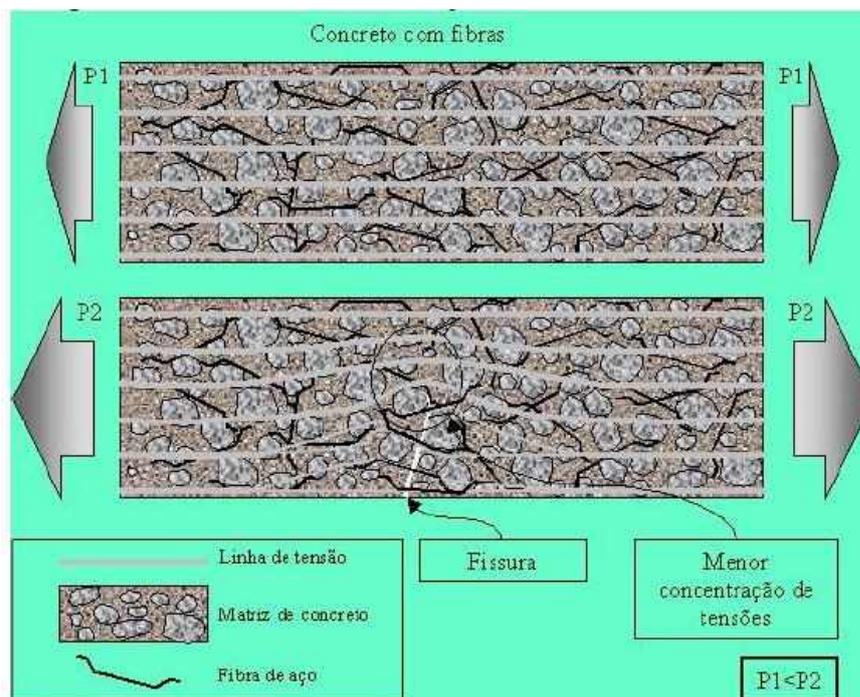
Mediante a estas características do concreto, este quando exposto a solicitações de tração, possibilita o aparecimento e a propagação de fissuras em estruturas formadas a partir deste compósito. A maneira que ocorre uma nova fissura, a área disponível para o suporte de carga é reduzida; o que proporciona um aumento de tensões localizadas nas extremidades destas fissuras que ao se unirem ocasionam futuramente a ruptura da estrutura.

Na finalidade de mitigar este comportamento do concreto simples e evitar ao máximo a ocorrência de ruptura do material é realizado a adição de fibras de aço nas devidas proporções para que iniba este comportamento frágil. Devido ao elevado módulo de elasticidade diante do concreto, as fibras de aço funcionam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, isto é, permitem a redistribuição dos esforços na estrutura.

2.2.2 Interação da fibra matriz

O CRFA é inteiramente dependente da interação fibra-matriz, assim faz-se necessário a verificação das especificações exigidas para os elementos que constituem este compósito, o que inclui o controle da qualidade do material, a dosagem e a correta prática na obtenção do mesmo. Esta interação é influenciada por diversos fatores como: resistência da matriz, orientação, seção transversal, comprimento e volume crítico das fibras. O comportamento das fibras na pasta cimentícia é demonstrado na figura 9 a seguir.

Figura 9 - Fibras trabalham como ponte de transferência de tensões.



Fonte: Figueiredo (2000).

2.2.3 Propriedades do CRFA no estado fresco

Estado fresco do concreto é o momento em que ainda não ocorreu a “pega” do aglomerante. De acordo com ACI 544.1R-96 (1996), o CRFA neste estado possui diversas propriedades que são influenciadas pelas fibras, características como: geometria, volume, aderência e proporção em relação a matriz. É válido ressaltar, que este processo de consolidação do composto, tem relação direta com a resistência e outras propriedades do material endurecido.

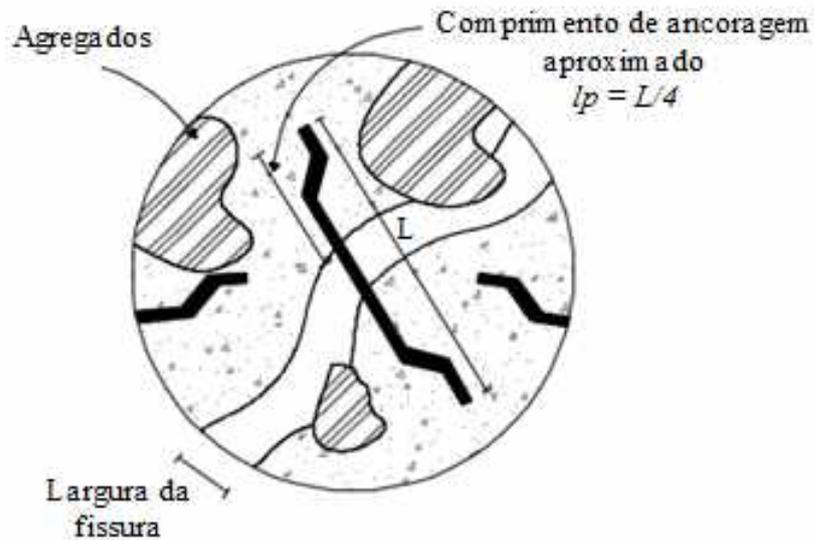
Além disso, é importante que aconteça a vibração correta do CRFA para que não haja aglomeração de fibras de aço na pasta de concreto, situação comumente quando o volume da mesma é superior a 100. Outros fatores também podem influenciar, como: falhas mecânicas do misturados do composto, fibras já aglutinadas antes do lançamento, adição de fibras antes dos demais componentes.

2.2.4 Propriedades do CRFA no estado endurecido

O estado endurecido do concreto, trata-se daquele em que o material já sofreu o processo de “pega” do aglomerante, solidificando-o. O uso das fibras de aço promove um reforço das propriedades do concreto endurecido,

um exemplo disto é o aumento da ductilidade do material, proporcionado pela melhor aderência entre a matriz de concreto e a fibra, como apresenta a figura 10.

Figura 10 - Ligação da fibra com a matriz cimentícia do concreto.



Fonte: Adaptado de HWANG.

A melhoria desta propriedade está condicionada ao tipo e volume de fibras presente no concreto, sendo que a resistência das fibras de aço pode ser avaliada por meio do ensaio de arrancamento que irá definir o comportamento dúctil ou não da mesma. É importante entender que a melhora nesta propriedade tem atuações diferentes em relação a compressão, flexão, cisalhamento e torção.

3 MECANISMOS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Durante toda a história da humanidade, a civilização sempre buscou a construção de estruturas que atendessem as necessidades da época. Com o passar dos anos, houve um grande avanço tecnológico acerca da construção civil e com isto, diversos conhecimentos científicos a respeito do assunto foram desenvolvidos e acumulados até os dias atuais. Estas informações que abrangem a forma de pensar a concepção da estrutura, cálculo, a análise e ao detalhamento das construções. Outro fator desenvolvido foi a questão da tecnologia referente aos materiais utilizados e as respectivas técnicas construtivas que os envolvem.

Hoje, existem no Brasil diversas Normas Técnicas para construção, dentre elas as que especificam qualidade dos materiais e normas de desempenho e execução de técnicas construtivas com o objetivo de aumentar a qualidade final do produto e reduzir na medida do possível os custos de construção; obedecendo as Normas da ABNT NBR 15575 e ABNT NBR 6118 quanto a garantias da vida útil da estrutura e o conforto necessário para a habitação.

No entanto, apesar de todos estes avanços no âmbito da construção civil, ainda existem manifestações patológicas e não conformidades presentes nas estruturas. As manifestações podem ser originadas na atividade da construção; excetuando-se quando ocorre catástrofes naturais imprevisíveis; nas fases de concepção, em que engloba as fases de planejamento, projeto e de materiais utilizados; na execução e na utilização.

Patologias são todas as manifestações cuja ocorrência no ciclo de vida da edificação venha prejudicar o desempenho esperado do edifício e suas partes. Degussa (2008), entende como patologia, a parte da engenharia que tem por objetivo estudar os sintomas, mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis. Para Piancastelli (1997), por ser um material não inerte, o concreto armado está sujeito a alterações ao decorrer do tempo, seja entre seus constituintes ou com os agentes externos.

Sendo assim, a manifestação patológica irá influenciar na estrutura de diversas formas, se destacando os quesitos de vida útil, qualidade de desempenho e conseqüentemente durabilidade.

A vida útil de uma estrutura é caracterizada como sendo o intervalo de tempo que esta conserva todas as características mínimas de funcionalidade,

resistência e aspectos externos exigíveis. É necessário que a construção mantenha de acordo com o que foi projetada, a segurança, funcionalidade e aparência aceitável durante um intervalo de tempo. Segundo a NBR 15575 para estruturas comuns esta vida útil de projeto é estimada em 50 anos.

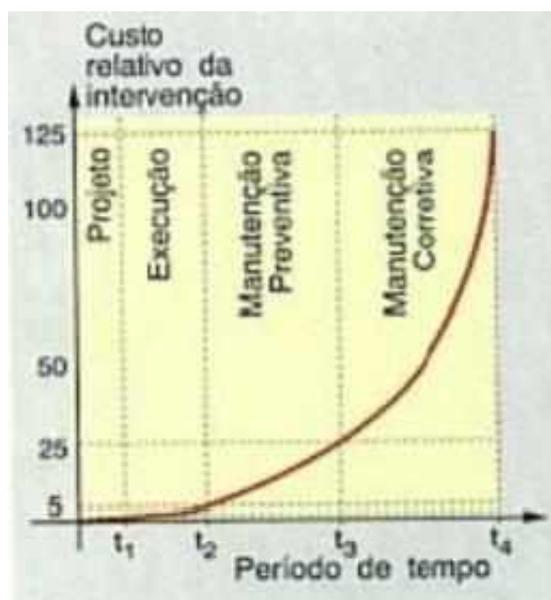
Em questão de desempenho, entende-se como o comportamento da estrutura quando solicitada em serviço, isto é, ao longo da vida útil. Esta característica é resultado de todo o trabalho desenvolvido durante as etapas de projeto, construção e manutenção. Este desempenho possui três níveis:

Ambos estes fatores, influenciam e correlacionam diretamente na longevidade de uma estrutura de concreto armado. A durabilidade é a capacidade de uma construção de conservar suas características estruturais e funcionais originais pelo tempo de vida útil esperado, nas condições de exposição para as quais foi projetada.

A análise da origem de questões patológicas envolvendo estruturas é de suma importância já que é a partir desta que influenciará nas decisões a serem tomadas para possível solução dos problemas envolvendo às estruturas. Quando as causas ocorrem por falha humana, isto é, resultantes de questões de projetos ou de execução; o processo de manutenção e correção serão mais duráveis, fáceis de executar e financeiramente melhor quanto antes forem colocados em prática.

A chamada “lei de Sitter”, formulada por Sitter (Apud Helene), retrata por meio de um gráfico que os custos relativos a uma intervenção na estrutura para reparar patologias na mesma segue os princípios de uma progressão geométrica conforme o intervalo de tempo em que ocorre a intervenção. O gráfico, como mostra a Figura 11 demonstra que a resolução de patologias pode ser colocada em práticas em 4 fases que englobam a construção e a utilização da estrutura; sendo que o custo segue uma progressão geométrica de razão cinco, em que quanto mais tarde intervir no problema, caso de uma manutenção corretiva, se torna cada vez mais inviável financeiramente.

Figura 11 - Lei de evolução de custos.



Fonte: HELENE (1992).

De acordo com HELENE (2001), os mecanismos de deterioração da estrutura como um todo, são aqueles relacionados às ações mecânicas, impactos, movimentações provenientes de diferenças térmicas, ações cíclicas, deformações lentas ocasionadas pelo grau de fluência da construção, relaxação e outras ocorrências consideradas na NB-001.

Dentre estes mecanismos atuantes nas estruturas de concreto armado, há aqueles em que atuam na deterioração do concreto e outros que interferem na armadura. Quanto aos processos relativos ao concreto têm-se como os principais: expansão por sulfatos, expansão por reação álcali-agregados, lixiviação e reações superficiais deletérias.

A expansão devido a ação dos sulfatos, substancia a qual proporciona uma queda na coesão dos produtos de hidratação do cimento; ocasiona em uma superfície a presença de fissuras, esfoliação e redução significativa da resistência superficial e da dureza do concreto, assim como redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais. Esta expansão, devido a presença dos sulfatos em algumas águas do meio, pode também acarretar reações deletérias de expansão com conseqüente formação de compostos expansivos do tipo etringita e gesso secundário.

A expansão por reação álcali-agregado proporciona o surgimento de fissuras superficiais e profundas no concreto. Dentre os agregados reativos

estão a opala, a calcedônia, as sílicas amorfas e certos calcários que necessitam para isto de elevada umidade.

A lixiviação é o fenômeno que possibilita na estrutura de concreto uma superfície arenosa sem a pasta superficial, com agregados expostos, alta retenção de fuligem, eflorescências de carbonato, risco de desenvolvimento de fungos o que pode gerar diminuição do pH das unidades aquosas presentes nos poros do concreto.

As reações superficiais deletérias surgem a partir de agregados que contêm a substância pirita em sua composição, esta que pode acarretar cavidades, manchas e protuberâncias na superfície da estrutura.

Já quanto aos mecanismos de deterioração relativos à armadura, HELENE (2001) afirma que os processos de despassivação tanto por carbonatação quanto por inserção de íons cloretos são os principais causadores das patologias presentes neste setor.

Segundo HELENE (1997) a despassivação da armadura por carbonatação ocorre devido a ação do gás carbônico presente na atmosfera, o qual pelo processo de difusão penetra no concreto e reage com os hidróxidos alcalinos da solução de poros da estrutura, reduzindo o pH. As reações de carbonatação são muito complexas, podendo ser simplificadas conforme mostra a equação 1.



Assim, quando o pH se torna abaixo de nove e atinge a armadura, a película passivadora antes existente, é rompida, resultando no processo de corrosão generalizada e homogênea, de maneira semelhante ao da armadura exposta à atmosfera sem nenhuma proteção (MONTEMOR et al, 2000). O fenômeno não promove a redução da resistência do concreto e até mesmo aumenta a dureza superficial, porém pode ser responsável pelo aparecimento de fissuras, manchas, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, conjunto de fatores que promovem o colapso de parte ou totalidade da estrutura.

Já a ação dos íons cloretos ocasiona uma séria corrosão localizada na armadura presente na estrutura, sendo uma das mais preocupantes causas de deterioração das estruturas de concreto (FIGUEIREDO 2005). De acordo com

Neville (1997) estes íons possuem uma alta capacidade de destruir o filme passivante do concreto, já que consegue atuar mesmo em condições de alta alcalinidade na solução de poros do concreto. Este fenômeno gera consequências semelhantes ao processo de carbonatação para as estruturas de concreto.

3.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO

As patologias, além de serem resultantes de falhas e ações humanas, podem ser ocasionadas também por fatores ambientais. Estes que podem ser provenientes de ações físicas, químicas, biológicas ou mesmo mecânicas; além de poderem atuar simultaneamente. Na maioria dos processos físicos e químicos dois fatores predominantes estão envolvidos na questão da durabilidade das estruturas de concreto que são: os mecanismos de transporte através das fissuras e dos poros, estes que podem ocorrer por meio dos processos de difusão, absorção capilar, permeabilidade e migração iônica; e a presença de água.

A estrutura de poros e as configurações das fissuras, através dos mecanismos de transportes de agentes agressivos no interior do concreto, exemplificados a seguir, se tornam os principais fatores que influenciam na extensão, velocidade e efeitos destes processos de deterioração.

3.1.1 Difusão

O processo de difusão ocorre quando há o deslocamento de um fluido, ocasionado por meio de um gradiente químico, geralmente este de concentração. Proporcionado pelo contato de dois meios distintos, este mecanismo de transporte permite o fluxo de massa devido ao efeito desta diferença de concentração, desta maneira o processo busca igualar as concentrações das substâncias, de maneira a eliminar o gradiente preexistente.

De acordo com Neville (1997), quanto a difusão dos gases, o dióxido de carbono é responsável pela carbonatação da pasta de cimento hidratado e o oxigênio é necessário à corrosão da armadura do concreto. A primeira Lei de Fick, demonstrada na equação 2, pode expressar a função da difusão que se aplica ao ar e ao vapor de água; além de ser um dos modelos

matemáticos que abordam a corrosão das armaduras do concreto devido à difusão de cloretos.

$$j = -D * \frac{dc}{dL} \quad (2)$$

Onde:

dC/dL = gradiente de concentração, em Kg/m⁴ ou moles/m⁴

D = coeficiente de difusão, em m²/s

J = velocidade de transporte de massa, em kg/m².s ou moles/m².s

L = espessura do elemento, em m

C = concentração de íons na solução

3.1.2 Migração iônica

Migração iônica é o processo de transporte gerado devido a um diferencial de potencial elétrico, o qual permite o deslocamento de íons presentes no meio aquoso para que se neutralize o efeito desta diferença. Segundo Helene (1993), o campo elétrico ocasionado pode ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou devido a uma diferença de potencial gerado por uma fonte externa.

Este mecanismo de transporte é utilizado em alguns ensaios que tem por objetivo avaliar a resistência a penetração dos íons cloretos no concreto, além de que permitem calcular o coeficiente de difusão estacionário ou aparente de íons na estrutura (NEPOMUCENO, 2005). A migração pode ser descrita pela fórmula:

$$qm = -Dc * \frac{(z*F)dV}{(R*T)dx} \quad (3)$$

Onde:

Dc = coeficiente de difusão

z = valência do íon

V = voltagem

R = constante dos gases

F = constante de Faraday (96.493 C)

T = temperatura absoluta

qm = fluxo de íons

3.1.3 Permeabilidade

Conforme Nepomuceno (2005) este mecanismo de transporte é definido como sendo o fluxo de um fluido gerado devido a uma diferença, um gradiente de pressão. Mecanismo caracterizado como sendo a facilidade com que o líquido atravessa um sólido poroso devido a esta diferença de pressão.

De acordo com Neville (1997), a permeabilidade do concreto de cobrimento está diretamente correlacionada com a permeabilidade da pasta de cimento. Esta última, que depende do grau de hidratação e do fator água/cimento do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Este mecanismo, considerando situações normais de temperatura ambiente, pode ser descrito pela lei de Darcy, conforme a equação 4 (HELENE, 1993).

$$V = k \cdot \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (4)$$

Onde:

V = velocidade de percolação da água, em m/s

k = coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s

H = pressão de água, em m.c.a

x = espessura do concreto percolado pela água, em m

Q = vazão de água percolada, em m³/s

S = área da superfície confinada por onde percola a água, em m².

As principais ocorrências deste fenômeno são em tanques industriais, reservatórios de estações de tratamentos de águas e esgotos, além de estruturas marítimas.

3.1.4 Absorção Capilar

Fenômeno de penetração dos líquidos nas estruturas de concreto quando estas se encontram raramente saturadas, isto é, deve haver poros secos ou parcialmente secos. A presença de poros nestas estruturas permite a absorção destes líquidos, sendo que no caso de concretos com menores relações de água e cimento, a intercomunicabilidade entre os poros é menor e conseqüentemente dificulta a ocorrência deste tipo de mecanismo de transporte.

Segundo Helene (1993) é recomendável a utilização de aditivos de ação hidrofugante de massa e de incorporadores de ar em estruturas que se

encontram parcialmente submersas, já que o risco de absorção é iminente. Para isto, é necessário cuidados em que as bolhas de ar incorporados tendem a diminuir a comunicação capilar e aditivos impermeabilizantes podem diminuir a resistência à compressão do concreto.

A ascensão capilar pode ser representada pela lei de Jurin, conforme apresenta a equação 5:

$$h = 2 * \frac{v}{r * \gamma} \quad (5)$$

Onde:

h = altura ou penetração da água no capilar, em m

v = tensão superficial da água, em kg/m

r = raio do capilar, em m

γ = massa específica da água, em kg/m³.

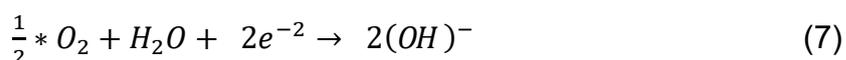
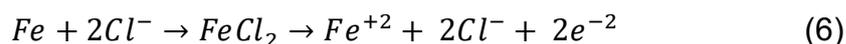
Este trabalho tem como enfoque de estudo a ação dos íons cloretos em estruturas de concreto, assim será evidenciado a seguir características desta substância, o processo e como atua este mecanismo de deterioração nas estruturas de concreto.

4 CLORETOS

Dos íons despassivantes, são os cloretos os principais responsáveis pela dissolução localizada da capa passiva, o que promove espaços pontuais que ficam sujeitos a ataques deste agente químico, este processo de corrosão das armaduras resulta em uma redução drástica da seção de trabalhabilidade do aço, em um curto intervalo de tempo (RINCÓN ET AL., 1998). Por consequência, há uma diminuição da aderência entre o concreto e o aço, além de promover um aumento do volume de aço. Este aumento, faz com que ocorra tensões internas que podem gerar um maior risco à um colapso estrutural (CÁNOVAS, 1988; MARTIN-PÉREZ et al., 2000).

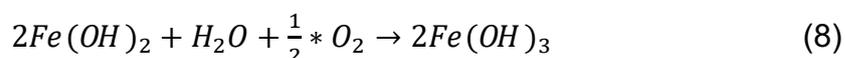
Formada logo após o início do processo de hidratação do cimento, a superfície passiva do aço; também chamada de capa protetora de passivação; consiste na presença de óxido de ferro firmemente aderida ao aço, sendo este composto destruído pela ação dos íons cloretos, propiciando a corrosão na presença de água e oxigênio (NEVILLE, 1997). Devido à característica expansiva deste processo, expõe-se a possibilidades de fissuração do concreto seguida de sua desagregação.

A alta capacidade de corrosão localizada proporcionada por estes íons, deve-se ao fato de que além de atuarem em condições de alta alcalinidade como ocorre nos poros do concreto, esses íons não são consumidos no processo de corrosão, o que garantem a disponibilidades para atuarem em novas reações mesmo em pequenas quantidades destes íons. Isto ocorre, devido ao fato destes íons cloretos atuarem apenas como catalizadores nas reações que ocasionam a corrosão localizada das armaduras devido a formação do hidróxido férrico, mais conhecido como ferrugem ($Fe(OH)_3$). Este processo eletroquímico é acompanhado de reações anódicas e catódicas de acordo com Mehta (1982) como é apresentado a seguir, por meio das equações 6 e 7 respectivamente.



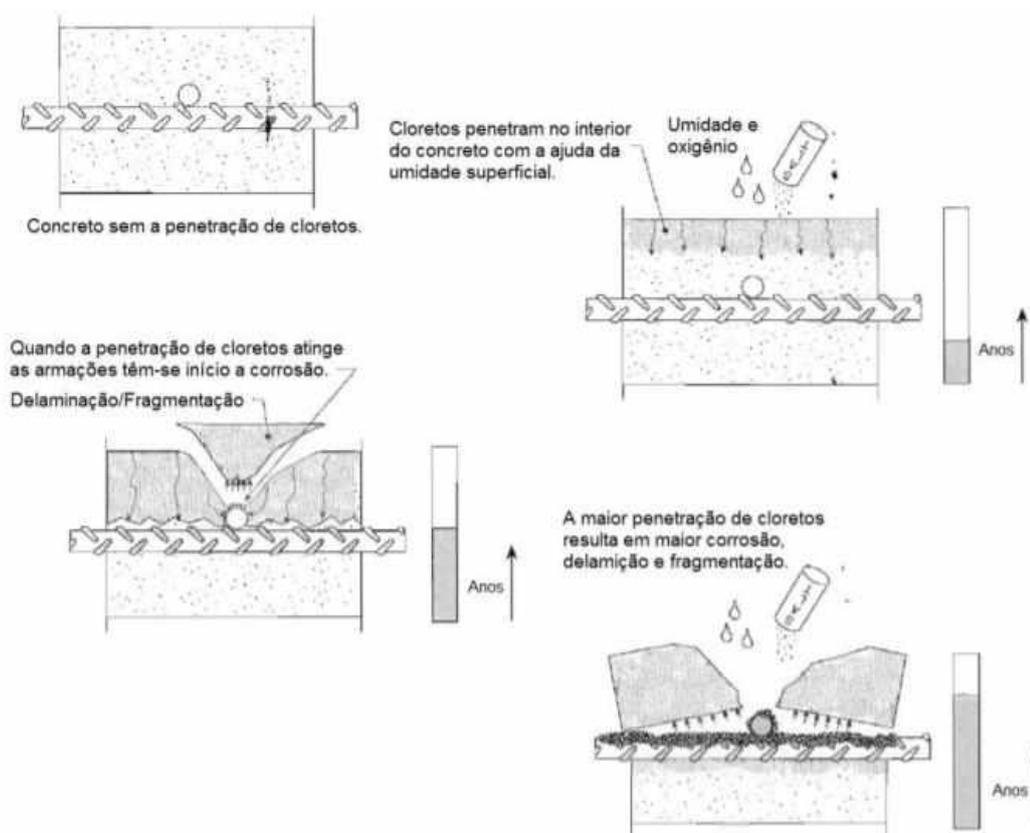
Segundo Gentil (2003), os íons de Ferro, conforme mostra a equação 8, formados na região anódica migram para a região catódica; enquanto que os íons hidroxilas, conforme observa-se na equação B, fazem o processo inverso.

O encontro destes íons na região intermediária possibilita a formação do hidróxido ferroso, este que sofre transformações formando outros compostos. Estes novos compostos, em contato com a água e a oxigenação presente nas estruturas de concreto forma o hidróxido de ferro expansivo como indica a equação 8.



Por ser um bom condutor elétrico, o cloreto torna a solução de poros menos resistiva, o que segundo Metha e Monteiro corrobora para acelerar a corrosão. É válido ressaltar que a penetração dos íons cloretos nas estruturas porosas do concreto é facilitada devido ao pequeno raio atômico deste componente, na ordem de grandeza de 3,6 Å. A Figura 12 a seguir apresenta este processo de atuação do cloreto em uma estrutura de concreto.

Figura 12 - Processo de penetração de íons cloretos no interior do concreto armado.



Fonte: Adaptado Emmons (1994).

De acordo com Neville (1997) e Helene (1993), os cloretos podem ser encontrados como contaminação de agregados principalmente provindos de regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas. Outra maneira de contaminação é originada a partir dos aditivos aceleradores de pega e endurecimentos que contêm cloreto de cálcio (CaCl_2).

Além destes meios, os cloretos podem ser resultantes do meio externo, podendo estar presente na água do mar, atmosfera marinha e industriais, névoa salina, lavagem de pisos ou fachadas com ácido clorídrico, produtos armazenados em taques industriais, e algumas das vezes até na liberação de gases quando ocorre a queima de produtos plásticos originados de PVC. Nos países de clima temperado, o uso de soluções de sais delegantes também permite o ataque de cloretos nas estruturas segundo Neville (1997).

De acordo com Hoffmann e Dal Molin (2002), o maior problema quanto ao ataque de cloretos ocorre quando estes são propiciados por fontes externas, já que quando os íons são adicionados na mistura de concreto, são distribuídos uniformemente na massa, o que dificulta a formação de regiões com alta concentração desde agente químico.

4.1 TEORES CRÍTICOS DE CLORETOS

O processo de corrosão originado pela ação dos íons cloretos, ocorre somente quando a quantidade destes íons, atinge uma concentração suficiente para despassivar a armadura. Esta concentração é conhecida como limite crítico de cloretos e possui diversas variáveis que influenciam diretamente neste valor limite de cloretos em relação à massa de aglomerante, dentre essas estão: as características dos materiais, o meio ambiente que envolve a estrutura e a interface aço-concreto.

As variáveis que relacionam a região de contato entre o aço e o concreto têm relação com um possível acúmulo pontual dos íons cloretos nesta interface ou a presença de falhas na formação da película de passivação. Os aspectos que envolvem o meio ambiente, ou seja, os fatores externos, estão relacionados ao tipo de cátion ligado ao cloreto e a forma como o mesmo penetra no concreto, a ocorrência de reações de corrosão e o controle catódico em decorrência da falta de oxigênio e às condições de umidade e suas variações nas regiões próximas a armadura. Quanto aos fatores que envolvem as características do

material, no caso o concreto, considera-se um conjunto de influências referentes ao potencial alcalino da matriz, à estabilidade do compósito nas proximidades do aço e à capacidade de fixação dos íons cloreto na microestrutura do concreto. (CASTRO; RINCON; FIGUEIREDO, 2001).

De acordo com ALONSO et al (2000), existem numerosos estudos com o objetivo de determinar o teor crítico de cloretos, e uma das razões para a discrepância de valores na literatura é em razão; além das variáveis citadas anteriormente, da inconclusão a respeito de que o teor deve ser baseado em fatores deterministas (observação visual, potencial ou corrente de corrosão) e/ou em expressões relativas (como a taxa de CL^- / OH^- sobre o peso do cimento ou do concreto).

Glass e Buenfeld (1977) defendem a tese de que a melhor maneira de representar o teor crítico de cloretos é por meio da relação entre cloretos totais e a massa de cimento. Isto ocorre, uma vez que a concentração de hidroxilas na solução dos poros do concreto é apenas um dos parâmetros que representa as propriedades inibidoras do cimento; além de que os cloretos combinados põem tornar-se livres e participar do processo de corrosão.

O conhecimento sobre o teor crítico de cloretos para despassar a armadura é fundamental para os modelos de previsão da vida útil das estruturas, apesar de que ainda não há um consenso geral sobre seus valores. Segundo HOFFMANN (2001) estes valores podem variar de 0,1% a 1% em relação à massa de cimento, havendo esta variação condicionada a cada país. Já BOWNE, afirma que o processo de corrosão pode se iniciar quando esta concentração atinge valores entre 0,4% e 0,6%.

De acordo com ANDRADE E HELENE (2002), o ACI C318 recomenda para estruturas de concreto armado um valor máximo de cloretos totais de 0,15% em relação à massa de cimento.

A NBR 12655:2006 determina os valores máximos da concentração de íons cloreto no concreto endurecido e ainda estabelece que a determinação destes teores deve obedecer ao procedimento da ASTM C1218. O quadro 4 apresenta estes valores.

Quadro 4 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.

Tipo de Estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl ⁻) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Concreto Protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço na estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço na estrutura)	0,40
Outros tipos de construção em concreto armado	0,30

(Fonte: NBR 12655:2006).

Esta mesma norma, apresenta exigências mínimas para concretos em situações de exposições especiais, sendo estas: exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de sais, água salgada, degelo, água do mar, entre outros. Assim, para um concreto com agregado normal em sua composição, o compósito deve possuir uma relação água/cimento de no máximo 0,4. Já para concreto que possui agregado normal ou leve, deve apresentar um valor mínimo de resistência característica no valor de 45 MPa.

A NBR 6118:2014 recomenda para a prevenção da penetração dos cloretos, a utilização de concretos que apresentem pequenas porosidades, um rigoroso controle da fissuração e de valores mínimos de cobrimento para as armaduras. É aconselhável também o uso de cimento composto por material pozolânico (CP IV) e aqueles que apresentam adição de escória (CP III).

As informações apresentadas nesta seção apresentam o fato de existir uma grande variabilidade quanto ao teor crítico dos íons cloretos, no qual a utilização de valores limites conservadores tem o objetivo de atender à maioria dos casos. Entretanto, o estudo de casos individuais, em que um conjunto específico de variáveis têm influência, pode levar à obtenção de limites mais próximos à realidade e, portanto, a análises de vida útil mais precisas.

4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO

A penetração dos íons de cloreto no concreto acontece no sentido da superfície da estrutura para o interior e a velocidade deste processo é influenciada diretamente pela quantidade de íons cloretos presentes no ambiente em contato com a superfície de concreto, pela permeabilidade do compósito e a umidade em que se faz presente no local.

No momento em que o cloreto entra em contato com a armadura é possível ocorrer um rompimento da camada passivante que protege o concreto e conseqüentemente promover a corrosão na presença de oxigênio e umidade. Formada a camada de ferrugem, há o início de forças de tensão no interior do compósito que podem ocasionar trincas e deslocamento do concreto, fato que facilita ainda mais a penetração dos cloretos no interior e acelera o mecanismo de corrosão.

Existem diversos fatores que corroboram para a penetração dos íons de cloreto no concreto, dentre eles: fatores ambientais, condições de exposição e fatores inerentes ao concreto.

4.2.1 Fatores Ambientais

A partir do momento que o compósito concreto é formado, o mesmo está sujeito às ações do meio, tais como as variações térmicas e de umidade. Após a conclusão da construção de uma estrutura em que o concreto já se encontra em seu estado endurecido, há um cenário de ciclos de temperaturas diárias e sazonais que segundo ANDRADE et al (2002) influenciam tanto na taxa de corrosão da armadura quanto na umidade relativa interna do concreto.

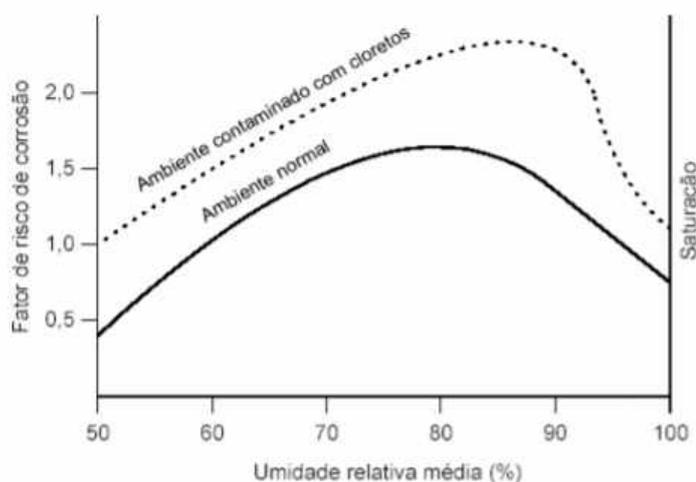
De acordo com o mesmo autor, em razão das alterações da condição hidrotérmica do concreto, há quatro principais fatores climáticos que propiciam a corrosão das armaduras: ciclos dia-noite; ciclos sazonais; períodos de chuvas e temperaturas extremas.

Em estruturas expostas a chuva, o que determina a taxa de corrosão é a umidade; enquanto que em estruturas protegidas deste fenômeno é a temperatura que controla a umidade e o grau de corrosão.

A umidade relativa, característica relacionada a quantidade de água presente no interior dos poros, influencia diretamente nos mecanismos de

deterioração da estrutura. Segundo NEVILLE (1997), a difusão de gases de oxigênio e/ou gás carbônico no concreto não ocorre quando estes se encontram saturados. Quando estes não estão saturados, os poros existentes no compósito ficam secos o que dificulta a penetração de cloretos pelo processo de migração e difusão, aumentando a resistividade do concreto e minimizando o risco à corrosão (ANDRADE, 1992). A figura 12 a seguir mostra esta relação.

Figura 13 - Classes de agressividade ambiental.



Fonte: ANDRADE (2001).

Já se tratando do fator temperatura, para NEVILLE (1997) as construções localizadas em regiões de clima mais quentes sofrem uma deterioração maior quando comparadas à aquelas localizadas em climas mais frios, em razão de que a elevação de temperaturas proporciona um aumento cinético das reações. Segundo MASLEHUDDIN (1994) o aumento da temperatura proporciona uma aceleração da solubilidade dos sais e conseqüente avanço da taxa de corrosão; as variações térmicas ainda alteram os ciclos de umidade do concreto que influencia na questão da retração e expansão do material, este processo de variação volumétrica ocasiona o surgimento de fissuras que irão possibilitar uma maior facilidade na penetração dos íons cloreto.

4.2.2 Condições de exposição

As deteriorações das estruturas de concreto são conseqüência das condições do meio ambiente de agressividade, sendo relacionada aos mecanismos físicos e químicos da mesma, que comprometem o desempenho

da construção pela atuação dos agentes agressores. HELENE (1997), elaborou uma tabela em que classifica a agressividade ambiental de acordo com a durabilidade das construções de concreto armado, conforme mostra a quadro 5.

Quadro 5- Classes de agressividade ambiental.

CLASSE DE AGRESSIVIDADE	AGRESSIVIDADE	RISCO DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURAS
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Fonte: HELENE (1997).

O concreto, quando exposto a presença de íons cloretos, tem sua superfície exposta a degradação que gera uma diminuição na vida útil da estrutura. O transporte desta substância para o interior do concreto ocorre principalmente pelos processos de migração e difusão e a concentração superficial destes íons influencia diretamente na velocidade da deterioração.

No regime estacionário, a difusão dos íons no processo de penetração no elemento estrutural é proporcional ao gradiente de concentração entre a superfície e o interior do concreto, conforme a Primeira Lei de Fick determina.

Além da concentração, o tipo de cátion presente na solução salina também influencia na velocidade de penetração do cloreto no concreto, a mudança do cátion de sódio para o de cálcio promove um significativo aumento da taxa de difusão da substância na estrutura (ZHANG E GJORV, 1995).

Outra grande condição de exposição que altera os mecanismos de inserção do cloreto no compósito é quando a estrutura de concreto armado é exposta em um ambiente marinho. Este tipo de ambiente, reconhecido por ser altamente agressivo, é dividido em cinco zonas de acordo com a localização da construção perante à margem e ao nível do mar: de atmosfera, respingos, de variação de marés, submersa e enterrada. No entanto, a névoa marinha faz com que a ação agressiva dos sais ocorra pelo interior do continente.

Segundo AITCIN (2003), estruturas de concreto neste tipo de ambiente, estão sujeitas a quatro tipo de fatores agressivos: fatores químicos, responsáveis pela presença de íons de cloreto em águas marinhas ou mesmo na atmosfera; fatores físicos, como o gelo e degelo; fatores mecânicos, como a movimentação das ondas; e fatores geométricos relacionados à flutuação do nível da água. A

figura 14 mostra a deterioração de uma estrutura de concreto armado exposta a este meio.

Figura 14- Pilar sobre o mar, após 10 anos de construção, deterioração por ataque da água.



Fonte: AGUIAR (2006).

4.2.3 Fatores inerentes ao concreto

A durabilidade de uma estrutura de concreto é condicionada a principalmente quatro fatores conforme a literatura técnica e identificada de acordo com HELENE (1997) como a regra dos 4C: composição ou traço do concreto, cobrimento das armaduras, compactação ou adensamento efetivo do concreto e cura efetiva do concreto na estrutura. Deste modo, a composição química dos cimentos e as adições minerais, assim como a relação água/aglomerante são fatores essenciais para se analisar a durabilidade de uma estrutura perante a penetração dos íons cloretos.

Quanto a composição química do concreto, a capacidade de fixação e combinação dos íons no processo de penetração no interior da estrutura é determinado pelo tipo de aglomerante envolvido, sendo esta característica, de acordo com MEHTA (1992), mais preponderante para avaliação da inserção dos íons no concreto em comparação com a relação água/aglomerante para estruturas de concretos convencionais onde estas relações são mais elevadas.

RASHEEDUZZAFAR (1991) afirma que o teor crítico de cloretos para cada tipo de cimento é depende do seu conteúdo de álcalis e do conteúdo total

de aluminatos, C3A e de C3AF. Sendo que a fixação dos cloretos é diretamente proporcional a quantidade de C3A presente no cimento.

Tratando-se das adições de sais no concreto, TALBOT (1995), alega que estes sais alteram a morfologia e a composição do C-S-H formado, o que propicia uma menor relação C/S e, portanto, torne-se mais suscetível a adsorção e redução da difusão. Porém, elevadas concentrações de sais minerais acarretam em uma redução do pH da solução dos poros, ambiente que favorece a decomposição dos sais de Friedel presentes no interior do concreto, e que simultaneamente com a ingressão permanente de cloretos; eleva a concentração destes íons nos poros da estrutura.

Quanto a relação água e aglomerante, esta determina a microestrutura e a porosidade do concreto, sendo que esta última característica é o principal fator controlador de ingresso dos cloretos (PEREIRA, 2001). É fato que sendo maior a relação água e aglomerante, maior será a porosidade do compósito e maior a taxa de difusão dos íons cloretos na estrutura; ocorrendo assim uma relação diretamente proporcional. Entretanto, observou-se que com a utilização de cimento Portland, ou de cimento puro com adição de cinza volante, a capacidade de fixação de cloretos aumentou a medida que ocorreu uma elevação na relação de água e cimento.

4.3 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL

A NBR 6118: 2014 conceitua vida útil como sendo o período de tempo durante o qual as estruturas de concreto mantêm suas características sem a necessidade de intervenções significativas, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção determinados na fase de projeto, sendo válido a execução de reparos decorrentes de danos acidentais.

É recorrente a utilização dos conceitos de vida útil e durabilidade de maneira equivocada, que apesar de serem parâmetros semelhantes, não possuem um mesmo significado. Considera-se a vida útil a quantificação da durabilidade que se supõe ser apenas uma qualidade da estrutura.

A questão da vida útil de estruturas de concreto deve ser tratada de forma abrangente e sistêmica e considerada como resultado de todas as ações e etapas do processo construtivo: desde a concepção ou planejamento do empreendimento, projeto, fabricação de materiais que serão utilizados, a

execução em si e principalmente durante o período de uso da estrutura (HELENE, 2001).

A estimativa deste parâmetro das estruturas de concreto armado, é de extrema importância para que seja possível mensurar quantitativamente a durabilidades destas estruturas. Helene (1997), afirma que o conhecimento a respeito dos mecanismos de transporte de fluídos nos poros do concreto, concomitantemente com informações acerca dos agentes de deterioração das estruturas; foram fundamentais para o progresso dos estudos sobre durabilidade e associar esta característica por meio de modelos matemáticos ao fator tempo.

Assim, com o avanço científico na área de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, surgiu a criação de modelos que estimam estes parâmetros e que são fundamentais para um maior conhecimento por parte dos projetistas e construtores sobre os mecanismos de deterioração, como o ataque de íons cloretos. Dentre os diversos modelos existentes, é possível destacar o modelo de Tuutti (1980), o modelo tradicional referente a segunda Lei de Fick e o modelo proposto por Guimarães e Helene (1993).

4.3.1 Modelo de Tuutti

Os modelos de vida útil sobre o fenômeno da corrosão, se baseiam geralmente no modelo proposto por Tuutti (1982), em que originalmente apresenta duas fases: a fase de iniciação e a fase de propagação da corrosão. Este modelo, é representado na figura 15 a seguir:

Figura 15 - Proposta original do modelo de Tuutti para corrosão de armaduras.



Fonte: Tuutti (1982).

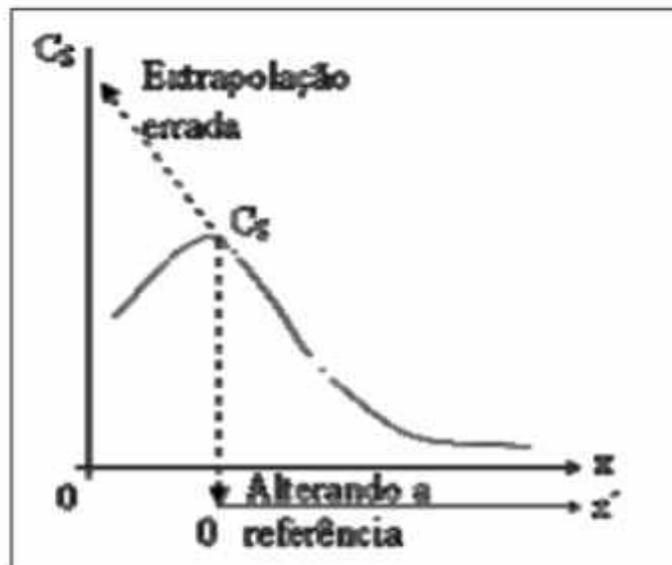
A primeira fase é caracterizada pela ocorrência da penetração dos agentes agressivos no concreto, até o momento que aconteça a despassivação da armadura, processo que envolve alterações na superfície do metal. A segunda fase, inicia-se na despassivação e é determinada pelo desenvolvimento das reações de corrosão.

Como a despassivação da armadura transcorra por um intervalo de tempo, Tuutti ajustou o modelo de vida útil acrescentando a fase de despassivação no processo entre a iniciação e a fase de propagação, passando assim a possuir três fases o modelo.

4.3.2 Segunda Lei de Fick

O Modelo tradicional correspondente a Segunda Lei de Fick, elaborado por ANDRADE, em que considera que para um concreto sob ataques de cloretos por um considerável intervalo de tempo, a concentração no pico deve ser constante e conforme mostra a Figura 16, no gráfico de profundidade de penetração dos cloretos (eixo X) por concentração teórica de cloretos na superfície (Y), o ponto 0 do eixo X é transferido para a profundidade onde ocorre o pico de teor dos cloretos.

Figura 16 - Correta e errônea extrapolação dos teores do perfil de cloretos.



Fonte: GUIMARÃES e HELENE (2009).

Portanto, de acordo com os fatos apresentados, a solução referente à segunda Lei de Fick pode ser descrita como apresenta a equação 9, em que se considera x igual a zero.

$$\frac{C_{c_{cl}} - C_o}{C_{seq} - C_o} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{Dt}} \quad (9)$$

Onde:

$C_{c_{cl}}$ = teor de cloretos na posição x' ;

C_o = teor inicial de cloretos na posição x' ;

C_{seq} = teor de cloretos no pico ($x' = \text{zero}$);

x' = distância entre o pico e a posição do teor $C_{c_{cl}}$, ou seja, considerando $x' = 0$ no pico;

D = coeficiente de difusão de cloretos no concreto;

t = tempo, considerando $t = 0$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos;

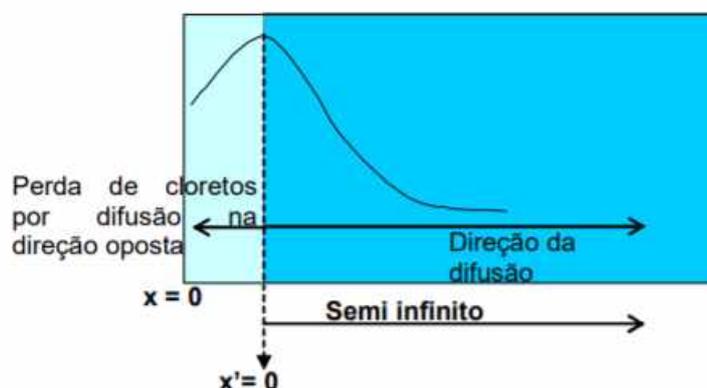
$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$;

$\operatorname{erf}(z)$ = função complementar de erro de Gauss.

4.3.3 Modelo proposto por Guimarães e Helene

O modelo de GUIMARÃES e HELENE, assim como o da Segunda lei de Fick, considera a transferência do ponto 0 do eixo X para a profundidade que ocorre o pico de teor de cloretos e também o mesmo comportamento do gráfico após este ponto. Este modelo estabelece que a forma do pico sugere um efeito equivalente à difusão no sentido das maiores profundidades, a partir desse pico, com perda de uma parcela do material que sofre difusão na direção oposta; processo demonstrado na figura 17.

Figura 17 - Difusão de cloretos com perda de fração de cloretos que sofre difusão na direção oposta.



Fonte: GUIMARÃES E HELENE (2009).

Este Modelo, apresenta a seguinte equação (10) para este processo:

$$-D * \partial C \div \partial x = \alpha * (C_{seq} - C_p) \quad (10)$$

Onde:

C_{seq} = teor equivalente de cloretos na superfície externa do concreto;

C_p = teor de cloretos no pico;

α = constante de proporcionalidade.

Sendo a solução para esta equação apresentada acima, baseada em CRANK, a equação 11; onde a nova incógnita h representa a relação entre a constante de proporcionalidade e o coeficiente de difusão do concreto.)

$$\frac{C_{c_i} - C_o}{C_{seq} - C_o} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{D.t}} - \exp(hx' + h^2 D.t) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x'}{2\sqrt{D.t}} + h\sqrt{D.t} \right) \quad (11)$$

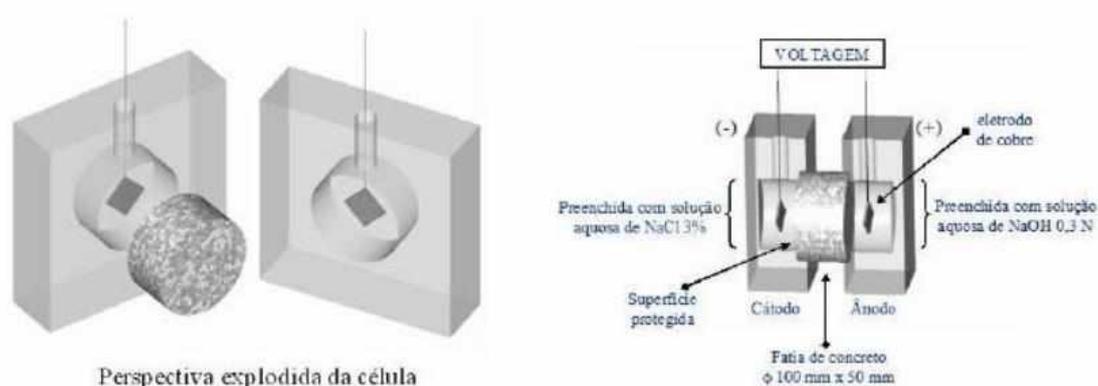
É válido ressaltar que este modelo, estima valores diferentes de coeficiente de difusão (D) quando comparado ao modelo da Segunda Lei de Fick, já que considera a perda de cloretos no sentido contrário a difusão.

4.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO NO CONCRETO

Existem vários métodos que podem auxiliar na determinação da resistência à penetração de cloretos do concreto, que são divididos em dois principais grupos: métodos naturais e métodos acelerados. No entanto, segundo ISAIA (1996), devido a demora da difusão natural, a maioria dos ensaios utiliza campo elétrico entre as faces de um corpo-de-prova com o intuito de acelerar os processos. Entre estes procedimentos para a definição da penetração de cloretos no concreto por migração, ANDRADE (1993) propôs o Teste Rápido de Penetração de Cloretos – TRPC (ASTM C1202-97) e o Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata – EPCANP (AASHTO T259-80). Além de existir o método de migração proposto por Whiting (1981).

Estes métodos, consistem em aplicar uma diferença de potencial elétrico (60V) entre as duas faces de um corpo de prova cilíndrico, em que uma face está em contato com uma solução de hidróxido de sódio (polo positivo) e a outra face em contato com uma solução de cloreto de sódio (polo negativo). Situação ilustrada na figura 18.

Figura 18 - Esquema de célula de migração.



Fonte: MEDEIROS (2008).

No ensaio, esta diferença de potencial promove que os íons de cloreto migrem, por meio dos corpos de provas de concreto, da solução de NaCl para a de NaOH, sendo medida durante um intervalo de tempo previamente fixado; este de 6 horas realizando medições a cada meia hora; a corrente passante e admitindo que a carga total passante no ensaio indica a resistência à penetração de cloretos do concreto analisado, quanto maior a carga menor será a resistência e vice-versa.

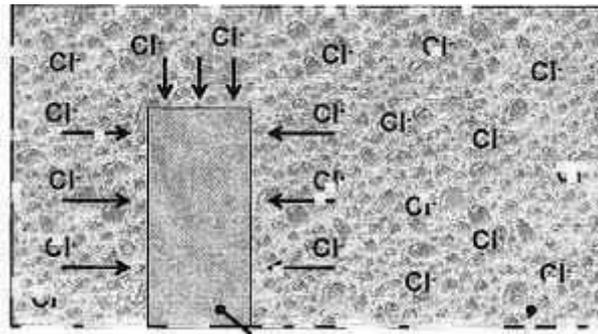
Segundo autores, como ANDRADE (1993), CALÇADA (2002) e ISAIA (1996), o método TRPC representa uma medida de condutividade elétrica do compósito e não de resistência a penetração, apesar de ser amplamente utilizado para este objetivo.

Os métodos considerados mais eficazes para a determinação da difusão de cloretos no concreto, são aqueles que se baseiam na imersão de amostras de concreto em solução salina, que com um intervalo de tempo de contaminação, torna-se possível conhecer o perfil de penetração dos íons cloretos, relacionando a concentração de CL^- pela sua profundidade de ataque. Este coeficiente pode ser encontrado utilizando a segunda Lei de Fick.

Uma técnica que segue esta metodologia é a que envolve uma concentração de íons cloretos, próximo da água do mar em sua solução contaminante de NaCl 0,5M e que necessita de 90 dias para que seja validado o experimento.

Outro método, presente pela NT BUILD 443 (1995) – Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration em que ocorre a imersão em uma solução salina com concentração de cloretos cinco vezes superior à concentração presente na água do mar, o que possibilita a redução do tempo de contaminação dos corpos de prova para 35 dias e conseqüentemente a determinação de maneira mais rápida do coeficiente de difusão em condições naturais. Este processo pode ser ilustrado, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Esquema do processo de difusão de cloretos nos métodos de imersão



Fonte: Medeiros (2008).

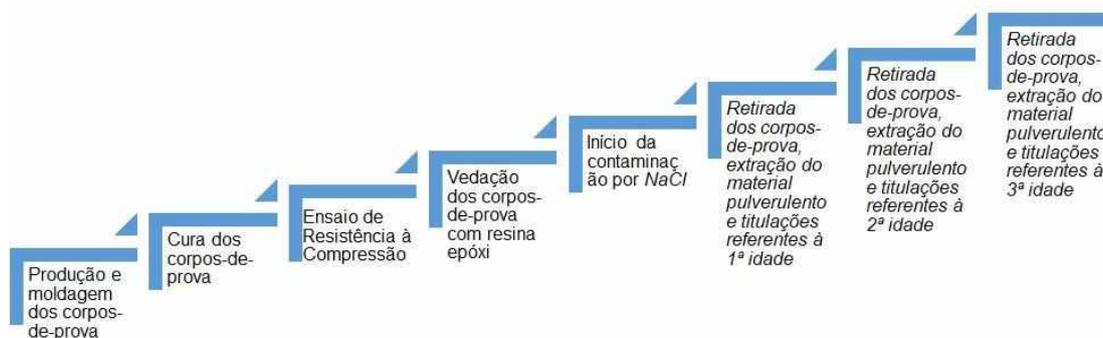
O método desenvolvido neste trabalho para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloretos em concretos com fibras na condição satura é o apresentado por Guimarães e Helene (2007), também conhecido como Acelerado Modificado – 250 g/cm³. A partir deste método, realizado por imersão e pelo processo de difusão, é possível também, analisar e determinar o comportamento do coeficiente de difusão (D) e da concentração superficial de cloretos (Cs) ao longo do tempo, testando diferentes traços de concreto, diferentes concentrações de fibras e diferentes períodos de contaminação.

5 PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O método desenvolvido neste trabalho para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloretos em concretos com fibras na condição saturada é o apresentado por Guimarães e Helene (2007), também conhecido como Acelerado Modificado – 250 g/cm³. A partir deste método, realizado por imersão e pelo processo de difusão, é possível também, analisar e determinar o comportamento do coeficiente de difusão (D) e da concentração superficial de cloretos (Cs) ao longo do tempo, testando diferentes traços de concreto, diferentes concentrações de fibras e diferentes períodos de contaminação.

O fluxograma apresentado na Figura 38 a seguir representa resumidamente as etapas do procedimento experimental

Figura 20 - Fluxograma de atividades do procedimento experimental



Fonte: Autor (2020).

O planejamento do trabalho referente a inserção de íons cloreto em concreto com fibra em solução saturada, iniciou-se no intuito de analisar a influência dos diferentes teores de fibras de aço em diferentes traços de concreto e em diferentes tempos de contaminação das amostras na penetração do cloreto de sódio na estrutura de concreto. Foi estabelecido que para cada condição destas citadas (teor, traço e tempo), haveria dois corpos de provas e para cada

corpo de prova haveria a avaliação de três pontos do corpo no intuito de mitigar erros e discrepâncias no procedimento experimental. Como o intuito do trabalho era avaliar o fluxo unidirecional dos íons cloretos na estrutura de concreto, foi determinado que em ambas as faces circulares do corpo de prova fosse revestido com a resina epóxi afim de garantir a estanqueidade nestas regiões e proporcionar o fluxo de íons cloretos desejados, de maneira a avaliar a penetração do mesmo.

O procedimento experimental realizado no laboratório da Faculdade de Engenharia Civil de Uberlândia, iniciou-se na determinação dos traços para os concretos de 20, 25 e 40 MPa, sendo estes baseados conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Traços utilizados na dosagem dos concretos.

Material	Unidade	Traço 1 – 20 MPa	Traço 2 – 25 MPa	Traço 3 – 40 MPa
Cimento	Kg/m ³	265	306	408
Areia	Kg/m ³	914	887	824
Brita 1	Kg/m ³	888	903	930
Água	Kg/m ³	199	199	208
Aditivo	% sobre a massa de cimento	0,5	0,5	0,5
Relação a/c	-	0,75	0,65	0,51

Fonte: Bastos (2008).

Para cada um destes traços apresentados, foram estabelecidas duas concentrações diferentes de fibras de aço, sendo estas 0,38% e 0,77% do volume total do traço de concreto em questão. A fim de analisar a influência da contaminação dos íons cloretos no concreto de acordo com o fator tempo, definiu-se três idades de contaminação distintas do material. Com base nestas informações, realizou-se o cálculo dos materiais utilizados para a produção da quantidade de corpos de provas necessários ao experimento.

5.1 MATERIAIS EMPREGADOS NA CONFECÇÃO DOS CONCRETOS.

Para a realização do presente trabalho foram preparados três traços de concreto com duas concentrações de fibra diferentes, nomeados de: T1 0,38%;

T1 0,77%; T2 0,38%; T2 0,77%; T3 0,38%; T3 0,77%. Os materiais utilizados na obtenção de cada traço serão abordados a seguir.

5.1.1 Aglomerante

O cimento empregado nos traços de concreto foi confeccionado de um fabricante nacional e classificado, de acordo com a NBR 5733:1991, como cimento Portland de alta resistência inicial, possuído como resistência mínima à compressão de 32 MPa aos 28 dias e caracterizado por ser resistente a sulfatos (CP V ARI RS).

Figura 21 - Ilustração figurativa de um saco comercial de cimento



Fonte: Cauê Cimentos (2020).

5.1.2 Agregado graúdo

A Brita 1, ilustrada na Figura 21 e disponível no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia, foi o agregado graúdo utilizado no compósito para todos os traços. A granulometria deste material é especificada na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2- Granulometria da brita 1.

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem retida de massa (%)
25	0
19	4
12,5	56
9,5	81
6,3	93
4,75	98

Fonte: Autor (2020).

Figura 22- Agregado graúdo, do tipo brita 1, utilizado para confecção do concreto



Fonte: Autor (2020).

5.1.3 Agregado miúdo

A areia média, ilustrada na Figura 22 e disponível no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia, foi o agregado miúdo utilizado no compósito para todos os traços. A granulometria deste material é especificada na Tabela 3 a seguir:

Figura 23 - Agregado miúdo, do tipo areia média, utilizado para confecção do concreto



Fonte: Autor (2020).

Tabela 3 - Granulometria da areia

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada de massa (%)
9,5	0
6,3	0
4,75	0
2,36	0
1,18	1
0,6	14
0,3	53
0,15	88
0,1	100
Módulo de finura	2,56
Dimensão máxima característica (mm)	1,18

Fonte: Autor (2020).

5.1.4 Água

A água utilizada na mistura do concreto foi a proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Uberlândia (MG), cujo responsável é o Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

5.1.5 Aditivo

O aditivo é o componente utilizado no traço que tem como objetivo aumentar a trabalhabilidade e fluidez do concreto. O empregado neste experimento foi um aditivo plastificante, mostrado na Figura 23, fabricado à base de policarboxilato e caracterizado por ser um agente que proporciona alta redução de água. De acordo com as especificações do fabricante, demonstradas no Anexo A, a dosagem do mesmo é estabelecida conforme a uma porcentagem do volume total do compósito, no caso 0,5%.

Figura 24 - Aditivo utilizado no experimento



Fonte: Autor (2020).

5.1.6 Fibras

O tipo de fibra utilizada neste experimento foi as fibras de aços, classificada como fibra do tipo A, classe 2 conforme a ABNT NBR 15530:2019. As dosagens de fibras abordadas neste trabalho foram previamente determinadas como sendo 0.38% e 0.77%, porcentagens referentes ao volume de concreto de cada traço. A figura 24 a seguir apresenta a mesma.

Figura 25 - Fibras de aço utilizadas no experimento



Fonte: Autor (2020).

5.2 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO.

Conforme citado anteriormente, para a presente pesquisa, realizou-se três traços distintos de concretos com duas porcentagens de fibras distintas no mesmo. O quantitativo de material utilizado na confecção dos corpos de provas foi calculado baseando-se na necessidade do número de corpos de provas utilizados na pesquisa, assim como apresenta detalhadamente a no quadro 6.

Quadro 6 - Quantitativo de material utilizado.

TRAÇO 20MPa	Para 1L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	0,265	0,914	0,888	0,199	0,5% do cimento
	Para 20L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	5,3	18,28	17,76	3,98	0,0305
TRAÇO 25MPa	Para 1L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	0,306	0,887	0,903	0,199	0,5% do cimento
	Para 20L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	6,12	17,74	18,06	3,98	0,036
TRAÇO 40MPa	Para 1L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	0,408	0,824	0,930	0,208	0,5% do cimento
	Para 20L de concreto				
	cimento (kg)	areia (kg)	pedra (kg)	água (kg)	aditivo (kg)
	8,16	16,48	18,6	4,16	0,0513

Fonte: Autor (2020).

Mediante a estes traços e com os quantitativos em mãos, foi realizado a produção de concreto para cada uma das resistências no laboratório da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como mostram as figuras 25a e 25b. É válido ressaltar que este processo de fabricação de corpos de provas foi realizado para duas porcentagens de fibras de aço diferentes, uma com 0,38% e outra com 0,77% de fibras em relação ao volume de concreto.

Figura 26a e 26b - Fabricação dos traços de concreto



Fonte: Autor (2020).

O processo de dosagem e cura foi realizado de acordo com a norma “NBR 5738:2015 – Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos”. Foi utilizado um misturador mecânico do tipo betoneira de eixo vertical e a mistura obedeceu a seguinte ordem: com o misturador em movimento, adicionava-se metade da água, em seguida a totalidade da brita e do cimento, e, após isso, a areia e o aditivo com a metade restante da água juntamente com as fibras de aço na proporção previamente definida para cada traço.

Após a realização deste processo para todos os traços desejados, foram moldados os corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. A quantidade de corpos de provas foi definida conforme mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Levantamento do número de corpos de prova.

Traços			Idades	Quantidades	Total CP's por traço
Traço 0,38%	20	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	
Traço 0,77%	20	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	
Traço 0,38%	25	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	
Traço 0,77%	25	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	
Traço 0,38%	40	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	
Traço 0,77%	40	MPa	223 dias	2	6
			251 dias	2	
			279 dias	2	

Fonte: Autor (2020).

É importante destacar, que se ensaiou três corpos de provas de cada traço, sem a presença de fibra, a fim de verificar a resistência a compressão dos mesmo e conseqüentemente a realização correta de execução e moldagem de cada corpo de prova de cada traço. Fez-se a identificação dos corpos por meio da colagem de etiquetas nos mesmos, em que estas mostravam o tipo do traço, a porcentagem de fibras, o número do corpo de prova e a idade com que o mesmo seria ensaiado. No dia seguinte a fabricação dos corpos de prova, foi realizado o processo de desmoldagem dos mesmos e posteriormente a imersão destes em um tanque com água situado em uma câmara úmida durante 28 dias a fim de que seja realizado o processo de cura, ou seja, todas as reações de hidratação do concreto necessárias; este processo é verificado na Figura 26.

Figura 27 - Imersão dos corpos de prova para o processo de cura



Fonte: Autor (2020).

Após 28 dias, retirou-se os corpos de prova do tanque e realizou-se o ensaio de resistência à compressão conforme a norma “NBR 5739:2015 – Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos” de 3 corpos de prova de cada traço estudado. A figura 27 demonstra a forma como o ensaio foi realizado e a tabela 5 os dados obtidos após os ensaios de resistência.

Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2020).

Tabela 5 - Resistência à compressão aos 28 dias

Traço	Corpo-de-prova 1 (MPa)	Corpo-de-prova 2 (MPa)	Corpo-de-prova 3 (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
1	20,85	19,50	21,32	20,56	0,67	3,26
2	21,75	23,92	26,80	24,16	1,79	7,41
3	41,58	43,61	35,27	40,15	3,08	7,67

Fonte: Autor (2020).

Depreende-se da Tabela 5 que, os valores obtidos para a resistência média dos corpos-de-prova se encontram numa faixa aceitável, de acordo com a classe de resistência prevista, com os respectivos coeficientes de variação entre 3 e 8%, aproximadamente.

5.2.1 Contaminação dos corpos de prova

Realizado a verificação da resistência a compressão dos traços de concreto estudados, e após o processo de cura, iniciou-se a preparação dos corpos de prova para a elaboração da contaminação. Primeiramente, fez-se a retificação, ação que consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material das bases a serem preparadas. Esta operação, deve ser feita de tal forma que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos.

Após a retificação, no intuito de analisar a contaminação dos corpos de prova em somente um sentido, no caso estudado optou-se por investigar a ocorrência deste processo pela área lateral da forma cilíndrica. Fez-se então, a vedação das extremidades circulares (base e topo) dos corpos de prova com a utilização de uma resina epóxi como demonstra a figura 28 e com a ficha técnica apresentada no Anexo B.

Figura 29 - Vedação dos corpos-de-prova com resina epóxi.



Fonte: Autor (2020).

Concluído a vedação e a secagem da resina epóxi utilizada neste procedimento, preparou-se o tanque em que seria realizado a contaminação dos objetos de estudo pelo sal de cozinha em uma solução aquosa. A concentração utilizada neste estudo seguiu o Método Acelerado Modificado, este que determina a proporção de 250 gramas de sal para cada decímetro cúbico de água. Para a imersão completa de todos os corpos de provas no tanque, foi colocado 80 litros de água e, portanto, 20 quilos de sal de cozinha. É importante ressaltar que durante o período de contaminação, fez-se uma verificação constante do nível do volume de água no tanque para que nenhum corpo de prova não ficasse totalmente imerso na solução, procedimentos adotados para que isto não ocorra foram a utilização de uma lona e a localização do tanque em uma câmara úmida que dificulta a evaporação da água; caso o nível da solução abaixasse era adicionado água e sal na mesma proporção do método de contaminação trabalhado. A figura 29 demonstra como permaneceu imersos os corpos estudados durante os períodos de contaminação.

Figura 30 - Contaminação por NaCl do concreto



Fonte: Autor (2020).

Inicialmente, as idades pretendidas de contaminação seriam menores, no entanto, com o advento da pandemia do vírus COVID-19, a pesquisa teve que ser adaptada para a realidade em questão. Assim, as idades de contaminação foram definidas em 223, 251 e 279 dias.

À medida que se atingia as idades pretendidas de contaminação (223, 251 e 279 dias), retirava-se uma quantidade de corpos de prova, de cada traço analisado, para a obtenção das amostras. Posteriormente, realizava-se a titulação potenciométrica para a determinação do teor de cloreto presente nestas amostras e, por conseguinte, a determinação dos coeficientes de difusão e concentração inicial do mesmo. Essas etapas serão minuciosamente explicadas nos tópicos posteriores.

5.2.2 Extração das amostras

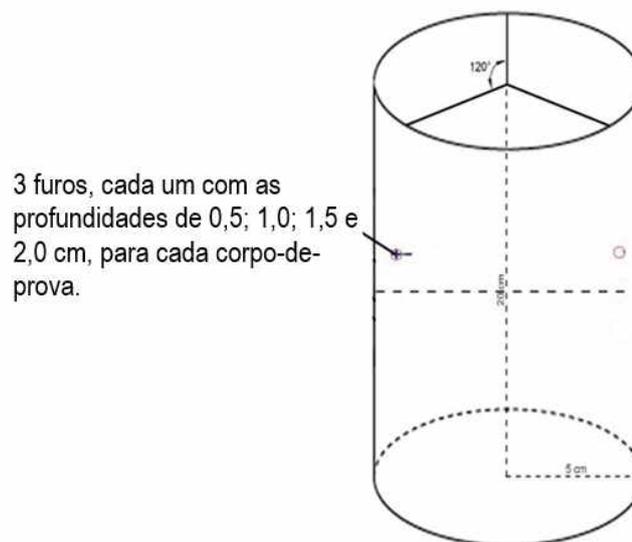
Depois de cumprido o tempo de contaminação dos corpos de prova, os mesmos eram retirados do tanque em que estavam imersos na solução e realizou-se a limpeza e secagem da superfície destes no intuito retirar as excessivas concentrações de cloreto que poderiam estar na região e evitar assim que isto influenciasse posteriormente nas análises do experimento.

No intuito de analisar a penetração dos íons cloreto e consequentemente os teores deste em cada corpo de prova, executou-se a perfuração em 3 regiões distintas deste, sendo que cada perfuração foi executada em 4 camadas, sendo

estas determinadas pela profundidade do furo. Todas as camadas possuem profundidade de 5 milímetros, sendo a primeira partindo da superfície e assim conseqüentemente até a última camada que consiste na amostra da profundidade de 15 milímetros até 20 milímetros.

Como mostra na figura 30, as 3 regiões de perfurações distintas no corpo de prova citadas anteriormente, foram delimitadas e alinhadas em relação ao meio do corpo de prova e espaçadas diametricamente uniformes para conseguir o máximo de informações e equivalências nos dados obtidos do corpo de prova.

Figura 31 - Desenho esquemático dos furos.



Fonte: Autor (2020).

Para o processo de extrações das amostras sob a forma pulverulenta, como mostra na Figura 31a e 31b, utilizou-se uma furadeira sem impacto e broca multimaterial, no caso abordado uma broca de ferro de 8 milímetros, para a realização dos furos a cada cinco milímetros de profundidade.

Figura 32a e 32b – Extração e obtenção do material pulverulento.



Fonte: Autor (2020).

As amostras do material pulverulento provenientes de cada perfuração, foram armazenadas em envoltórios plásticos, como mostra a figura a seguir. Estes devidamente identificados e nomeados de acordo com a camada de profundidade, tipo de traço e idade de contaminação. Processo este realizado para todas as idades estudadas.

Figura 33 - Amostras extraídas



Fonte: Autor (2020).

5.3 ANÁLISE DO TEOR DE CLORETOS NO CONCRETO

5.3.1 Titulação potenciométrica

A titulação potenciométrica, também conhecida como ensaio titulométrico, consiste em um método utilizado para a determinação quantitativa do teor de íons cloreto presentes em cada uma das amostras de concreto, todo o processo seguindo as orientações da ABNT NBR 13797.

Para cada amostra, realizou-se o mesmo procedimento: em posse do material pulverulento seco dentro da embalagem identificada; com o auxílio de uma balança digital, pesou-se 1 grama do material e a este foi adicionado 200 milímetros de água corrente com o intuito de envolver o cloreto absorvido pela amostra durante o processo de contaminação. Após a mistura homogênea da água e do material pulverulento, realizou-se a filtração desta solução por meio de um papel filtro, permitindo assim com que a mistura se encontrasse transparente. A técnica de filtragem da solução é mostrada na figura 33.

Figura 34 - Filtragem das amostras



Fonte: Autor (2020).

De posse da solução filtrada, dividiu-se a mesma em três recipientes contendo cada um, um volume de 50 milímetros. Com as três amostras prontas, ilustradas na Figura 34, executou-se a titulação dos mesmos.

Figura 35 – Amostras filtradas



Fonte: Autor (2020).

Primeiramente, para a realização deste método, necessitou-se do cromato de potássio (K_2CrO_4) e do nitrato de prata ($AgNO_3$). Para a primeira substância, utilizou-se uma concentração de 5% deste em uma solução de água destilada; com uma coloração amarela forte, o cromato de potássio atua como um indicador químico dos íons Cl^- presentes solução filtrada. Disposto dessa solução, aplicou-se cinco gotas desta na solução filtrada e misturou até que esta nova solução ficasse homogênea, situação ilustrada na Figura 35.

Figura 36 – Soluções com cromato de potássio



Fonte: Autor (2020).

O nitrato de prata, disposto também em uma solução de água destilada, na concentração de 0,0141 mol, é colocado em uma bureta graduada de 10 milímetros e por meio desta, misturado gradativamente à solução filtrada já homogeneizada com o cromato de potássio. Processo que ocorre até que atinja o ponto de viragem, isto é, o volume necessário de nitrato de prata quando há a mudança de coloração da mistura para um tom marrom-avermelhado,

ocasionada pela precipitação do cromato de potássio. É possível observar pela Figura 36 a diferença da coloração que fica a mistura após a adição do nitrato de prata e na Figura 37 já a precipitação do cromato de potássio depois de interromper o processo de agitação da mistura.

Figura 37 - Adição do AgNO_3 à solução com K_2CrO_4



Fonte: Autor (2020).

Figura 38 - Reação do AgNO_3 em contato com a solução com K_2CrO_4



Fonte: Autor (2020).

Após atingir o ponto de viragem de uma amostra, é registrado o volume de nitrato de prata que foi consumido pela mistura e realizado o procedimento para todas as outras amostras.

O fluxograma apresentado na Figura 38 a seguir representa resumidamente as etapas do procedimento experimental

5.3.2 Determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto

O teor de cloretos em relação à massa de concreto é determinado a partir da definição do volume de cloretos obtidos da titulação, à massa molar do cloreto, a concentração de nitrato de prata utilizada e a massa da amostra, conforme a equação 12:

$$C = \frac{V_{Cl} \cdot M_{Cl} \cdot C_{solução}}{M_{amostra}} \cdot 100 \quad (12)$$

Em que:

‘C’ é o teor de cloretos em relação à massa de concreto (%);

‘V_{Cl}’ é o volume de cloretos obtidos da titulação (ml);

‘M_{Cl}’ é a massa de cloreto em 1 mol de NaCl = 35,453 g/mol;

‘C_{solução}’ é a concentração da solução titulante (nitrato de prata e água) = 0,0141 mol/L;

‘M_{amostra}’ é a massa da amostra submetida à titulação = 1g.

5.3.3 Determinação do perfil de cloretos, da concentração superficial de cloretos (Cs) e do coeficiente de difusão (D)

Mediante a equação 6, determinou-se quantitativamente o teor de cloretos em relação a massa de concreto de cada profundidade para cada uma das amostras analisadas. Com estes valores de cada camada de profundidade, é possível traçar o perfil de cloreto de cada corpo de prova, isto é, um gráfico que relaciona a concentração dos íons cloretos em relação à profundidade de penetração do mesmo; o que possibilita analisar o processo de contaminação dos íons cloretos nas amostras de concreto.

Com o perfil de cloretos traçado por meio da ferramenta Excel, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados na solução da Segunda Lei de Fick e ajustado este gráfico do perfil de cloretos para a obtenção da concentração superficial de cloretos das amostras. Com a equação do gráfico ajustado, basta calcular a concentração de cloretos em que a profundidade seja zero (superfície) e assim consegue-se a determinação deste valor.

Já a concentração inicial de íons cloreto, isto é, a quantidade de cloretos presente em uma amostra de concreto exposta a um ambiente comum, foi adotada neste estudo como sendo a média das concentrações de teores de cloreto da última camada analisada em cada amostra, estas que foram a profundidade de 15 a 20 milímetros. Esta concentração é chamada de ' C_0 ' na Eq.3.

Para o cálculo do coeficiente de difusão de íons cloreto, baseou-se na equação solução da segunda Lei de Fick, desenvolvida por Crank (1975) e ilustrada na equação 13.

$$Mt = 2 \cdot Cs \cdot \left(\frac{D \cdot t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Sendo que:

'Mt' é a massa total de cloretos difundidos no tempo t (g)

Isolando o coeficiente de difusão 'D' na equação 13, tem-se que:

$$D = \frac{Mt^2 \cdot \pi}{4 \cdot Cs^2 \cdot t} \quad (14)$$

Desta equação, adotou-se a concentração superficial (C_s) como constante ao longo do tempo. Portanto, com os valores já conhecidos do tempo (223, 251 e 279 dias) específicos para cada idade e com a concentração superficial previamente calculada, necessitou-se descobrir a massa total de cloretos difundidos no tempo para assim conseguir determinar o coeficiente de difusão.

Com o conhecimento de que esta massa é calculada pelo produto da densidade do material pelo volume do mesmo, possibilitou-se a definição dos valores do coeficiente de difusão, já que a densidade do íon cloreto é um valor fixo na magnitude de 2,98 gramas por litro e o volume do mesmo foi obtido pelo ensaio titulométrico.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS TEORES DE CLORETOS E OS RESPECTIVOS PERFIS

Os teores de cloretos médios obtidos em cada idade estão dispostos nas Tabelas 6, 7 e 8, sendo uma para cada classe de resistência. Os valores foram calculados em mg de Cl^- por porcentagem de massa de cimento presente em cada traço. O ANEXO C traz as Tabelas completas, com todos os resultados de cada corpo de prova, de cada profundidade em cada Idade.

Tabela 6 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C20

		Profundidade			
		(mm)	1ª Idade	2ª Idade	3ª Idade
20 MPa	0,38 % de fibras	5	0,69	0,906	0,984
		10	0,534	0,742	0,861
		15	0,445	0,694	0,778
		20	0,413	0,653	0,669
	0,77 % de fibras	5	0,585	0,927	0,981
		10	0,495	0,794	0,813
		15	0,389	0,733	0,705
		20	0,366	0,658	0,645

Fonte: Autor (2020).

Tabela 7 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C25

		Profundidade			
		(mm)	1ª Idade	2ª Idade	3ª Idade
25 MPa	0,38 % de fibras	5	0,580	0,879	1,036
		10	0,490	0,736	0,897
		15	0,432	0,682	0,753
		20	0,403	0,599	0,701
	0,77 % de fibras	5	0,675	0,936	1,001
		10	0,497	0,790	0,901
		15	0,429	0,702	0,785
		20	0,399	0,640	0,727

Fonte: Autor (2020).

Tabela 8 - Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência

C40

		Profundidade (mm)	1ª Idade	2ª Idade	3ª Idade
40 MPa	0,38 % de fibras	5	0,723	1,136	1,244
		10	0,599	0,834	1,051
		15	0,523	0,723	0,889
		20	0,452	0,657	0,803
	0,77 % de fibras	5	0,763	1,179	1,333
		10	0,636	0,870	1,096
		15	0,591	0,756	0,967
		20	0,531	0,680	0,903

Fonte: Autor (2020).

Com estes resultados, elaborou-se os perfis de cloretos por cada traço de concreto estudado, estes ilustrados nos gráficos e representados pelas figuras 39, 40, 41, 42, 43 e 44 demonstrados a seguir. Ao final do presente trabalho, encontra-se no Anexo D, todos os gráficos de todos os corpos de provas ensaiados neste estudo individualmente.

Figura 39- Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C20 0,38%.

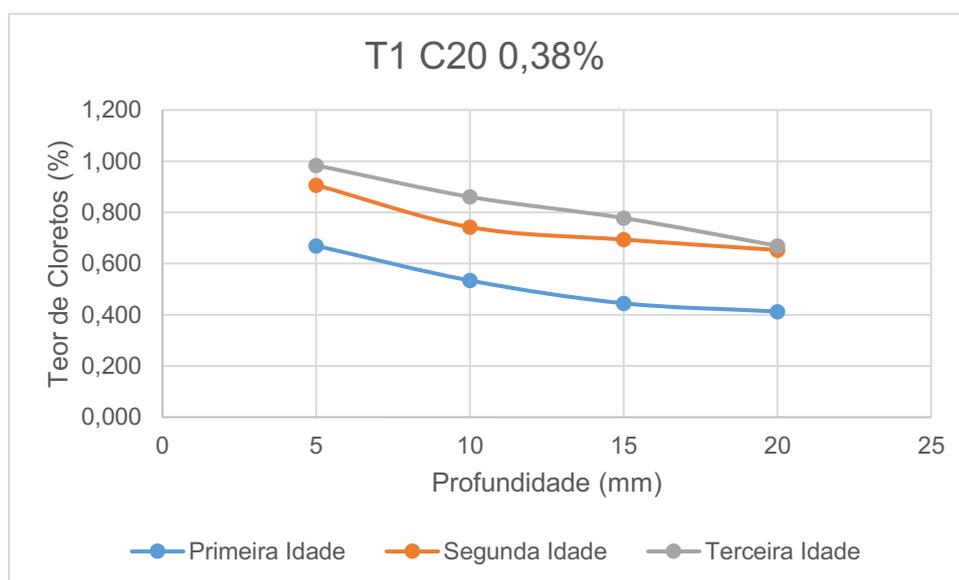
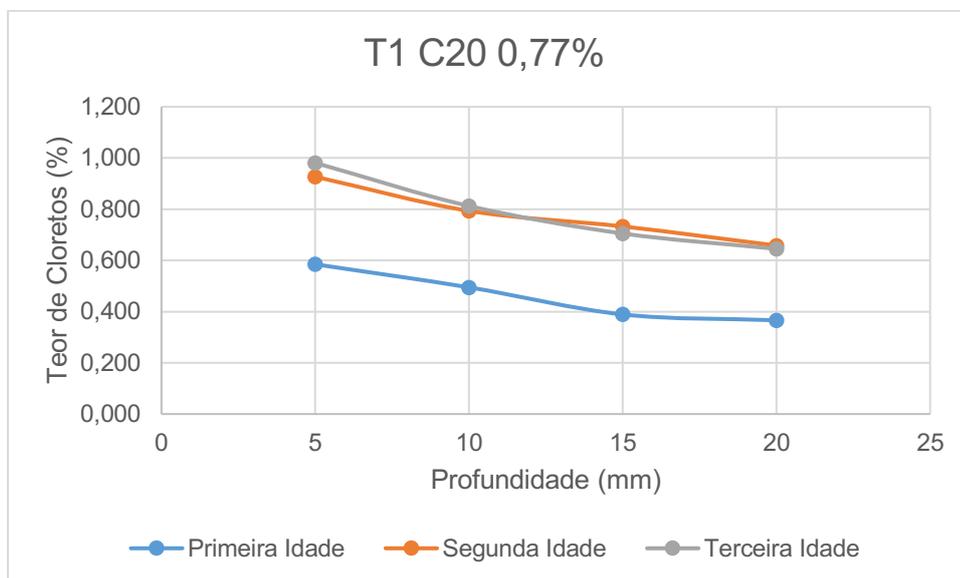


Figura 39- Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C20 0,38%.

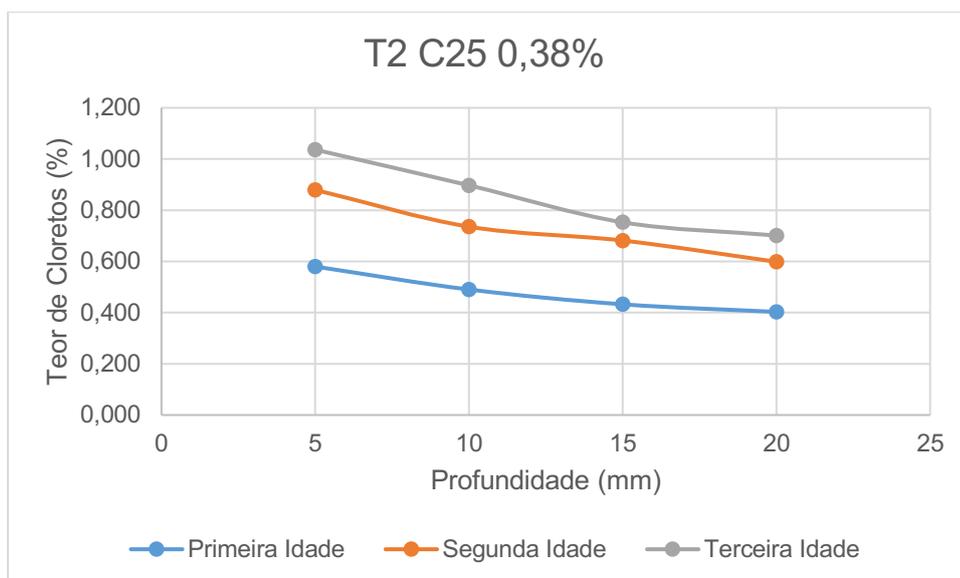
Fonte: Autor (2020).

Figura 40 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C20 0,77%.



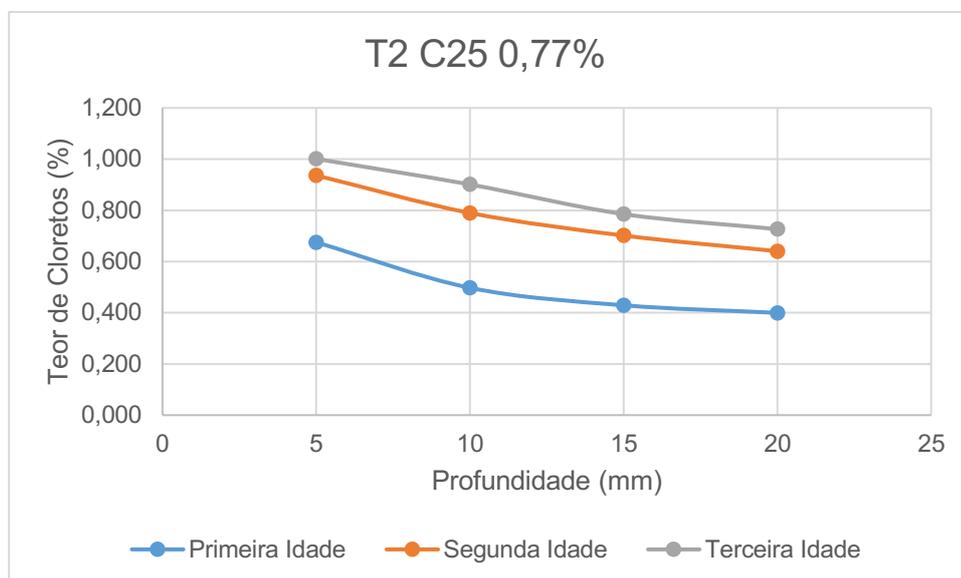
Fonte: Autor (2020).

Figura 41 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C25 0,38%.



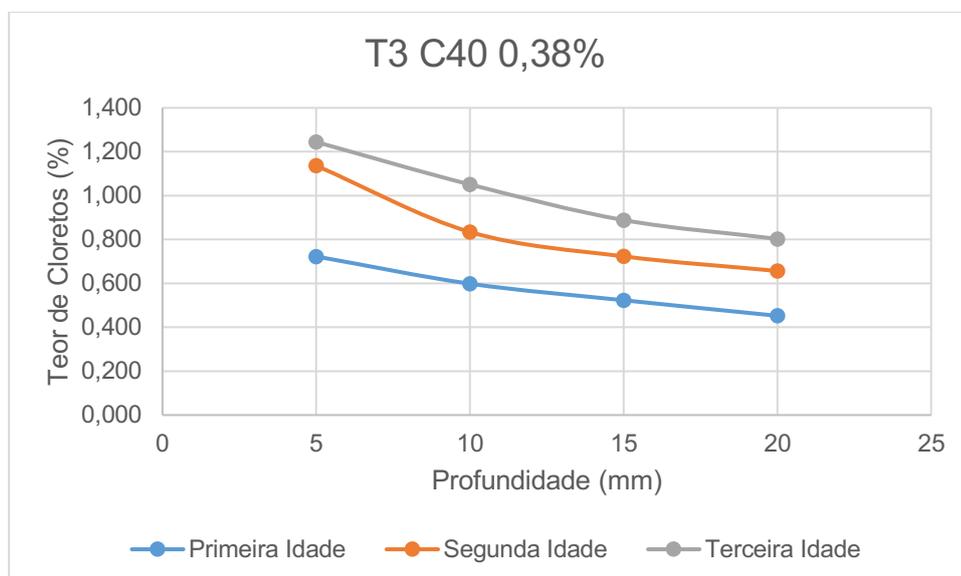
Fonte: Autor (2020).

Figura 42- Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C25 0,77%.



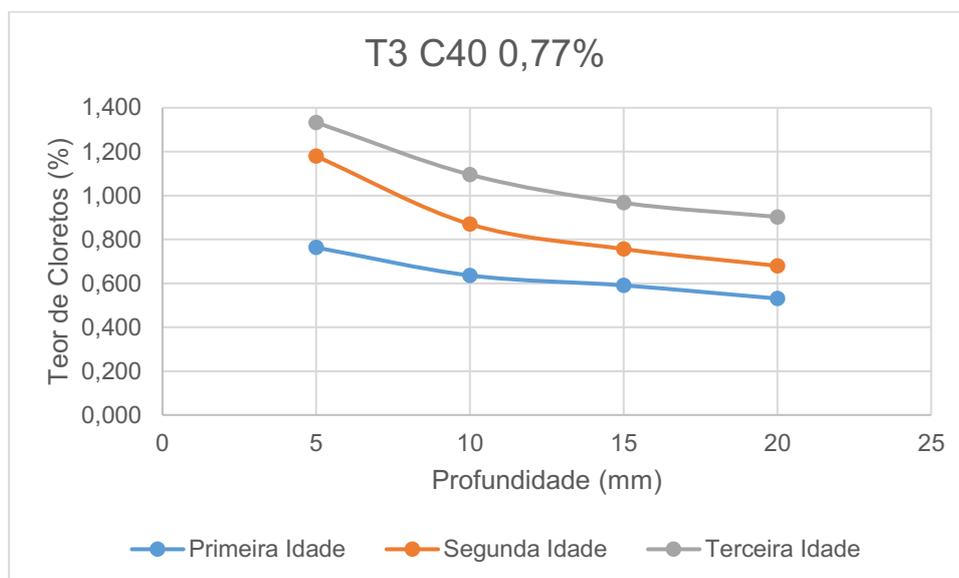
Fonte: Autor (2020).

Figura 43 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C40 0,38%.



Fonte: Autor (2020).

Figura 44 - Teores de cloreto em função da profundidade de penetração para a classe de resistência C40 0,77%.



Fonte: Autor (2020).

Mediante aos resultados obtidos nas Tabelas 6, 7 e 8 e com base na análise gráfica dos mesmos; infere-se que: em relação ao fator tempo, constatou-se que, como previsto, a intensidade penetração dos íons cloretos no concreto é diretamente proporcional ao tempo em que este é exposto a este agente. Quanto a análise da interferência das classes de resistência, notou-se uma diferença relativamente pequena em decorrência provavelmente da imprecisão na leitura das titulações, já que a leitura do processo de viragem não é algo definido com precisão; e do processo de adensamento do concreto em que a porosidade das classes de concreto C20 possivelmente foram superiores a porosidade da classe C40 já que esta última apresentou valores um pouco maiores de teores de cloreto. É importante ressaltar também, que pelo tempo de contaminação dos corpos de provas ter sido muito extenso quando comparado a diferença de idades de contaminação dos corpos, isto também pode ter acarretado na imprecisão dos resultados.

Observa-se quanto a ação das fibras na penetração dos íons cloretos, uma diferença mínima na análise comparativa da influência dos diferentes percentuais de fibras (0,38% e 0,77%), sendo que o menor percentual de fibras performou ligeiramente melhor perante ao bloqueio da penetração dos agentes agressivos, possivelmente devido a melhor compatibilidade do volume desta com a matriz do concreto em si.

6.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS E DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO

A concentração superficial de cloretos determinada para cada corpo de prova estudado, foi estabelecida com base nos gráficos presentes no Anexo D. Por meio destes, traçou-se as linhas de tendencia de cada um e determinou-se por meio da ferramenta Excel, a equação destes gráficos. A partir da equação, adotando-se a incógnita x como 0 (profundidade 0) para então calcular por aproximação a concentração superficial do agente no concreto.

Já o coeficiente de difusão dos íons cloretos é calculado conforme a equação 8 citada anteriormente. Os valores obtidos neste experimento para ambos objetos de análises estão dispostos nas Tabelas 9, 10 e 11 a seguir.

Tabela 9 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C20

Código	Tempo de contaminação (dias)	Cs (% massa de concreto)	Cs médio (% massa de concreto)	D (10^{-9} mm ² /s)	Dmédio (10^{-9} mm ² /s)
T1 0,38% CP1_223d	223	0,7215	0,73005	1,16137E-09	1,15486E-09
T1 0,38% CP2_223d	223	0,7386		1,14834E-09	
T1 0,77% CP1_223d	223	0,6619	0,6492	1,11188E-09	1,15877E-09
T1 0,77% CP2_223d	223	0,6365		1,20567E-09	
T1 0,38% CP1_251d	251	0,9548	0,95105	1,29841E-09	1,27687E-09
T1 0,38% CP2_251d	251	0,9473		1,25533E-09	
T1 0,77% CP1_251d	251	0,9894	0,9946	1,25208E-09	1,25948E-09
T1 0,77% CP2_251d	251	0,9998		1,26688E-09	
T1 0,38% CP1_279d	279	1,0735	1,07955	1,07991E-09	1,07656E-09
T1 0,38% CP2_279d	279	1,0856		1,07321E-09	
T1 0,77% CP1_279d	279	1,0581	1,06475	1,0176E-09	1,00981E-09
T1 0,77% CP2_279d	279	1,0714		1,00201E-09	

Fonte: Autor (2020).

Tabela 10 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C25

Código	Tempo de contaminação (dias)	Cs (% massa de concreto)	Cs médio (% massa de concreto)	D (10^{-9} mm ² /s)	Dmédio (10^{-9} mm ² /s)
T2 0,38% CP1_223d	223	0,6982	0,6236	1,23512E-09	1,37224E-09
T2 0,38% CP2_223d	223	0,549		1,50936E-09	
T2 0,77% CP1_223d	223	0,7427	0,7242	1,06583E-09	1,10765E-09
T2 0,77% CP2_223d	223	0,7057		1,14948E-09	
T2 0,38% CP1_251d	251	0,9385	0,9479	1,22341E-09	1,20098E-09
T2 0,38% CP2_251d	251	0,9573		1,17854E-09	
T2 0,77% CP1_251d	251	1,0139	1,0112	1,22862E-09	1,18508E-09
T2 0,77% CP2_251d	251	1,0085		1,14154E-09	
T2 0,38% CP1_279d	279	1,1335	1,13455	1,03265E-09	1,03226E-09
T2 0,38% CP2_279d	279	1,1356		1,03187E-09	
T2 0,77% CP1_279d	279	1,0835	1,09415	1,10274E-09	1,10389E-09
T2 0,77% CP2_279d	279	1,1048		1,10504E-09	

Fonte: Autor (2020).

Tabela 11 - Resultados do Cs e D para a classe de resistência C40

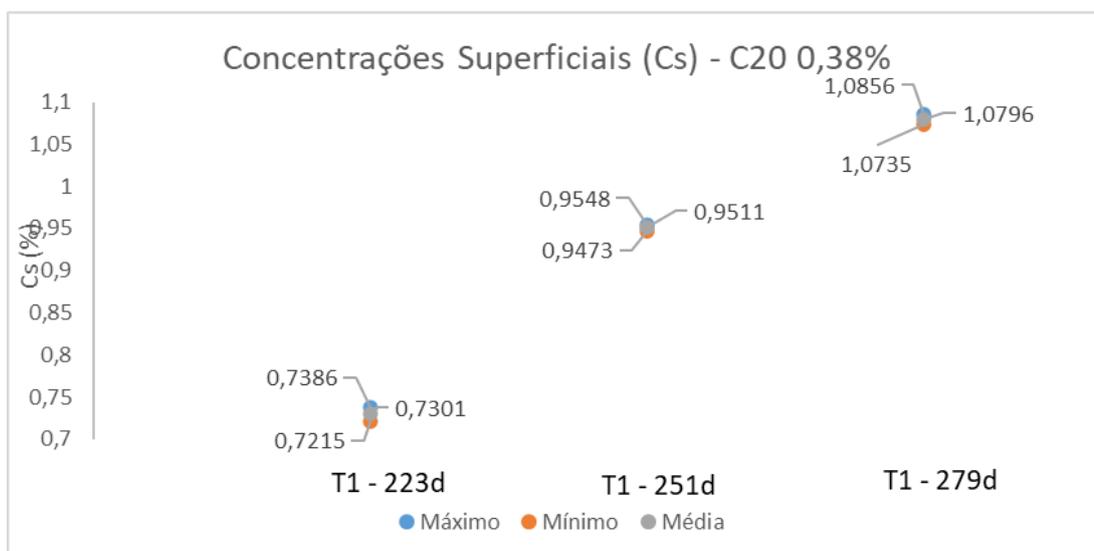
Código	Tempo de contaminação (dias)	Cs (% massa de concreto)	Cs médio (% massa de concreto)	D (10^{-9} mm ² /s)	Dmédio (10^{-9} mm ² /s)
T3 0,38% CP1_223d	223	0,7573	0,79585	1,22293E-09	1,20753E-09
T3 0,38% CP2_223d	223	0,8344		1,19213E-09	
T3 0,77% CP1_223d	223	0,794	0,81585	1,42213E-09	1,38413E-09
T3 0,77% CP2_223d	223	0,8377		1,34612E-09	
T3 0,38% CP1_251d	251	1,2431	1,22535	9,55773E-10	9,62357E-10
T3 0,38% CP2_251d	251	1,2076		9,68941E-10	
T3 0,77% CP1_251d	251	1,278	1,27425	9,77779E-10	9,62961E-10
T3 0,77% CP2_251d	251	1,2705		9,48143E-10	
T3 0,38% CP1_279d	279	1,3684	1,3684	9,79869E-10	9,82744E-10
T3 0,38% CP2_279d	279	1,3684		9,8562E-10	
T3 0,77% CP1_279d	279	1,4297	1,4295	1,04367E-09	1,0468E-09
T3 0,77% CP2_279d	279	1,4293		1,04994E-09	

Fonte: Autor (2020).

6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONCENTRAÇÕES SUPERFICIAIS DE ÍONS CLORETO

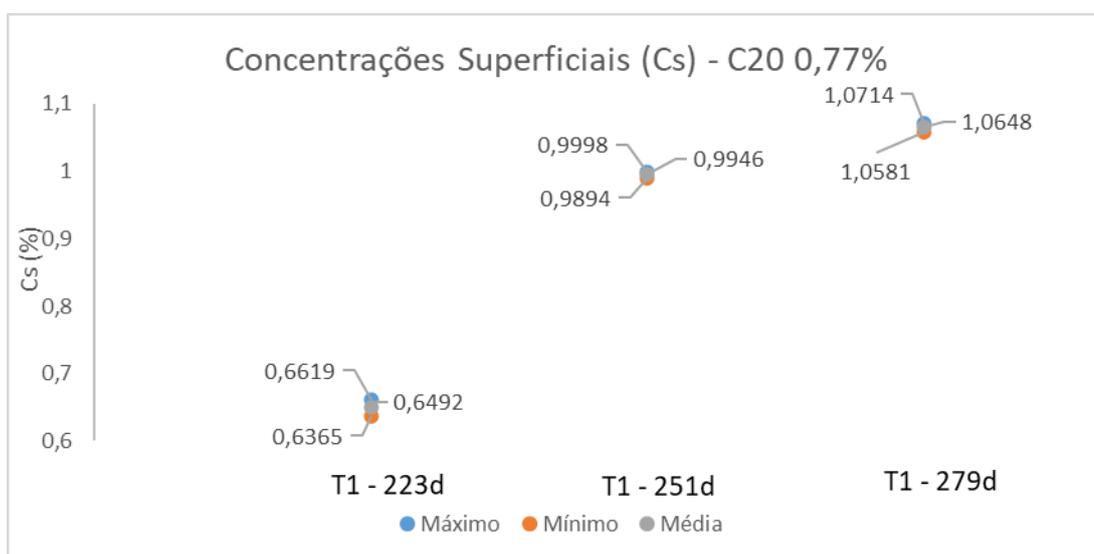
No intuito de investigar os dados adquiridos das concentrações superficiais de íon cloreto de cada classe de resistência (C20 0,38%; C20 0,77%; C25 0,38%; C25 0,77%; C40 0,38% e C40 0,77%) por tempo de contaminação (223, 259 e 279 dias), elaborou-se gráficos ilustrados nas Figuras 45 a 50 que demonstram os valores máximos, mínimos e a média da variável Cs.

Figura 45 - Valores máximo, médio e mínimo para a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,38%



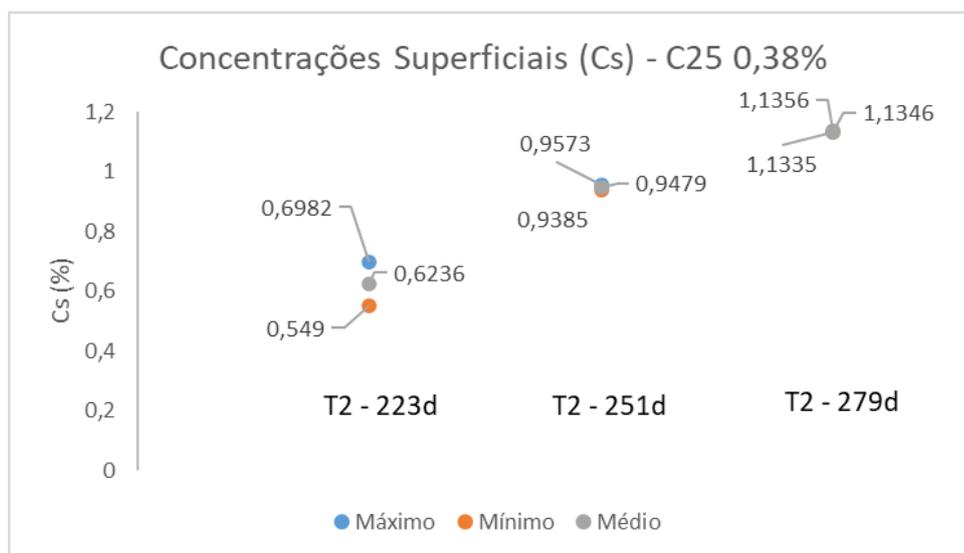
Fonte: Autor (2020).

Figura 46 - Valores máximo, médio e mínimo para a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%



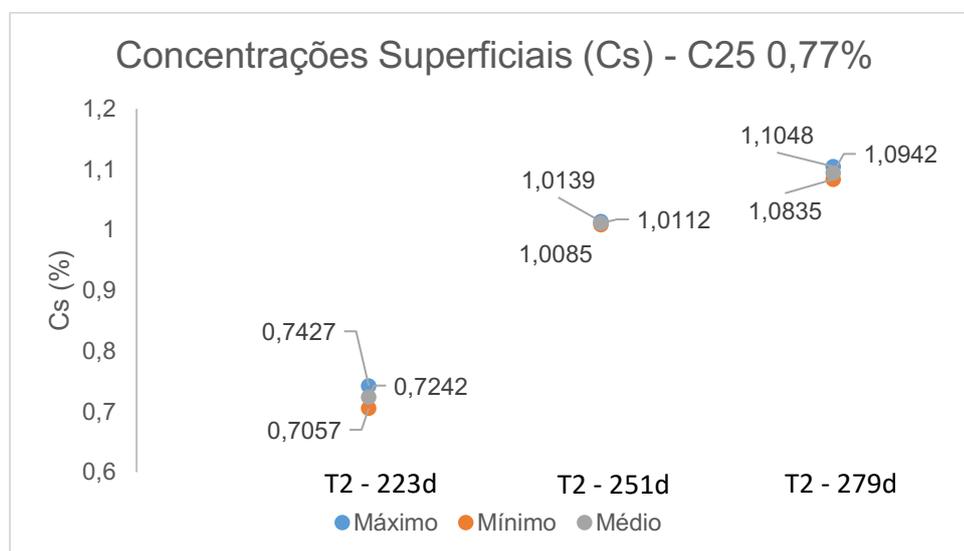
Fonte: Autor (2020).

Figura 47 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,38%



Fonte: Autor (2020).

Figura 48 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,77%



Fonte: Autor (2020).

Figura 49 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,38%

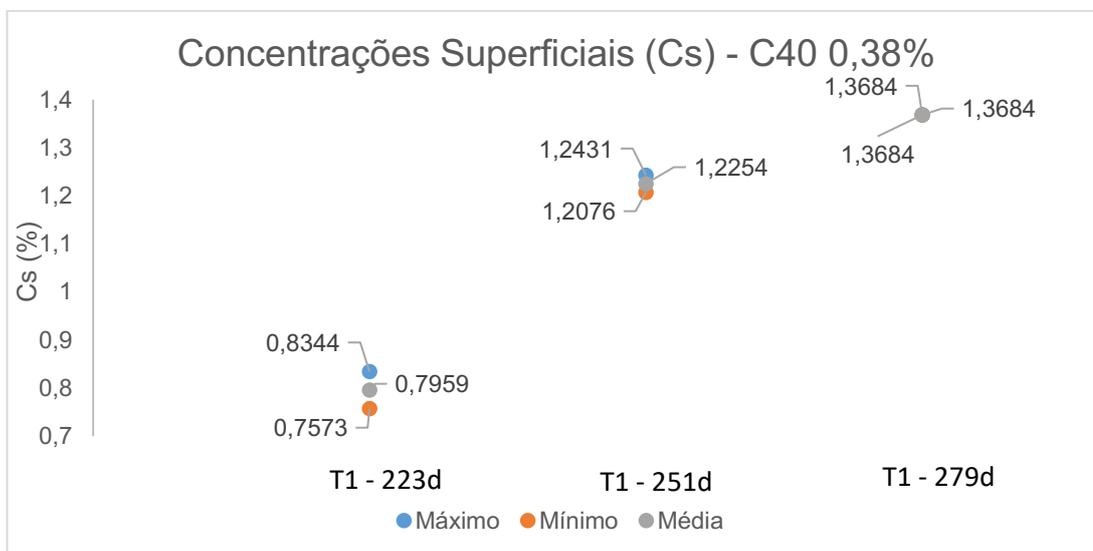
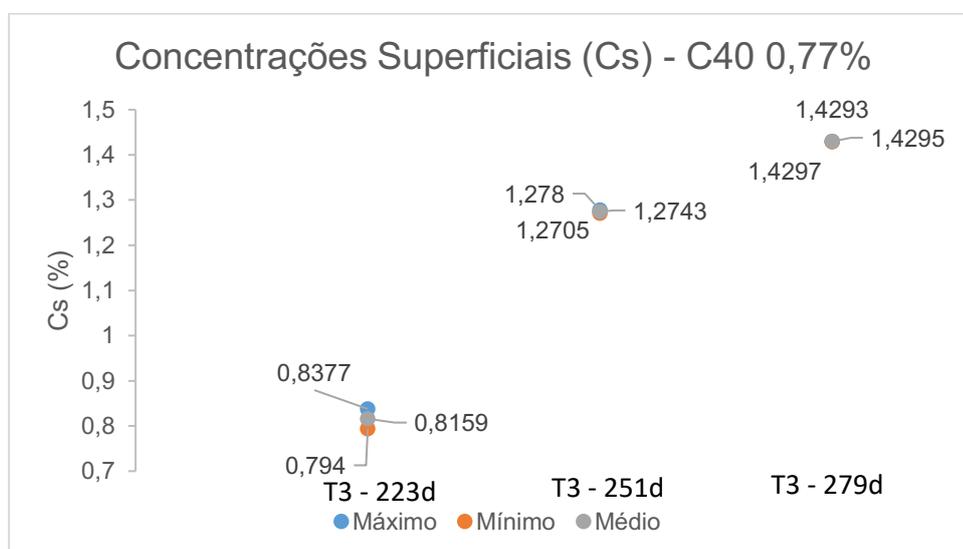


Figura 50 - Valores máximo, médio e mínimo para o a concentração superficial de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,77%



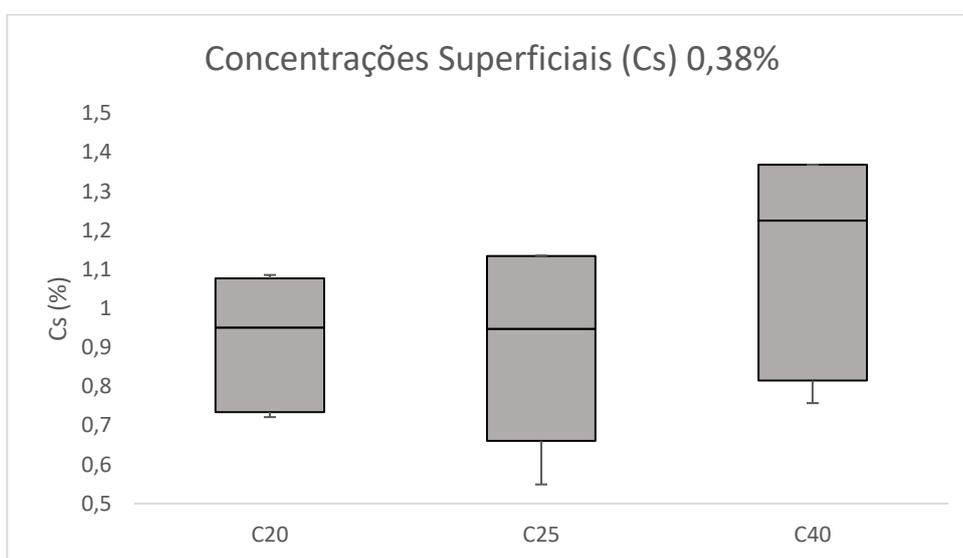
Observa-se que os gráficos acima seguem uma mesma tendência (crescente), em que o fator predominante de influência no aspecto destes foi o aspecto tempo e que o percentual de fibras e classes de resistência do concreto pouco influenciaram. Quanto ao fator tempo de contaminação, há maiores concentrações superficiais de íons cloretos nos corpos que ficaram mais tempo

exposto ao mesmo e que se constatou uma diferença menor da segunda idade para a terceira quanto em relação aos dados da primeira idade para a segunda.

Com o intuito de analisar todos os resultados obtidos para o coeficiente de difusão de íons cloreto, produziu-se um diagrama de caixa, conhecido como “*box plot*”, que apresenta a relação entre os valores máximo e mínimo do coeficiente “*C_s*”, além do 1º, 2º e 3º quartil dos valores obtidos, para cada classe de resistência verificada (C20, C25 e C40).

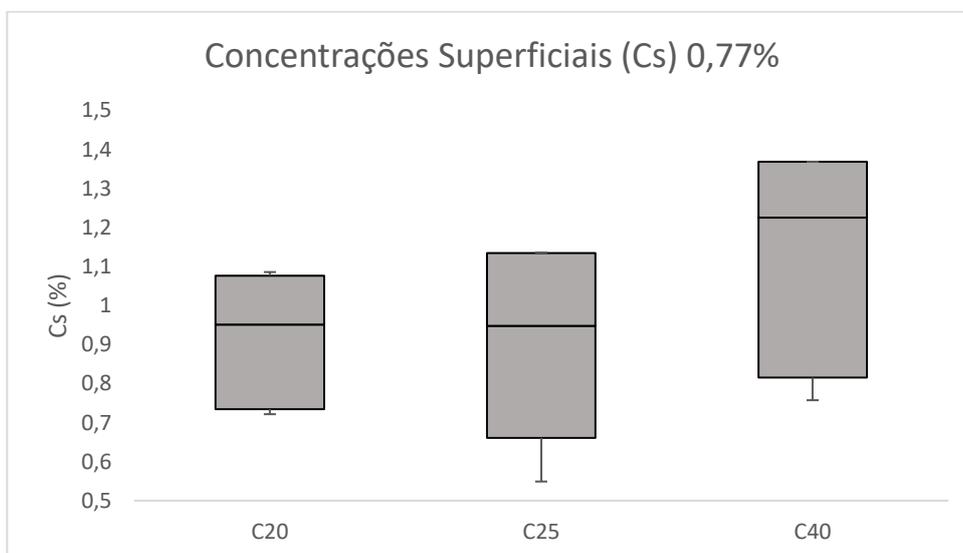
Deste modo, a Figura 51 e a Figura 52 apresentam o diagrama de caixa dos valores calculados para a concentração superficial “*C_s*”.

Figura 51 - Diagrama de caixa da concentração superficial “C_s”



Fonte: Autor (2020).

Figura 52 - Diagrama de caixa da concentração superficial “C_s”



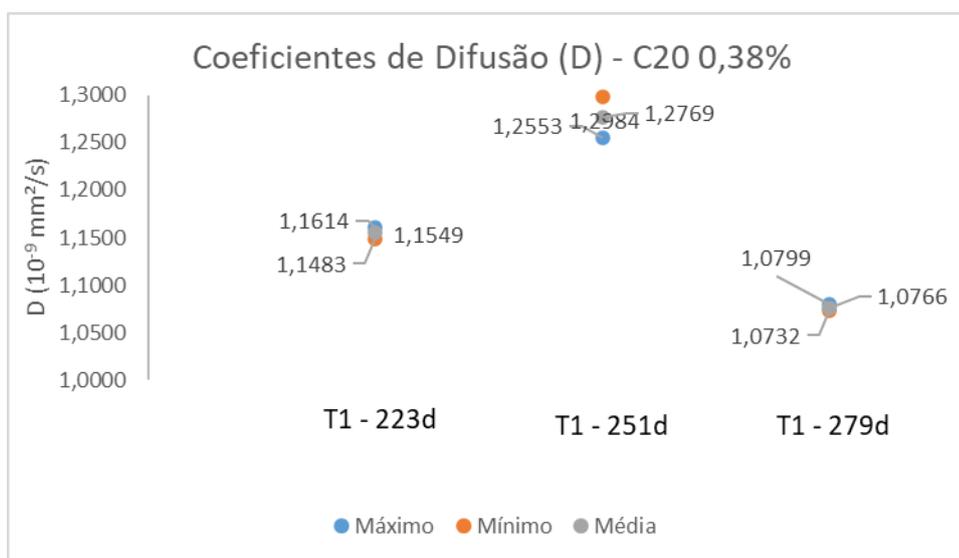
Fonte: Autor (2020).

A partir da análise das Figura 51 e 52, depreende-se uma constância dos valores obtidos para as classes de resistência C20 e C25 e uma variação um pouco maior para a classe C40; ainda que o maior desvio padrão obtido ocorreu na classe de resistência C25.

6.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO

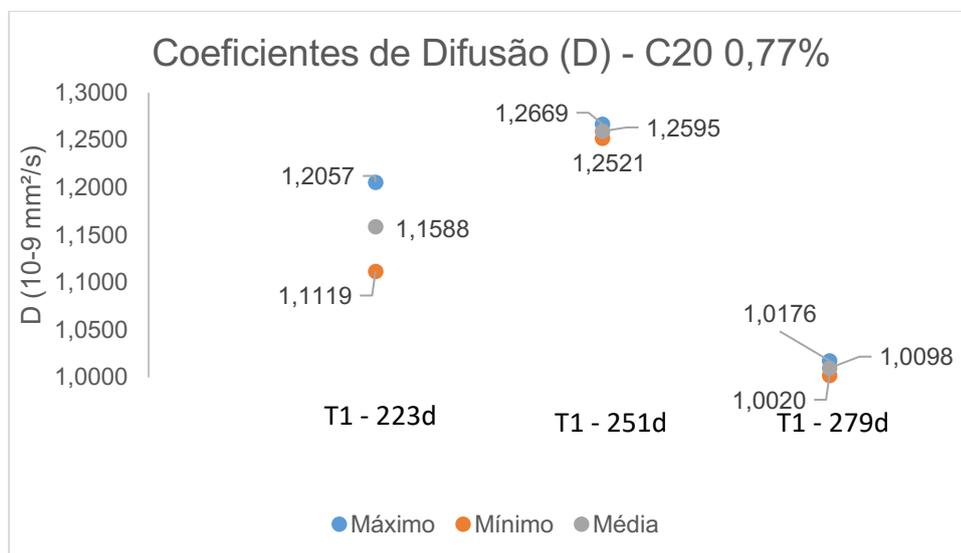
Mediante aos dados expostos nas Tabelas 9, 10 e 11 e com o objetivo de analisar os mesmos, elaborou-se os gráficos a demonstrados nas figuras 50 a 55 a seguir que apresentam os valores máximos, mínimos e a média destes para os diferentes traços de concreto e as diferentes idades de contaminação estudadas

Figura 53 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,38%



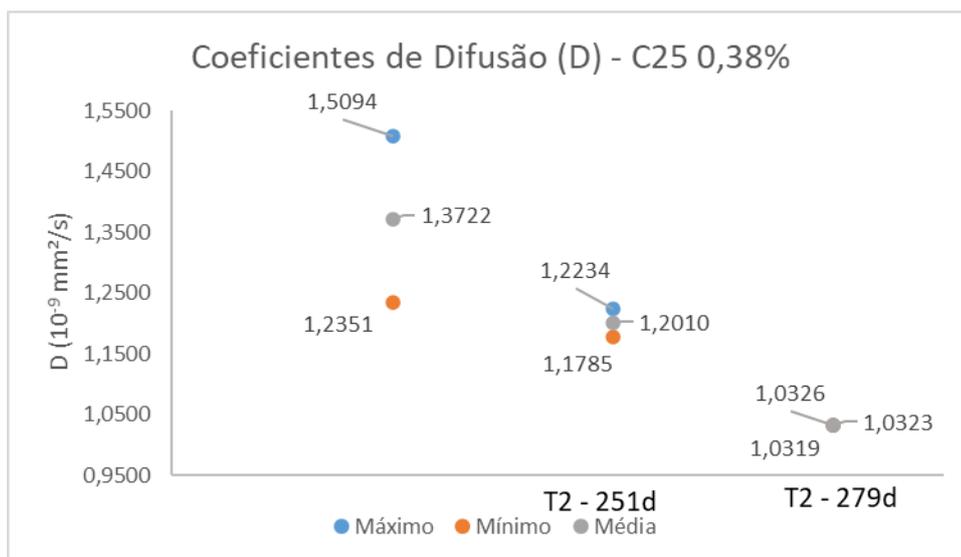
Fonte: Autor (2020).

Figura 54 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%



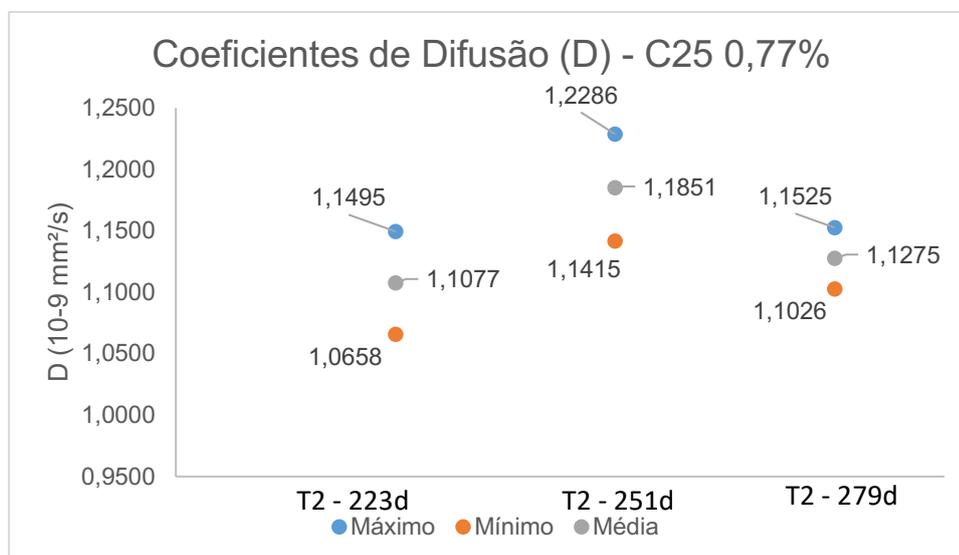
Fonte: Autor (2020).

Figura 55 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,38%



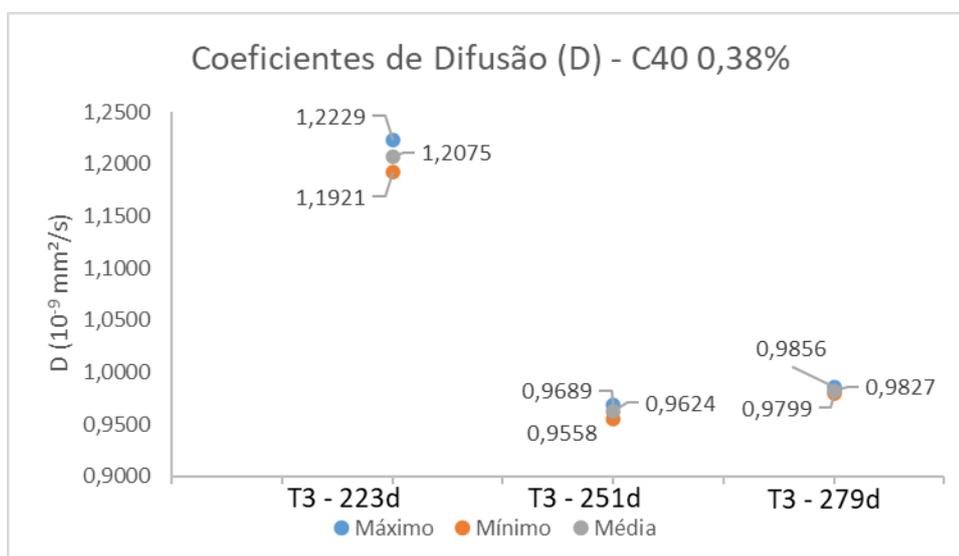
Fonte: Autor (2020).

Figura 56 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C25 0,77%



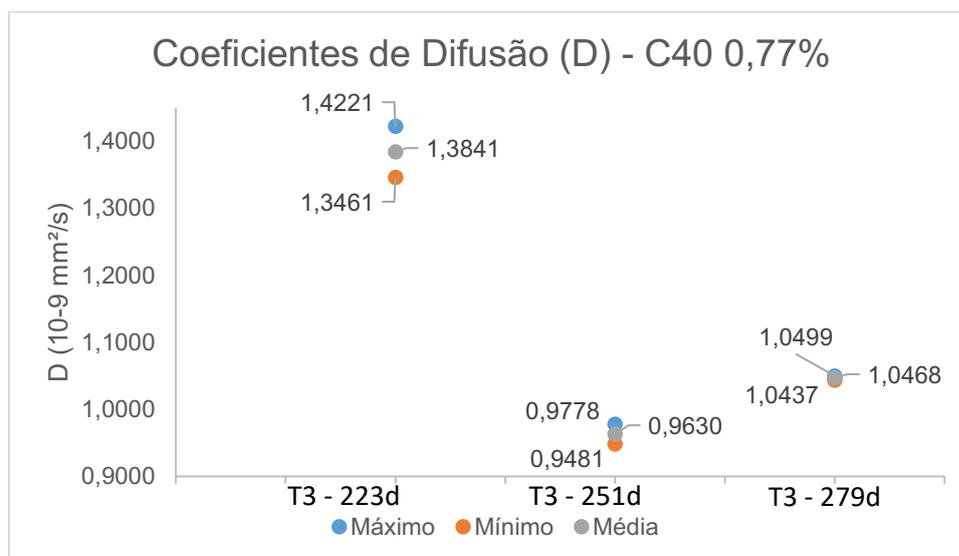
Fonte: Autor (2020).

Figura 57 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C40 0,38%



Fonte: Autor (2020).

Figura 58 - Valores máximo, médio e mínimo para o coeficiente de difusão de íons cloreto, para a classe de resistência C20 0,77%



Ao realizar a interpretação destes gráficos, constata-se que com relação às classes de resistência, para a classe C20, os valores máximos e mínimos encontrados do coeficiente de difusão estão nos corpos de prova ensaiados na segunda idade e na terceira idade respectivamente. Infere-se também que o percentual de fibras pouco influenciou neste processo de difusão, constatando-se uma atuação no combate a difusão dos íons minimamente melhor no traço em que a maior percentual de fibras para as duas primeiras idades.

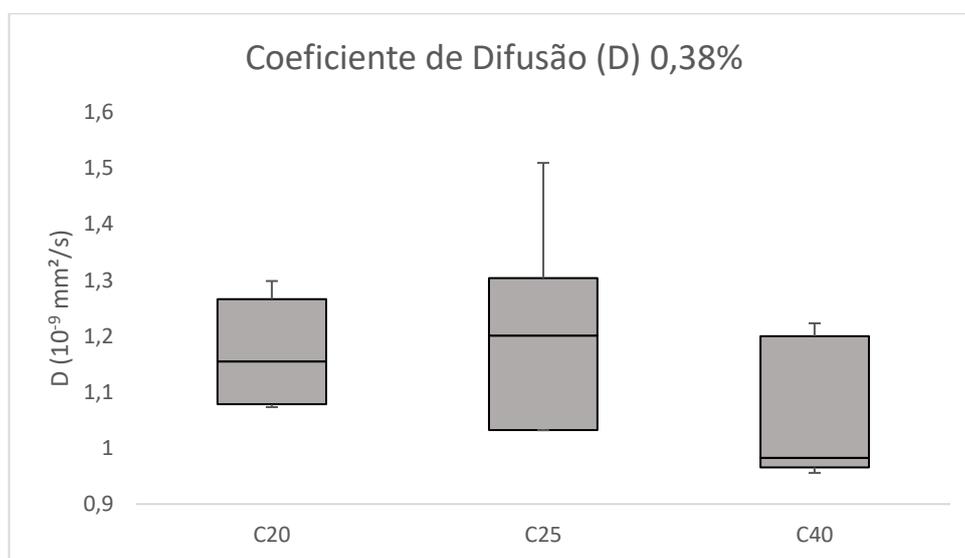
Já quanto a classe de resistência C40, em relação ao fator tempo de contaminação, infere-se que os máximos coeficientes de difusão se encontram nas primeiras idades e o mínimo na terceira idade, para os dois percentuais de fibra. Apesar de que para esta classe, o traço que performou melhor para o combate da difusão de íons cloretos foi aquele de menor percentual de fibras. Pelos resultados obtidos, ainda podemos concluir que a adição de uma maior quantidade de fibras para o concreto da classe de resistência C40, não performou tão bem quanto a aqueles concretos convencionais (C20 e C25).

Para a classe C25, chama-se a atenção ao realizar a comparação dos das Figuras 52 e 53 uma diferença em especial na primeira idade de ambos em relação ao coeficiente de difusão. Em que o traço com percentual de 0,38% de fibras possui um coeficiente de difusão na grandeza de aproximadamente $0,45 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{s}$ maior para com o traço com percentual de 0,77%.

A fim de analisar todos os resultados obtidos para as concentrações superficiais de íons cloreto, produziu-se outro diagrama de caixa, apresentando a relação entre os valores máximo e mínimo do coeficiente de difusão “ D ”, além do 1º, 2º e 3º quartil dos valores obtidos, para cada classe de resistência verificada (C20, C25 e C40).

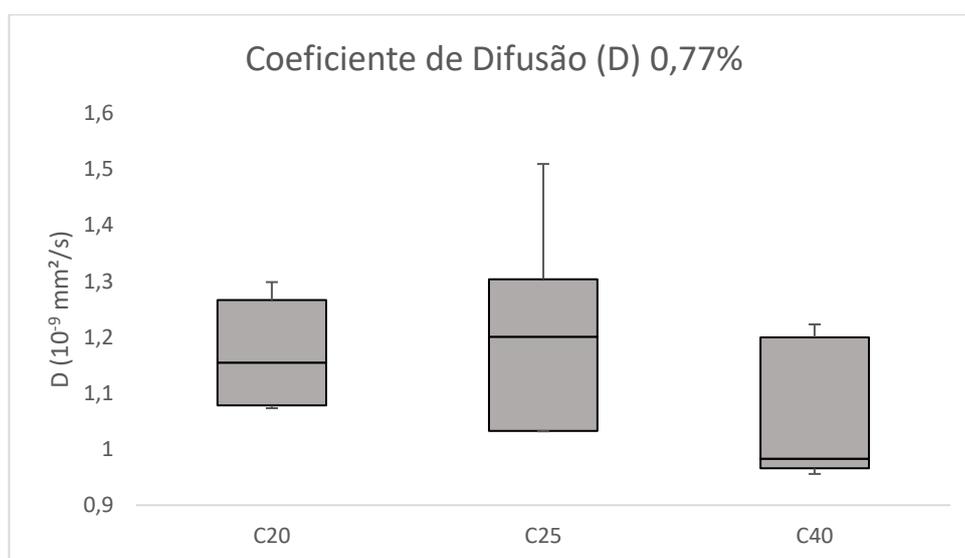
Assim, a Figura 59 e a Figura 60 apresentam o diagrama de caixa dos valores calculados para o coeficiente de difusão “ D ”.

Figura 59 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão “ D ”



Fonte: Autor (2020).

Figura 60 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão “ D ”



Fonte: Autor (2020).

Mediante a análise das Figuras 59 e 60, é possível constatar para o coeficiente de difusão o mesmo comportamento dos dados como ocorreu com a concentração superficial para as três classes de resistência e idades de contaminação estudados.

7 CONCLUSÕES

Diante do objetivo principal deste trabalho que é a análise da influência dos traços de concreto com diferentes percentuais de fibras de aço na penetração de cloretos durante distintos intervalos de tempo; expostos ao agente nocivo a uma concentração de 250 gramas por decímetro cúbico de água, baseando-se no Método Acelerado Modificado; é possível adquirir respostas quanto ao comportamento dos corpos de prova estudados quanto aos teores de cloretos por profundidade, a concentração superficial do agente nocivo e também à difusão deste no concreto.

Com relação aos teores de cloreto das amostras estudadas, pela análise dos resultados observados e pela demonstração destes nos perfis de cloretos, infere-se que estes possuem o comportamento de uma curva decrescente, à medida que aumenta a profundidade de análise nos corpos de prova, diminui gradativamente a penetração dos íons cloretos; observa-se então uma maior concentração deste agente nocivo nas camadas mais superficiais do concreto, tal como o esperado. Processo este que ocorre, independente da classe de resistência, do percentual de fibras e do tempo de contaminação estudado.

Ainda quanto ao estudo dos perfis de cloreto, constata-se que há uma menor variação da penetração dos íons cloretos nas camadas mais profundas diante das camadas superficiais. Fato este explicado devido a estrutura e conformidades do concreto se encontrar com menores porosidades em seu interior o que dificulta este processo de penetração. Tal fenômeno também justifica a redução da variação da concentração superficial nas idades mais elevadas.

Em relação a concentração superficial de íons cloreto nota-se que o principal fator que influenciou os resultados deste foi o tempo de contaminação das amostras, em que são grandezas diretamente proporcionais já que à medida que aumenta o intervalo de contaminação aumenta também a concentração na profundidade 0 do agente nocivo. Nota-se que a diferença das concentrações superficiais dos íons cloretos comparando as diferenças classes de resistência das amostras e o percentual de fibras é mínimo, por consequência de que grandezas como porosidade, rigidez e composição do concreto não interferem na análise desta variável.

Na análise do coeficiente de difusão, mediante a influência da classe de resistência do concreto, do percentual de fibras e do intervalo de tempo de contaminação; nota-se pelos resultados experimentais, diferenças praticamente mínimas deste coeficiente; ainda sim destaca-se uma ligeira performance melhor dos concretos de classes de resistência convencional, quando submetidos a menores teores de fibras de aço.

Diante destas considerações e partindo dos resultados obtidos, não é possível constatar qual o percentual ótimo de fibras para o combate da penetração dos íons cloretos já que ambos os percentuais obtiveram resultados bastantes similares para uma mesma classe de resistência. Assim como a influência das fibras, não foi observado no experimento grandes distinções nos resultados da penetração dos íons ao comparar diferentes classes de resistência de concreto, situação esta, que pode ter acontecido em decorrência do curto intervalo de tempo de exposição à solução salina e da imprecisão na leitura das titulações, já que o discernimento do processo de viragem é algo totalmente dependente do ponto de vista pessoal de quem está realizando o experimento.

Portanto, ainda é necessário a continuação dos estudos referentes a influência das classes de resistência e da presença de fibras nos traços na penetração dos íons cloretos, seja na execução do experimento em um maior intervalo de tempo ou na realização de outros experimentos diferentes capazes de analisar a influência destes fatores.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **Fibras de aço para concreto – Especificação**. NBR 15530:07, ABNT, Rio de Janeiro. 2007.

AGUIAR, J.E. Patologia e Durabilidade das Estruturas de Concreto. Notas de aula (especialização em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2014. 298 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 284. Standard Specification for Epoxy-Coated Reinforcing Bars: Materials and Coating Requirements. AASHTO, 2009, 12 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI: Farmington Hills, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5**. ACI. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (ACI 544.2R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C995: Standard test method for time of flow of fiber-reinforced concrete through inverted cone slump. Book of ASTM Standards, USA. 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS, “Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C 1218-92”, In: Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1993.

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

ANDRADE, C. Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. Madrid: CSIC/IETcc, 1988. 122 p.

ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Técnicas electroquímicas cuali y cunatitativas para medir los efectos de las adiciones sobre la corrosión de las armaduras. Materiales de Construcción, n. 182, p. 69-78, 1981.

ANDRADE, J. J. de O. Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Elsevier, 1990.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L.M. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Cadernos de Engenharia de Estruturas. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. Durable concrete structures: design guide. 2 ed. London: Editora Thomas Telford, 1989. 112 p.

CRANK, J., The mathematics of diffusion, New York, Oxford University Press, 1975.

EMMONS, P.H. Concrete repair and maintenance illustrated. Kingston: Editora Means, 1994. 295 p.

FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. R. L., AGOPYAN, V. Fiber reinforced shotcrete dor tunnelling for NATM Brazilian conditions In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials, 1995, Toronto. **Fiber Reinforced Concrete – Modern Developments**. P.263 – 272. 1995.

FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. R. L. Evolution of strength and toughness in steel fiber reinforced shotcrete In: ACI/SCA International Conference on Sprayed Concrete/Shotcrete, 1996, Edinburgh. **Sprayed Concrete Technology**. London. E & FN SPON, p.99 – 106. 1996a.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1997.

FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. R. L. Controle da tenacidade do concreto com fibras de aço In: 39ª Reunião IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 1997, **Anais**. São Paulo. 1997a. v.1. p.357 – 372.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.) Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.2, Capítulo 39, p. 1195 – 1225. 2005a.

FONTON, T. Proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada. Rio Grande: FURG, 2017. Tese (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2017.

GUIMARÃES, A. T.; HELENE, P. Models of variation of chloride ion diffusion as a function of changes in the saturation degree (sd) of concrete mixes prepared with a pozzolanic cement. INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON INTEGRAL SERVICE LIFE MODELLING OF CONCRETE STRUCTURES. 2007, Guimarães, Portugal.

GUIMARÃES, M. C. N., FIGUEIREDO, A. D. Análise da repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio de tenacidade à flexão para concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza, 2000. **Anais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2002.

GUIMARÃES, A.T.C., Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos, Tese de D.Sc., PCC/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

GUIMARÃES, A.T.C., HELENE, P.R.L., Influência do teor de umidade sobre a difusividade de cloretos na pasta de cimento, Relatório FAPESP processo 99/10909-7, São Paulo, 2001.

GUIMARÃES, A.T.C., HELENE, P.R.L., “Concrete structures service life estimation with chloride peak profiles”, In: Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing, ACI, Recife, September 2005.

HELENE, P. Vida útil das estruturas de concreto. IV Congresso Iberoamericano de Patologias da Construção e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais, v.1. Porto Alegre, 1997.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Tese (Livre docência). São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Introdução da vida útil nos projetos das estruturas de concreto**. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São José dos Campos, 2001.

HELENE, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: PINI 1986.

ISAIA, G. C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MACDONALD, K. A.; NORTHWOOD, D. O. Experimental measures of chloride ion diffusion rates using a two-compartment diffusion cell: effects of material and test variables. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.7, 1995.

MANSUR, M.A.; CHIN, M.S.; WEE, T.H. (1999). *Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression*. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. v.11, pg. 21-29. January.

MEDEIROS, M, H, F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACOM, 2008.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 751p.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada, 1995. **Proceedings**. P. 1 – 12.

MOREIRA, A. L. R. **Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas à ação de íons cloretos: modelagem numérica e aplicações**. Vitória, UFES, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. p. 828

NT BUILD 443; **Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration**; NORDTEST; Espoo; Finland, November 1995.

PEREIRA, B. M. G. **Modelos Analíticos para a previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança Paulista, 2012.

PEREIRA, V. G. A.; Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

STANISH, K. D., HOOTON, R. D., THOMAS, R. D. A. (2000). **Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 2000.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. 2. ed. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 2008.

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

WANG, Z.L.; WU, L.P.; WANG, J.G. (2010). *A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression*. Construction and Building Materials, v. 24, Issue 8, pg. 1358-1363. August.

ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO

MIRA FLOW

Aditivo plastificante polifuncional (Mid Range) – Elevada redução de água

DESCRIÇÃO

MIRA FLOW é uma linha de aditivos polifuncionais de alta redução de água base policarboxilato ou híbrido de lignosulfonato + policarboxilato ou poliacrilato que apresenta excelente dispersão das partículas de cimento melhorando assim a trabalhabilidade. Os produtos da linha **MIRA FLOW** são adequados para serem usados tanto no verão quanto no inverno, permitem o ganho de tempo de processo pela facilidade de aplicação e lançamento do concreto bombeado, como melhoria do adensamento do concreto armado. **MIRA FLOW** trata-se de uma nova geração de aditivos polifuncionais que apresentam otimização de custo aplicado.

- Atende a ABNT:NBR 11768/2011 – PR/ PA/ PN

USOS

A linha **MIRA FLOW** pode ser usada com uma ampla gama de dosificações. É adequada as seguintes aplicações:

Concreto dosado em central;

Pisos industriais e paredes de concreto;

Concretos normais ou concretos leves;

Pré moldado e pré fabricado;

MODO DE UTILIZAÇÃO

Os aditivos da linha **MIRA FLOW** devem ser adicionados diretamente no concreto após a mistura dos materiais ou no final do carregamento. Nunca deve ser adicionado sobre os materiais secos. O abatimento ideal do concreto para o melhor desempenho do produto vai de 160 a 220 mm (concreto fluido).

COMPATIBILIDADE

A linha **MIRA FLOW** é compatível com todos os demais aditivos GCP destinados ao uso em concreto com exceção da linha **DARACEM**.

QUANDO UTILIZAR COMBINAÇÕES DE ADITIVOS, ESTES DEVEM SER ADICIONADOS AO CONCRETO SEPARADAMENTE.

Dosagens recomendadas

Vide tabela anexa.

EMBALAGENS

Fornecido em tambores de 200 litros, contentores de 1000 litros ou a granel.

ESTOCAGEM E VALIDADE

Tambores/Contentores: Local abrigado, ventilado e seco mantendo as embalagens originais e intactas. Granel: Tanque plástico totalmente vedado provido de barreira de contenção de acordo com as recomendações da GCP. Recomendado processo diário de agitação por circulação ou injeção de ar.

A validade é de 12 (doze) meses a partir da data de fabricação.

Obs.: No caso de estocagem a granel esta validade está condicionada as condições periódicas de limpeza e conservação do tanque. Consulte o “Guia GCP Applied Technologies de armazenamento e limpeza de tanques de aditivos” disponível no site.

INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA

Evitar contato direto com os olhos e pele. Manuseio através do uso de EPI como luvas, óculos, máscaras e avental. Em caso de ingestão procurar ajuda médica. Para maiores informações, consulte FISPQ.

ANEXO – TIPOS DE PRODUTOS DISPONÍVEIS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Produto	Descrição do Produto	Aspecto/Cor	*Dosagem Recomendada (% SPC)	Massa Específica g/cm ³ (NBR 10908)
MIRA FLOW 920	Produto especialmente desenvolvido para modificar a viscosidade do concreto e facilitar seu bombeamento, mesmo em concretos com baixa relação água/cimento. Possui excelente poder dispersante e manutenção de abatimento prolongada.	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,080 – 1,120
MIRA FLOW 929	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,025 - 1,065
MIRA FLOW 940	Alta redução de água e elevado poder dispersante e manutenção de abatimento	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,0%	1,070 – 1,110
MIRA FLOW 966	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,025 - 1,065

	resistências			
MIRA FLOW 968	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,070 – 1,110
MIRA FLOW 973	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,030 - 1,070
MIRA FLOW 982	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,060 - 1,100
MIRA FLOW 985	Alta redução de água, alto poder dispersante, excelente manutenção e abatimento sem retardo e altas resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,075 - 1,115

ANEXO B – FICHA TÉCNICA DA RESINA EPÓXI

Viapoxi Adesivo

Adesivo estrutural fluido à base de resina epóxi

DESCRIÇÃO:

Viapoxi Adesivo é um adesivo bi-componente de base epóxi, de fluidez controlada, indicado para colagem de concreto, aço, alumínio, cerâmico e outros.

UTILIZAÇÃO

Colagem e reparo estrutural (concreto velho com novo);

Ancoragem de aço em concreto com furos em vários diâmetros;

Fixação de chumbadores, guias, dormentes e apoios estruturais;

Reposição de pavimentos de concreto;

Juntas de concretagens (junta fria);

Colagem de elementos pré-moldados;

Colagem de cerâmica (azulejo), madeira, alumínio e ferro.

VANTAGENS:

Elevado poder de aderência e resistências mecânicas, superiores a do próprio concreto;

Aplicação em superfície com inclinações variáveis (vertical e horizontal);

Sua fluidez permite fácil aplicação através de trincha ou pincel. Maior desempenho e rendimento;

Pode ser aplicado sobre superfície úmida;

Impermeável;

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Característica:	Especificação:	Unidade:
Massa Específica:	1,60	g/cm ³
Tempo para aplicação (23°C):	1 a 2	Horas
Cura inicial:	24	Horas

Cura final:	7	Dias
Resistência à compressão (01 dia):	>40	MPa
Resistência à compressão (07 dias):	>60	MPa
Temperatura de aplicação:	5 a 35	°C

INSTRUÇÃO DE USO

Preparação da superfície

A superfície deverá estar sólida, sem partículas soltas, limpa, livre de impregnações, como óleo, graxa, nata de cimento, ferrugens, etc. Em se tratando de substratos cimentícios poderá haver umidade, porém, sem saturação. Superfícies lisas de concreto devem ser apicoadas ou escarificadas, de forma a se obter uma superfície íntegra e rugosa. Películas de cura química e pinturas existentes deverão ser removidas do substrato.

PREPARAÇÃO DO PRODUTO

Recomenda-se iniciar a mistura do produto somente após a superfície preparada.

Faça uma pré-mistura separadamente dos componentes A e B. Em seguida, despeje todo o conteúdo do componente B (endurecedor) ao recipiente do componente A, e proceda a mistura do **Viapoxi Adesivo** com o uso de espátula por no mínimo 3 minutos, até se obter um material homogêneo e sem grumos. Aplique em seguida.

APLICAÇÃO DO PRODUTO

Para Colagem:

Aplique o **Viapoxi Adesivo** utilizando trincha ou pincel, formando uma camada da ordem de 2 mm de espessura. Aplique o produto sobre o substrato, observando a eficiência da penetração e a completa cobertura da superfície. O material a ser colado deve entrar em contato com o **Viapoxi Adesivo** ainda em seu estado pegajoso. Em caso de colagem de concreto, microconcreto, graute, ou argamassa ao elemento estrutural de concreto, lance-os sobre o adesivo dentro do prazo máximo de 2 horas considerando temperatura de 20 °C.

Para Fixação e Ancoragem de Tirantes/ Barras de Aço:

As locações e as dimensões das perfurações (diâmetro e profundidade dos furos) devem seguir o projeto. O diâmetro do furo deve ter dimensão padrão superior ao diâmetro da barra de aço.

Recomenda-se que a espessura de colagem seja no mínimo de 2 mm. O **Viapoxi Adesivo** deve ser vertido para dentro do furo com volume suficiente para preencher todo o espaço entre a barra de aço e o concreto. Em seguida, introduza a barra de aço previamente limpa, efetuando um leve movimento de giro sobre si e mantenha a barra imobilizada até o endurecimento inicial da resina.

Para colagem de placas metálicas:

Em reforços estruturais com chapas metálicas o dimensionamento das chapas deve seguir conforme projeto. As chapas devem ser providas de pequenos furos espaçados a cada 15 cm, de modo a permitir a saída do ar no momento da colagem. A chapa metálica deve passar por processo de limpeza e estar seca para receber o **Viapoxi® Adesivo**. Aplicar o adesivo numa espessura mínima de 2,0mm. Horas antes ao serviço da colagem, ancorar no concreto, parafusos de fixação da chapa utilizando o próprio produto. Pressionar a chapa contra o concreto e apertar as porcas dos parafusos procurando obter-se uma espessura de colagem uniforme. Manter a chapa sem movimento durante, pelo menos 24h.

Liberação para carregamento após 7 dias.

Em temperaturas inferiores a +10°C, recomendamos o aquecimento indireto (banho-maria) do Componente A até no mínimo de +20°C e máximo de 35°C, ou preferencialmente manter as embalagens em local aquecido antes de sua utilização.

CONSUMO

Pintura: 1,6 kg/m².

Ancoragens e fixações: 1600 kg/m³.

VALIDADE E ESTOCAGEM

O produto tem validade de 12 meses, a partir da data de fabricação, desde que armazenado em local coberto, seco, ventilado e nas embalagens originais e intactas.

RECOMENDAÇÕES

Limpar as ferramentas que tiveram contato com o produto, com solventes tais com: Toluol, aguarrás, álcool, etc. Após o endurecimento, só é possível a remoção mecanicamente.

RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA

Antes de iniciar os trabalhos consultar a FISPQ dos produtos.

Utilize EPI's adequados como luvas e mascara de proteção facial, botas impermeáveis e óculo de segurança.

Durante o manuseio do produto, manter o ambiente ventilado até a secagem completa. Em caso de contato com a pele, lavar a região com água e sabão neutro.

No caso de contato com os olhos, lavar com água potável em abundância por no mínimo 15 minutos e procurar orientação médica.

Eventual irritação da pele, olhos ou ingestão do produto, procurar orientação médica, informando sobre o tipo de produto.

Em caso de ingestão, não induza o vômito e procure auxilio médico imediatamente.

CUIDADOS AMBIENTAIS

Não descarte o produto ou embalagem no meu ambiente. Realizar o descarte em local apropriado e regulamentado de acordo com legislação vigente do meio ambiente local. Não reutilize as embalagens.

ANEXO C – RESULTADOS DAS TITULAÇÕES E TEORES DE CLORETO

PRIMEIRA IDADE

Traço 1 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	13	13,25	13,3	13,18333	0,659018	1,16137E-09
2ª camada	10,75	10,8	10,65	10,73333	0,536546	
3ª camada	8,55	8,75	8,85	8,716667	0,435735	
4ª camada	8,25	8,2	8,25	8,233333	0,411574	

Traço 1 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ªcamada	13,5	13,7	13,6	13,6	0,679847	1,14834E-09
2ª camada	10,5	10,75	10,65	10,63333	0,531547	
3ª camada	8,8	9,25	9,2	9,083333	0,454064	
4ª camada	8,1	8,4	8,35	8,283333	0,414073	

Cs1	0,7215
Cs2	0,7386
C0	0,412823595
Dmed	1,15486E-09

Traço 1 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	11,75	12	11,9	11,88333	0,594033	1,11188E-09
2ª camada	9,8	10	9,95	9,916667	0,495722	
3ª camada	7,25	8	7,8	7,683333	0,38408	
4ª camada	7,25	7,25	7,1	7,2	0,359919	

Traço 1 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	11,2	11,65	11,7	11,51667	0,575704	1,20567E-09
2ª camada	9,75	10	9,9	9,883333	0,494055	
3ª camada	7,8	7,95	7,9	7,883333	0,394078	
4ª camada	7,3	7,55	7,5	7,45	0,372416	

Cs1	0,6619
Cs2	0,6365
C0	0,366167447
Dmed	1,15877E-09

Traço 2 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	12,75	13,05	12,95	12,91667	0,645688	1,23512E-09
2ª camada	10,6	10,45	10,5	10,51667	0,525715	
3ª camada	8,75	9,05	9	8,933333	0,446566	
4ª camada	8,3	8,5	8,45	8,416667	0,420738	

Traço 2 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	10,05	10,45	10,35	10,28333	0,514051	1,50936E-09
2ª camada	9,1	9,15	9,05	9,1	0,454897	
3ª camada	8,25	8,45	8,4	8,366667	0,418239	
4ª camada	7,55	7,8	7,75	7,7	0,384913	

Cs1	0,6982
Cs2	0,549
C0	0,402825849
Dmed	1,37224E-09

Traço 2 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)

	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	13,75	13,55	13,6	13,63333	0,681513	1,06583E-09
2ª camada	9,95	10,45	10,3	10,23333	0,511551	
3ª camada	8,5	8,75	8,7	8,65	0,432403	
4ª camada	7,55	7,95	7,85	7,783333	0,389079	

Traço 2 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	13,75	13,4	13	13,38333	0,669016	1,14948E-09
2ª camada	9,55	9,75	9,7	9,666667	0,483224	
3ª camada	8,3	8,65	8,6	8,516667	0,425737	
4ª camada	8,15	8,2	8,25	8,2	0,409908	

Cs1	0,7427
Cs2	0,7057
C0	0,399493267
Dmed	1,10765E-09

Traço 3 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	13,2	13,9	13,8	13,63333	0,681513	1,22293E-09
2ª camada	11,45	11,75	11,7	11,63333	0,581536	
3ª camada	9,9	10,35	10,2	10,15	0,507386	
4ª camada	8,45	8,7	8,65	8,6	0,429903	

Traço 3 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	14,85	15,5	15,5	15,28333	0,763994	1,19213E-09
2ª camada	12	12,55	12,4	12,31667	0,615695	
3ª camada	10,5	11	10,85	10,78333	0,539045	
4ª camada	9,45	9,55	9,5	9,5	0,474893	

Cs1	0,7573
Cs2	0,8344
C0	0,452398007
Dmed	1,20753E-09

Traço 3 0,77%

	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	14,8	15	14,9	14,9	0,744832	1,42213E-09
2ª camada	12,55	12,85	12,8	12,73333	0,636523	
3ª camada	11,1	11,6	11,4	11,36667	0,568205	
4ª camada	10,6	10,9	10,8	10,76667	0,538212	

Traço 3 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	15,35	15,85	15,7	15,63333	0,78149	1,34612E-09
2ª camada	12,7	12,6	12,85	12,71667	0,63569	
3ª camada	12,15	12,35	12,3	12,26667	0,613195	
4ª camada	10,3	10,6	10,5	10,46667	0,523215	

Cs1	0,794
Cs2	0,8377
C0	0,530713684
Dmed	1,38413E-09

SEGUNDA IDADE

Traço 1 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	18,15	18,4	18,35	18,3	0,914794	1,29841E-09
2ª camada	15	14,8	14,85	14,88333	0,743999	
3ª camada	14,25	14,15	14,2	14,2	0,70984	
4ª camada	13,1	13,45	13,3	13,28333	0,664017	

Traço 1 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	18,05	17,95	17,9	17,96667	0,898131	1,25533E-09
2ª camada	14,7	14,9	14,85	14,81667	0,740666	
3ª camada	13,5	13,45	13,7	13,55	0,677347	
4ª camada	12,7	12,95	12,9	12,85	0,642355	

Cs1	0,9548
Cs2	0,9473
C0	0,653186072

Dmed	1,27687E-09
------	-------------

Traço 1 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	18,5	18,4	18,45	18,45	0,922292	1,25208E-09
2ª camada	15,65	15,75	15,8	15,73333	0,786489	
3ª camada	14,35	14,55	14,6	14,5	0,724837	
4ª camada	12,95	13,15	13,05	13,05	0,652353	

Traço 1 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	18,65	18,7	18,55	18,63333	0,931457	1,26688E-09
2ª camada	15,95	16,1	16	16,01667	0,800653	
3ª camada	14,85	14,7	14,9	14,81667	0,740666	
4ª camada	13,3	13,35	13,2	13,28333	0,664017	

Cs1	0,9894
Cs2	0,9998
C0	0,658184945
Dmed	1,25948E-09

Traço 2 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	17,3	17,75	17,6	17,55	0,877302	1,22341E-09
2ª camada	14,2	14,7	14,65	14,51667	0,72567	
3ª camada	13,5	13,9	13,85	13,75	0,687345	
4ª camada	12,25	11,95	12	12,06667	0,603197	

Traço 2 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	17,75	17,55	17,6	17,63333	0,881468	1,17854E-
2ª camada	15	14,95	14,8	14,91667	0,745665	09

3ª camada	13,8	13,3	13,45	13,51667	0,675681
4ª camada	11,8	11,95	11,9	11,88333	0,594033

Cs1	0,9385
Cs2	0,9573
C0	0,598615042
Dmed	1,20098E-09

Traço 2 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	18,75	18,8	19	18,85	0,942288	1,22862E-09
2ª camada	15,95	16,2	16,25	16,13333	0,806485	
3ª camada	14,5	14,45	14,3	14,41667	0,720671	
4ª camada	13,2	13,35	13,25	13,26667	0,663184	

Traço 2 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	18,65	18,5	18,7	18,61667	0,930624	1,14154E-09
2ª camada	15,25	15,6	15,55	15,46667	0,773159	
3ª camada	13,8	13,6	13,55	13,65	0,682346	
4ª camada	12,2	12,5	12,35	12,35	0,617361	

Cs1	1,0139
Cs2	1,0085
C0	0,640272317
Dmed	1,18508E-09

Traço 3 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	23	23,2	22,95	23,05	1,15224	9,55773E-10
2ª camada	16,85	16,85	17	16,9	0,84481	
3ª camada	14,7	14,5	14,45	14,55	0,727336	
4ª camada	13	13,5	13,3	13,26667	0,663184	

Traço 3 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)

1ª camada	22,5	22,4	22,35	22,41667	1,120581	9,68941E-10
2ª camada	16,5	16,4	16,55	16,48333	0,823981	
3ª camada	14,1	14,6	14,45	14,38333	0,719005	
4ª camada	12,8	13,2	13	13	0,649853	

Cs1	1,2431
Cs2	1,2076
C0	0,656518654
Dmed	9,62357E-10

Traço 3 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	24	23,5	23,45	23,65	1,182233	9,77779E-10
2ª camada	17,8	17,7	17,55	17,68333	0,883967	
3ª camada	15,1	15,35	15,4	15,28333	0,763994	
4ª camada	13,9	13,8	13,85	13,85	0,692344	

Traço 3 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	23,5	23,4	23,7	23,53333	1,176401	9,48143E-10
2ª camada	16,95	17,25	17,15	17,11667	0,85564	
3ª camada	15,15	14,9	14,9	14,98333	0,748998	
4ª camada	13,1	13,5	13,45	13,35	0,66735	

Cs1	1,278
Cs2	1,2705
C0	0,679846728
Dmed	9,62961E-10

TERCEIRA IDADE

Traço 1 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	19,75	19,8	19,5	19,68333	0,983945	1,07991E-09
2ª camada	17	17,2	16,8	17	0,849808	
3ª camada	15,5	15,25	15,7	15,48333	0,773992	

4ª camada	13,5	13,45	13,3	13,41667	0,670682	
Traço 1 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	19,8	19,55	19,7	19,68333	0,983945	1,07321E-09
2ª camada	17,4	17,9	17	17,43333	0,87147	
3ª camada	15,4	15,7	15,8	15,63333	0,78149	
4ª camada	13,4	13,3	13,4	13,36667	0,668183	

Cs1	1,0735
Cs2	1,0856
C0	0,669432409
Dmed	1,07656E-09

Traço 1 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	19,3	19,5	19,75	19,51667	0,975613	1,0176E-09
2ª camada	16,1	16,05	16,4	16,18333	0,808984	
3ª camada	14,25	14,15	14,1	14,16667	0,708174	
4ª camada	12,9	12,85	12,9	12,88333	0,644021	

Traço 1 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª camada	19,75	19,75	19,7	19,73333	0,986444	1,00201E-09
2ª camada	16,3	16,5	16,2	16,33333	0,816483	
3ª camada	14	14	14,15	14,05	0,702342	
4ª camada	13	12,8	13	12,93333	0,646521	

Cs1	1,0581
Cs2	1,0714
C0	0,64527119
Dmed	1,00981E-09

Traço 2 0,38%

	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	20,75	20,8	20,6	20,71667	1,0356	1,03265E-09
2ª camada	18,05	17,75	18	17,93333	0,896465	
3ª camada	15,05	15,2	14,9	15,05	0,75233	
4ª camada	14	13,95	14,1	14,01667	0,700675	

Traço 2 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	20,8	20,9	20,55	20,75	1,037266	1,03187E-09
2ª camada	18	18	17,9	17,96667	0,898131	
3ª camada	15,1	15,1	15	15,06667	0,753164	
4ª camada	14,1	13,9	14,1	14,03333	0,701509	

Cs1	1,1335
Cs2	1,1356
C0	0,701091938
Dmed	1,03226E-09

Traço 2 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	20	20,1	19,9	20	0,999775	1,15252E-09
2ª camada	18,2	18,15	17,95	18,1	0,904796	
3ª camada	15,65	15,75	15,8	15,73333	0,786489	
4ª camada	14,6	14,65	14,4	14,55	0,727336	

Traço 2 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	20,15	20,1	19,9	20,05	1,002274	1,10257E-09
2ª camada	18	17,9	17,95	17,95	0,897298	
3ª camada	15,65	15,6	15,8	15,68333	0,78399	
4ª camada	14,5	14,35	14,7	14,51667	0,72567	

Cs1	1,0835
-----	--------

Cs2	1,1048
C0	0,726502876
Dmed	1,12754E-09

Traço 3 0,38%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	25	24,8	24,85	24,88333	1,243886	9,79869E-10
2ª camada	21,05	21,1	20,85	21	1,049763	
3ª camada	17,55	17,85	17,8	17,73333	0,886467	
4ª camada	16,05	15,95	16,05	16,01667	0,800653	

Traço 3 0,38%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	24,7	24,95	25,05	24,9	1,244719	9,8562E-10
2ª camada	21,1	21,1	20,95	21,05	1,052263	
3ª camada	18	17,55	17,9	17,81667	0,890633	
4ª camada	16,15	16,2	15,95	16,1	0,804819	

Cs1	1,3684
Cs2	1,3684
C0	0,802735689
Dmed	9,82744E-10

Traço 3 0,77%						
	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	26,85	26,6	26,45	26,63333	1,331367	1,04367E-09
2ª camada	22,05	21,95	21,9	21,96667	1,098086	
3ª camada	19,25	19,05	19,4	19,23333	0,96145	
4ª camada	18,1	17,85	18,15	18,03333	0,901463	

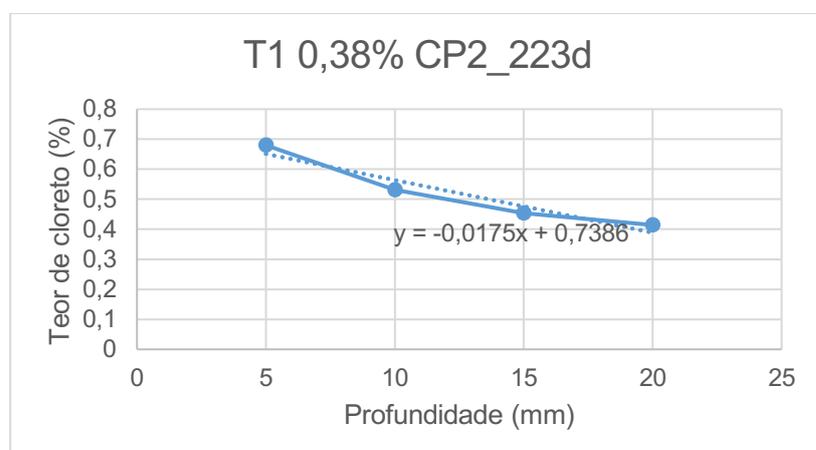
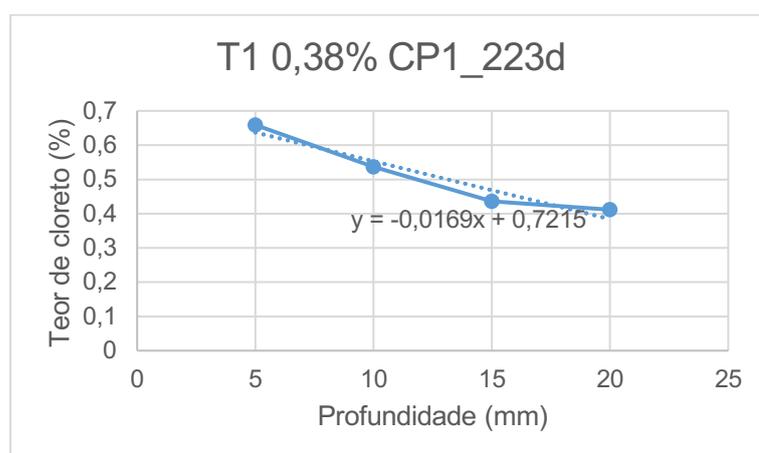
Traço 3 0,77%						
	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1ª camada	26,8	26,7	26,6	26,7	1,334699	1,04935E-09
2ª camada	22	21,8	21,8	21,86667	1,093087	
3ª camada	19,45	19,5	19,4	19,45	0,972281	

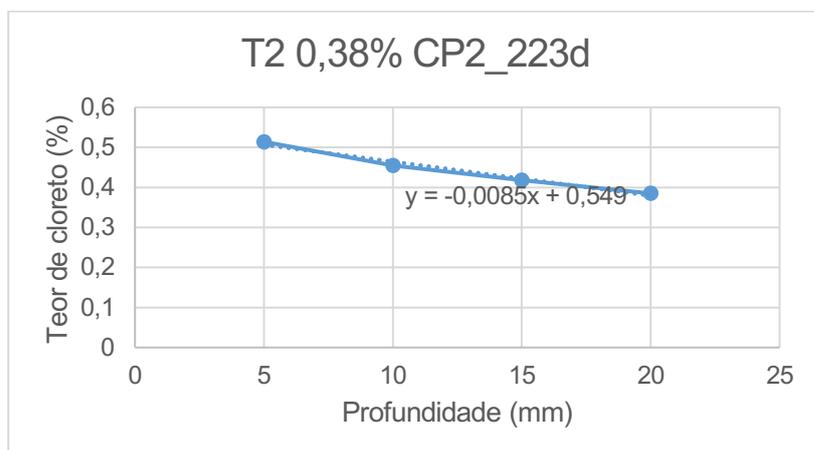
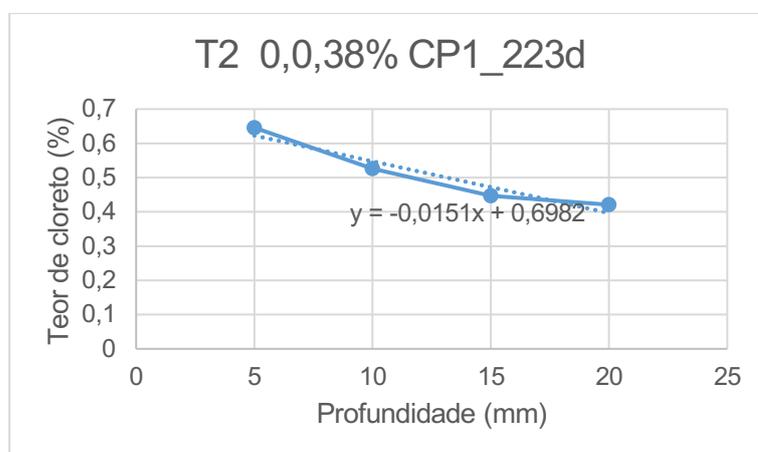
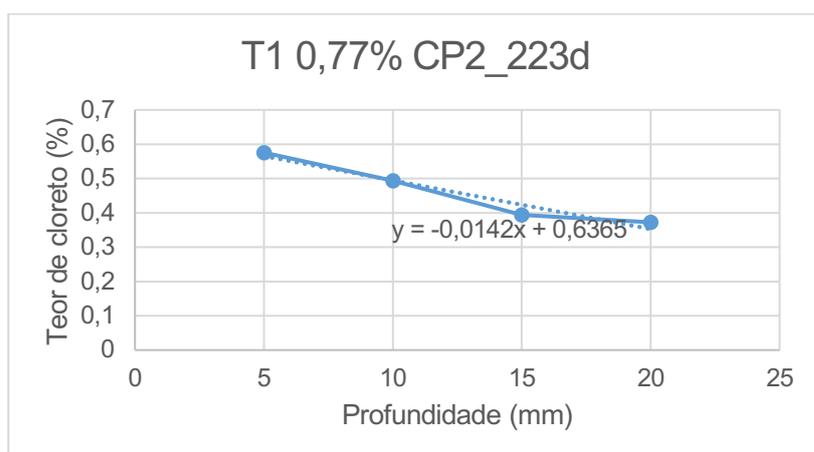
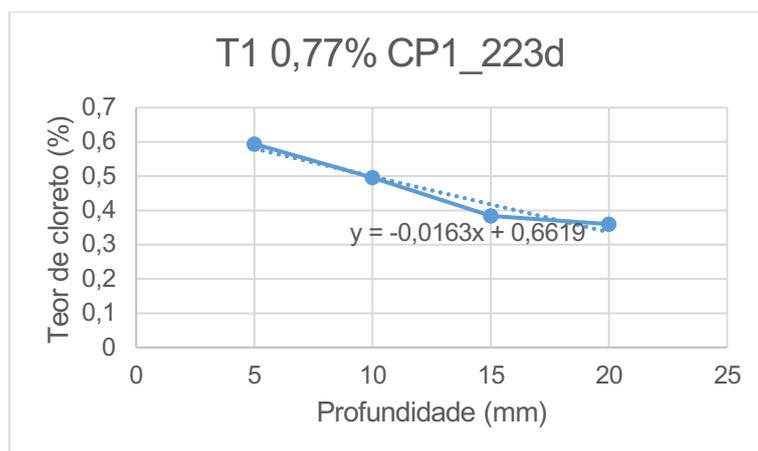
4ª camada	18,2	18,1	17,95	18,08333	0,903963
-----------	------	------	-------	----------	----------

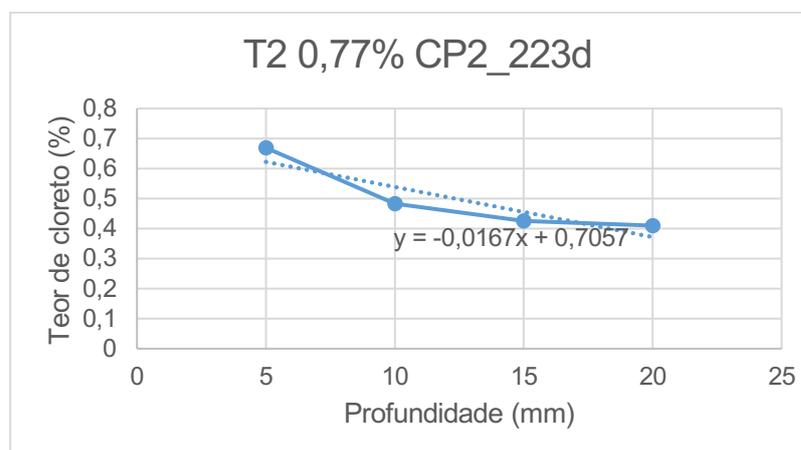
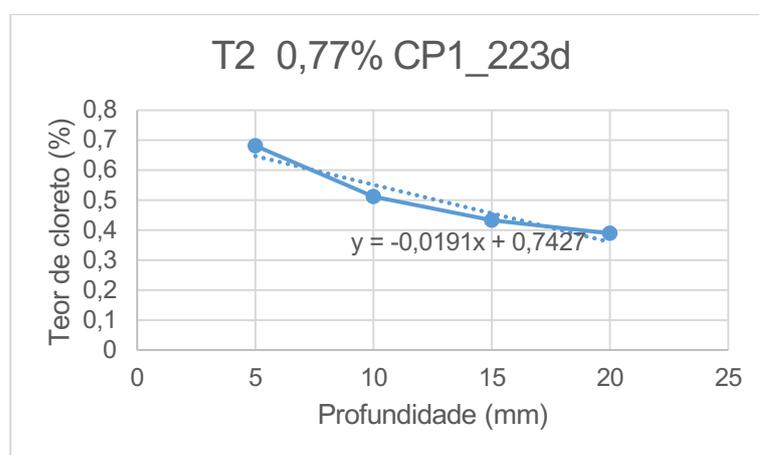
Cs1	1,4297
Cs2	1,4293
C0	0,902713149
Dmed	1,0468E-09

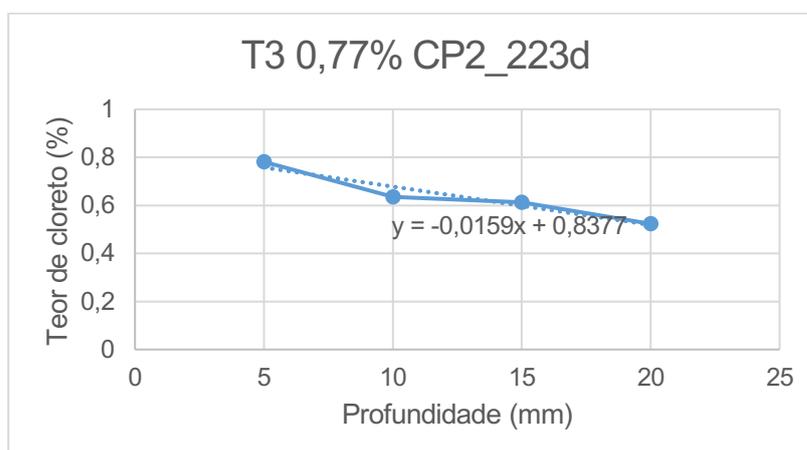
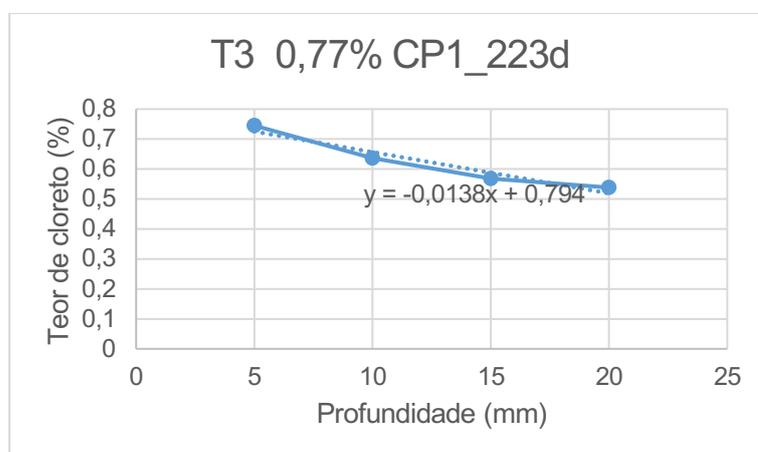
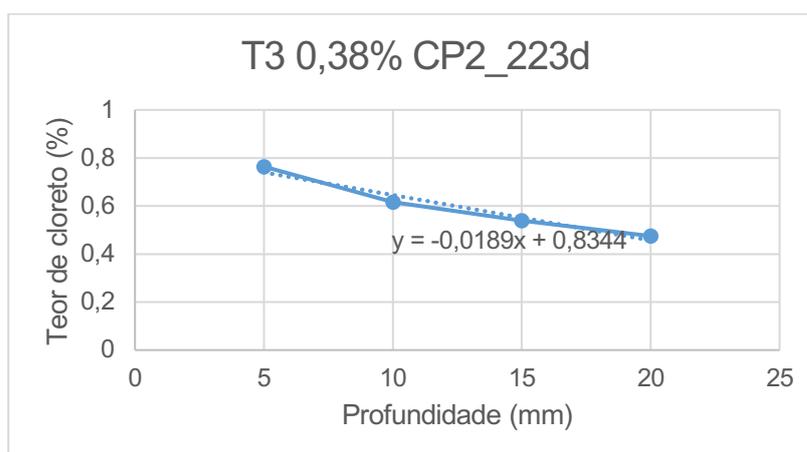
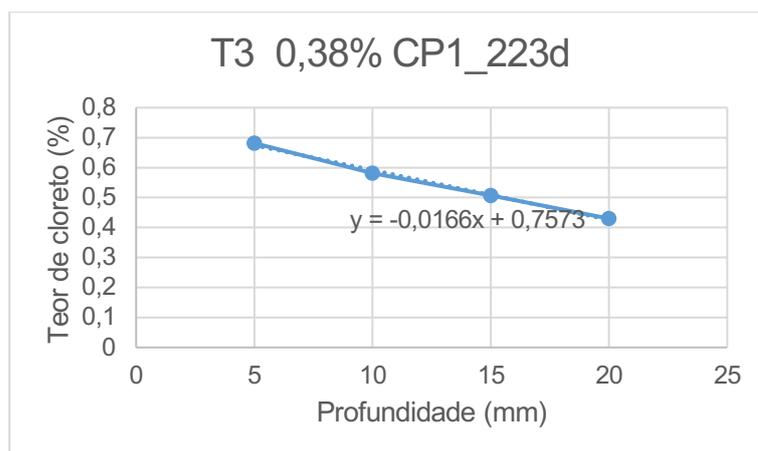
ANEXO D – GRÁFICOS DOS PERFIS DE TEORES DE CLORETO

PRIMEIRA IDADE

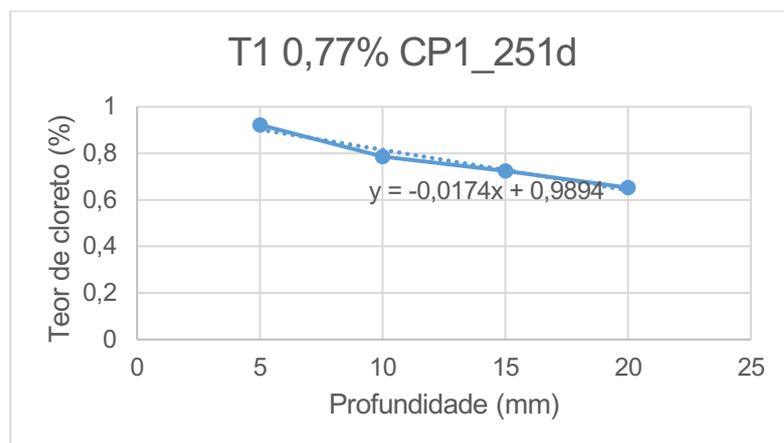
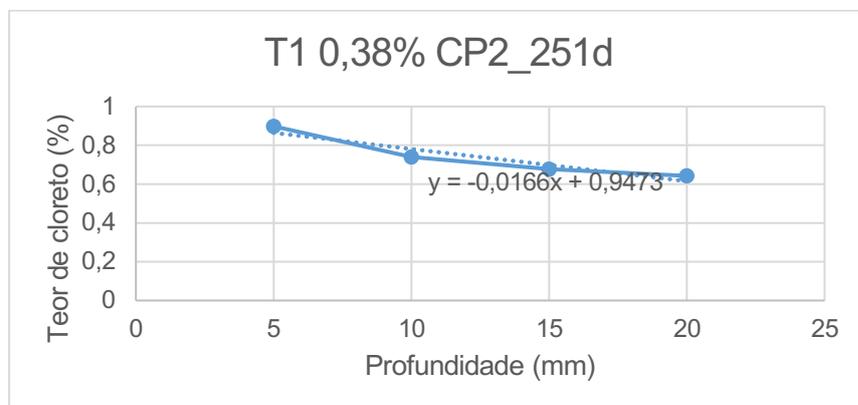
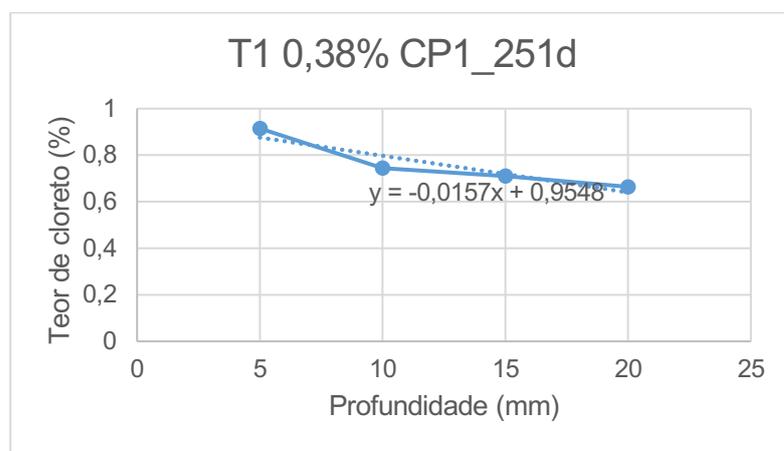


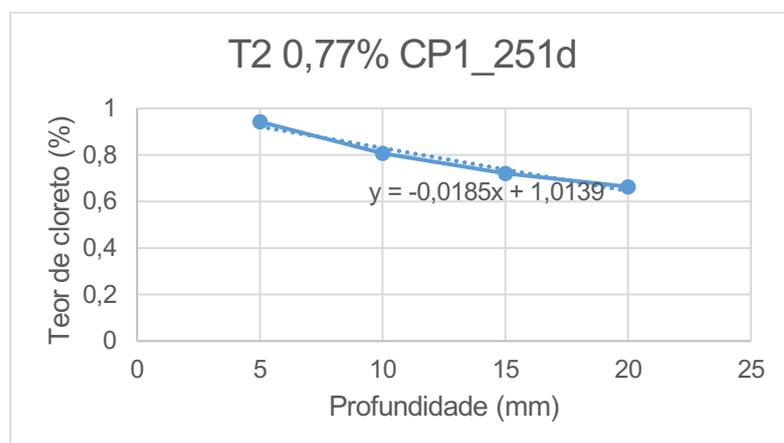
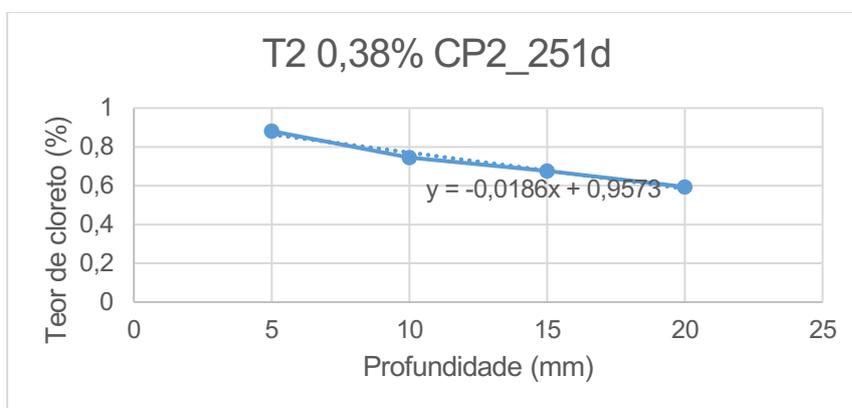
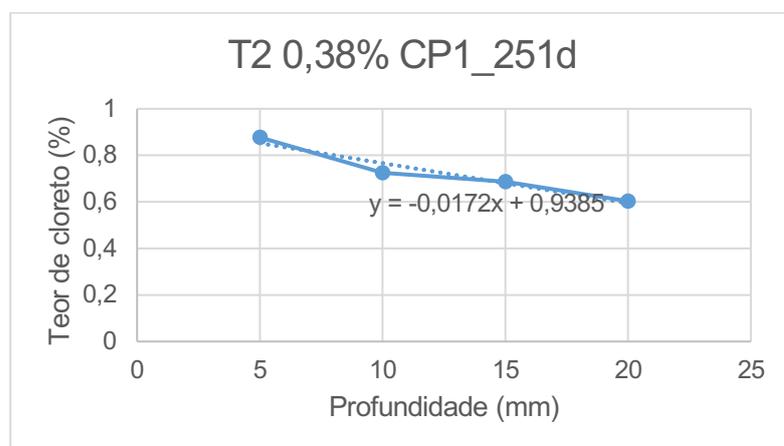
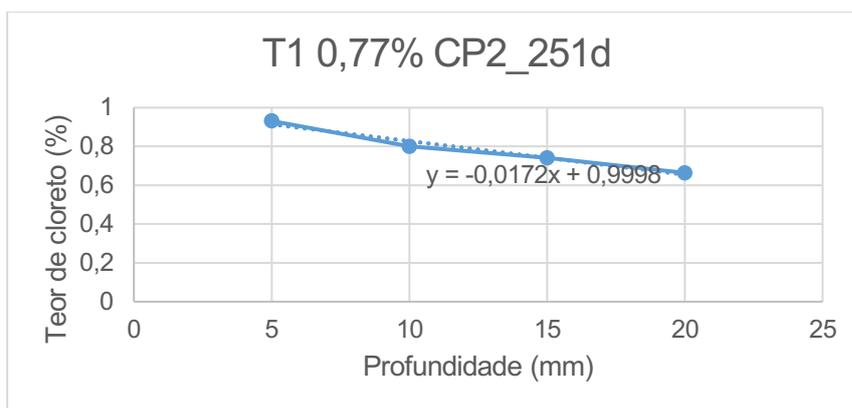


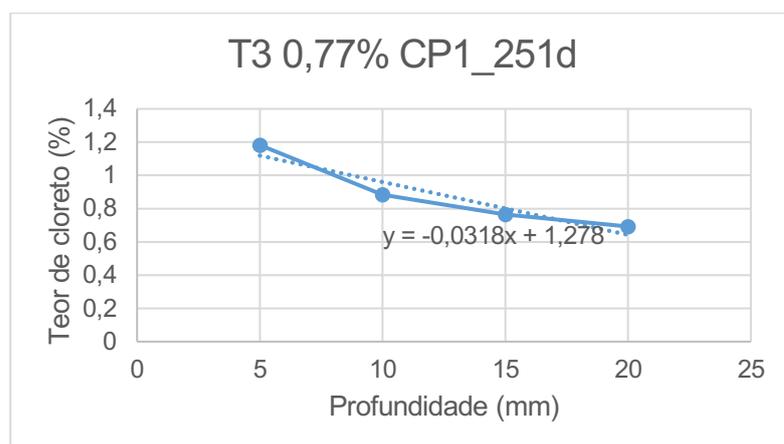
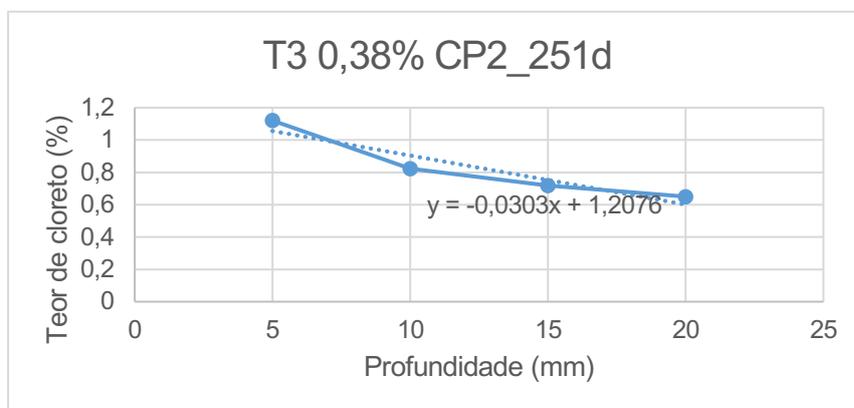
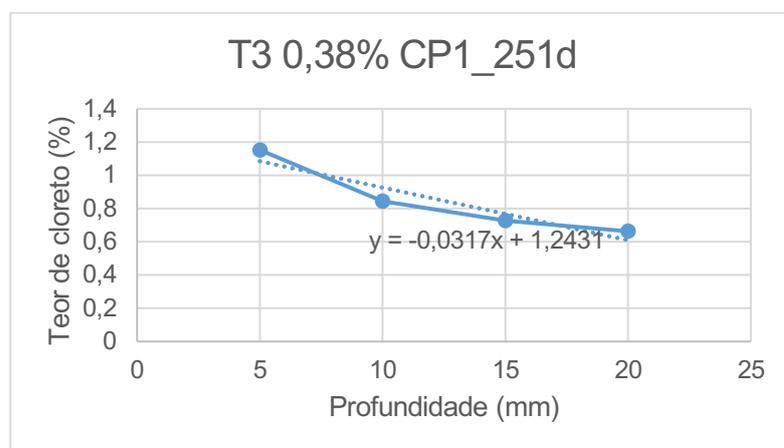
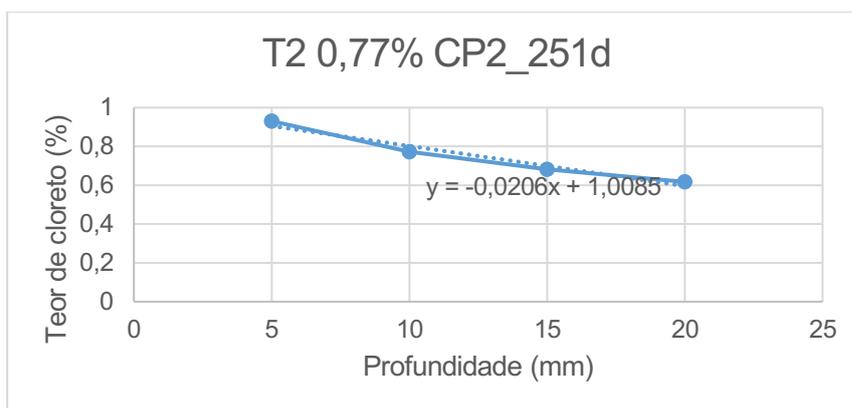


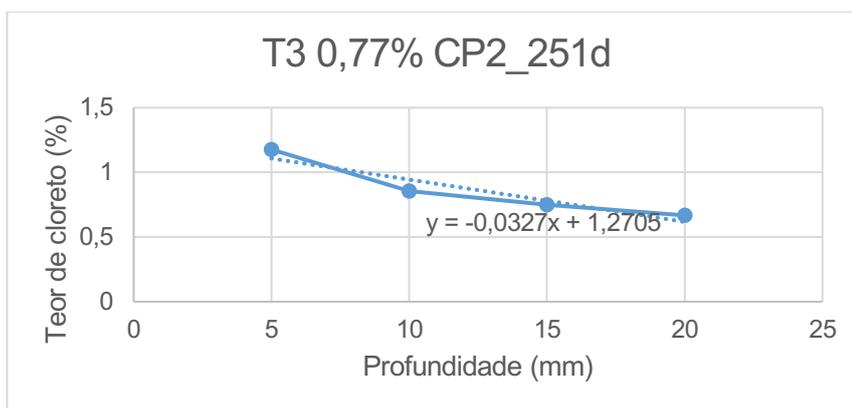


SEGUNDA IDADE









TERCEIRA IDADE

