



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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

Pedro Rodrigues Morais Macedo – 11611ECV035

Uberlândia

2020

Pedro Rodrigues Morais Macedo

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO EM
CONCRETOS 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: Profº. Dr. Antonio Carlos
dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Prof. Dr. Márcio Augusto Reolon Schmidt

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Aluno: Pedro Rodrigues Morais Macedo

Uberlândia
2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me conceder vitalidade, força, ânimo e motivação para superar os momentos de questionamentos e dificuldades durante a graduação. Também agradeço a minha família e amigos, pelo apoio incondicional prestado e em especial, aos meus pais Jair e Maria Aparecida, 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 e paciência durante a execução do experimento. Por fim, agradeço ao Prof.Dr. Antonio Carlos dos Santos, que se mostrou presente, disponível e compreensivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Sem vocês, isso não seria possível.

Lista de figuras

Figura 1 - Representação do modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)...	13
Figura 2 - Representação do modelo de vida útil proposto por Helene (1993)	14
Figura 3 - Causas das manifestações patológicas	22
Figura 4 - Água de um canal que contém sulfatos	28
Figura 5 - Degradação do concreto por água sulfatosa	28
Figura 6 - Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto.....	30
Figura 7 - Trincas causadas pela proximidade com raízes de árvores	34
Figura 8 - Influência da relação água/cimento no coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento.....	41
Figura 9 - Esquema do processo de difusão de cloretos nos métodos de imersão	43
Figura 10 - Representação do método proposto por Guimarães e Helene (2007)	44
Figura 11 - Esquema do ensaio de migração de íons	44
Figura 12 - Fluxograma de atividades do procedimento experimental	46
Figura 13 - Agregado miúdo (tipo areia média) e graúdo (tipo brita 1), utilizados para confecção do concreto	47
Figura 14 - Corpos-de-prova no processo de cura por imersão	49
Figura 15 - Ensaio de resistência à compressão.....	50
Figura 16 - Vedação dos corpos-de-prova com resina epóxi	51
Figura 17 - Contaminação por NaCl do concreto	52
Figura 18 - Desenho esquemático dos furos.....	53
Figura 19 - Extração do material pulverulento.....	53
Figura 20 - Obtenção do material pulverulento	54
Figura 21 - Amostras extraídas na primeira idade.....	54
Figura 22 - Filtragem das amostras.....	55
Figura 23 - Solução após a filtragem.....	56
Figura 24 - Adição do AgNO_3 à solução com K_2CrO_4	57
Figura 25 - Início da reação do AgNO_3 em contato com a solução com K_2CrO_4	57
Figura 26 - Diferença de coloração obtida ao final da titulação.....	58
Figura 27 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão " D ".....	64

Figura 28 - Diagrama de caixa da concentração superficial "Cs".....	65
---	----

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental	37
Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal	38
Tabela 3 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto	40
Tabela 4 - Classificação do concreto frente à penetrabilidade de cloretos, de acordo com a norma ASTM C1202:2009	45
Tabela 5 - Granulometria da areia.....	47
Tabela 6 - Granulometria da brita.....	48
Tabela 7 - Traços utilizados na dosagem dos concretos	48
Tabela 8 - Classes de resistência e quantidade de corpos-de-prova produzidos	49
Tabela 9 - Resistência à compressão aos 28 dias	50
Tabela 10 – Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C20, C25 e C40.....	61
Tabela 11 – Resultados do Cs e D para a classe de resistência C20	62
Tabela 12 – Resultados do Cs e D para a classe de resistência C25.....	62
Tabela 13 – Resultados do Cs e D para a classe de resistência C40	63

RESUMO

A durabilidade e a vida útil de uma estrutura são aspectos essenciais para a garantia de que esta cumpra sua função social e forneça segurança e conforto para o usuário. Em se tratando dos fatores que possam vir a reduzir a durabilidade de um edifício, destacam-se os mecanismos patológicos do concreto, sendo que uma das patologias cuja ação é bastante acelerada e que merece atenção e precaução é o ataque de íons cloreto. Os íons cloreto, bastante presentes em ambientes localizados próximos ao litoral, são responsáveis por adentrar no concreto, penetrar em sua microestrutura e provocar a despassivação da armadura, e, por conseguinte, sua corrosão. A fim de se ampliar os conhecimentos acerca dessa patologia, propôs-se um estudo sobre o coeficiente de difusão desses íons, que indica a capacidade que um determinado tipo de concreto tem de resistir à penetração desse agente agressivo. Desse modo, a presente pesquisa visa analisar e estudar o comportamento do teor de cloreto, do coeficiente de difusão e da concentração superficial desses íons, em três classes de resistência do concreto (C20, C25 e C40), para três idades de contaminação (223, 251 e 279 dias) por *NaCl*, por meio de imersão em uma solução salina de concentração de 250g deste sal por litro de água. Após a contaminação dos corpos-de-prova, foram obtidas amostras das profundidades analisadas dos corpos-de-prova (5, 10, 15 e 20 milímetros), que foram submetidas a titulações, de modo a obter os teores de cloreto presente na respectiva profundidade do concreto, sendo possível traçar os perfis de penetração dos íons cloreto, para cada corpo-de-prova. Com os perfis de penetração traçados, foi possível concluir que as curvas dos teores de cloreto decrescem em função da profundidade, o que indica teores menores de cloreto à medida que se afasta da superfície. Além disso, pôde-se obter os valores dos coeficientes de difusão e concentrações superficiais, que consistiram em números bastante similares entre as classes de resistências e idades de contaminação analisados. Notou-se também que a concentração superficial de cloreto tende a aumentar, à proporção que se aumenta o tempo de contaminação do concreto, sendo que esse aumento é mais significativo nas primeiras idades.

Palavras-chave: Cloreto, difusão, concreto.

ABSTRACT

The durability and the service life of an structure are very important aspects that guarantee that it accomplish its social function and provide security and comfort for the user. When it comes to the factors that can reduce the durability of a building, the pathological mechanisms of the concrete detach, and one of the pathologies that has a very fast action and deserves attention and precaution is the attack of ions chloride. The ions chloride, present in environments located close to the sea, are responsible to enter the concrete, penetrate in its microstructure, and provoke the depassivation of the steel bars, and consequently, its corrosion. With the purpose to increase the knowledge about this pathology, a study about the diffusion coefficient of these ions has been proposed, which indicates the capacity of a concrete to resist the penetration of this aggressive agent. Thus, this research's objective is to analyze and study the behavior of the chloride content, diffusion coefficient and the surface concentration of these ions, in three resistance classes of the concrete (C20, C25 and C40), for three different contamination ages (223, 251 and 279 days) by *NaCl*, with the immersion in a saline solution, whose concentration is 250 grams of this salt per liter of water. After the contamination of the specimens, it has been extracted samples of the depths analyzed (5, 10, 15 and 20 millimeters), that were submitted to titrations, to obtain the chloride contents present in the respective depth of the concrete, that became possible to obtain the penetration profile of chloride ions, for each specimen. With the penetration profile obtained, it was possible to conclude that the chloride contents' graphics, in function of the depths, are decrescents, which indicates smaller chloride contents as it moves away from the surface. Furthermore, the research was able to estimate the diffusion coefficients and surface concentrations, that consisted in very similar numbers, between the different resistance classes and contamination ages analyzed. It was also noticed that the surface chloride concentration tends to increase, in proportion to the rising of time that the concrete is exposed to these ions, and that increasing is more significant in the early ages.

Keywords: Chloride, diffusion, concrete.

SUMÁRIO

1 Introdução	10
2 Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto	12
3 Mecanismos de transporte de massa no concreto	16
3.1 Difusão.....	17
3.2 Permeabilidade	19
3.3 Sucção capilar	20
4 Mecanismos patológicos em estruturas de concreto.....	21
4.1 Carbonatação	23
4.2 Ação dos íons cloreto	25
4.3 Sulfato externo e interno.....	25
4.3.1 Reações químicas no ataque por sulfato.....	26
4.3.2 Sulfato externo.....	27
4.4 Reação Álcali-agregado.....	29
4.5 Gelo e degelo	31
4.6 Ataque biológico	33
5 Ação dos íons cloreto	36
5.1 Fontes de cloreto	38
5.2 Teores críticos de cloreto.....	39
5.3 Velocidade de penetração dos íons cloreto	40
5.4 Métodos de ensaio para determinação da penetração dos íons cloreto no concreto.....	42
6 Procedimento e planejamento experimental	46
6.1 Materiais utilizados na mistura do concreto	46
6.2 Definição dos traços	48
6.3 Produção dos corpos-de-prova.....	49
6.4 Início da contaminação e armazenamento	50
6.5 Extração do material	52

6.6 Análise do teor de cloretos no concreto.....	55
6.6.1 Titulação potenciométrica	55
6.6.2 Determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto	58
6.6.3 Determinação do perfil de cloretos, da concentração superficial de cloretos (Cs) e do coeficiente de difusão (D)	59
7 Resultados e discussões.....	61
7.1 Determinação da Concentração Superficial de cloretos e do Coeficiente de Difusão de íons cloreto.....	61
7.2 Análise comparativa dos coeficientes de difusão de íons cloreto	63
7.3 Análise comparativa das concentrações superficiais de íons cloreto.	64
8 Conclusões.....	66
REFERÊNCIAS.....	67
ANEXO A – Ficha técnica do aditivo	74
ANEXO B – Ficha técnica da resina epóxi	77
ANEXO C – Resultados das titulações e teores de cloreto.....	80
ANEXO D - Gráficos dos teores de cloreto em função da profundidade analisada, da classe de resistência C20, para as 3 idades de contaminação	86
ANEXO E - Gráficos dos teores de cloreto em função da profundidade analisada, da classe de resistência C25, para as 3 idades de contaminação	91
ANEXO F - Gráficos dos teores de cloreto em função da profundidade analisada, da classe de resistência C40, para as 3 idades de contaminação	96

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade e a vida útil de uma estrutura de concreto são fatores primordiais para a obtenção de uma edificação íntegra, segura e com longevidade. Sendo assim, novos estudos se fazem necessários para ampliar o conhecimento acerca dos elementos que possam vir a interferir no bom funcionamento e promover ações deletérias para a estrutura.

Durante as etapas da construção de um edifício, são tomadas diversas medidas visando a concepção de uma estrutura durável e que propicie conforto e segurança durante a sua utilização, como: adoção de uma camada de cobrimento da armadura, valores de resistência mínimos, classificação do ambiente quanto a sua agressividade em relação à estrutura, relação água/cimento máxima, qualidade mínima dos agregados e aglomerantes.

Quanto mais atenção oferecida a esses aspectos nas etapas de construção do edifício, menores serão as preocupações em relação à manutenção da estrutura, depois de finalizada a obra. Isso implica na redução de possíveis gastos com técnicas e procedimentos combativos à deterioração que, no viés econômico, representa despesas significativas.

Em se tratando da durabilidade do concreto armado, existem as patologias referentes ao concreto e às armaduras, que, por sua vez, podem possuir inúmeras causas, como: falhas na concepção ou execução do projeto, falta de qualidade dos materiais, manutenção precária ou controle de qualidade ineficaz.

As patologias referentes ao concreto são: fissuração, aparecimento de trincas, desagregação, eflorescências, dentre outros.

Já em relação às armaduras, é possível destacar a corrosão, causada pela carbonatação ou ação dos íons cloreto, que será objeto de estudo desse trabalho.

A ação dos íons cloreto representa uma importante causa de deterioração para a estrutura, visto que proporciona altos índices de corrosão. Isso acontece porque os íons cloreto, além de possuírem comportamento bastante agressivo, permanecem disponíveis para novas reações de corrosão, uma vez que não são consumidos no processo.

Vale ressaltar que, a corrosão causada por penetração de íons cloreto é uma patologia muito presente em empreendimentos próximos ou localizados nas costas

marítimas, como: edifícios e pontes em zonas costeiras, construções portuárias e estruturas *off-shore*, pois há, nesses locais, uma alta oferta de sais presente no ar e na água marinha.

Diante disso, faz-se necessário um estudo da penetração desses íons em diferentes classes de concreto, de modo a estabelecer uma relação entre o concreto analisado e a velocidade de propagação do cloreto, por meio do cálculo das grandezas coeficiente de difusão e concentração superficial, ambas relativas ao comportamento do íon.

Assim, esse trabalho representa um estudo necessário para ampliar os conhecimentos sobre o comportamento do íon cloreto, em diferentes classes de resistência de concreto, cuja importância tem fundamento em um maior entendimento deste tipo de patologia e das variáveis intervenientes nesse processo.

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o processo de penetração de íons cloreto em três diferentes classes de resistências, sendo elas: C20, C25 e C40, nas idades de contaminação de 223, 251 e 279 dias.

Para isso, os objetivos específicos são necessários, dentre eles:

- Determinar os traços e relação de a/c dos concretos;
- Compreender os mecanismos de transporte, manifestações patológicas, e possíveis causas pertinentes ao estudo;
- Determinar os coeficientes de difusão de íons cloreto e concentração superficial de cloreto nas três diferentes classes de resistência do concreto analisadas;
- Comparar os resultados encontrados, em relação aos diferentes traços e idades de contaminação analisados.

2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

A norma ABNT NBR 6118:2014 define “durabilidade” como a capacidade da estrutura de resistir às condições ambientais previstas no projeto, mantendo a segurança, estabilidade e aptidão em serviço, ao longo da sua vida útil.

Assim, o conceito de durabilidade envolve duas vertentes a serem analisadas: a estrutura em si e o meio ambiente em que ela está inserida.

O meio ambiente é determinante para a durabilidade, porque vai proporcionar situações que, no decorrer do tempo, poderão vir a prejudicar a segurança, estabilidade ou aptidão em serviço da estrutura. Dessa forma, a durabilidade não depende simplesmente das características dos materiais utilizados, mas também do resultado da interação da estrutura com o meio ambiente em que essa se insere (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Tais situações podem ser exemplificadas com a presença de agentes prejudiciais no ambiente da construção, como sulfatos e cloretos.

Cabe ao engenheiro, portanto, nas fases de projeto e execução da estrutura, pensar em estratégias que minimizem a influência dos efeitos ambientais que podem vir a se tornar maléficos para a estrutura. Nesse contexto, o engenheiro deve partir do pressuposto que a melhoria das condições ambientais é impraticável e, por conseguinte, a única maneira de evitar a degradação dos concretos é reduzir a vulnerabilidade do material ao acesso de agentes agressivos (SOUZA e RIPPER, 1998).

Diante desse contexto, o nível de agressividade do ambiente determinará as características que a estrutura deverá apresentar para não comprometer sua integridade. Assim, as normas NBR 6118 e NBR 12655 fixam requisitos específicos para o concreto em função do local de aplicação, a fim de que o mesmo resista aos agentes agressivos e a vida útil seja maximizada (Leite et al, 2018).

Esse raciocínio deve ser utilizado no momento de definição do traço do concreto, da relação água/cimento, agregados e cimento utilizados, bem como nas etapas de cura e adensamento do concreto, visto que, havendo um ambiente desfavorável à durabilidade da estrutura, é necessário que se retarde ao máximo a penetração desses agentes nocivos para o interior do concreto.

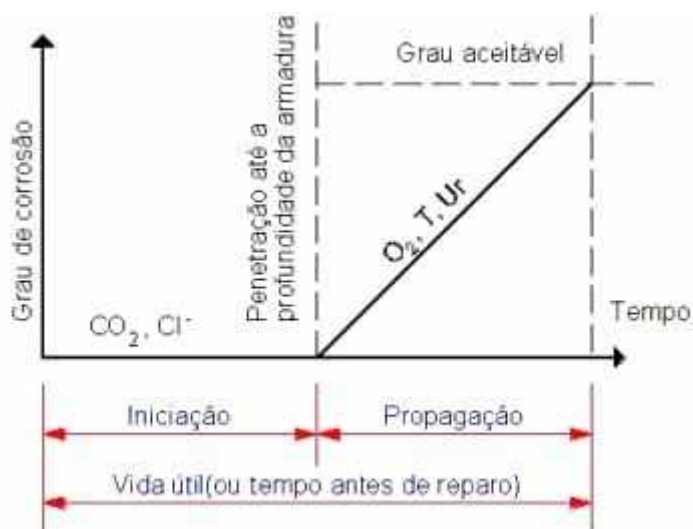
De acordo com Leite, Girard e Hastenpflug (2018), a relação água/cimento varia na razão inversa à resistência mecânica, pois à medida que esta relação aumenta, o

concreto se torna mais poroso, reduzindo a resistência mecânica, aumentando a permeabilidade, e, por conseguinte, reduzindo a durabilidade. Já em relação aos processos de cura e adensamento, caso estes processos sejam realizados de maneira correta, os concretos tendem a ser menos porosos. Diante desse contexto, os materiais e traço empregados influenciam diretamente nas propriedades físicas e químicas que são primordiais para durabilidade e resistência da estrutura de concreto armado.

Sendo assim, fez-se necessária a aproximação dessa durabilidade em valores quantitativos. A NBR 6118:2014 definiu, então, o conceito de vida útil de projeto como o período de tempo no qual se mantém as características da estrutura, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção previstos pelo projetista e pelo construtor.

No entanto, configura-se uma tarefa bastante difícil estimar a vida útil de uma estrutura de concreto, devido a quantidade de fatores envolvidos, seja referente ao meio ambiente ou ao próprio material em si. Deste modo, um modelo, proposto por Tuutti (1982), objetivou apresentar uma visão sobre a vida útil das estruturas de concreto, conforme se observa na Figura 1.

Figura 1 - Representação do modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)



Fonte: Tuutti (1982).

Neste modelo, Tuutti (1982) propõe a divisão da vida útil de uma estrutura de concreto em dois períodos: iniciação e propagação.

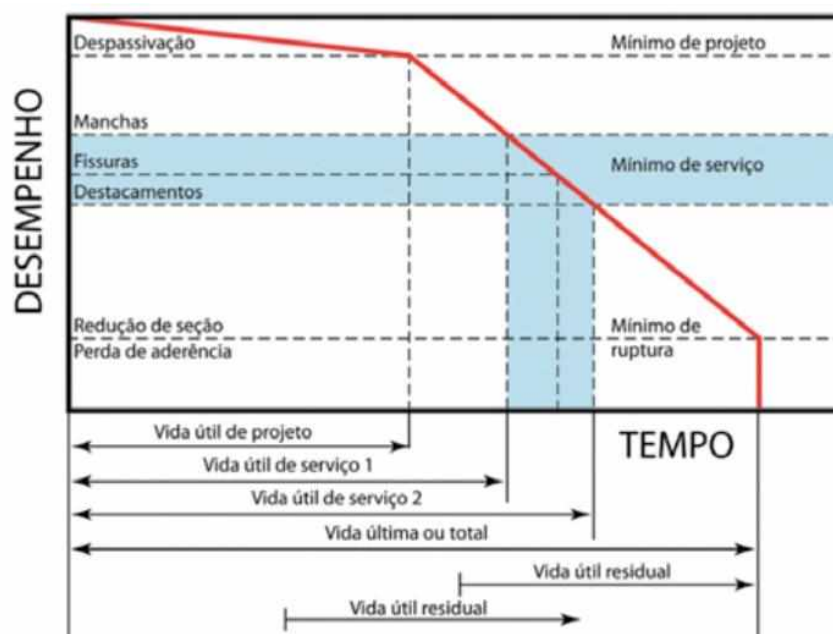
A iniciação é o tempo em que os agentes agressivos presentes no meio ambiente levam para penetrar a camada de cobertura, atingir a armadura e provocar a sua despassivação, que marca o início da corrosão da armadura. Contudo, o período de iniciação não representa danos perceptíveis ao material (Tuutti, 1982).

Já a propagação é o tempo em que a degradação se torna efetiva, o que proporciona o aparecimento de mecanismos patológicos, com a possibilidade de haver perda de seção da estrutura e fissuração (Tuutti, 1982).

Segundo Andrade (2005), os elementos estruturais (viga, pilar e laje) e os não-estruturais (drenos, juntas e aparelhos de apoio, por exemplo) possuem vida útil menor que a do concreto propriamente dito, sendo assim, estes serão determinantes para a vida útil da estrutura. Diante disso, a manutenção adequada desses elementos se faz primordial para a durabilidade da estrutura em questão.

A partir do modelo de Tuutti (1982), Helene (1993) propôs uma alternativa para se entender a vida útil de uma estrutura, com base em situações variadas possíveis em relação à corrosão das armaduras, representadas na Figura 2.

Figura 2 - Representação do modelo de vida útil proposto por Helene (1993)



Fonte: Helene (1993).

Com base na Figura 2, Helene (1993) propôs as seguintes definições:

- Vida útil de projeto: Período de tempo que vai até a despassivação da armadura, normalmente denominado de período de iniciação. Corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. É o período adotado no projeto da estrutura, a favor da segurança;
- Vida útil de serviço: Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento. É muito variável de um caso para outro, pois depende das exigências associadas ao uso da estrutura. Enquanto em certas situações é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão ou fissuras, em outros casos somente o início da queda de pedaços de concreto, colocando em risco a integridade de pessoas e bens, pode definir o momento a partir do qual se deve considerar terminada a vida útil de serviço;
- Vida útil última ou total: Período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. Corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura/concreto, o que pode acarretar o colapso parcial ou total da estrutura;
- Vida útil residual: Corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado nesse caso a partir de uma data qualquer, correspondente a uma vistoria. Essa vistoria e diagnóstico podem ser efetuados a qualquer instante da vida em uso da estrutura.

3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA NO CONCRETO

A durabilidade de uma peça de concreto armado depende de uma série de fatores, dentre eles destaca-se a velocidade com que os agentes nocivos presentes no ambiente penetram a estrutura, até atingir a armadura (SANTOS, 2006). Diante disso, Helene (1997) afirma que o estudo da durabilidade evoluiu devido ao conhecimento adquirido em relação aos mecanismos de transporte de fluidos em meios porosos. Faz-se preciso, então, uma elucidação sobre o movimento direcionado de massa, no interior do material em questão.

O concreto, por se tratar de um compósito, ele é propenso a possuir vazios, devido aos diferentes tamanhos e tipos de materiais utilizados na sua fabricação. Nesse sentido, são esses vazios que proporcionam o transporte de substâncias no seu interior.

É preciso minimizar a presença desses vazios, ou poros, buscando uma massa de concreto densa e bem compactada. De acordo com Ribeiro (2014), esses vazios formam uma rede conectada com o exterior, que é relevante para o processo de transporte de substâncias para o interior do concreto, e serve de fundamento para os mecanismos de degradação.

De acordo com o código *Comité Euro-international du Béton* (FIP-CEB) de 1989, existem diferentes tipos de poros, de diferentes diâmetros e origens. Quanto às origens, existem os poros capilares (oriundos da saída da água livre), poros de gel (oriundos da água de gel), poros de ar incorporado (originados pela adição de ar incorporado) e os poros de ar aprisionado (resultantes do condensamento do concreto). Já quanto aos diâmetros, os poros podem ser classificados em: macroporos, poros capilares e microporos, sendo os macroporos e os poros capilares aqueles mais relevantes para a durabilidade do material.

Os macroporos são aqueles com dimensões maiores que os demais, podendo atingir até 3mm (Mehta e Monteiro, 2014), e são decorrentes de ar incorporado ao concreto ou ar aprisionado durante o condensamento.

Já os poros capilares são resultantes da saída da água não participante do processo de hidratação da pasta cimentícia. Assim, o tamanho desses poros capilares depende, principalmente, de dois fatores: do grau de hidratação ocorrida na mistura e relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Ou seja, havendo uma maior hidratação na pasta, e uma relação água/cimento menor, as dimensões dos poros capilares serão reduzidas, quando comparados com uma hidratação menor e uma relação água/cimento maior.

Outra característica que faz com que os poros capilares facilitem o transporte de substâncias agressivas é que eles, geralmente, se encontram interligados uns aos outros.

Dessa maneira, em se tratando de mecanismos de transporte de massa no concreto, deve-se destacar a existência dos seguintes fenômenos: difusão, permeabilidade e sucção ou absorção capilar.

3.1 DIFUSÃO

A difusão é um processo espontâneo, de transporte de substâncias, seja no estado líquido ou gasoso, que ocorre por meio de um gradiente de concentrações (BENDER, 2016). Isto é, a substância será deslocada do meio mais concentrado para o meio menos concentrado, de forma a tentar eliminar essa diferença de concentrações.

De acordo com Stanish et al. (2000), o mecanismo predominante de penetração de agentes agressivos é a difusão, visto que é raro uma diferença de pressão considerável sobre a estrutura e o efeito da absorção é limitado a uma região superficial da espessura do revestimento. Assim, a difusão é um meio essencial para o início do processo de corrosão das armaduras.

Deste modo, precisou-se de um modelo matemático para quantificar a taxa de difusão ocorrente entre dois meios de diferentes concentrações, expressa por um coeficiente de difusão.

Dentre os variados modelos matemáticos que abordam a corrosão das armaduras pela difusão de cloretos, destaca-se o modelo proposto por Fick, comumente empregado e recomendado (ANDRADE, 2001), representado pela 1ª Lei de Fick da difusão, conforme a equação (1).

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Sendo que: J é o fluxo de massa, D é o coeficiente de difusão, C é a concentração, e x é a profundidade de onde se mede a quantidade de massa que penetrou.

É importante salientar que o sinal negativo na 1ª Lei de Fick significa que o fluxo que ocorre a difusão segue o sentido da concentração mais alta, para a concentração mais baixa, ou seja, adentrando para o interior do material analisado. Além disso, a 1ª Lei de Fick parte do pressuposto de que o fluxo é constante, isto é, o gradiente se mantém por meio da entrada e saída contínua da substância transportada, conhecido como estado estacionário.

Contudo, de acordo com Hoffmann (2001), o estado estacionário não é eficaz ao representar a realidade, uma vez que o transporte de cloreto através dos poros e fissuras do concreto não ocorre de maneira constante.

Portanto, ao considerar que a concentração varia em função do tempo e da profundidade de penetração no material, tem-se a 2ª Lei de Fick, que caracteriza o estado não-estacionário, representada pela equação (2).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

A solução para a 2ª Lei de Fick, considerando uma concentração constante no meio externo, de acordo com a equação (3).

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (3)$$

Sendo que:

$C(x, t)$ é a concentração de íons cloreto na profundidade (x) a partir da superfície, num tempo (t) [%];

C_0 é a concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto [%];

C_s é a concentração superficial de íons cloreto [%];

erfc é a função complementar de Erro de Gauss;

D é o coeficiente de difusão [mm^2/s];

x é a profundidade analisada [mm];

t é o tempo [s].

Essa solução é comumente utilizada para determinar a vida útil de um elemento de concreto pois, conhecidas as concentrações da equação, e o coeficiente de difusão, é possível calcular o tempo que os íons cloreto atingem a armadura, causando a corrosão.

No entanto, esse modelo sofre algumas simplificações para ser aplicado. Para chegar à solução da 2ª Lei de Fick, representada pela equação (3), e aplicá-la para o concreto, considerou-se que: este é um material homogêneo; o transporte de substâncias ocorre exclusivamente por difusão; não ocorre interações entre os íons cloreto e o concreto durante a contaminação; a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão são constantes; dentre outros.

Deste modo, de acordo com Helene (1997), o coeficiente de difusão no concreto depende de uma série de variáveis, dentre elas: porosidade, relação água/cimento, teor de cimento na mistura, composição química desse cimento, concentração superficial da substância agressora na superfície, temperatura.

3.2 PERMEABILIDADE

A permeabilidade é o processo de deslocamento de um fluido por meio de um gradiente de pressão. O sentido desse movimento é do meio com maior pressão para o meio com menor pressão.

Em relação ao concreto, sua permeabilidade está diretamente relacionada a sua porosidade. Ou seja, quanto mais poroso, mais permeável se torna o concreto, e vice-versa (SANTOS, 2006). Sendo assim, é possível inferir que a facilidade de um fluido adentrar no concreto, por gradiente de pressão, depende de alguns fatores, como: grau de hidratação da pasta cimentícia, teor de agregados, relação água/cimento.

A ocorrência desse mecanismo de transporte de fluidos para o concreto é comum em ambientes que proporcionam grandes pressões de líquidos. Dentre os inúmeros exemplos, é possível citar: estações de tratamento de água, esgotos, tanques industriais, reservatórios, estruturas marítimas, etc (ANDRADE, 2001).

Segundo Stanish et al. (2000), os íons cloreto podem vir a penetrar o concreto pelo processo de permeabilidade, se houver um gradiente de pressão. Contudo, é

rara a ocorrência dessa diferença necessária para o ingresso dos íons cloreto por permeabilidade. Espera-se, portanto, um processo indireto de penetração de cloreto no concreto por permeabilidade, em que esse se encontra dissolvido na água que permeabilizou o material em questão.

3.3 SUCÇÃO CAPILAR

A sucção ou absorção capilar é o fluxo de um fluido por meio de um gradiente de umidade. Em relação ao concreto, é possível definir esse processo como o transporte de líquidos por meio da tensão superficial atuante nos poros capilares existentes.

Os poros capilares, geralmente, se encontram interligados uns aos outros. Assim, consoante Santos (2006), o líquido que adentrou o concreto, e se encontra num poro capilar, devido a sua tensão superficial, faz surgir forças capilares que favorecem a ascensão do líquido através dos poros.

Assim, segundo Helene (1993), é possível inferir que esse mecanismo de transporte não acontece em concretos na condição saturada, pois, para haver a ascensão do líquido através dos poros e absorção deste por capilaridade, estes devem se encontrar secos ou parcialmente secos.

A intensidade de ocorrência de absorção capilar é difícil de ser prevista. Isso acontece porque, inicialmente, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores as forças capilares que surgem, o que ocasiona em maiores alturas de ascensão e menores volumes absorvidos (ANDRADE, 2001). No entanto, de acordo com Helene (1993), poros capilares com diâmetros menores são menos interligados e intercomunicáveis, o que ocasiona em menores alturas de ascensão e volumes absorvidos.

4 MECANISMOS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

A medida que se intensificam as pesquisas acerca dos custos referentes a uma obra, constata-se que aqueles referentes à manutenção e recuperação de uma estrutura são maiores em relação aos custos de intervenções na fase de projeto e concepção do empreendimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Patologia é o ramo da Engenharia que estuda os sintomas, mecanismos, causas e origens dos defeitos das construções civis, isto é, o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema (HELENE, 1993).

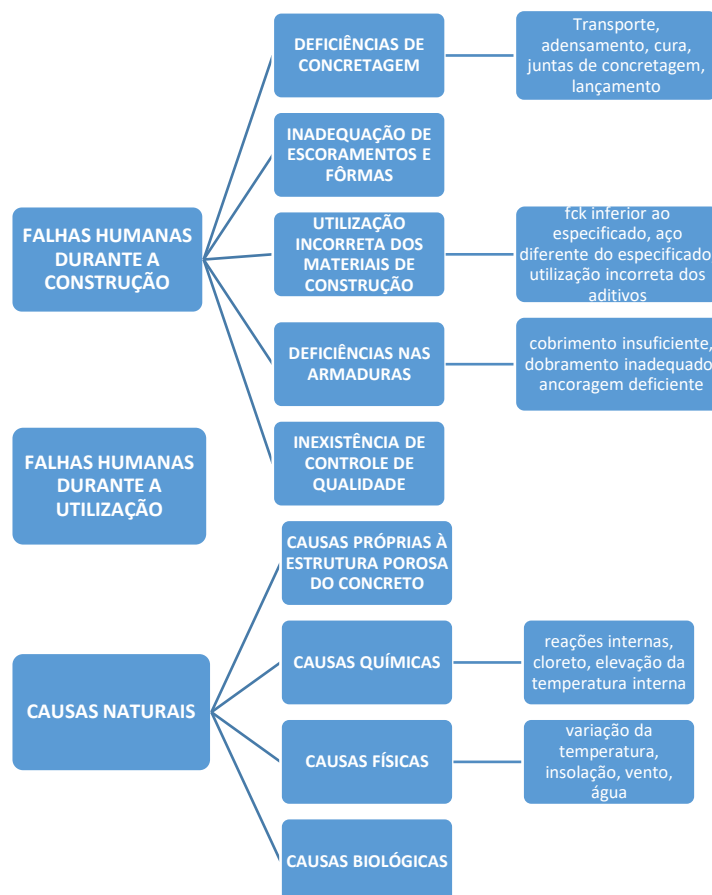
Sendo assim, segundo Trindade (2015), uma patologia em uma construção tem duas possíveis causas: falha humana ou ação do meio ambiente. A falha humana pode acontecer em qualquer das fases do empreendimento (projeto, execução e utilização), sendo que é possível citar alguns exemplos, como: deficiências de concretagem, inadequação de escoramentos e formas, utilização incorreta dos materiais de construção, destino de uso diferente àquele definido em projeto, dentre outros.

Já em relação à ação ambiental, as causas de degradação de uma estrutura podem decorrer de diversos tipos de ações: químicas, físicas, biológicas, mecânica, de maneira isolada ou simultânea.

A princípio, a deterioração de uma estrutura feita de concreto armado se dá através da degradação da pasta cimentícia, do agregado ou de ambos. Segundo Brandão (1999), a degradação da pasta é mais severa e é considerada como a principal causa, uma vez que o agregado é uma rocha, que é mais resistente a ataques químicos, em geral.

A Figura 3 relaciona as principais causas intrínsecas das patologias do concreto armado.

Figura 3 - Causas das manifestações patológicas



Fonte: Adaptado de Souza e Ripper (1998).

Os mecanismos patológicos mais relevantes se dividem nas seguintes categorias: relativos ao concreto, à armadura e a estrutura propriamente dita. Os mecanismos patológicos relativos ao concreto são: a lixiviação, expansão por sulfatos ou magnésios, expansão por reação álcali-agregado e reações superficiais deletérias. Já os mecanismos de deterioração referente à armadura são a corrosão devido a carbonatação ou ao elevado teor de íons de cloro. E os mecanismos patológicos referentes à estrutura propriamente dita são: ações mecânicas, ações cíclicas (fadiga), impactos, temperatura, relaxação, deformações lentas (fluência), dentre outros (HELENE, 2001).

Neste tópico, serão evidenciados alguns dos mais importantes e danosos mecanismos de deterioração do concreto. São eles: ação dos íons cloreto,

carbonatação, sulfato externo e interno, reação álcali-agregado, gelo e degelo, e ataque biológico.

4.1 CARBONATAÇÃO

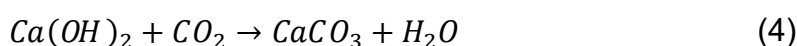
A grande maioria dos problemas referentes à deterioração do concreto está relacionada com a corrosão e despassivação da armadura presente no seu interior. Desse modo, Helene (2001) divide os mecanismos de envelhecimento e deterioração do concreto em: relativos ao concreto, relativos à armadura, e da estrutura propriamente dita.

Aqueles mecanismos patológicos referentes à armadura são a carbonatação e a ação dos íons cloreto. Esses agem por meio da destruição da camada passivadora do aço, penetrando no concreto através de fissuras ou pela estrutura porosa do mesmo, até atingir a armadura, em concentrações suficientes para provocar a sua despassivação e posterior corrosão.

Sendo assim, a carbonatação, conforme Song et al. (2005), compreende as reações entre o dióxido de carbono presente no ar e os produtos da hidratação do cimento (hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado), no concreto, que causa uma redução na alcalinidade do mesmo e, conseqüentemente, um comprometimento na habilidade de proteger a armadura da corrosão.

Compreender acerca desse processo de deterioração é de suma importância, uma vez que o gás carbônico é um dos gases que se encontram em maior abundância na atmosfera terrestre. Outro fator agravante é que, nos grandes centros urbanos, onde ocorre a maior parte das construções em concreto armado, o teor de dióxido de carbono no ar é maior que em regiões menos industrializadas devido à existência de uma significativa poluição ambiental, causada por uma intensa urbanização e industrialização.

O gás carbônico adentra na estrutura do concreto por difusão, e o processo químico resultante é representado pela equação química (4).



A equação demonstra a formação de carbonato de cálcio em solução aquosa, por meio da combinação do gás carbônico da atmosfera e o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento. O dióxido de carbono (CO_2) penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o composto chamado ácido carbônico (H_2CO_3) que, por sua vez, reage com alguns componentes da pasta de cimento hidratada, como o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], que resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO_3).

Esse processo reduz o pH do concreto e a estabilidade química da camada passivadora que envolve e protege o aço da corrosão.

Como a maioria das patologias existentes que danificam o concreto, a carbonatação depende de fatores externos e internos à estrutura, relacionados ao ambiente e a microestrutura do concreto utilizado.

Segundo Ferreira (2013), em relação ao ambiente, o fator preponderante para a existência de carbonatação será a concentração de gás carbônico na atmosfera., além da temperatura, umidade relativa e tempo de exposição. Já em relação à microestrutura do concreto, como em outras patologias, a principal variável que influencia nesse processo é a permeabilidade, que determina a velocidade com que os agentes agressivos avançam adentro da estrutura. Dessa maneira, são os fatores internos essenciais para a ocorrência de carbonatação: relação água/cimento, porosidade, umidade, presença de fissuras, temperatura, cura e adensamento na execução, dentre outros.

A carbonatação diferencia o material em duas regiões: a região carbonatada, tendo seu pH reduzido a um número menor que 9, conhecida como frente de carbonatação; a região não-carbonatada, cujo pH não sofreu a mesma redução, mantendo-se maior que 12,5 (CASCUDO, 1997).

De acordo com Helene (2001), como a carbonatação propriamente dita não é perceptível a olho nu, a identificação da frente ou profundidade da mesma requer a aplicação de ensaios minuciosos e específicos. O método mais usual é a utilização de indicadores de pH a base de fenolftaleína, que adquire uma coloração vermelha para valores de pH acima de 9,5.

4.2 AÇÃO DOS ÍONS CLORETO

Um dos mecanismos patológicos mais críticos que uma estrutura de concreto armado pode sofrer é a corrosão de sua armadura, responsável por diversos problemas: redução de área transversal resistente das barras de aço, pela perda de aderência entre o concreto e o aço, fissuras, manchas, destacamentos de pedaços do concreto (HELENE, 2001).

Esse processo se dá, inicialmente, pela despassivação da armadura, que possui a capacidade de retirar a fina camada de óxidos que envolvem as barras de aço, cuja função é proteger da corrosão. A mesma é iniciada por duas maneiras possíveis: pela carbonatação, que consiste na redução da alcalinidade do concreto devido a penetração do gás carbônico da atmosfera; ou pela penetração dos íons cloreto, que adentram ao material pelo movimento de difusão, absorção capilar ou permeabilidade.

Neste trabalho, serão aprofundados os estudos da ação do cloreto nas estruturas de concreto e seu ingresso nas mesmas por meio da difusão.

4.3 SULFATO EXTERNO E INTERNO

Em se tratando de mecanismos patológicos de estruturas de concreto, o sulfato representa grande perigo para este tipo de material, pois pode proporcionar uma queda da coesão dos produtos da hidratação do cimento, o que provoca perda de massa e redução na resistência do concreto. Além disso, o ataque dessa substância pode vir de duas fontes distintas: interna e externa.

O sulfato reage com os produtos da hidratação do cimento, formando gipsita e etringita, que por seu caráter expansivo, provocam a deterioração do concreto. No viés interno, esse sulfato é proveniente dos agregados ou cimento empregados na mistura. Já no viés externo, a fonte de íons sulfato vem do ambiente que a construção está inserida (CENTURIONE, KIHARA E BATAGIN, 2003).

O ataque por sulfato se manifesta por meio da expansão e possível fissuração no material. A expansão é responsável por provocar aumentos na tensão interna, e, por conseguinte, deformações e deslocamentos na estrutura que, possivelmente, fazem surgir fissuras e trincas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Com a fissuração, conforme observado em outras patologias, há uma intensificação da exposição do material ao sulfato, visto que a permeabilidade da

estrutura é aumentada, o que facilita a entrada do referido composto e de outros agentes deteriorantes, como cloretos.

Deste modo, para controlar os danos causados pelo ataque de sulfatos, deve-se dirigir o foco para duas variáveis: o ambiente em que se pretende construir, e as propriedades do concreto utilizado. Se não for possível impedir o contato dos ânions sulfatosos com a construção, seja por meio do solo ou da água, cabe ao engenheiro se atentar à microestrutura do concreto, a fim de minimizar a penetração desse composto no interior do material.

Dessa maneira, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), o concreto deve ser o menos permeável possível. Para isso, no momento da dosagem, deve-se priorizar uma mistura com baixa relação água/cimento e alto consumo de cimento. Já no momento da execução da estrutura, deve-se priorizar um adensamento e uma cura adequados, para se obter um concreto com o menor índice de vazios possível.

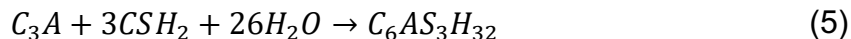
Outra medida bastante utilizada para evitar os danos causados por esse mecanismo patológico, é o uso de cimentos Portland resistentes a sulfatos ou compostos.

Nesse sentido, consoante Centurioni et al. (2003), cimentos Portland com escória ou pozolana possuem maior resistência ao ataque de sulfatos, por terem baixo teor de C_3A (aluminato), e pequena liberação de $Ca(OH)_2$ durante a hidratação, que é responsável pela formação de etringita expansiva, ao reagir com os sulfatos.

Os dois modos de ataque por sulfatos podem ocorrer simultaneamente, sendo que o determinante para a predominância de um sobre o outro será a concentração e a fonte dos íons sulfato (SO_4^{2-}), seja proveniente de um meio externo ou do próprio cimento utilizado na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

4.3.1 Reações químicas no ataque por sulfato

Quando se inicia o processo de hidratação do cimento, um dos compostos formados que é primordial para o início da pega e endurecimento da mistura é a etringita. Esse é um produto formado pela combinação dos sulfatos disponíveis em solução aquosa e o aluminato cálcico (C_3A) ou o ferroaluminato cálcico (C_4AF). Scrivener e Taylor (1993) descrevem a reação química de formação da etringita de acordo com a equação (5).



Esse mineral, quando é formado de maneira imediata e é homogeneamente distribuído na massa de concreto, se denomina etringita primária. Nesse caso, a etringita primária não configura nenhum tipo de dano ou problema, devido a sua expansão para formação de seus cristais.

No entanto, quando o concreto já se encontra no estado endurecido, e ocorre alguma oferta de sulfatos, seja de fonte interna (agregados ou cimento que contém SO_3) ou externa (meio ambiente), pode vir a ocorrer a formação de etringita secundária, que é tardia e heterogênea, causando expansão e possível fissuração na estrutura.

Isso gera um efeito cascata, uma vez que a fissuração causada pela formação de etringita secundária torna a peça de concreto mais exposta à ação de agentes deletérios para a estrutura, o que prejudica sua durabilidade.

4.3.2 Sulfato externo

Segundo Filho (1994), o sulfato pode ser encontrado na natureza nos mais diversos meios, em concentrações e compostos variados, sendo possível obtê-lo a partir de ácidos, gases, matéria orgânica e outros. A sua ampla oferta na natureza representa o grande cuidado que se deve ter com essa substância.

O ânion sulfato encontra-se no solo, em pequenas concentrações, na forma de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$); em águas subterrâneas, nas formas de sulfato de magnésio, sódio e potássio; em terras usadas para a agricultura, na forma de sulfato de amônia; em pântanos, lagos rasos, e esgoto, devido a matéria orgânica que se transforma em ácido sulfúrico pela ação de bactérias (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Por isso, deve-se atentar, quanto à presença de sulfatos no ambiente, às construções que entrem em contato com esses tipos de condições, como fundações, tubulações, barragens, galerias, dentre outras estruturas que se encontrem em contato constante com águas subterrâneas e terras agriculturáveis. As Figuras 4 e 5 contêm um exemplo de degradação do concreto, em um canal, devido à presença de água contaminada por sulfatos.

Figura 4 - Água de um canal que contém sulfatos



Fonte: Thomaz (2013).

Figura 5 - Degradação do concreto por água sulfatosa



Fonte: Thomaz (2013).

4.3.3 Sulfato interno

Em relação ao viés interno, a formação de etringita tardia, preponderante para a expansão e possível fissuração do concreto, advém da liberação tardia de sulfatos por meio dos componentes do cimento utilizado ou do agregado.

Dessa forma, Centurioni et al. (2003) afirma que as fases de aluminato de cálcio (C_3A) do clínquer, presente no cimento, são as principais responsáveis por esse fenômeno. Assim, cimentos produzidos com clínqueres de baixo teor em aluminato são inibidores das reações com sulfatos.

A adição de escórias e pozolanas também são indicados para evitar as reações expansivas provocadas pelos sulfatos. Isso é possível, porque, conforme Centurione et al. (2003), essas substâncias combinam com o $Ca(OH)_2$, no momento da hidratação, formando $C-S-H$ (silicato de cálcio hidratado), possibilitando uma menor quantidade de $Ca(OH)_2$ livre. Além disso, as pozolanas e escórias reduzem a estrutura de poros da mistura e modificam a química da mesma, formando monosulfoaluminato no lugar da etringita.

4.4 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é definida como um tipo de degradação que afeta o concreto através de um fenômeno de expansão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Para que a aderência entre o cimento e os agregados seja alcançada, desenvolvem-se combinações químicas entre estes e os componentes hidratados do cimento. A princípio, essas reações são benéficas para um concreto mais resistente e homogêneo (SOUZA e RIPPER, 1998).

No entanto, em alguns casos, essas reações podem se tornar expansivas e prejudicar a coesão do concreto.

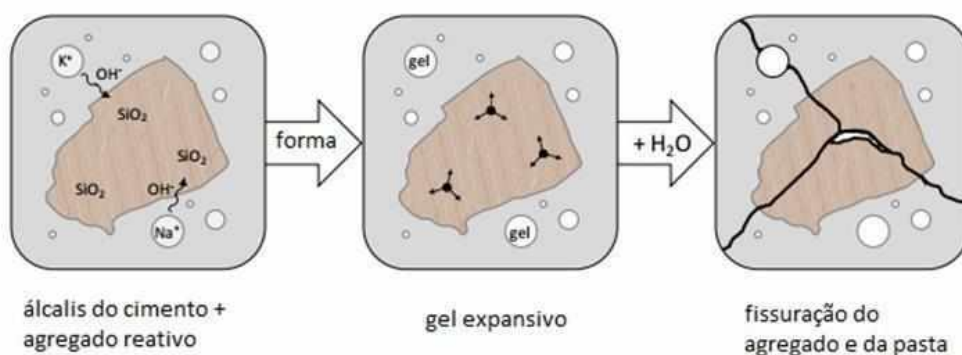
Segundo Mehta e Monteiro (2014), dependendo do grau de desordem na estrutura do cristal do agregado, da porosidade e da dimensão da partícula, géis silicatos alcalinos de composição química variada se formam na presença de hidroxila e íons alcalinos. A forma de ataque no concreto envolve a quebra da estrutura de sílica do agregado por íons hidroxila seguido da adsorção dos íons metálico-alcalinos nas superfícies recém-criadas dos produtos da reação.

Assim, se o grau de restrição no sistema é baixo, a pressão hidráulica desenvolvida pode ser suficiente para causar expansão e fissuração das partículas do agregado afetado, assim como da matriz da pasta cimentícia em torno do agregado.

Os produtos da hidratação do cimento são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ e sulfoaluminato de cálcio. À medida que ocorre a hidratação, enquanto que os íons de cálcio são convertidos nesses compostos, o sódio e o potássio presentes no cimento permanecem na solução.

Conforme Souza e Ripper (1998), com a continuidade da hidratação e a dissolução dos componentes alcalinos, há a formação de uma solução cada vez mais alcalina. Essas condições são favoráveis para o desencadeamento de reações entre o sódio e potássio presentes no cimento, na presença de umidade, e a sílica e minerais silicosos presentes nos agregados. A representação desse processo se encontra na Figura 6.

Figura 6 - Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto



Fonte: Adaptado de Deschenes (2009).

A possibilidade de ocorrência de expansão, nesse tipo de reação, existe porque há uma formação adicional de sólidos em meio confinado, ocasionando, de início, a fissuração da superfície do concreto. Posteriormente, é possível a desagregação e, por conseguinte, a formação de crateras na estrutura.

De acordo com Trindade (2015), fissuração consequente da reação álcali-agregado é crítica por tornar o concreto mais suscetível à ação de outros agentes deteriorantes e por provocar a perda de estanqueidade. Além disso, esse tipo de reação pode reduzir a resistência mecânica do material.

A velocidade de desenvolvimento e magnitude das deformações vão depender de um grande número de fatores: a natureza e quantidade disponível de agregados reativos, níveis de álcalis no cimento, temperatura ambiente, disponibilidade de umidade e de eventuais restrições físicas à expansão (VALDUGA, 2002).

Segundo Andriolo (1999), as principais consequências da reação álcali-agregado são:

- Microfissuras no concreto, principalmente na argamassa que preenche o espaço entre os agregados graúdos;
- Fissuras na proximidade da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface;
- Descolamento (perda de aderência) da argamassa junto a superfície dos agregados graúdos;
- Fissuras de grande abertura, transversais a maior dimensão da estrutura;
- Travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças moveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, etc.);
- Fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão. Em vários casos, é confundida com o panorama de reação por sulfatos ou até mesmo retração por secagem (quando as fissuras são de pequena abertura), e com o panorama de fissuração por origem térmica (quando as fissuras são de grande abertura).

4.5 GELO E DEGELO

O concreto, quando submetido a temperaturas reduzidas ou a ciclos de congelamento e degelo, tende a sofrer danos na sua estrutura, na forma de fissuração e lascamento. Esses acontecimentos são comuns em regiões onde o clima é bastante frio, ou as variações de temperatura são intensas.

Powers (1945) desenvolveu uma série de estudos sobre os efeitos em estruturas de concreto quando submetidos a ciclos constantes de congelamento e descongelamento. Ele percebeu que os principais causadores desses tipos de danos, na pasta de cimento endurecida, quando submetida a essas condições são: a geração de pressão hidráulica, pressão osmótica e a difusão da água dos poros de gel e capilares.

A água, por sua vez, possui um comportamento anômalo quando sofre o processo de solidificação, que é a mudança de estado físico líquido para o sólido. Isto é, quando a água passa por esse processo físico, ela sofre uma expansão, ocupando um volume maior que anteriormente ocupado no seu estado líquido. Quando se analisa a microestrutura do concreto, ao submetê-lo a temperaturas reduzidas, o mesmo acontece com a água contida nos seus poros capilares. Assim, quando a água se expande, é gerada uma pressão hidráulica no interior do material, responsável pela migração da água para os poros maiores e próximos.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), esse aumento de pressão, caso supere a resistência do material, ou o fluxo de água no seu interior não seja suficiente para aliviar a pressão hidráulica, haverá uma deformação nos poros capilares que se encontram preenchidos com gelo.

Powers (1945) também constatou que, além da pressão hidráulica, há um outro tipo de pressão que ocasiona a expansão da pasta de cimento, denominada de osmótica. A água presente nos poros capilares não é totalmente pura, visto que ela possui alguns elementos químicos dissolvidos, como cloretos, álcalis e hidróxido de cálcio. Existe, então, a ocorrência de um efeito crioscópico, em que a temperatura de congelamento de uma solução diminui em relação a água no estado puro. Quanto maior a concentração de sais na solução, menor é a temperatura de congelamento desta. Assim, as diferentes concentrações da água presente nos poros capilares do concreto proporcionam em pressões osmóticas que ampliam a expansão do material.

Outro fator importante para a expansão citada, é a migração da água dos pequenos poros para os grandes vazios. Consoante Powers (1945), no congelamento, enquanto a água presente nos poros capilares se solidifica, a mesma situada nos poros de gel se encontra em um estado super-resfriado, porém, ainda no estado líquido. Isso gera um desequilíbrio termodinâmico, em que a água no interior dos poros capilares se encontra em um estado de baixa energia, e a água dos poros de gel ocupa um estado de alta energia.

Essa diferença de entropia faz com que a água dos poros de gel busque os poros capilares para se solidificar e diminuir seu saldo energético, causando uma migração de água no interior do material e, por conseguinte, sua expansão.

É importante analisar também os efeitos do congelamento e degelo nos agregados usados na composição do concreto. A respeito desse assunto, Mehta e

Monteiro (2014) observou que não há nenhum tamanho crítico único para o tipo de agregado porque há diversos fatores para se levar em conta: velocidade de congelamento, grau de saturação e permeabilidade.

Sendo assim, acredita-se que alguns agregados de arenito e calcário, caracterizados por um grande volume de poros muito finos (menores que 1 μm), presentes em pavimentos de concreto expostos ao congelamento, são responsáveis pela fissuração-D, caracterizada por fissuras que se curvam em torno de dois dos quatro cantos da laje (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

É importante ressaltar que, a fim de acelerar o fenômeno do degelo, é comum, nas regiões frias, a aplicação de sal. Isso pode ser danoso para o concreto, porque a ação dos cloretos, presentes no sal, contribuem para a sua degradação em função dos mecanismos de corrosão das armaduras (CODY, 1996).

A aplicação do sal produz também uma redução da temperatura da superfície do concreto e, por conseguinte, um choque térmico, além de tensões internas que podem provocar fissuras devido a diferença de temperaturas entre a superfície e o interior do material (SILVA, 1998).

Ao considerar todos esses fatores, infere-se que as intervenções para minimização dos efeitos decorrentes do congelamento e degelo do concreto consistem na modificação de sua estrutura porosa. Como exemplo, é possível citar a incorporação de ar e o emprego de uma dosagem e cura apropriados.

A incorporação de ar, embora possa ser responsável por certas patologias (como a delaminação de pisos, por exemplo), reduz a expansão do concreto, quando submetido às condições de congelamento, uma vez que os espaços entre os vazios são aumentados, reduzindo os efeitos da migração da água.

É importante uma dosagem com relação água/cimento menor e maior grau de hidratação, visto que essas características proporcionam menores quantidades de poros, o que é determinante para a redução da água presente no interior do material sujeita ao congelamento.

4.6 ATAQUE BIOLÓGICO

O ataque biológico é definido como a deterioração do concreto devido a ação de microorganismos, e, por isso, também é nomeado de biodeterioração.

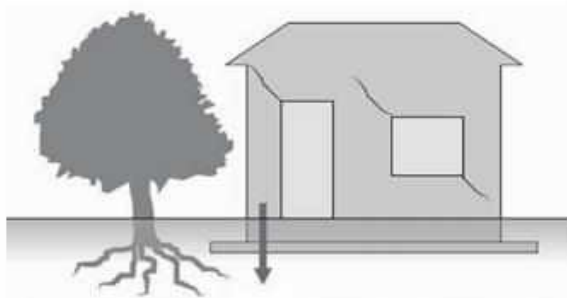
A alta porosidade do concreto ou a presença de trincas e fissuras, permitem a ação de microorganismos, principalmente fungos e bactérias, que ocasionam em alterações das propriedades dos materiais utilizados na construção.

Segundo Lapa (2008), o concreto é considerado um material bioreceptivo ao ataque microbiológico, devido às condições de rugosidade, porosidade, umidade e composição química, que combinadas com as condições ambientais (umidade, temperatura e luminosidade), podem promover a biodeterioração do material.

Os danos causados pelo ataque biológico nas estruturas de concreto podem ter efeitos estéticos ou funcionais. De acordo com Pereira (2012), a biodeterioração é classificada em: física ou mecânica, estética, química assimilatória e química não assimilatória.

A biodeterioração física é caracterizada pelo rompimento do material devido à pressão exercida por organismos presentes no ambiente em que a construção se insere, durante seu crescimento ou locomoção. Como exemplo, é possível citar uma raiz de uma árvore que danifica uma estrutura enterrada (PEREIRA, 2012). A Figura 7 contém uma representação desse fenômeno.

Figura 7 - Trincas causadas pela proximidade com raízes de árvores



Fonte: Marcelli (2007).

A biodeterioração estética é menos gravosa e não representa nenhum tipo de alteração na composição química ou desempenho do material, mas sim na sua estética. Por isso, esta é exemplificada por manchas e mudanças de coloração, causadas por algas, fungos ou bactérias (PEREIRA, 2012).

Já a biodeterioração química assimilatória corresponde àquela que o microorganismo utiliza o material para sua nutrição, como fonte de energia. Assim, há

a liberação de ácidos e outros compostos químicos que deterioram a estrutura (PEREIRA, 2012).

E, por fim, a deterioração química não assimilatória é causada pela ação química sobre o material de produtos oriundos do metabolismo dos microorganismos. Tais produtos são responsáveis pela decomposição dos minerais do concreto, por meio da produção de sais e quelatos, que são posteriormente lixiviados (PEREIRA, 2012).

É válido mencionar que, segundo Souza e Ripper (1998), o tipo de ataque biológico mais comum nas estruturas de concreto é a ação de sulfetos presentes nos esgotos. Nesse processo, os sulfetos, inicialmente na forma de gás sulfídrico (H_2S) dissolvido na água, entram em contato com o cimento Portland do concreto, e com o auxílio de bactérias anaeróbias, formam o sulfeto de cálcio (CaS), que descalcifica o concreto e amolece a pasta de cimento.

5 AÇÃO DOS ÍONS CLORETO

Os íons cloreto, conforme o item 4.2, pode adentrar no concreto através de três tipos diferentes de movimentos de massa: difusão, absorção capilar ou permeabilidade.

A difusão é iniciada devido a uma diferença de concentrações desses íons entre a superfície externa e a estrutura do concreto. Assim, a água que contém esses íons entra em contato com o material, e o cloreto adentra na estrutura por meio desse gradiente de concentrações.

A absorção capilar, por sua vez, é o fluxo de um líquido através de uma diferença de umidade. Quando uma superfície de concreto parcialmente saturada está molhada, a água é rapidamente absorvida por sucção capilar, o que conjuntamente transporta íons cloreto dissolvidos para dentro do concreto (TUUTTI, 1982).

Já a permeabilidade é o transporte desses íons pela diferença de pressões do meio externo e o interior do material. A penetração de cloreto no concreto pela permeabilidade geralmente acontece quando os íons estão dissolvidos na água, visto que essa diferença de pressões é difícil de se alcançar. Esse mecanismo de transporte do cloreto é recorrente em construções que lidam com elevadas pressões de líquidos, como reservatórios, tanques industriais e estações de tratamento de água (ANDRADE, 2001).

De uma maneira simplificada, os íons cloreto adentram na estrutura de concreto, por meio de fissuras ou pela estrutura de poros, com o auxílio da água, e age de forma a provocar a despassivação da armadura e posterior corrosão.

O concreto, devido a sua alcalinidade, propiciada pela presença dos hidróxidos Ca(OH)_2 , KOH e NaOH na sua composição, fornece a armadura presente no seu interior uma proteção. Essa é denominada de camada passivadora, e consiste numa película de óxidos extremamente delgada, aderente à superfície da barra.

Assim, para que a corrosão se inicie, é preciso que agentes agressivos capazes de destruir essa camada passivadora, ultrapassem a camada de cobrimento de concreto, e atinjam a armadura em concentrações suficientes para provocar a despassivação (SANTOS, 2006).

Quando essa é provocada pela ação do gás carbônico, no processo de carbonatação, desencadeia-se uma corrosão generalizada, ao passo que, quando é provocada pela ação do cloreto, a corrosão ocorre em partes específicas do aço.

O controle da corrosão causada pela ação do cloreto pode ser feito de duas formas: preventiva e posterior. A forma preventiva corresponde em escolher uma dosagem da mistura que retarde, ao máximo, o movimento de massa dentro da estrutura, isto é, um material menos permeável possível.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), para conseguir o material mais denso e com menor número de vazios, é preciso adotar uma reduzida relação água/cimento, controle da dimensão do agregado e sua graduação, consumo adequado de cimento e uso de adições minerais.

Além disso, na fase de concepção da estrutura, adota-se uma camada de cobertura, que serve como uma barreira física para agentes deletérios, e varia de acordo com a agressividade do ambiente da construção. A norma brasileira NBR 6118:2014 determina a espessura dessa camada de cobertura que depende da classe de agressividade ambiental (meio) em que a estrutura se encontra exposta. As classes de agressividade ambiental e as espessuras dos cobrimentos estão demonstradas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: NBR 6118 (2014).

Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30	30	40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (2014).

Em relação ao controle posterior, este representa a reparação da estrutura depois de ocorrido o problema, visto que os custos de manutenção e reparação de estruturas que sofreram corrosão é alto.

Mehta e Monteiro (2014) cita o uso de membranas impermeáveis, como os concretos do tipo impermeável e estanque. Essa medida interventiva, muito utilizada em tabuleiros de pontes, consiste na aplicação de um concreto que oferece uma proteção mais durável para a penetração desses fluidos agressivos, devido a sua muito baixa relação água/cimento e alto consumo de cimento.

5.1 FONTES DE CLORETO

A penetração de íons cloreto em uma estrutura de concreto se reduz a duas formas: no momento da fabricação da mistura ou oriunda do ambiente em que a construção se insere.

De acordo com Helene (1993), ao se produzir o concreto, o cloreto pode ser inserido na mistura pelo uso de materiais contaminados (agregados ou água) ou aditivos aceleradores de “pega” à base de cloreto de cálcio (CaCl_2). Além desses compostos, Mehta e Monteiro (2014) constatou que existem suspeitas que emulsões poliméricas (látex) do tipo cloreto vinilideno sejam a causa de problemas de corrosão em alguns casos.

Em relação ao ambiente da estrutura, a penetração dos íons cloreto se dá de diversas maneiras, como: contato com águas marinhas ou névoa salina (maresia), através de determinados processos industriais, dentre outros.

Zhu et al. (2016), complementa, dizendo que o ingresso do cloreto na estrutura é, geralmente, significativo em atmosferas de ambientes marinhos, onde o suprimento desses íons devido ao contato da água marinha pode acontecer juntamente com a carbonatação.

5.2 TEORES CRÍTICOS DE CLORETO

A determinação de um valor específico de teor de cloreto que seria prejudicial para o concreto é necessária para a obtenção da vida útil de uma estrutura. No entanto, o que acontece é que não se chegou a um consenso, a um valor único e preciso.

Isso é causado pela enorme variedade de fatores que influenciam nesse tipo de ponderação, como o teor e tipo de cimento utilizado na mistura, a relação água/cimento, a permeabilidade do material, a temperatura, o pH da solução dos poros, a proporção de cloretos solúveis, dentre outros (ALONSO et al., 2000).

É válido destacar que o teor máximo de cloreto é especificado na especificação americana “ACI Building Code 318”, que fixa concentrações máximas de íons Cl^- , no concreto endurecido, aos 28 dias, de 0,06%, 0,15% e 0,30% em relação à massa de cimento, para concretos do tipo protendido, armado em ambiente exposto a ação de cloretos, e outros tipos de concreto armado, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A associação FIP-CEB, proveniente da Europa, segundo Moreira (2018), também definiu um teor crítico de íons cloreto de 0,4% em relação à massa de cimento, para concretos do tipo armado, e 0,2% para concretos do tipo protendido.

Em se tratando de normas brasileiras, a “NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento” não tratou desse assunto. Contudo, a norma “NBR 12655:2015 Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento” fixou um valor máximo de concentração de íons cloreto, no concreto endurecido, em relação à massa de cimento, em função da classe de agressividade do ambiente e das condições de serviço em que a estrutura se encontra. A Tabela 3 contém esses valores.

Tabela 3 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto no concreto (% sobre a massa de cimento)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloreto nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloreto nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade em condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: ABNT NBR 12655 (2015).

Ao analisar a Tabela 3, é perceptível que, à medida que a classe de agressividade do ambiente e as condições de serviço tendem a uma situação mais favorável (como condições brandas ou inexistência de exposição a cloretos), permite-se um teor maior de cloretos em relação à massa de cimento.

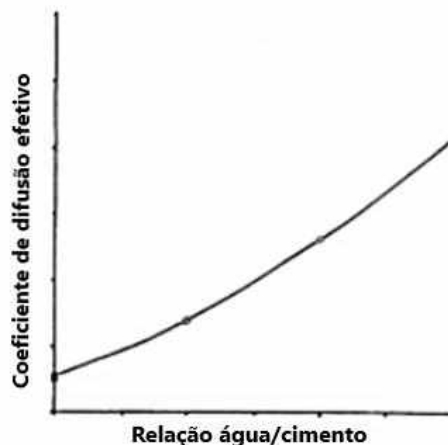
5.3 VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO

Os fatores que influenciam na velocidade e alcance da penetração dos íons cloreto no concreto se relacionam, cada um a sua maneira, com a estrutura porosa da mistura, ou seja, quanto mais porosa for a mistura, mais rápida e intensa será a propagação dos íons cloreto. Desse modo, é válido citar como tais fatores: a fissuração, temperatura, relação água/cimento, grau de hidratação, a cura utilizada, o cimento empregado na mistura, uso de adições minerais.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), quando a relação água/cimento for alta e o grau de hidratação baixo, a pasta de cimento terá uma porosidade capilar alta, o que contribui para uma estrutura de poros grandes e bem conectados e facilita o transporte de agentes deletérios.

A Figura 8 representa o gráfico do coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento em função da relação água/cimento utilizada e comprova a relação inversamente proporcional entre a relação água/cimento e a resistência do concreto para a penetração de cloreto.

Figura 8 - Influência da relação água/cimento no coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento



Fonte: Adaptado de MacDonald e Northwood (1995).

A temperatura é um fator determinante para a difusão dos íons cloreto no material pois, segundo Repette (1997), essa afeta os mecanismos de transporte e a velocidade das reações químicas.

As reações de corrosão causadas pelos íons cloreto, como qualquer reação química, acontecem mais rapidamente quando a temperatura do reagente é mais elevada. Já, em relação aos mecanismos de transporte, a temperatura é responsável por aumentar o grau de agitação e mobilidade das moléculas de Cl^- , o que acelera o seu transporte no interior do material. Além disso, temperaturas elevadas podem influir no surgimento de microfissuras de origem térmica, o que aumenta a permeabilidade e exposição do material (ISAIA, 1995).

Segundo Pereira (2001), o tipo de cimento utilizado no concreto é um fator que interfere na velocidade de penetração do cloreto, devido ao seu teor de C_3A e C_4AF do clínquer (aluminato cálcico e ferroaluminato cálcico, respectivamente). Essas substâncias são capazes de fixar os íons cloreto, por meio de reações químicas, formando cloroaluminatos de cálcio e reduzindo a quantidade de cloretos livres na solução dos poros.

Quanto ao uso de adição de minerais, seja na fabricação do cimento ou na dosagem da mistura do concreto, estes são preponderantes para o aumento da resistência frente aos efeitos da penetração do cloreto. Em relação ao emprego de minerais na fabricação do cimento, como escória de alto forno e cinza volante, esses

são responsáveis por aumentar a resistência à agentes agressivos devido ao refinamento na estrutura dos poros da pasta de cimento endurecida.

Assim, em relação ao uso de minerais para a preparação do concreto, como a cinza volante, escória granulada de alto forno, metacaulim e a sílica ativa, esses contribuem para o aumento da resistividade do concreto e redução do ingresso de agentes agressivos, devido a segmentação dos poros maiores e uma interface pasta/agregado mais resistente.

A cura, por sua vez, se faz importante no endurecimento do concreto, ao diminuir os efeitos da evaporação prematura da água destinada às reações de hidratação do cimento. Sendo assim, o processo de cura adequado proporciona uma hidratação mais efetiva da pasta de cimento, o que faz decrescer a porosidade, uma vez que o volume do gel formado na hidratação ocupa o espaço originalmente preenchido pela água (NEVILLE, 1997). Esse decréscimo da porosidade contribui para o aumento da resistência do concreto à penetração do cloreto.

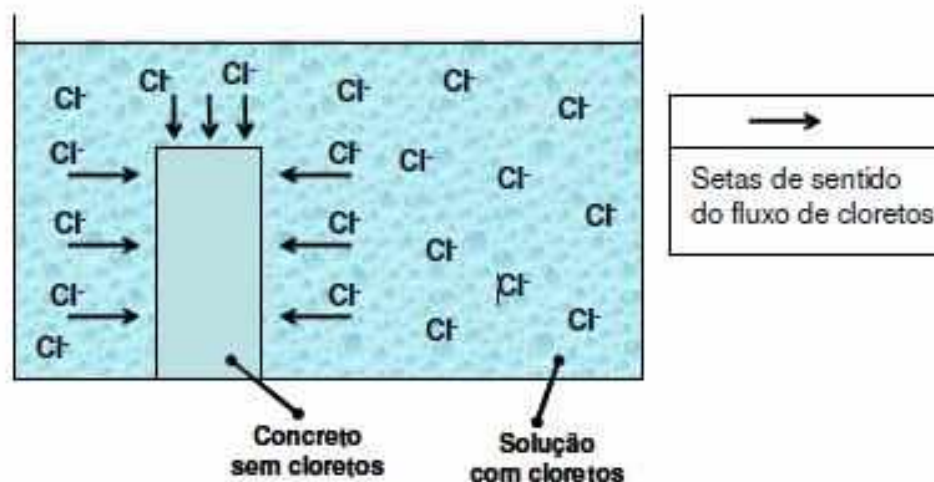
5.4 MÉTODOS DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO NO CONCRETO

Com o aumento da incidência de corrosão de armaduras devido a ação do cloreto, e dos gastos referentes à manutenção de estruturas que sofreram este tipo de patologia, fez-se necessário a formulação de métodos precisos que forneçam a velocidade de propagação dos íons cloreto nos concretos.

Para isso, desenvolveu-se métodos dos tipos naturais e acelerados para a obtenção do coeficiente de difusão dos íons cloreto no concreto. Entretanto, os métodos naturais, por simularem condições da vida real, consomem muito tempo até sua finalização, o que faz que os métodos acelerados sejam mais utilizados pelos pesquisadores, em detrimento dos naturais.

Dentre os métodos acelerados, destacam-se aqueles de imersão do concreto em solução salina e os de migração. Em relação aos métodos de imersão em solução salina, emerge-se uma quantidade de corpos de prova em uma solução de água e sal de concentração constante, durante tempos de contaminação diferentes, e, obtêm-se um perfil da penetração dos íons Cl^- em função da profundidade de penetração, do tempo de contaminação e do tipo de concreto. A Figura 9 ilustra o movimento de difusão dos íons cloreto nesse tipo de ensaio.

Figura 9 - Esquema do processo de difusão de cloretos nos métodos de imersão



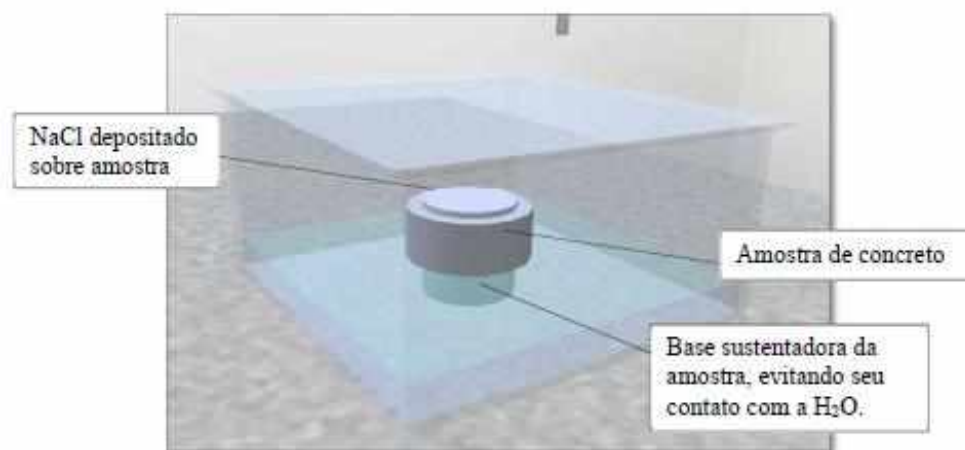
Fonte: Medeiros (2008).

Dentre os métodos de imersão em solução salina, é válido citar aquele que envolve uma concentração semelhante à da água do mar, com uma solução contaminante de NaCl 0,5M (mols da molécula de NaCl por litro de água) e um tempo de contaminação de 90 dias.

É possível destacar, também, o método prescrito pela norma americana “*NT BUILD 443 (1995) – Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*”, que consiste na imersão do concreto em uma solução contaminante, cujo teor de cloretos é cinco vezes maior que o encontrado na água marinha, correspondente a uma concentração de 165 gramas de NaCl por decímetro cúbico de água. Por se tratar de uma concentração mais elevada do agente agressivo, o tempo de contaminação é reduzido, equivalente a 35 dias.

Outro método de determinação do coeficiente de difusão é o proposto por Guimarães e Helene (2007), que difere dos demais citados, pois não utiliza a imersão, mas sim o contato direto do contaminante (NaCl) sobre a superfície da amostra a ser ensaiada. Tal método apresentou resultados satisfatórios para um tempo de contaminação inferior a 35 dias, e sua representação é visualizada através da Figura 10.

Figura 10 - Representação do método proposto por Guimarães e Helene (2007)

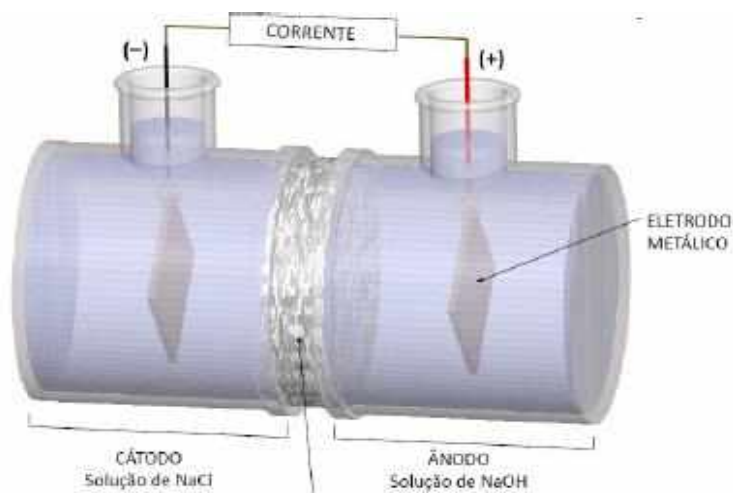


Fonte: Fonton (2017).

O método utilizado neste trabalho, para a determinação do coeficiente de difusão dos íons cloreto, será aquele proposto por Fonton (2017), chamado de “Método Acelerado Modificado”, em que a solução contaminante de *NaCl* possui uma concentração de 250 g/dm^3 .

Já em relação aos métodos de migração, aplica-se uma diferença de potencial elétrico, de forma que os íons positivos são atraídos pelo polo negativo e os íons negativos pelo polo positivo, conforme se visualiza na Figura 11.

Figura 11 - Esquema do ensaio de migração de íons



Fonte: Medeiros (2008).

Dentre os métodos de migração existentes, destaca-se aquele inicialmente proposto por Whiting, em 1981, que é atualmente recomendado e normalizado pela ASTM C 1202/05, que permite a obtenção de resultados em ensaio com duração de seis horas.

Esse método consiste na medição da carga total passante sobre uma fatia cilíndrica de concreto, no estado saturado, de 5 cm de espessura e 10 cm de diâmetro, entre duas células acrílicas, sendo uma preenchida com solução aquosa de *NaOH* a 0,1M, e a outra com solução aquosa com 3% de *NaCl*. As duas células são submetidas a uma diferença de potencial de 60 V, e registra-se a corrente passante a cada 30 minutos, durante 6 horas (FONTON, 2017).

Calcula-se a carga total passante pela integral da curva obtida da corrente elétrica em função do tempo. A partir desse valor, classifica-se qualitativamente o concreto analisado em relação a sua durabilidade, por meio da Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do concreto frente à penetrabilidade de cloretos, de acordo com a norma ASTM C1202:2009

Carga total passante (C)	Penetrabilidade de cloretos no concreto
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Fonte: Fonton (2017).

No entanto, embora esse método demande um tempo reduzido para finalizá-lo, quando comparado aos métodos de imersão (duração de 6 horas), este tem sido alvo de críticas, que reforçam a ideia que este procedimento produz resultados qualitativos, e não quantitativos.

De acordo com Medeiros (2008, p.19, apud ANDRADE, 1993, p. 724), as críticas fundamentam-se nos seguintes equívocos desse método: a diferença de potencial, por ser muito alta (60V), provoca aumento na temperatura e um consequente aumento na velocidade dos íons; a variável medida é a corrente total, sem diferenciar o fluxo de cloretos; a integração da corrente em função do tempo, não distingue o fluxo de cloretos da reação de fixação dos cloretos.

6 PROCEDIMENTO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

6.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA DO CONCRETO

A Figura 12 contém uma representação das atividades realizadas ao longo da execução do procedimento experimental.

Figura 12 - Fluxograma de atividades do procedimento experimental



Fonte: Autor (2020).

Para a realização deste experimento, foram produzidos três tipos de traços de concreto, de resistência à compressão de 20, 25 e 40 MPa.

O aglomerante empregado na mistura é o cimento Portland do Tipo 5 de alta resistência inicial, do fabricante “Cauê”.

Os agregados miúdo e graúdo, conforme expostos na Figura 13, constituem, respectivamente, em areia do tipo média e brita 1, e ambos foram obtidos no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV).

Figura 13 - Agregado miúdo (tipo areia média) e graúdo (tipo brita 1), utilizados para confecção do concreto



Fonte: Autor (2020).

As Tabelas 5 e 6 fornecem as granulometrias da areia e brita, respectivamente, utilizados na mistura.

Tabela 5 - 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).

Tabela 6 - Granulometria da brita

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem retida de massa (%)
25	0
19	4
12,5	56
9,5	81
6,3	93
4,75	98
2,36	100
1,18	100
Módulo de finura	6,83
Dimensão máxima característica (mm)	19

Fonte: Autor (2020).

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).

Com o intuito de aumentar a fluidez e trabalhabilidade do concreto, adicionou-se um aditivo plastificante, de alta redução de água, à base de policarboxilato. A ficha técnica do aditivo utilizado encontra-se no Anexo A. Conforme às especificações do fabricante, para os cálculos do aditivo empregado na mistura, para todos os traços, adotou-se uma porcentagem fixa de 0,5% sobre a massa do cimento.

6.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Foram confeccionados três traços de concreto, para as resistências de 20, 25 e 40 MPa, sendo utilizados os materiais descritos anteriormente, conforme se observa na Tabela 7.

Tabela 7 - 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).

6.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Com os traços em mãos, foi possível a produção do concreto para cada resistência. O processo de dosagem e cura foi 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.

Logo após esse processo, efetuado para cada um dos traços, foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos, de altura e diâmetro de 20 e 10 centímetros, respectivamente. A Tabela 8 traz a relação dos corpos-de-prova para cada idade.

Tabela 8 - Classes de resistência e quantidade de corpos-de-prova produzidos

Classes de Resistência	Idade (dias)		
	223	251	279
C20	4	4	4
C25	4	4	4
C40	4	4	4

Fonte: Autor (2020).

No dia seguinte, esses corpos-de-prova foram desmoldados e levados à cura por imersão, em que ficaram submersos em um tanque que continha água, situado em uma câmara úmida, por 28 dias, a fim de que seja ofertada a água necessária para as reações de hidratação do concreto, como se verifica na Figura 14.

Figura 14 - Corpos-de-prova no processo de cura por imersão



Fonte: Autor (2020).

Realizada a cura, fez-se o ensaio de resistência à compressão, de acordo com a norma “NBR 5739:2007 – Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”, como é possível se observar na Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2020).

Foram ensaiados 3 corpos-de-prova para cada traço e os resultados obtidos se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 - 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 9 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.

6.4 INÍCIO DA CONTAMINAÇÃO E ARMAZENAMENTO

Após realizada a cura, deu-se início ao processo de preparação dos corpos-de-prova para a contaminação. Para isso, foi preciso vedar os dois topos da forma

cilíndrica dos corpos-de-prova com resina epóxi, a fim de garantir que a contaminação ocorra em somente um sentido (pela área lateral da forma cilíndrica). A vedação ocorreu da maneira representada na Figura 16.

Figura 16 - Vedação dos corpos-de-prova com resina epóxi



Fonte: Autor (2020).

A ficha técnica da resina epóxi utilizada encontra-se no Anexo B. Concluído o revestimento e a secagem da resina epóxi utilizada, preparou-se o tanque de contaminação, com a formação de uma solução de água e sal de cozinha, na concentração requerida pelo Método Acelerado Modificado, de 250 gramas do sal, por decímetro cúbico de água. O volume de água determinado foi aquele suficiente para emergir todos os corpos-de-prova utilizados na contaminação.

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. Com essas em mãos, realizava-se a titulação potenciométrica para a determinação do teor de cloreto e, por conseguinte, a determinação dos coeficientes de difusão e concentração inicial do cloreto. Essas etapas serão minuciosamente explicadas nos tópicos posteriores.

A Figura 17 demonstra como foi o armazenamento e contaminação dos corpos-de-prova.

Figura 17 - Contaminação por NaCl do concreto



Fonte: Autor (2020).

Vale destacar que, durante o período de contaminação das amostras, o volume de água do tanque era verificado com constância, a fim de garantir que todos os corpos-de-prova estejam submersos. Além disso, para evitar a evaporação da água e consequente variação de concentração da solução contaminante, esta era coberta por uma lona, possível de ser constatada na Figura 17.

6.5 EXTRAÇÃO DO MATERIAL

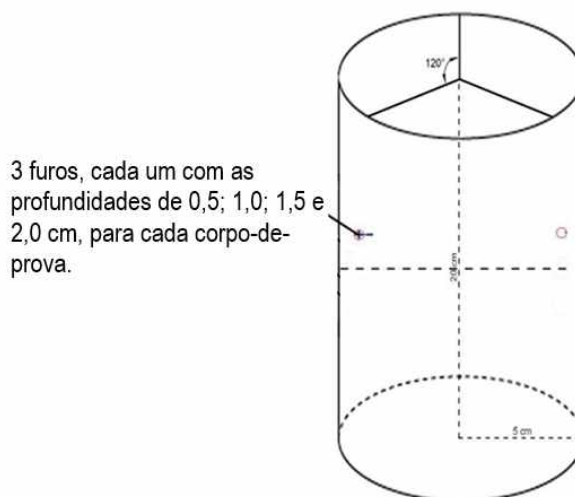
Após efetivado o tempo de contaminação, retirou-se as amostras do tanque em que estavam armazenadas, e efetuou-se a limpeza da superfície dos corpos-de-prova com o auxílio de um tecido seco, a fim de evitar uma concentração superficial elevada de cloretos em vista da presença de resíduos de NaCl .

Para a medição dos teores de cloreto, foi necessário a extração de amostras do material dos corpos-de-prova para a posterior análise laboratorial. O material foi retirado sob a forma pulverulenta, com o auxílio de uma furadeira sem impacto e broca multimaterial com furos a cada 5 mm de profundidade, alinhados em relação ao meio

do corpo de prova, partindo da superfície até 20 mm de profundidade, sendo 5, 10, 15 e 20 mm.

Em cada corpo-de-prova, foram abertos três furos, com uma diferença angular de 120° entre eles, afim de se ter uma maior abrangência da penetração de cloretos considerando toda a área lateral dos corpos-de-prova. Em cada furo, retirou-se materiais das quatro profundidades analisadas. A Figura 18 é uma representação dos furos no corpo-de-prova, com suas profundidades, enquanto as Figuras 19 e 20 mostram o processo de obtenção das amostras dos corpos-de-prova.

Figura 18 - Desenho esquemático dos furos



Fonte: Autor (2020).

Figura 19 - Extração do material pulverulento



Fonte: Autor (2020).

Figura 20 - Obtenção do material pulverulento



Fonte: Autor (2020).

O material pulverulento retirado de cada perfuração foi armazenado em envoltórios plásticos, sendo devidamente identificados, de acordo com sua profundidade e tipo de traço. O mesmo procedimento foi realizado para as duas idades restantes.

A Figura 21 mostra as amostras referentes à primeira idade, extraídas e identificadas em seus envoltórios.

Figura 21 - Amostras extraídas na primeira idade



Fonte: Autor (2020).

6.6 ANÁLISE DO TEOR DE CLORETOS NO CONCRETO

6.6.1 Titulação potenciométrica

Para a determinação quantitativa do teor de íons cloreto presente em cada amostra, utilizou-se o ensaio titulométrico, também conhecido como titulação potenciométrica, seguindo as orientações da NBR 13797.

O ensaio foi realizado da seguinte maneira, para cada amostra: inicialmente pesou-se 1 grama do material pulverulento retirado em um Erlenmeyer, adicionou-se 200 milímetros de água corrente, com o intuito de envolver todo o cloreto absorvido na contaminação na execução do ensaio, de modo a garantir sua eficácia nas medições. Feito isso, agitou-se a solução até que a mesma se tornasse homogênea. Em seguida, realizou-se a filtração da solução obtida, por meio de papel filtro, até que a mesma se encontrasse transparente. O processo de filtração está representado na Figura 22. A Figura 23 demonstra a solução após o processo de filtração.

Figura 22 - Filtração das amostras



Fonte: Autor (2020).

Figura 23 - Solução após a filtração



Fonte: Autor (2020).

A partir da solução filtrada, dividiu-se esta em três amostras, cada uma com 50 milímetros da solução, para realizar o processo de titulação.

Adicionou-se cinco gotas da solução de água destilada e cromato de potássio (K_2CrO_4), a 5%, reagente de coloração amarela que age como indicador químico dos íons Cl^- , e homogeneizou-se as amostras.

Utilizando-se uma bureta graduada de 10 milímetros, foi possível gotejar a solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) e água, de 0,0141 M, até atingir o ponto de viragem, ou seja, o volume correspondente de nitrato que permite a mudança de coloração da mistura para um tom marrom-avermelhado, oriunda da precipitação do cromato de prata (Ag_2CrO_4).

A Figura 24 ilustra o processo de adição do nitrato de prata à solução com cromato de potássio, a Figura 25 a reação que ocorre quando a gota de nitrato de prata entra em contato com a solução e a Figura 26 a diferença de coloração obtida ao final da titulação.

Figura 24 - Adição do AgNO_3 à solução com K_2CrO_4



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Início da reação do AgNO_3 em contato com a solução com K_2CrO_4



Fonte: Autor (2020).

Figura 26 - Diferença de coloração obtida ao final da titulação



Fonte: Autor (2020).

Esse processo foi realizado para as três idades de contaminação analisadas.

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

A partir da determinação do volume obtido na titulação potenciométrica, torna-se possível obter o percentual de cloretos presente no concreto analisado, através da equação 6:

$$C = \frac{V_{Cl} \cdot M_{Cl} \cdot C_{solução}}{M_{amostra}} \cdot 100 \quad (6)$$

Sendo 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.

6.6.3 Determinação do perfil de cloretos, da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão (D)

Com os valores dos teores de cloreto em relação à massa de concreto de cada amostra analisada para cada profundidade, é possível produzir um gráfico desses dados em função da profundidade de cada camada estudada. Esse gráfico se configura em um perfil que relaciona a concentração dos íons cloreto em relação à profundidade de penetração do mesmo.

Com o auxílio do Excel, por meio do Método dos Mínimos Quadrados na solução da Segunda Lei de Fick (Eq.3), esse gráfico é ajustado, o que torna possível de se obter o valor da Concentração Superficial de cloretos para cada situação analisada, uma vez que basta calcular o ponto em que o perfil de penetração do cloreto intercepta o eixo das ordenadas (concentração referente a profundidade de 0 milímetros).

A constatação do valor da concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto, chamada na Eq.3 de ' C_0 ', se deu a partir da verificação da repetição dos valores do teor de cloretos nas últimas camadas analisadas para cada perfil. Assim, adotou-se como C_0 a média de tais valores, para cada classe de resistência de cada idade de contaminação, uma vez que essa repetição se remete a quantidade de cloretos presentes na amostra de concreto antes de sua contaminação.

Deste modo, a fim de calcular o coeficiente de difusão de íons cloreto, utilizou-se a equação 7, que consiste na solução da segunda Lei de Fick, exposta por Crank (1975), que considerou o ' C_s ' constante ao longo do tempo.

$$M_t = 2 \cdot C_s \cdot \left(\frac{D \cdot t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Sendo que:

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

Isolando o coeficiente de difusão ' D ' na equação 7, tem-se que:

$$D = \frac{M_t^2 \cdot \pi}{4 \cdot C_s^2 \cdot t} \quad (8)$$

A massa total de cloretos difundidos no tempo t " Mt " é calculada pelo produto da densidade do íon cloreto, que é 2,98 gramas por litro, pela soma das médias dos volumes de cloreto, encontrados nas titulações.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

Os valores médios dos teores de cloretos obtidos em cada idade estão dispostos na Tabela 10. O Anexo C traz as tabelas completas, com todos os resultados das titulações realizadas, com os respectivos teores de cloreto, para todas as idades, traços e profundidade analisados.

Tabela 10 – Valores médios dos teores de cloreto para as classes de resistência C20, C25 e C40

Classe de resistência	Profundidade (mm)	Teores de cloreto da 1ª idade (%)	Teores de cloreto da 2ª idade (%)	Teores de cloreto da 3ª idade (%)
20 MPa	5	0,698	0,954	1,022
	10	0,508	0,846	0,772
	15	0,445	0,754	0,666
	20	0,385	0,697	0,628
25 MPa	5	0,578	0,896	1,031
	10	0,491	0,787	0,833
	15	0,429	0,715	0,752
	20	0,387	0,663	0,692
40 MPa	5	0,751	0,978	1,115
	10	0,643	0,893	1,015
	15	0,549	0,755	0,872
	20	0,501	0,712	0,786

Fonte: Autor (2020).

Os gráficos referentes às amostras dos teores de cloreto em função da profundidade analisada, para as 3 idades, das classes de resistência C20, C25 e C40, se encontram, respectivamente, nos Anexos D, E e F.

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos (Cs) e o coeficiente de difusão de íons cloretos (D) e seus valores médios para a classe de resistência C20, nas três idades analisadas.

Tabela 11 – 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% CP1_223d	223	0,7253	0,7587	1,1937	1,0559
T1 0% CP2_223d	223	0,8340		0,8806	
T1 0% CP3_223d	223	0,7169		1,0934	
T1 0% CP1_251d	251	1,0543	1,0289	1,2394	1,2858
T1 0% CP2_251d	251	1,0319		1,2912	
T1 0% CP3_251d	251	1,0006		1,3267	
T1 0% CP1_279d	279	1,0835	1,0938	0,9201	0,9230
T1 0% CP2_279d	279	1,1048		0,9151	
T1 0% CP3_279d	279	1,0931		0,9338	

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos (Cs) e o coeficiente de difusão de íons cloretos (D) e seus valores médios para a classe de resistência C25, nas três idades analisadas.

Tabela 12 – 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% CP1_223d	223	0,6344	0,6307	1,2536	1,2951
T2 0% CP2_223d	223	0,6286		1,2508	
T2 0% CP3_223d	223	0,6290		1,3810	
T2 0% CP1_251d	251	0,9719	0,9579	1,3166	1,3146
T2 0% CP2_251d	251	0,9444		1,3177	
T2 0% CP3_251d	251	0,9573		1,3094	
T2 0% CP1_279d	279	1,1002	1,1013	1,0449	1,0440
T2 0% CP2_279d	279	1,1068		1,0294	
T2 0% CP3_279d	279	1,0968		1,0578	

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos (Cs) e o coeficiente de difusão de íons cloretos (D) e seus valores médios para a classe de resistência C40, nas três idades analisadas.

Tabela 13 – 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% CP1_223d	223	0,8298		1,2503	
T3 0% CP2_223d	223	0,8169	0,8226	1,2751	1,2794
T3 0% CP3_223d	223	0,8211		1,3129	
T3 0% CP1_251d	251	1,1252		1,1815	
T3 0% CP2_251d	251	1,0585	1,0682	1,2739	1,2595
T3 0% CP3_251d	251	1,0210		1,3230	
T3 0% CP1_279d	279	1,2289		1,1027	
T3 0% CP2_279d	279	1,2318	1,2289	1,0923	1,100
T3 0% CP3_279d	279	1,2260		1,1050	

Fonte: Autor (2020).

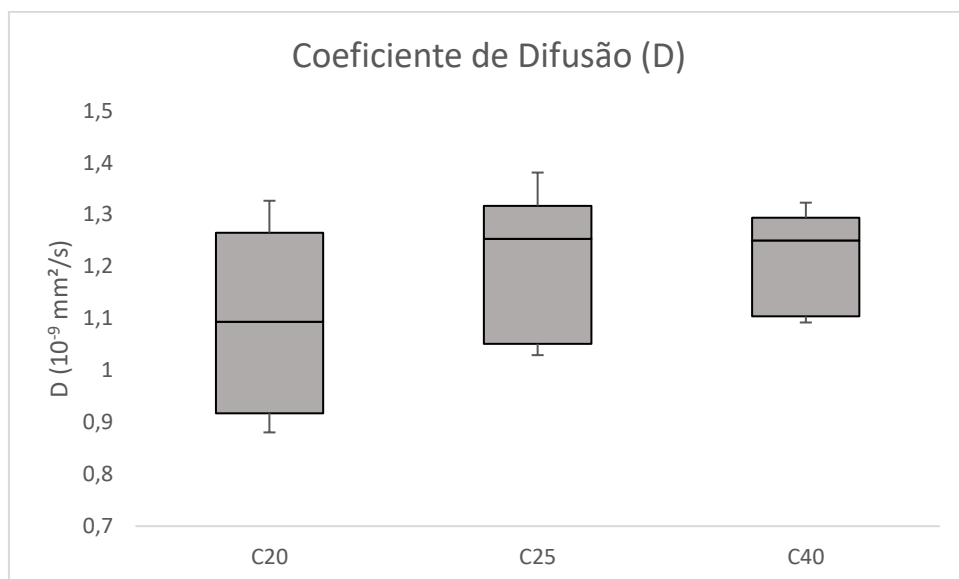
Diante de tais resultados, faz-se necessária a análise comparativa dos coeficientes de difusão de íons cloreto encontrados para os diferentes traços e idades de contaminação.

7.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO

Com o intuito de analisar 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 “*D*”, além do 1º, 2º e 3º quartil dos valores obtidos, para cada classe de resistência verificada (C20, C25 e C40).

Deste modo, a Figura 27 apresenta o diagrama de caixa dos valores calculados para o coeficiente de difusão “*D*”.

Figura 27 - Diagrama de caixa do coeficiente de difusão "D"



Fonte: Autor (2020).

A partir da análise da Figura 27, depreende-se uma determinada constância entre os resultados obtidos para o coeficiente de difusão "D" para as três classes de resistência e idades de contaminação estudados, sendo que a amplitude entre o menor e o maior "D" calculado é de, aproximadamente, $0,50 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{s}$.

Partindo da análise no escopo de cada idade de contaminação, essa constância entre os resultados obtidos é ainda maior, sendo que a amplitude entre o menor e o maior "D" calculado para as idades de 223, 251 e 279 dias são, respectivamente: $0,50 \times 10^{-9}$; $0,15 \times 10^{-9}$ e $0,19 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{s}$.

Já em relação às classes de resistência, a amplitude entre o menor e maior "D", para as classes C20, C25 e C40 são, respectivamente: $0,45 \times 10^{-9}$; $0,35 \times 10^{-9}$ e $0,23 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{s}$.

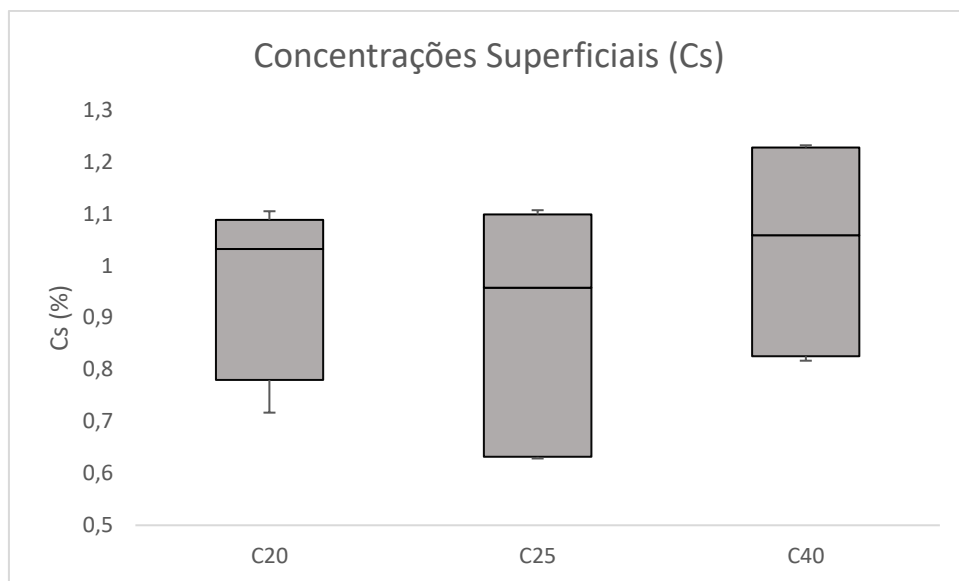
7.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONCENTRAÇÕES SUPERFICIAIS DE ÍONS CLORETO

A fim de analisar 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 da concentração superficial “Cs”, além do 1º, 2º e 3º quartil dos valores obtidos, para cada classe de resistência verificada (C20, C25 e C40).

Assim, a Figura 28 apresenta o diagrama de caixa dos valores calculados para a concentração superficial “Cs”.

Figura 28 - Diagrama de caixa da concentração superficial “Cs”



Fonte: Autor (2020).

A partir da análise da Figura 28, conforme também ocorreu com o coeficiente de difusão, depreende-se uma constância dos valores obtidos para as três classes de resistência e idades de contaminação estudados.

8 CONCLUSÕES

Logo, em relação aos teores de cloreto das amostras analisadas, é válido salientar que todas as curvas de penetração de cloreto obtidas, independentemente da classe de resistência e da idade de contaminação, possuem a forma de uma curva decrescente, o que indica teores menores de cloreto à medida que se afasta da superfície. Desta maneira, pode-se afirmar que as concentrações do cloreto tendem a ser maiores nas camadas mais próximas à superfície da estrutura de concreto.

Com a análise dos gráficos de penetração do cloreto e da Tabela 10, é perceptível que a variação dos teores é maior nas camadas mais superficiais, do que nas camadas mais profundas. Isso acontece devido ao fato do cloreto, a medida que adentra na estrutura de concreto, sua passagem se torna mais difícil, o que faz com que esse se deposite nas camadas mais superficiais. Esse fenômeno também explica a redução da variação da concentração superficial nas idades mais elevadas.

Já no que diz respeito ao coeficiente de difusão “D”, conforme exposto anteriormente, infere-se uma determinada constância entre os resultados obtidos para as três classes de resistência e idades de contaminação estudados.

Sobre a concentração superficial “Cs” de íons cloreto, notou-se que, a partir da análise da Figura 28 e das Tabelas 11, 12 e 13, para as três classes de resistência estudadas, à medida que se amplifica o tempo de contaminação das amostras, os valores das concentrações superficiais tendem a aumentar. Isso é explicado pela relação diretamente proporcional entre o tempo de exposição da estrutura ao agente nocivo e a concentração desse agente na superfície da estrutura.

Os valores obtidos do “Cs” para as diferentes classes de resistência são muito próximos, devido ao fato da concentração superficial corresponder ao teor de cloretos presentes na superfície da amostra estudada, isto é, na profundidade de 0 milímetros, o que implica na pouca interferência da composição e proporção dos materiais empregados na produção do traço do concreto da estrutura no valor obtido para essa variável.

REFERÊNCIAS

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to despassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**. v.30. p.1047-1055. 2000.

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. 278p.

ANDRADE, J. J. Vida útil das Estruturas de Concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 31, p.923-951.

ANDRIOLO, F.R. **AAR Dams Affected in Brazil - Report on the Current Situation**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. Anais ... Québec, 2000. p. 1243-1252.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13797 **Água - Determinação de cloretos - Métodos titulométricos do nitrato mercúrico e do nitrato de prata**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739 **Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

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

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. **Traços de concreto para obras de pequeno porte**. UNESP, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil. Bauru. São Paulo, p. 8, 2008.

BENDER, J. A. M. **Desenvolvimento de ensaio de difusão acelerado em condição saturada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2016. 112p.

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.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão em armaduras de concreto**. 2. Ed. Goiânia: PINI e UFG, 1997. 237p.

CENTURIONE, S.L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A.F. **Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato**. 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 2003, João Pessoa, Brasil.

CODY, R. D. et al. **Experimental deterioration of highway concrete by chloride deicing salts**. Enviroment & Engineering Geoscience. V. 2, n. 4, Winter, 1996. p. 575- 588.

DESCHENES, D. J., 2009. **ASR/DEF-Damaged bent caps : shear tests and field implications**. Master of Science in Engineering, The University of Texas.

EDDINE, L. P. K. **Análise comparativa do ataque químico de íons cloreto em concretos com e sem fibras de aço.** 2017. Dissertação (Engenharia Civil) - UFU, Uberlândia, 2017.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2013. 31p.

FILHO, L. C. P. S. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

FONTON, T. **Proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal de Rio Grande, 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.** 5-6 November, 2007, Guimarães, Portugal.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo: USP, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. 271p.

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

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. p. 1-30.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 143p.

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. 280p.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. Dissertação (Construção Civil) - UFMG, Belo Horizonte, 2008. p. 21.

LEITE, Helena Rodrigues; GIRARDI, Ricardo; HASTENPFLUG, Daniel. Durabilidade do Concreto: Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, [s. l.], ano 2018, n. 8, ed. 8, p. 14-25, 1 jul. 2018. Disponível em: <http://www.fsma.edu.br/RESA>. Acesso em: 1 jul. 2020.

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.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: Pini, 2007.

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**. Nicole Pagan Hasparyk - IBRACON; ed. 4; 2014.

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. 828p.

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

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS C. G.; FARDIS, M. N. **Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete**. ACI Materials Journal, No 88-M24, p. 186-195, 1991a

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. 138p.

POWERS, T. C. **A working Hypothesis for further studies of frost resistance of concrete**. Journal of the American Concrete Institute. Michigan, v. 16, n. 4, p. 245- 273, feb., 1945.

RIBEIRO, D. V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap 06, p. 87-118.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Brasília, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006.

SCRIVENER, K.; TAYLOR, H.F.W. **Advanced in Cement Research**. 1993.

SILVA, Turíbio José da. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 1998. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.

SONG, Ha Won; KWON, Seung-Jun; BYUN, Keun-Joo; PARK, Chan-Kyu. **Predicting carbonation in early-aged cracked concrete**. Cement and Concrete Research, 2005.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

STANISH, K. D., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. (2000). **Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 2000. 31 p.

THOMAZ, Eduardo C. S. **Ataque de sulfatos ao concreto de cimento portland**. Notas de Aula. 2013.

TRINDADE, S. D. **Patologias em estruturas de concreto armado**. Santa Maria, UFSM, 2015. Tese de Conclusão de Curso, Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

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

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. Campinas, Unicamp, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

ZHU, X.; ZI G.; CAO, Z.; CHENG, X. **Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete**. Construction and Building Materials, 2016.

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 resistências	Líquido alaranjado.	0,3 a 1,2%	1,025 - 1,065
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 trinchá 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

1ª idade

Traço 1

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	13	13,5	14	13,5	0,674848	1,19371E-09
2ª	11,25	10,2	9,5	10,31667	0,515717	
3ª	9,7	9,4	9,5	9,533333	0,476559	
4ª	8,1	8,45	8,35	8,3	0,414906	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	15,55	15,25	15,2	15,33333	0,766494	8,80561E-10
2ª	10,25	9,9	10,05	10,06667	0,50322	
3ª	8,25	8,4	8,45	8,366667	0,418239	
4ª	7,25	7,45	7,4	7,366667	0,36825	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	12,9	13	13,2	13,03333	0,65152	1,0934E-09
2ª	10,25	9,95	10,05	10,08333	0,504053	
3ª	8,7	8,85	8,9	8,816667	0,440734	
4ª	7,35	7,55	7,5	7,466667	0,373249	

Cs1	0,7253
Cs2	0,834
Cs3	0,7169
C0	0,385469

Traço 2

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	11,45	11,6	11,65	11,56667	0,578203	1,25363E-09
2ª	9,5	9,9	9,85	9,75	0,48739	
3ª	8,4	8,6	8,55	8,516667	0,425737	
4ª	7,6	7,45	7,45	7,5	0,374915	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	11,45	11,25	11,3	11,33333	0,566539	1,25079E-09
2ª	9,75	10	10,05	9,933333	0,496555	

3 ^a	8,35	8,15	8,2	8,233333	0,411574
4 ^a	7,55	7,4	7,4	7,45	0,372416

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	11,6	12	11,85	11,81667	0,5907	1,38097E-09
2 ^a	9,6	9,9	9,9	9,8	0,48989	
3 ^a	8,7	9,1	9,1	8,966667	0,448232	
4 ^a	8,1	8,4	8,3	8,266667	0,41324	

Cs1	0,6344
Cs2	0,6286
Cs3	0,629
C0	0,386857

Traço 3

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	14,8	15,15	15,1	15,01667	0,750664	1,25027E-09
2 ^a	12,95	13,15	13,1	13,06667	0,653186	
3 ^a	10,6	10,85	10,9	10,78333	0,539045	
4 ^a	9,9	9,8	10	9,9	0,494888	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	14,9	15,1	15,05	15,01667	0,750664	1,27512E-09
2 ^a	12,3	12,7	12,65	12,55	0,627359	
3 ^a	10,95	11,05	11,05	11,01667	0,550709	
4 ^a	9,75	10	9,95	9,9	0,494888	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	14,8	15,25	15,15	15,06667	0,753164	1,31294E-09
2 ^a	12,9	13,05	13	12,98333	0,64902	
3 ^a	11,1	11,15	11,15	11,13333	0,556541	
4 ^a	10,05	10,4	10,35	10,26667	0,513218	

Cs1	0,8298
Cs2	0,8169
Cs3	0,8211
C0	0,500998

2ª idade

Traço 1

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	19,4	19,6	19,7	19,56667	0,978113	1,23944E-09
2ª	17	17,15	17,05	17,06667	0,853141	
3ª	14,7	14,9	14,8	14,8	0,739833	
4ª	13,9	14,1	14,05	14,01667	0,700675	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	19,25	18,95	19,05	19,08333	0,953952	1,2912E-09
2ª	17,1	17,25	17,15	17,16667	0,85814	
3ª	14,9	15,2	15,15	15,08333	0,753997	
4ª	14,1	14	14,05	14,05	0,702342	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	18,4	18,7	18,75	18,61667	0,930624	1,32674E-09
2ª	16,75	16,5	16,4	16,55	0,827313	
3ª	15,5	15,25	15,3	15,35	0,767327	
4ª	13,8	13,75	13,7	13,75	0,687345	

Cs1	1,0543
Cs2	1,0319
Cs3	1,0006
C0	0,696787

Traço 2

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	18	18,25	18,2	18,15	0,907295	1,31656E-09
2ª	16,1	15,95	15,95	16	0,79982	
3ª	14,65	14,7	14,5	14,61667	0,730669	
4ª	13,3	13,45	13,5	13,41667	0,670682	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	17,9	17,55	17,5	17,65	0,882301	1,3177E-09
2ª	15,5	15,6	15,7	15,6	0,779824	
3ª	14,15	14,05	14,05	14,08333	0,704008	
4ª	13,25	13,1	13	13,11667	0,655686	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	18,1	17,85	17,95	17,96667	0,898131	1,30944E-09

2 ^a	15,6	15,65	15,7	15,65	0,782324
3 ^a	14,35	14,15	14,05	14,18333	0,709007
4 ^a	13,2	13,35	13,3	13,28333	0,664017

Cs1	0,9719
Cs2	0,9444
Cs3	0,9573
C0	0,663462

Traço 3

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	20,1	20,8	20,65	20,51667	1,025602	1,18153E-09
2 ^a	17,9	18,25	18,45	18,2	0,909795	
3 ^a	14,9	15,5	15,4	15,26667	0,763161	
4 ^a	14	14,45	14,2	14,21667	0,710673	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	19	19,8	19,5	19,43333	0,971448	1,27385E-09
2 ^a	17,8	17,7	17,85	17,78333	0,888966	
3 ^a	14,9	15,2	15,2	15,1	0,75483	
4 ^a	14,1	14,5	14,3	14,3	0,714839	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	18,85	18,55	18,8	18,73333	0,936456	1,32295E-09
2 ^a	17,4	17,75	17,6	17,58333	0,878969	
3 ^a	15,25	14,8	14,85	14,96667	0,748165	
4 ^a	14,05	14,35	14,2	14,2	0,70984	

Cs1	1,1252
Cs2	1,0585
Cs3	1,021
C0	0,711784

3^a idade

Traço 1

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1 ^a	20,5	20,3	20,25	20,35	1,017271	9,20087E-10
2 ^a	15,25	15	15,2	15,15	0,757329	

3ª	13,2	13,1	13	13,1	0,654852
4ª	12,6	12,5	12,4	12,5	0,624859

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	20,6	20,9	20,3	20,6	1,029768	9,15137E-10
2ª	15,2	15,8	15,7	15,56667	0,778158	
3ª	13,5	13,4	13,3	13,4	0,669849	
4ª	12,7	12,4	12,6	12,56667	0,628192	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	20,4	20,4	20,3	20,36667	1,018104	9,3383E-10
2ª	15,6	15,8	15,5	15,63333	0,78149	
3ª	13,4	13,7	13,3	13,46667	0,673182	
4ª	12,4	12,6	12,9	12,63333	0,631524	

Cs1	1,0835
Cs2	1,1048
Cs3	1,0931
C0	0,628192

Traço 2

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	20,75	20,5	20,45	20,56667	1,028102	1,04492E-09
2ª	16,65	16,6	16,8	16,68333	0,833979	
3ª	15	15,25	14,95	15,06667	0,753164	
4ª	13,85	13,9	13,65	13,8	0,689844	

Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	20,85	20,5	20,7	20,68333	1,033934	1,02937E-09
2ª	16,6	16,6	16,8	16,66667	0,833146	
3ª	15,25	14,8	14,7	14,91667	0,745665	
4ª	13,8	13,75	13,7	13,75	0,687345	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm²/s)
1ª	20,55	20,7	20,55	20,6	1,029768	1,05778E-09
2ª	16,6	16,7	16,6	16,63333	0,831479	
3ª	14,9	15,4	15,1	15,13333	0,756496	
4ª	13,95	14	13,9	13,95	0,697343	

Cs1	1,1002
Cs2	1,1068

Cs3 1,0968
C0 0,691511

Traço 3

Camada	CP1	CP1	CP1	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1 ^a	22,5	22,45	22,1	22,35	1,117248	1,10274E-09
2 ^a	20,5	20,1	20,15	20,25	1,012272	
3 ^a	17,5	17,65	17,3	17,48333	0,87397	
4 ^a	15,95	15,7	15,7	15,78333	0,788989	

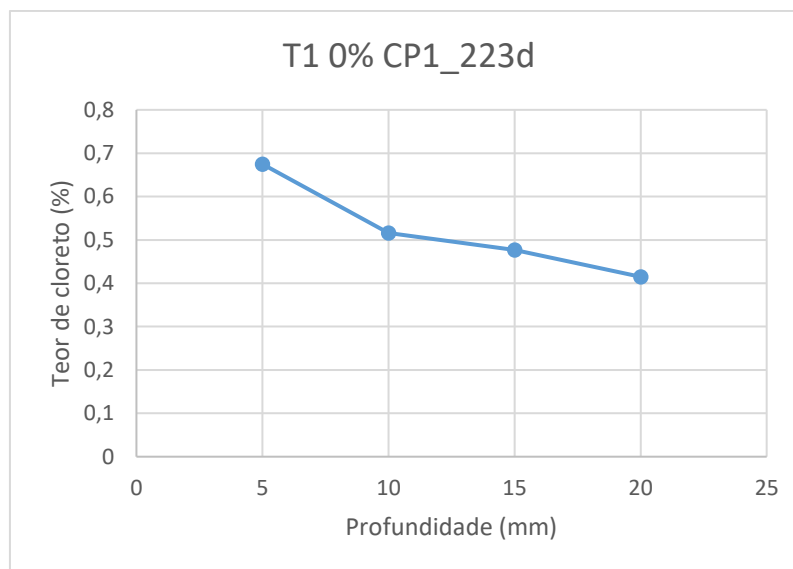
Camada	CP2	CP2	CP2	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1 ^a	22,5	22,1	22,3	22,3	1,114749	1,09226E-09
2 ^a	20,25	20,6	20,2	20,35	1,017271	
3 ^a	17,3	17,5	17,3	17,36667	0,868138	
4 ^a	15,65	15,55	15,8	15,66667	0,783157	

Camada	CP3	CP3	CP3	Média	C (%)	D (mm ² /s)
1 ^a	22,4	22,05	22,3	22,25	1,112249	1,10504E-09
2 ^a	20,4	20,2	20,3	20,3	1,014771	
3 ^a	17,5	17,2	17,7	17,46667	0,873136	
4 ^a	15,8	15,7	15,75	15,75	0,787322	

Cs1 1,2289
Cs2 1,2318
Cs3 1,226
C0 0,786489

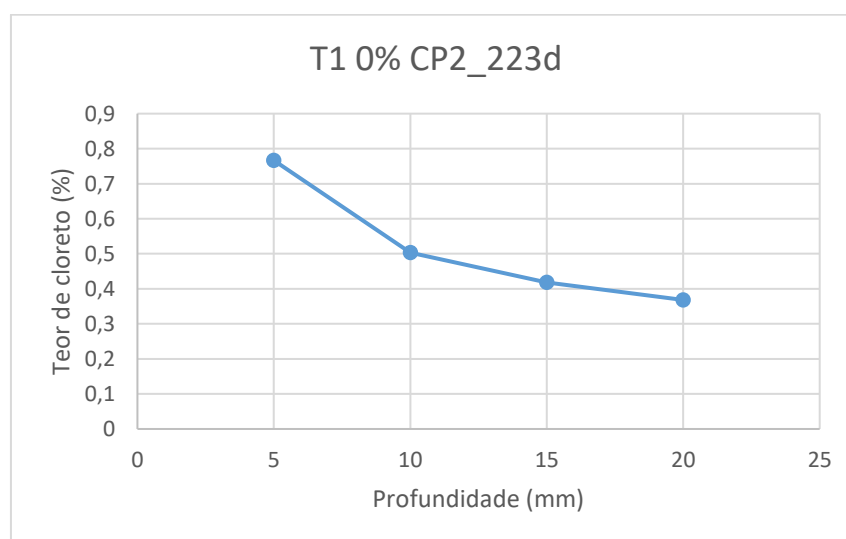
ANEXO D - GRÁFICOS DOS TEORES DE CLORETO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ANALISADA, DA CLASSE DE RESISTÊNCIA C20, PARA AS 3 IDADES DE CONTAMINAÇÃO

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 1



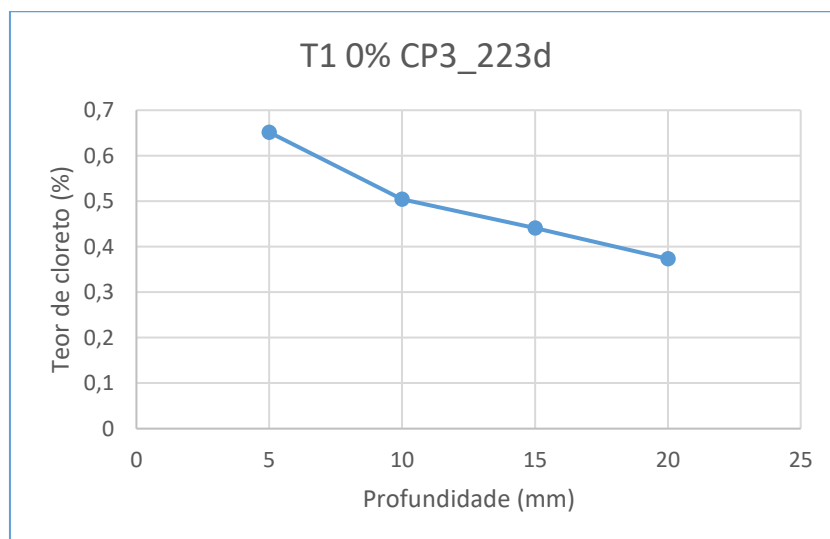
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 2



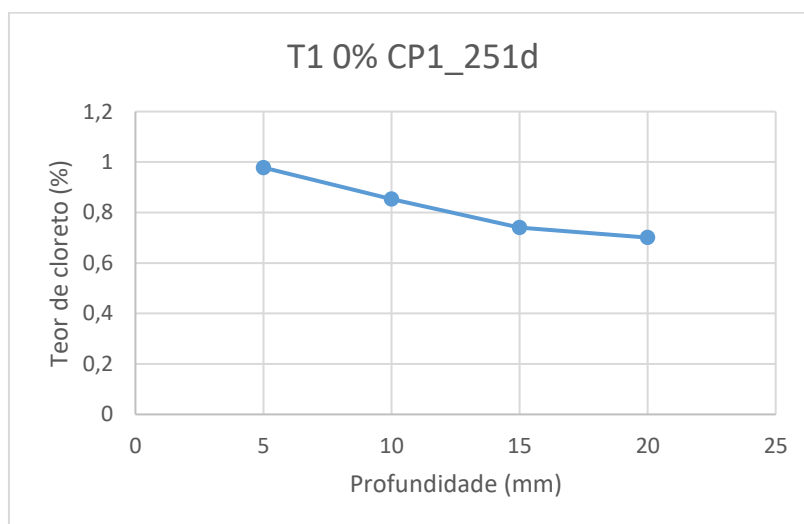
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 3



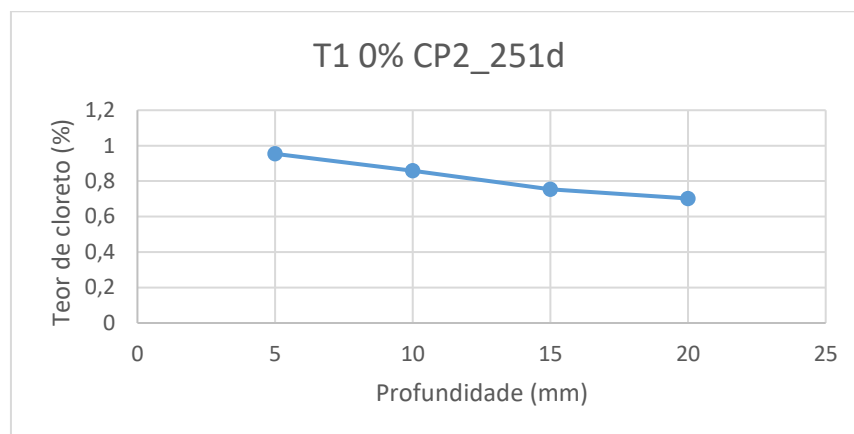
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 1



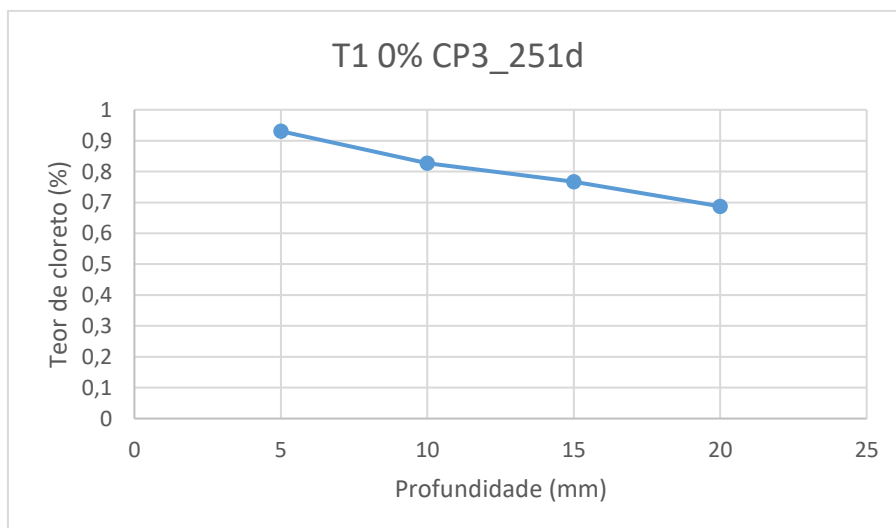
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 2



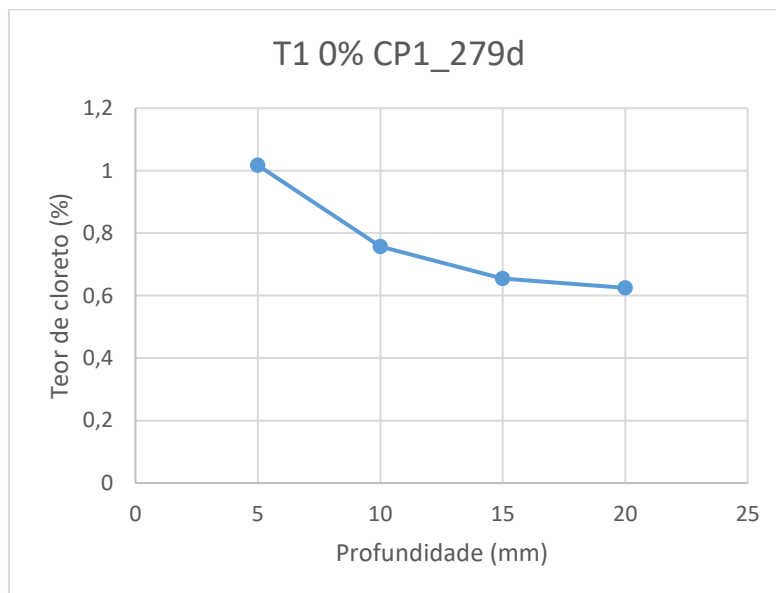
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 3



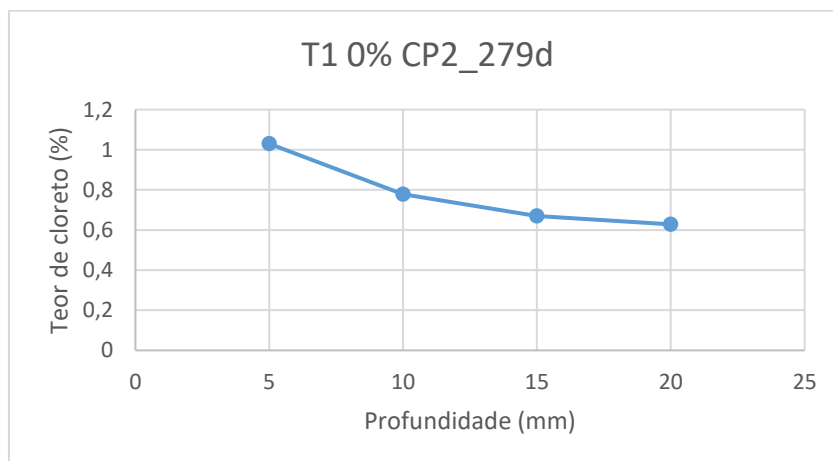
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 1



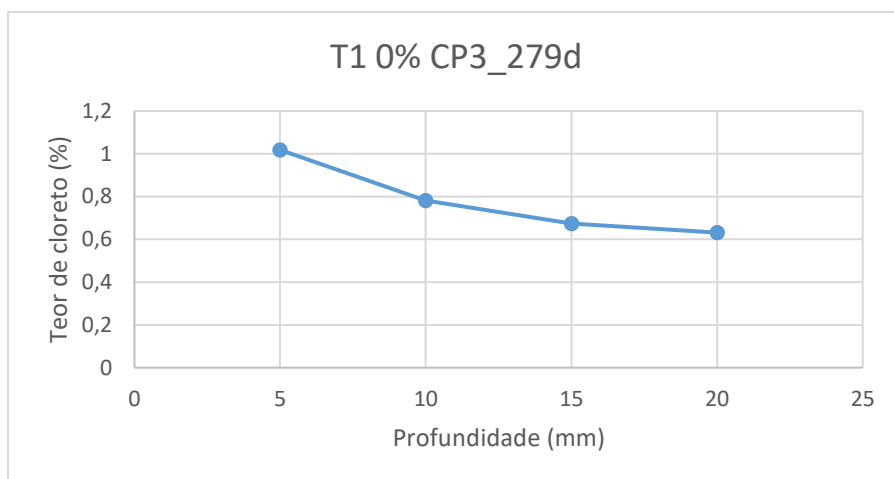
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 2



Fonte: Autor (2020).

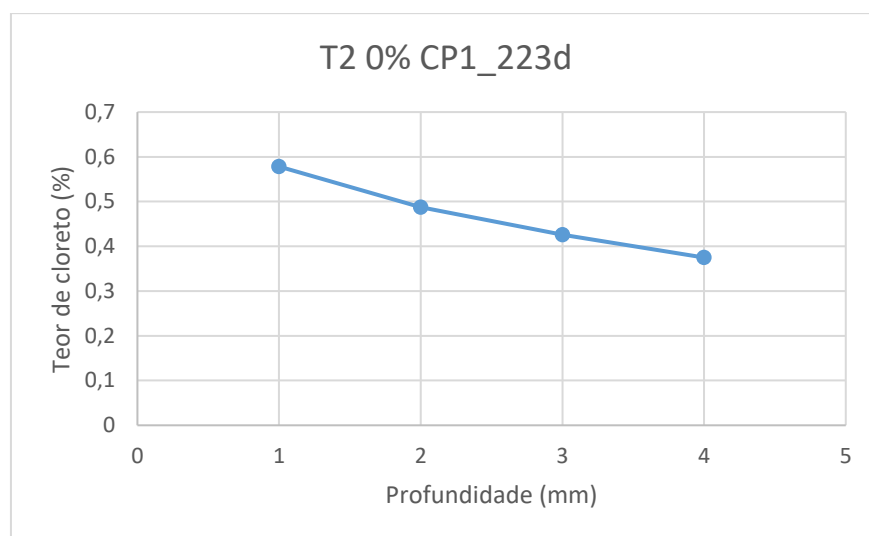
Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C20, corpo-de-prova 3



Fonte: Autor (2020).

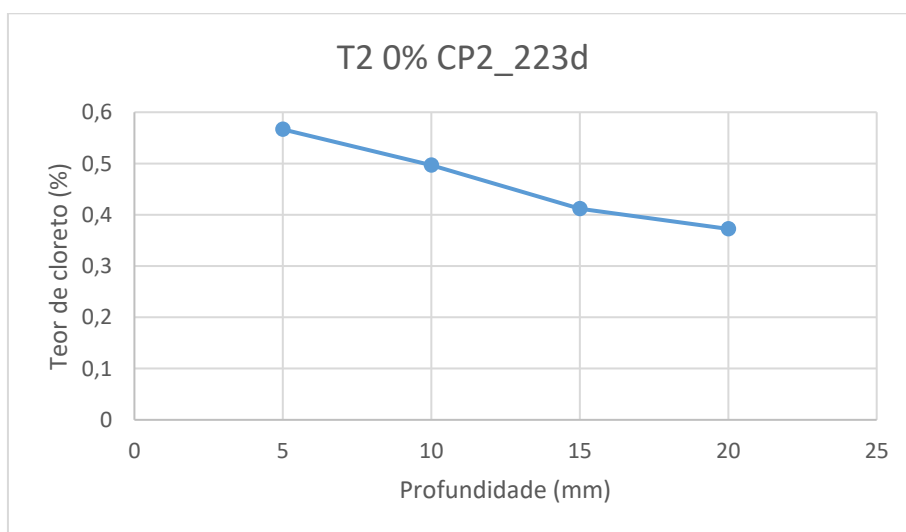
ANEXO E - GRÁFICOS DOS TEORES DE CLORETO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ANALISADA, DA CLASSE DE RESISTÊNCIA C25, PARA AS 3 IDADES DE CONTAMINAÇÃO

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 1



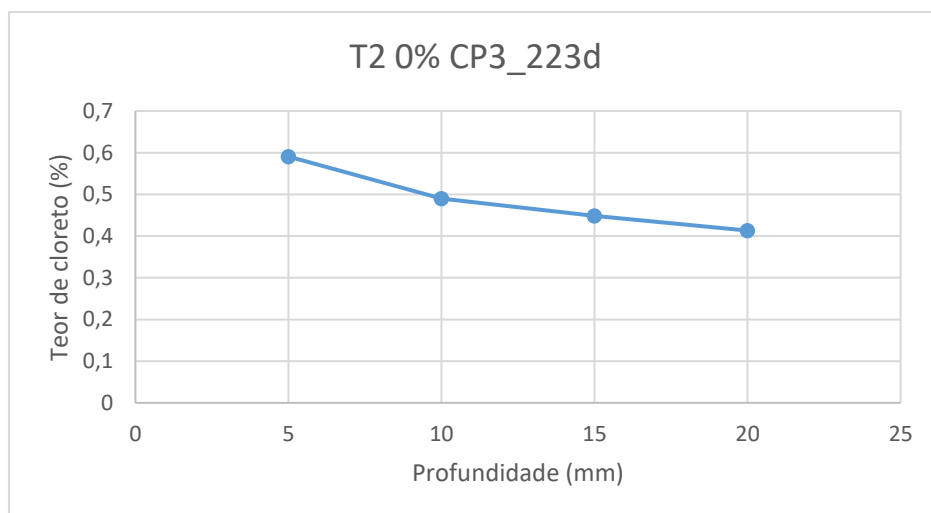
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 2



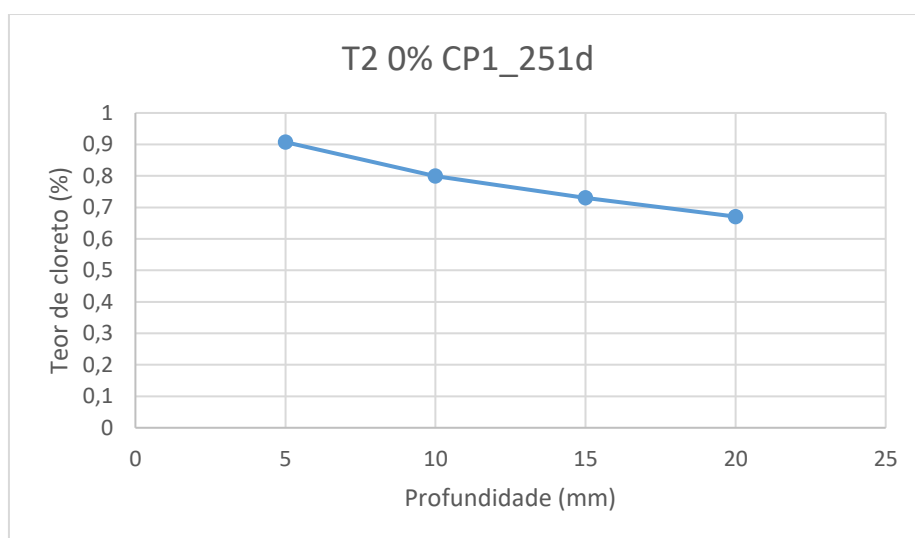
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 3



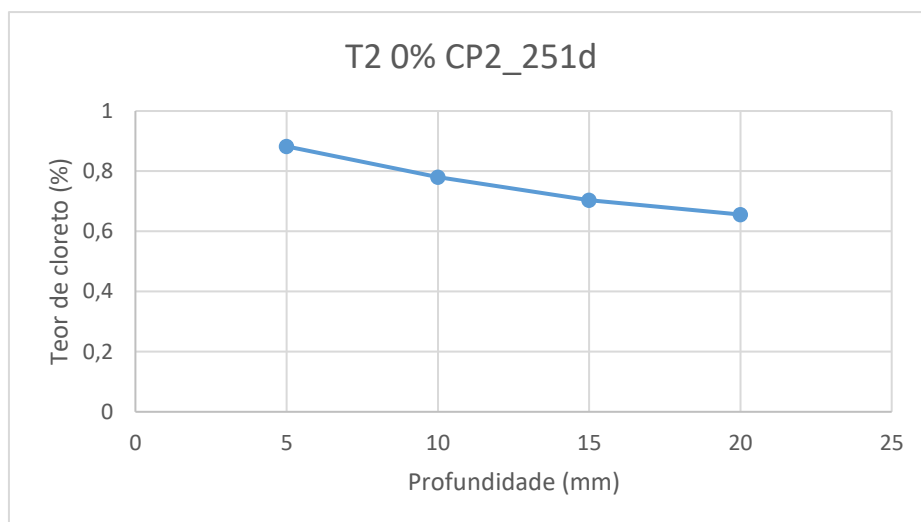
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 1



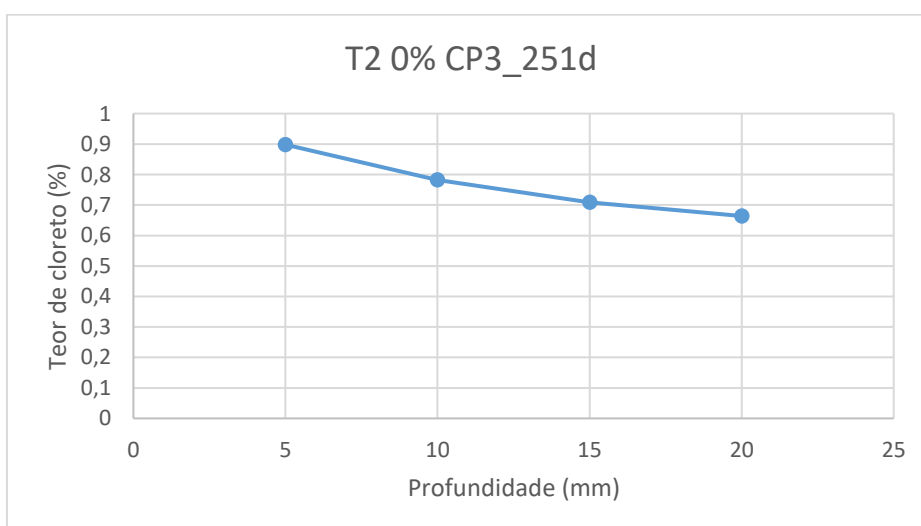
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 2



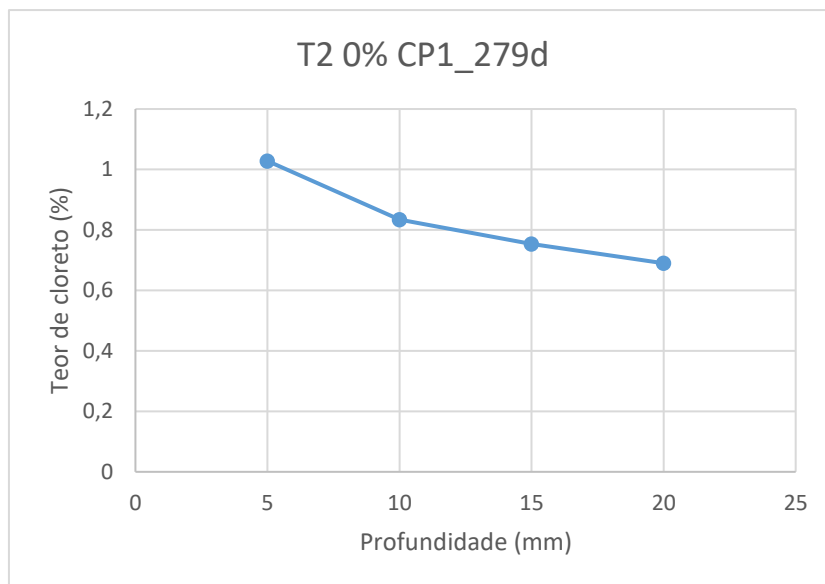
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 3



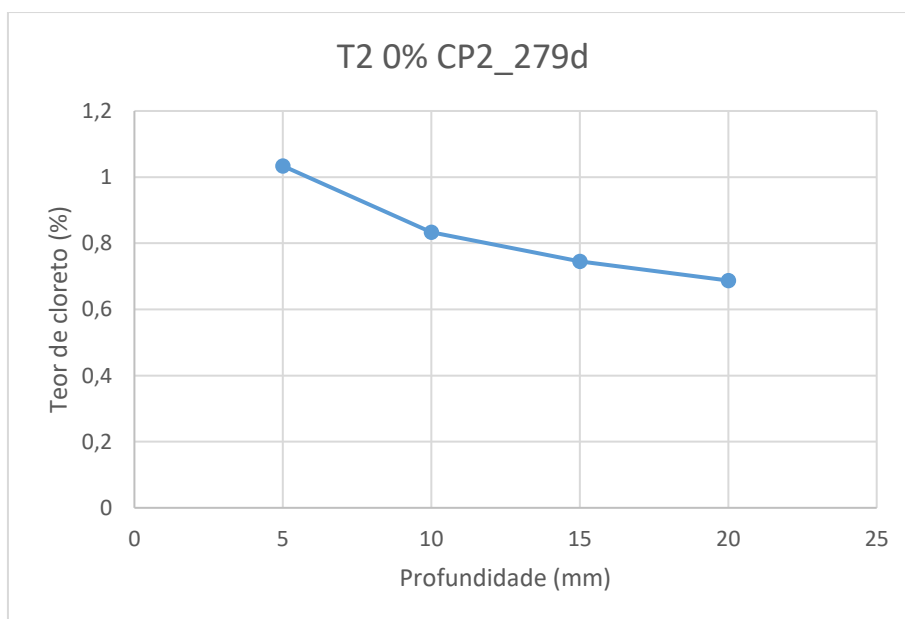
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 1



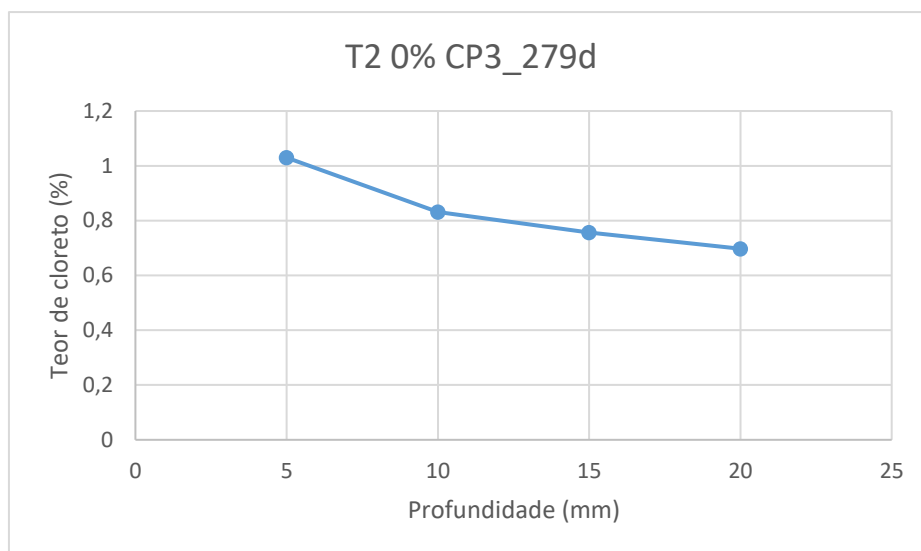
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 2



Fonte: Autor (2020).

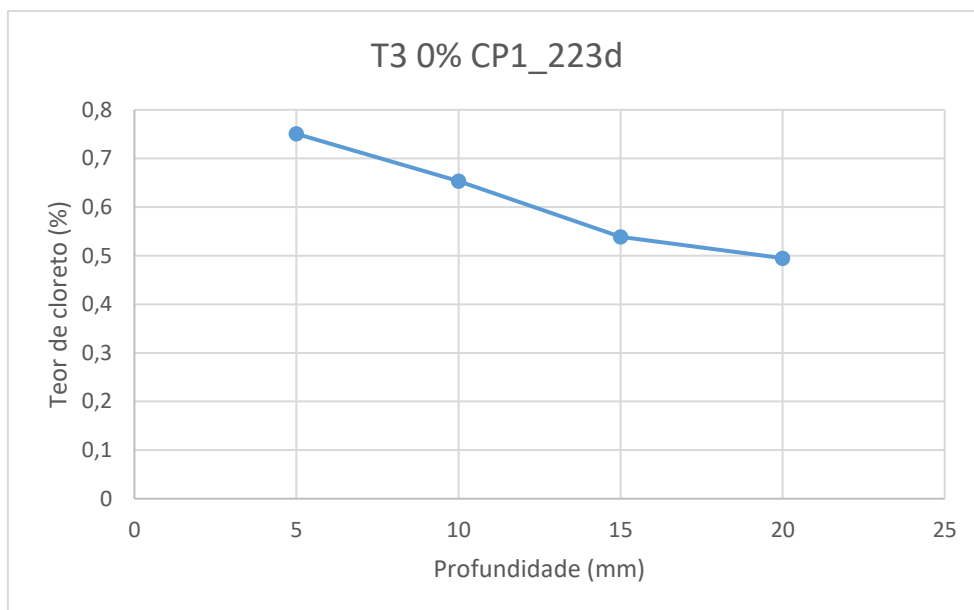
Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C25, corpo-de-prova 3



Fonte: Autor (2020).

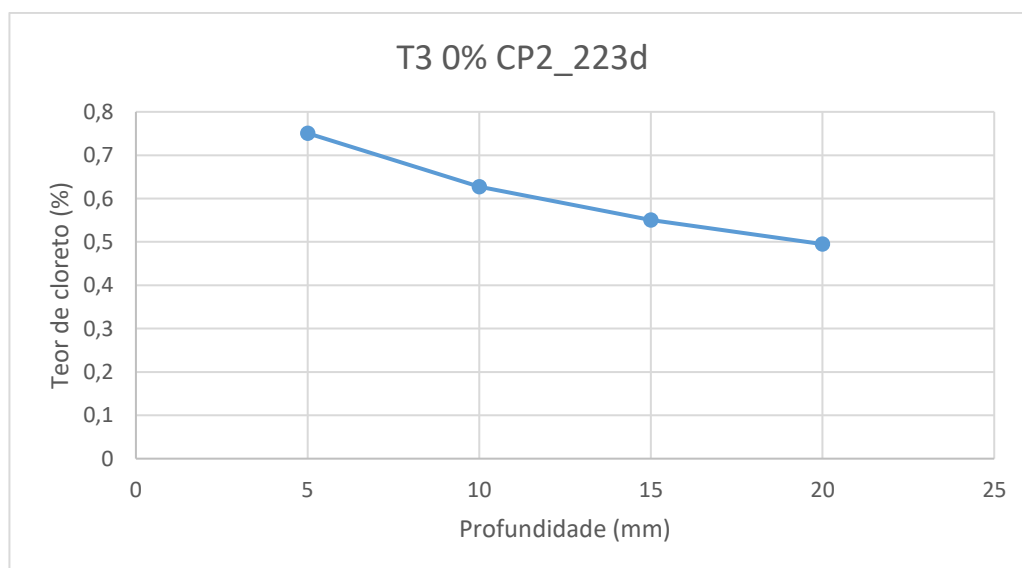
ANEXO F - GRÁFICOS DOS TEORES DE CLORETO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ANALISADA, DA CLASSE DE RESISTÊNCIA C40, PARA AS 3 IDADES DE CONTAMINAÇÃO

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 1



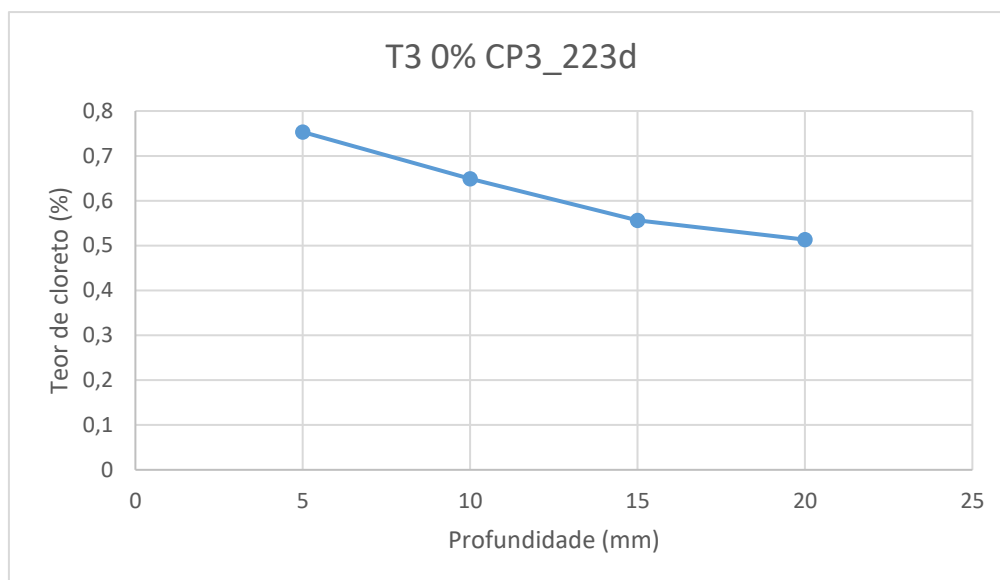
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 2



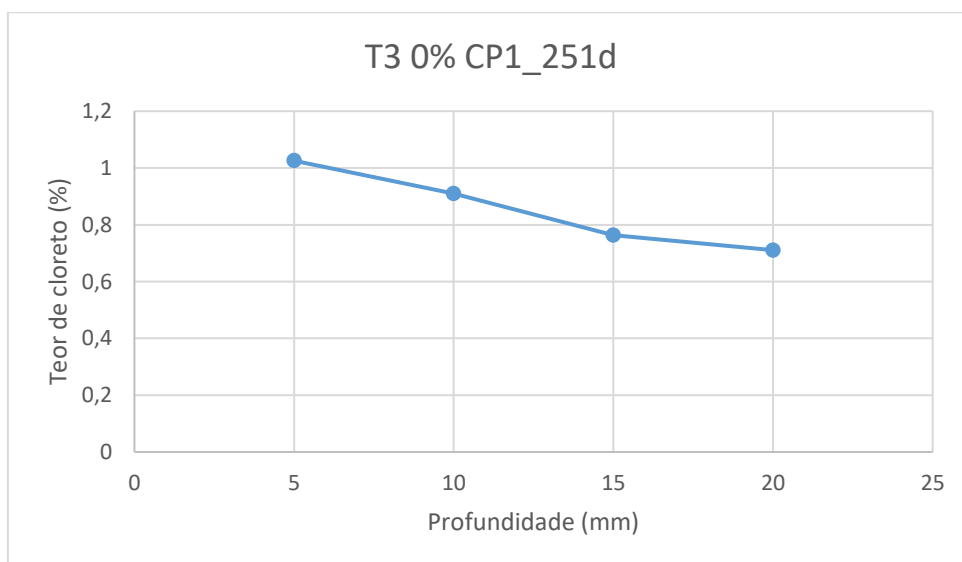
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 1ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 3



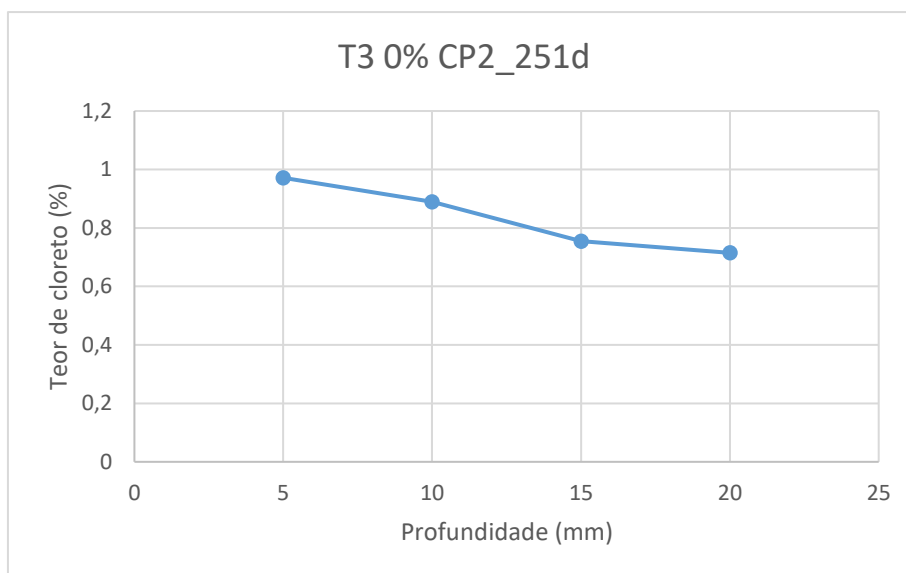
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 1



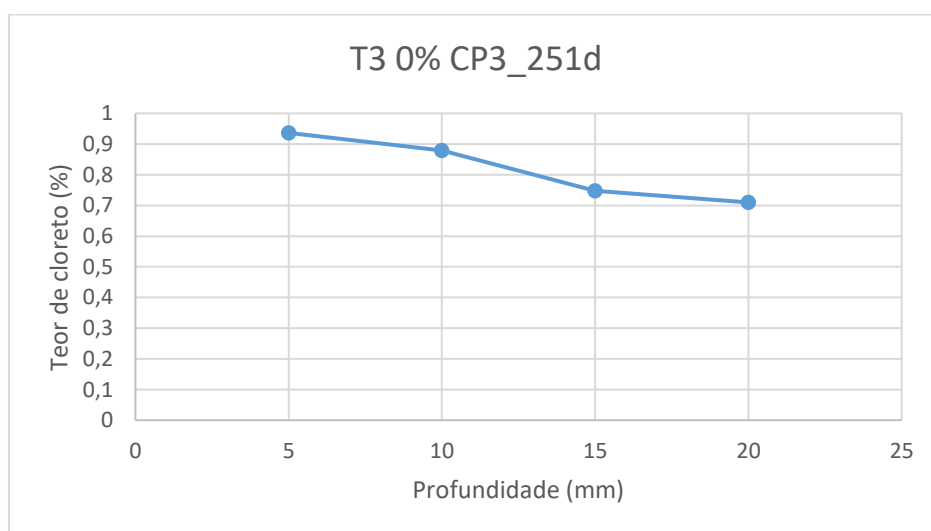
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 2



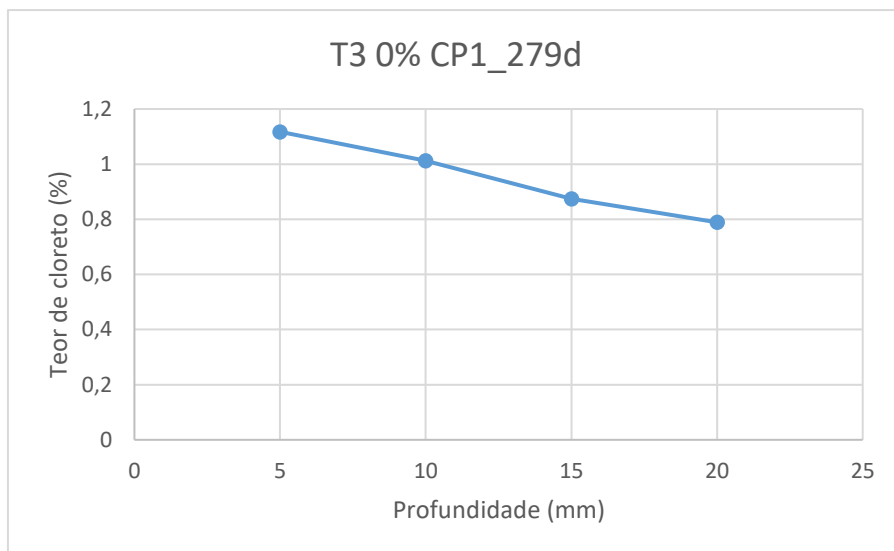
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 2ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 3



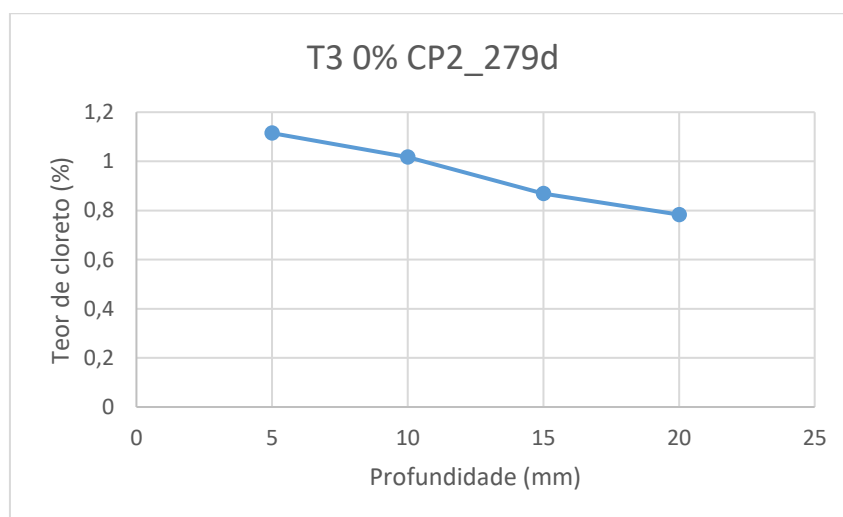
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 1



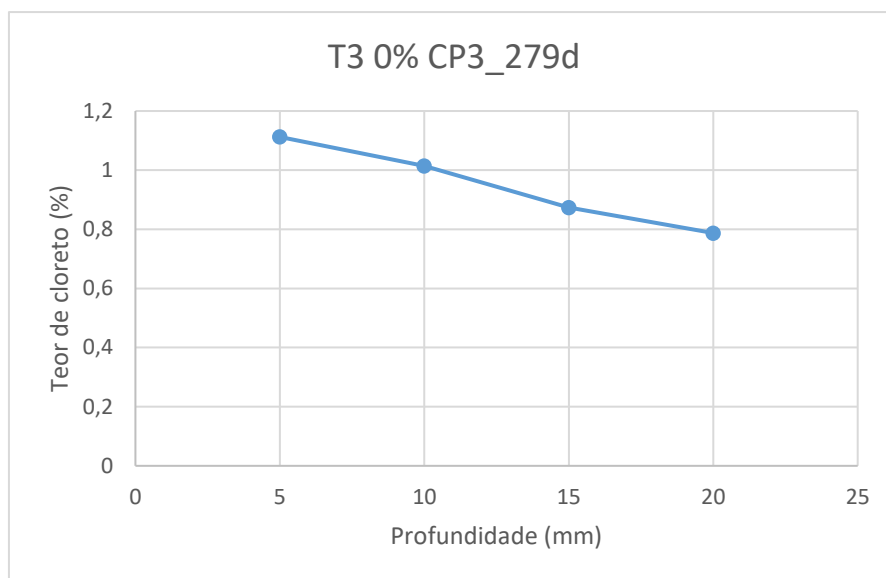
Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 2



Fonte: Autor (2020).

Teores de cloreto em função da profundidade de penetração da 3ª idade, para a classe de resistência C40, corpo-de-prova 3



Fonte: Autor (2020).