

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá

PAULO GUILHERME CORNELIO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL NA
DIFUSÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Guaratinguetá-SP

2025



PAULO GUILHERME CORNELIO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL NA
DIFUSÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Emerson Felipe Félix

Coorientadora: Prof^a. Dra. Lisiane Pereira Prado

Guaratinguetá - SP

2025

C814e	Cornelio, Paulo Guilherme Estudo experimental da influência da proteção superficial na difusão de cloretos em estruturas de concreto / Paulo Guilherme - Guaratinguetá, 2025. 104 f : il. Bibliografia: f. 94-101 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Emerson Felipe Félix Coorientadora: Profª. Drª. Lisiane Pereira Prado 1. Concreto. 2. Cloretos. 3. Íons. 4. Durabilidade (Engenharia). I. Título. CDU 691.32(043)
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente a influência de diferentes sistemas de proteção superficial sobre a difusão de cloretos em concretos. A pesquisa foi realizada por meio de ensaios acelerados em que amostras de concreto com diferentes condições de proteção foram expostas a cloretos (Cl⁻). As amostras avaliadas neste estudo configuram elementos de concreto sem proteção, com revestimento de argamassa, com revestimento trifásico composto por argamassa, massa corrida e tinta, podendo esta ser do tipo PVA ou acrílica. O estudo apresenta resultados que corroboram a literatura para os casos de elementos com proteção por uma camada de argamassa e traz novos resultados ao tratar também de elementos com sistema de proteção com múltiplas camadas. O melhor resultado, em termos de mitigação da difusão de cloretos, foi obtido com o sistema múltiplo, com camadas de argamassa, selador, massa corrida e duas camadas de tinta acrílica. Os resultados obtidos no estudo demonstram que sistemas simples de proteção, elementos já utilizados em edificações, podem ampliar a vida útil das estruturas de concreto em ambientes urbanos e, devem ser considerados nos modelos de análise de vida útil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The present work aimed to experimentally evaluate the influence of different surface protection systems on chloride diffusion in concrete. The research was carried out through accelerated tests in which concrete samples with different protection conditions were exposed to chlorides (Cl⁻). The samples evaluated in this study included concrete elements without protection, those with a mortar coating, and those with a three-phase coating composed of mortar, putty, and paint, either PVA or acrylic. The study presents results that corroborate the literature for cases of elements protected by a single layer of mortar and introduces new findings by also addressing elements with multi-layer protection systems. The best result, in terms of mitigating chloride diffusion, was achieved with the multi-layer system, consisting of mortar, sealer, putty, and two layers of acrylic paint. The results of the

study demonstrate that simple protection systems already used in buildings can extend the service life of concrete structures in urban environments and should be considered in service-life analysis models.

PAULO GUILHERME CORNELIO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA PROTEÇÃO SUPERFICIAL NA DIFUSÃO DE
CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 24/10/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON FELIPE FELIX**
Data: 24/10/2025 18:27:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EMERSON FELIPE FELIX
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO CARRAZEDO**
Data: 04/11/2025 15:58:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO
USP

Documento assinado digitalmente
 **EDNA POSSAN**
Data: 12/11/2025 15:17:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. EDNA POSSAN
UNILA

Dedico este trabalho a Deus, fonte de toda sabedoria, autor e princípio de toda ciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me dar forças e sustento em todos os momentos.

À minha família, pelo incentivo, pela paciência e pela confiança nesta etapa de minha vida, em particular, à minha esposa, Luciene Oliveira Cornelio, por inúmeras vezes me incentivar e repetir sua confiança em mim, e aos meus pais e irmãos.

Ao meu orientador, Dr. Emerson Felipe Félix, pela confiança, orientação e apoio em todos os momentos da pesquisa. Sem seu auxílio, a realização deste trabalho seria praticamente impossível.

À minha coorientadora Dra. Lisiane Pereira Prado, por todo o incentivo, orientação e atenção sempre que precisei.

À banca composta pela Dra. Edna Possan e pelo Dr. Rogério Carrazedo por todos os apontamentos e contribuições que me passaram.

Aos docentes do DEC-UNESP, em especial Profa. Dra. Mariana e Prof. Dr. Paulo, por toda a ajuda.

Aos técnicos dos Laboratórios do DEC-UNESP, Flávio e Robson.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPGE-UNESP) por toda infraestrutura fornecida para o desenvolvimento da pesquisa.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade: CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, código de financiamento 001.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão do estudo.

“Não é a carga que o derruba, mas a
maneira como você a carrega”
(Lou Holtz).

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente a influência de diferentes sistemas de proteção superficial sobre a difusão de cloretos em concretos. A pesquisa foi realizada por meio de ensaios acelerados em que amostras de concreto com diferentes condições de proteção foram expostas a cloretos (Cl^-). As amostras avaliadas neste estudo configuram elementos de concreto sem proteção, com revestimento de argamassa, com revestimento trifásico composto por argamassa, massa corrida e tinta, com estas do tipo PVA ou acrílicas. Durante o período de 90 dias de exposição, as amostras foram monitoradas quanto às propriedades físico-mecânicas, à concentração de Cl^- em diferentes profundidades e ao coeficiente de difusão. Os resultados mostraram que o concreto sem proteção apresentou a maior suscetibilidade à penetração de cloretos, com concentração de 0,38% em relação à massa de cimento, a 50 mm de profundidade, e coeficiente de difusão de $13,89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. A aplicação de uma camada de argamassa reduziu parcialmente a difusão, limitando a concentração a 0,30% (a 50 mm de profundidade), diminuindo o coeficiente de difusão em 25,3% em relação ao elemento sem proteção. A proteção com o sistema trifásico PVA, composto por argamassa, massa corrida e tinta PVA, apresentou desempenho superior ao elemento sem proteção, restringindo a concentração a 0,23% (a 50 mm de profundidade) e reduzindo o coeficiente de difusão em 27,2% em relação ao elemento sem proteção. O melhor resultado foi obtido com o sistema trifásico usando a tinta acrílica, que apresentou a menor concentração de cloretos (0,19% a 50 mm) e a maior redução do coeficiente de difusão (44,6%), demonstrando eficácia no bloqueio físico da difusão e proporcionando maior durabilidade. Os resultados permitem inferir que a aplicação de sistemas de proteção superficial pode contribuir para a resistência à penetração de cloretos, sendo os revestimentos acrílicos os mais eficazes. As conclusões reforçam a importância da escolha adequada do sistema de proteção para ampliar a vida útil das estruturas de concreto em ambientes urbanos e reduzir os custos associados à manutenção corretiva.

Palavras-chave: Concreto; Durabilidade; Cloretos; Sistema de proteção superficial.

ABSTRACT

The present study aimed to experimentally evaluate the influence of different surface protection systems on chloride diffusion in concrete. The research was carried out through accelerated tests in which concrete samples with different protection conditions were exposed to chlorides. The samples analyzed in this study consisted of unprotected concrete elements, elements with a mortar coating, and elements with a three-layer system composed of mortar, putty, and paint, which could be either PVA- or acrylic-based. During the 90-day exposure period, the samples were monitored for their physical-mechanical properties, chloride concentrations at different depths, and diffusion coefficients. The results showed that unprotected concrete had the highest susceptibility to chloride penetration, with a concentration of 0.38% relative to the cement mass at a 50 mm depth and a diffusion coefficient of $13.89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Applying a mortar layer partially reduced diffusion, limiting the concentration to 0.30% (at 50 mm depth) and decreasing the diffusion coefficient by 25.3% compared to the unprotected element. Protection with the PVA three-layer system, composed of mortar, putty, and PVA paint, showed superior performance, restricting the concentration to 0.23% (at 50 mm depth) and reducing the diffusion coefficient by 27.2% compared to the unprotected element. The best result was obtained with the three-layer system using acrylic paint, which presented the lowest chloride concentration (0.19% at 50 mm) and the greatest reduction in the diffusion coefficient (44.6%), demonstrating effectiveness in physically blocking diffusion and providing greater durability. The results suggest that applying surface protection systems can enhance resistance to chloride penetration, with acrylic coatings being the most efficient. These findings reinforce the importance of selecting an appropriate protection system to extend the service life of concrete structures in urban environments and reduce the costs associated with corrective maintenance.

Keywords: Concrete; Durability; Chloride; Surface protection systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Danos associados à corrosão das armaduras: (a) produtos de corrosão e (b) destacamento do concreto de cobrimento.	19
Figura 2: Tipologias dos cps utilizados na campanha experimental de Malheiro <i>et. al.</i> (2014).	22
Figura 3: Concentração de cloretos para CPs com 25 mm de revestimento de argamassa.	22
Figura 4: Tipologias dos corpos de prova avaliados neste estudo.	23
Figura 5: Modelo simplificado da frente de corrosão das armaduras.	26
Figura 6: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado.	26
Figura 7: Vida útil das estruturas de concreto.	27
Figura 8: Perfil de concentração.	30
Figura 9: Difusão em regime estacionário e perfil de concentração.	31
Figura 10: Perfis de concentração para difusão em regime não estacionário.	31
Figura 11: Perfil de concentração em regime não estacionário para tempo e posição conhecidos.	32
Figura 12: Despassivação da armadura por cloretos.	34
Figura 13: Fases da difusão gerada por corrosão localizada.	34
Figura 14: Parâmetros de influência na difusão de cloretos no concreto.	35
Figura 15: Influência da zona de exposição no perfil de cloretos após 5 anos de exposição.	38
Figura 16: Influência da distância do mar no perfil de cloretos.	38
Figura 17: Perfis de cloretos dos concretos com tempo de exposição de 9 anos.	41
Figura 18: (a) Corpo de prova com argamassa de revestimento; (b) Gráfico da concentração de cloretos em função de diferentes graus de saturação.	44
Figura 19: Tipologias dos corpos de prova utilizados na campanha experimental.	44
Figura 20: Concentração de cloretos nos elementos protegidos com diferentes argamassas.	45
Figura 21: Contraste entre cores em amostra de concreto após aspersão de nitrato de prata.	46
Figura 22: Representação esquemática do Teste LMDC.	47
Figura 23: Representação esquemática do Ensaio ASTM C1202.	49

Figura 24: Representação esquemática do Ensaio NT Build 492 (NORDTEST, 1999).	50
Figura 25: Extração do pó em camadas pré-definidas.	52
Figura 26: Fluxo de processos da metodologia experimental utilizada.	55
Figura 27: Curva granulométrica do agregado miúdo.	57
Figura 28: Curva granulométrica do agregado graúdo.	58
Figura 29: Modelo esquemático de proteção com resina epóxi.	61
Figura 30: Modelo esquemático do sistema de proteção completo.	61
Figura 31: Dimensões das formas prismáticas.	62
Figura 32: Produção da argamassa em betoneira.	64
Figura 33: Metodologia adotada para a proteção superficial com argamassa de revestimento.	64
Figura 34: Aplicação dos sistemas de proteção superficial.	65
Figura 35: Representação 3D do elemento com proteção completa.	66
Figura 36: Atividades experimentais – fev/24 a ago/24.	66
Figura 37: Vista transversal de um elemento com proteção completa imerso em solução salina.	67
Figura 38: Ensaio para determinação do índice de vazios.	68
Figura 39: (a) Máquina utilizada nos ensaios e (b) corpo de prova após ruptura por compressão.	69
Figura 40: Perfil de furação das amostras.	70
Figura 41: Etapas de coleta das amostras pulverizadas.	71
Figura 42: Reagentes utilizados no ensaio de concentração.	71
Figura 43: Equipamentos e utensílios utilizados no ensaio de concentração.	72
Figura 44: Etapas iniciais do ensaio de concentração.	72
Figura 45: Etapas iniciais do ensaio de concentração.	73
Figura 46: Titulação das amostras.	73
Figura 47: Calibração dos parâmetros da Eq. (12) e definição do coeficiente de difusão de cloretos.	75
Figura 48: Imagem ampliada das camadas de proteção com argamassa, tinta PVA e tinta ACRÍLICA.	78
Figura 49: concentração de cloretos aos 28 dias de imersão na solução de nacl.	79
Figura 50: Concentração de cloretos após 90 dias de imersão na solução de NaCl.	81
Figura 51: Concentração de cloretos no concreto.	82

Figura 52: Ajuste da curva e do coeficiente de difusão dos elementos: a) SP e b) PARG.....	84
Figura 53: Ajuste da curva e do coeficiente de difusão dos elementos: a) PPVA e b) PAC.....	85
Figura 54: Classificação do nível de durabilidade dos elementos avaliados.....	86
Figura 55: Custo estimado para implantação dos sistemas de proteção em superfície de 1 m ²	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vida útil de projeto.....	29
Quadro 2: Classe de agressividade ambiental (CAA).	37
Quadro 3: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto.	37
Quadro 4: Penetrabilidade de cloretos baseada na carga elétrica passante.	48
Quadro 5: Tensão e duração do ensaio para uma amostra de concreto com teor normal de ligante.....	51
Quadro 6: Pesos nos estados fresco e endurecido.....	63
Quadro 7: Insumos necessários para a execução de 1 m ² de superfície.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos cimentos conforme NBR.	40
Tabela 2: Propriedades dos agregados.	58
Tabela 3: Composição química do cimento.	59
Tabela 4: Grupos de sistema de proteção.	61
Tabela 5: Traço de concreto em massa para 1 m ³ de material.	62
Tabela 6: Traço da argamassa de revestimento.	64
Tabela 7: Índice de vazios.	77
Tabela 8: Resistências à compressão dos materiais.	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1.	MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	17
1.2.	OBJETIVO	24
1.3.	CONTEÚDO DO TRABALHO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1.	VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	25
2.2.	DIFUSÃO DE UM GÁS EM UM MEIO	29
2.2.1.	Processo de difusão em materiais.....	29
2.2.2.	Processo de difusão de cloretos no concreto	32
2.2.3.	Fatores que influenciam na difusão de cloretos no concreto	33
2.2.3.1.	<i>Influência do ambiente de exposição</i>	<i>35</i>
2.2.3.2.	<i>Influência do tipo de cimento, adições, relação água-cimento e resistência à compressão</i>	<i>39</i>
2.2.3.3.	<i>Influência dos agregados.....</i>	<i>42</i>
2.2.3.4.	<i>Influência do tipo de proteção superficial.....</i>	<i>43</i>
2.2.4.	Métodos de avaliação da frente de difusão de cloretos.....	46
2.3.	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	54
3	METODOLOGIA	55
3.1.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	56
3.1.1.	Caracterização dos materiais	56
3.1.2.	Produção dos elementos de concreto e suas proteções	60
3.1.3.	Resumo da campanha experimental	66
3.1.4.	Ensaio de índice de vazios (<i>IV</i>)	67
3.1.5.	Ensaio de resistência à compressão (<i>CS</i>).....	68
3.1.6.	Ensaio de concentração de íons cloreto (<i>%Cl</i>).....	69
	<i>(a) Furadeira de bancada.....</i>	<i>71</i>
	<i>(b) Conjunto para furação.....</i>	<i>71</i>
3.1.7.	Determinação do coeficiente de difusão de cloretos (<i>DCL</i>).....	74
3.2.	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	76

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	77
4.2.	ANÁLISE DE CUSTOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL 87	
4.3.	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	90
5	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE 1: CÓDIGO PYTHON DE CALIBRAÇÃO.....	102
	DADOS CURRICULARES	103

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização do tema da pesquisa, fundamentada em trabalhos da literatura. Além disso, apresentam-se os objetivos do estudo, correlacionados à avaliação experimental da influência de sistemas de proteção superficial na difusão de cloretos em elementos de concreto.

1.1. MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O concreto armado, uma das invenções mais significativas na engenharia civil, foi desenvolvido no final do século XIX e rapidamente se tornou o material de escolha para muitas infraestruturas devido à sua resistência, flexibilidade e custo relativamente baixo. A combinação de concreto e aço permitiu o desenvolvimento de estruturas mais esbeltas e complexas, como pontes, edifícios e barragens, transformando a paisagem urbana e industrial (Mehta e Monteiro, 2008).

A durabilidade das estruturas de concreto armado é um tema de destaque na construção civil, especialmente diante dos desafios decorrentes da produção de elementos cada vez mais esbeltos, em ambientes com mais agentes agressivos, como o dióxido de carbono (CO_2) e os íons cloretos (Cl^-). A durabilidade do concreto é um parâmetro fundamental, particularmente no que diz respeito ao seu comportamento sob condições ambientais adversas (Adesina e Zhang, 2024). Esses agentes são responsáveis pela despassivação das armaduras imersas no concreto, deixando-as suscetíveis à corrosão, o que, por sua vez, leva à degradação das propriedades mecânicas e à diminuição da vida útil das estruturas de concreto (Sitter, 1984 apud Helene, 1993). Esse fenômeno ocorre em diversos contextos, como em ambientes costeiros e industriais, onde a exposição ao sal marinho ou a substâncias químicas é constante, e em grandes centros urbanos, onde há elevadas concentrações de CO_2 .

A corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio no qual está inserido (Ribeiro *et al.*, 2015; Yi *et al.*, 2020). O processo de corrosão das armaduras apresenta-se como um mecanismo de deterioração da fase metálica, na qual se desenvolvem a perda de massa da armadura (perda de seção) e a formação de produtos de corrosão (de maior volume), que causam a fissuração do concreto (Mehta e Monteiro, 2008).

No Brasil, Carmona e Marega (1988), Dal Molin (1988), Andrade (1992) e Aranha (1994) verificaram a existência de um índice de ocorrência de corrosão entre 14 e 64% em estruturas de concreto no país, classificando a corrosão como a deterioração mais frequente do concreto armado.

Embora a alcalinidade naturalmente elevada do concreto (pH entre 12 e 13,5) normalmente proporcione um ambiente passivo que protege o aço incorporado, essa capacidade protetora diminui devido à entrada de agentes agressivos (Sagüés *et al.*, 1997). Os íons cloreto atacam diretamente a camada passiva, enquanto o CO₂ reduz a alcalinidade da matriz por meio da carbonatação, levando à desp passivação da armadura de aço.

Os cloretos causam um aumento da condutividade elétrica do concreto e atacam a camada passivadora que protege as armaduras, enquanto o CO₂ age carbonatando o concreto, fenômeno este que causa a diminuição do pH da matriz, destruindo a camada passivadora das armaduras.

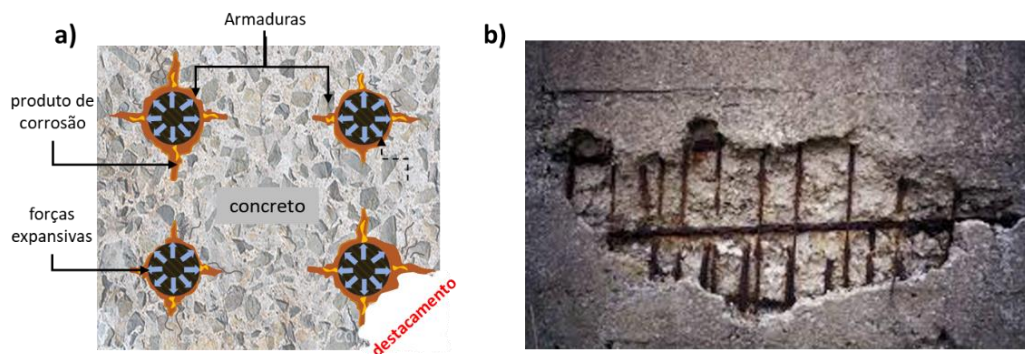
A desp passivação das armaduras devido à penetração dos agentes agressivos é relatada na literatura (Andrade, 1992; Santos, 2006; Stanish; Hooton; Thomas, 2000) como sendo um estágio de corrosão não estacionário, isso porque o fluxo de entrada dos agentes agressivos é não contínuo, apresentando coeficiente de difusão variável no tempo. Porém, à medida que a desp passivação ocorre, o coeficiente de difusão torna-se invariante no tempo, e o processo de corrosão é classificado como estacionário (Ribeiro *et al.*, 2015).

De acordo com Tuutti (1982) e Graeff (2007), os dois estágios da corrosão podem ser definidos, por exemplo, pelas fases de iniciação e de propagação. A fase de iniciação refere-se ao estágio não estacionário, desde o início da construção do elemento estrutural até a chegada dos agentes agressivos à armadura, provocando sua desp passivação. Já a fase de propagação refere-se ao período em que a armadura se encontra parcialmente ou totalmente desp passivada. Neste estágio, a corrosão ocorrerá de forma contínua, até um instante de falha ou quando for atingido o estado limite de utilização, caso não seja realizada nenhuma intervenção humana.

Quanto aos efeitos da corrosão nas estruturas de concreto, Andrade (1992) aponta três principais efeitos: a diminuição da capacidade mecânica das armaduras, o surgimento de fissuras no concreto e a perda de aderência entre o sistema aço/concreto.

A corrosão em estágio não estacionário (progressiva) ocorre em regiões com concretos de baixa qualidade ou em locais onde o cobrimento da armadura é insuficiente para garantir sua proteção. Helene (1986) citou que, nestes casos, os produtos resultantes do processo corrosivo podem ocupar espaços de 3 a 10 vezes maiores do que os volumes iniciais, gerando um campo de tensão interno (Figura 1.a). À medida que essas tensões se tornam superiores às resistidas pelo concreto, podem ocorrer fissuras no concreto ou até mesmo o destacamento do concreto de cobrimento, o que ocasiona sérios danos (Figura 1.b).

Figura 1: Danos associados à corrosão das armaduras: (a) produtos de corrosão e (b) destacamento do concreto de cobrimento.



Fonte: Felix (2018).

Ao considerar ambientes com significativa concentração de Cl^- , a corrosão das armaduras de aço é desencadeada pela penetração de íons cloreto na camada de concreto que envolve e protege as barras de aço. Além da existência e da concentração dos agentes agressivos no ambiente de exposição, outros fatores também afetam a durabilidade do concreto, como a porosidade, que facilita a penetração de água e de substâncias agressivas, a qualidade dos materiais utilizados na produção do compósito e a existência de proteção ao concreto de cobrimento.

Pesquisas sobre o transporte de cloretos no concreto destacam a influência significativa das características dos materiais utilizados na composição do concreto. A estrutura porosa dos materiais desempenha papel central nesse processo, como apontado por Tuutti (1982), Jaegermann (1990) e Mangat e Molloy (1994). Além disso, a presença de fissuras no concreto, identificada como fator crítico por Mangat e Gurusamy (1987) e Bakker (1988), pode aumentar significativamente a penetração de cloretos. Outro aspecto relevante é a capacidade da matriz cimentícia de fixar cloretos, conforme observado por Byfors (1990) e Rasheeduzzafar, Hussain e Alsaadoun (1990), o que pode retardar ou acelerar a difusão de íons cloreto.

Paralelamente, estudos também analisam o impacto das condições ambientais no transporte de cloretos. Fatores como temperatura (Page, Short e El Tarras, 1981; Al-Khaja, 1997), carbonatação do concreto (Byfors, 1990; Jones, MacCarthy e Dhir, 1994) e o grau de saturação dos poros (Nielsen e Geiker, 2003; Guimarães e Helene, 2005) têm sido amplamente investigados, mostrando como as condições externas podem interagir com as propriedades do concreto para influenciar o movimento de cloretos em sua estrutura.

De acordo com Ibrahim *et al.* (1999), os revestimentos à base de materiais poliméricos merecem destaque por sua capacidade de formar uma barreira física que dificulta a entrada de agentes agressivos (Ibrahim *et al.*, 1999). Contudo, a eficácia desses tratamentos ainda é um ponto de questionamento, em que muitos estudos apresentam resultados divergentes, sendo necessários estudos mais aprofundados sobre a sua aplicação e desempenho em diversas condições ambientais. Além disso, esses sistemas de proteção são onerosos e muitas vezes não se aplicam a estruturas de edificações residenciais (Zhang *et al.*, 1997). Nestes casos, a proteção superficial das estruturas pode ser definida pela aplicação de diferentes produtos, em diferentes camadas, a exemplo do sistema composto por argamassa, selador, massa corrida, e por fim, uma ou duas demãos de tinta.

Conforme observado, a maioria dos trabalhos da literatura ainda concentra esforços em mensurar a influência dos diferentes materiais constituintes do concreto na difusão de cloretos, a fim de proporcionar leis de difusão com maior eficiência, e então, proporcionar maior acuracidade nas predições do tempo de desp passivação das armaduras. No entanto, a maioria destes trabalhos não leva em consideração que muitas das estruturas de concreto de edificações residenciais apresentam proteções superficiais compostas por camadas de revestimento em argamassa, massa corrida e tintas, as quais precisam ser levadas em consideração na avaliação da durabilidade dessas estruturas.

Nessa temática, Crank (1975) desenvolveu uma abordagem matemática para descrever o transporte de massa em sistemas com duas camadas, considerando a difusão como mecanismo predominante. Com base no chamado efeito pele, Andrade, Diez e Alonso (1997) propuseram as Equações (1-3) como solução para modelar o transporte de cloretos por difusão em materiais com diferentes propriedades de transporte entre a superfície e o interior. Nesse modelo, C_1 representa a concentração de cloretos na camada externa, C_2 é a concentração na

camada interna, D_1 é o coeficiente de difusão da camada externa, D_2 o coeficiente de difusão da camada interna, C_s é a concentração superficial de cloretos, $erfc$ é a função erro complementar, e representa a espessura da camada externa (pele), R refere-se à resistência entre as duas camadas, x é a profundidade avaliada, e t o tempo de exposição.

$$C_1 = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[erfc \left(\frac{2ne + x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) - \alpha erfc \right] - \left[\frac{(2n + 2)e - x}{2\sqrt{D_1 t}} \right] \quad \text{Eq. (1)}$$

$$C_2 = \frac{2kC_s R}{k + 1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n erfc \left[\frac{(2n + 1)e + k(x - e)}{2\sqrt{D_1 t}} \right] \quad \text{Eq. (2)}$$

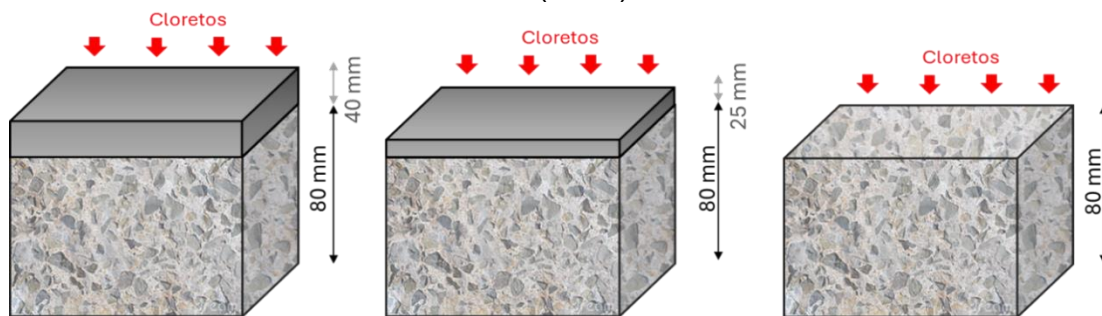
$$k = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}; \quad \alpha = \frac{1 - k}{1 + k}; \quad C_1 = RC_2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Nos poucos estudos sobre o transporte em sistemas compostos, a maioria está focada em simulações numéricas e na proposição de modelos, cujas formulações frequentemente dependem de parâmetros de difícil definição ou calibração. Neste sentido, há uma carência de investigações experimentais. Em uma revisão bibliográfica, Malheiro *et al.* (2014) identificaram um estudo experimental realizado por Kreijger (1984) que demonstrou a formação de uma camada superficial mais porosa no concreto. Essa camada, com propriedades de transporte distintas em relação ao interior do material, foi caracterizada como o efeito de pele.

Sabendo disso, Malheiro *et al.* (2014) investigaram a influência de uma camada de revestimento em argamassa sobre a penetração de cloretos no concreto, sendo pioneiros nesse campo de pesquisa. A campanha experimental de Malheiro *et al.* (2014) envolveu corpos de prova (cps) de concreto com dimensões de 8 cm x 8 cm x 8 cm e relação água/cimento de 0,55, revestidos com três tipos de argamassa aplicados sobre uma camada de chapisco, com diferentes espessuras de proteção (Figura 2). Após a cura de 28 dias do concreto e da argamassa, cinco das seis faces dos cps foram isoladas com resina epóxi para simular fluxo unidirecional. Os elementos foram submetidos a ciclos de imersão e secagem por 49 dias, e os perfis de cloretos foram analisados.

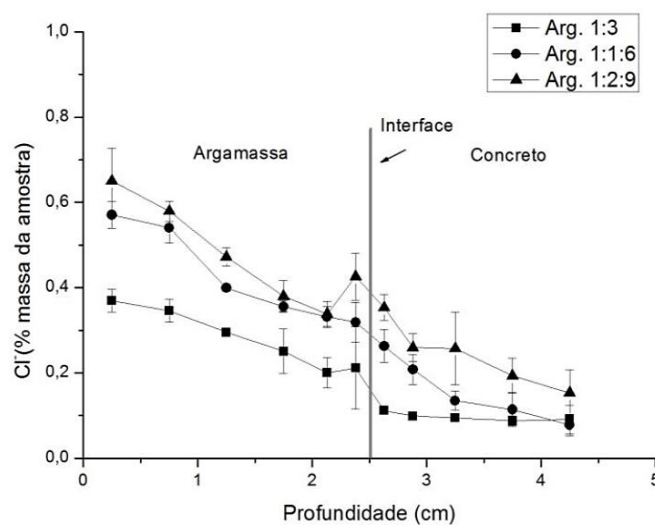
Os principais resultados de Malheiro *et al.* (2014) mostraram que as argamassas de revestimento influenciam o transporte de cloretos no concreto, sendo que as menos porosas e mais ricas em cimento apresentaram menores concentrações de cloretos. Os autores observaram, ainda, um acúmulo de cloretos próximo à interface argamassa-concreto, devido às diferenças na capacidade de transporte (Figura 3). Ademais, os resultados obtidos na campanha experimental mostram que, apesar de as argamassas serem mais porosas do que o concreto, elas podem atuar como uma barreira adicional, contribuindo para um atraso na difusão de cloretos no concreto.

Figura 2: Tipologias dos cps utilizados na campanha experimental de Malheiro *et al.* (2014).



Fonte: Adaptado de Malheiro *et al.* (2014).

Figura 3: Concentração de cloretos para CPs com 25 mm de revestimento de argamassa.

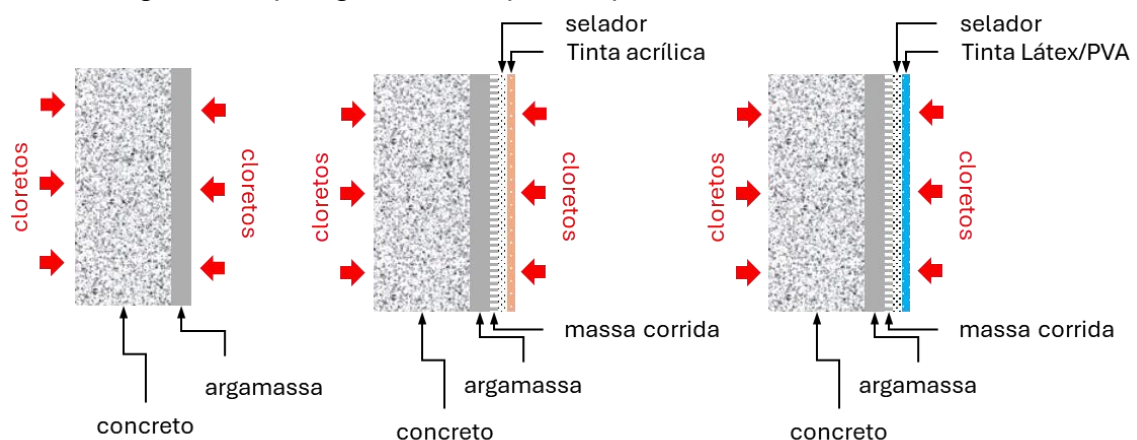


Fonte: Malheiro *et al.* (2014).

Em estudo recente, Bandeira (2022) avaliou a influência dos revestimentos de argamassa na difusão de cloretos de elementos de concreto sob diferentes níveis de saturação. Os resultados confirmaram que tal tipo de proteção contribui para reduzir a difusão de íons cloreto no concreto, destacando a eficácia da argamassa como revestimento de proteção. A pesquisa utilizou corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10x20 cm, com uma camada de argamassa de 25 mm sobre uma face do corpo de prova. Os resultados indicaram ainda que os corpos de prova com revestimento apresentaram valores de concentração menores em comparação com os corpos de prova sem revestimento, independentemente do grau de saturação.

Diante de uma busca realizada nos principais repositórios de trabalhos acadêmicos, não foram encontrados outros trabalhos, além dos supracitados, que avaliassem experimentalmente a influência de sistemas múltiplos de proteção do concreto formados por argamassas de revestimento em conjunto com tintas. Diante da escassez de pesquisas nessa área e da relevância de avaliar essa influência na durabilidade e na vida útil de estruturas de concreto armado, neste estudo, conduz-se uma campanha experimental com amostras de concreto protegidas por sistemas compostos por argamassas, massa corrida, selador e tintas acrílicas e látex PVA (Figura 4). O objetivo é abranger diferentes materiais utilizados nos sistemas de revestimento de estruturas do ambiente construído, avaliando a barreira física formada pelos sistemas de proteção quanto à difusão de cloretos.

Figura 4: Tipologias dos corpos de prova avaliados neste estudo.



Fonte: Própria autoria.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar experimentalmente a influência de diferentes sistemas de proteção superficial na difusão de cloretos em elementos de concreto.

Como objetivos específicos, citam-se:

- Avaliar concentração de cloretos em relação à massa de cimento em elementos de concreto com diferentes sistemas de proteção superficial;
- Determinar o coeficiente de difusão de cloretos para elementos de concreto com diferentes condições de proteção superficial;
- Avaliar a eficiência dos sistemas de proteção na vida útil de elementos de concreto armado.

1.3. CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, apresentam-se a introdução e a contextualização do tema, destacando os objetivos e a relevância do estudo.

No Capítulo 2, é abordada a fundamentação teórica necessária para compreender os processos envolvidos na pesquisa, bem como a compreensão da durabilidade do concreto sob a ação de cloretos.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia empregada na pesquisa, que envolve uma campanha experimental para avaliar a difusão de cloretos em amostras de concreto com e sem sistemas de proteção superficial, e os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões da pesquisa, destacando as principais contribuições do estudo e sugerindo diretrizes para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda a difusão de cloretos no concreto, analisando os fatores que influenciam esse processo, como a porosidade, a umidade relativa e a temperatura do ambiente, bem como os materiais constituintes. Abordam-se o mecanismo de transporte de cloretos e as equações matemáticas utilizadas para modelar esse fenômeno, destacando-se parâmetros como o coeficiente de difusão e a resistência ao cloreto.

2.1. VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A busca por construções mais esbeltas, econômicas e sustentáveis, com o uso de novos materiais e soluções cada vez mais desafiadoras, é uma realidade crescente no mundo atual, especialmente no campo da engenharia civil. No entanto, paralelamente a esse avanço, surgem outras questões que impactam o setor: a escassez de mão de obra especializada, a alta competitividade, a busca por altos lucros e a redução de investimentos em processos de qualidade e de monitoramento, fatores que resultam em construções com baixos índices de qualidade construtiva.

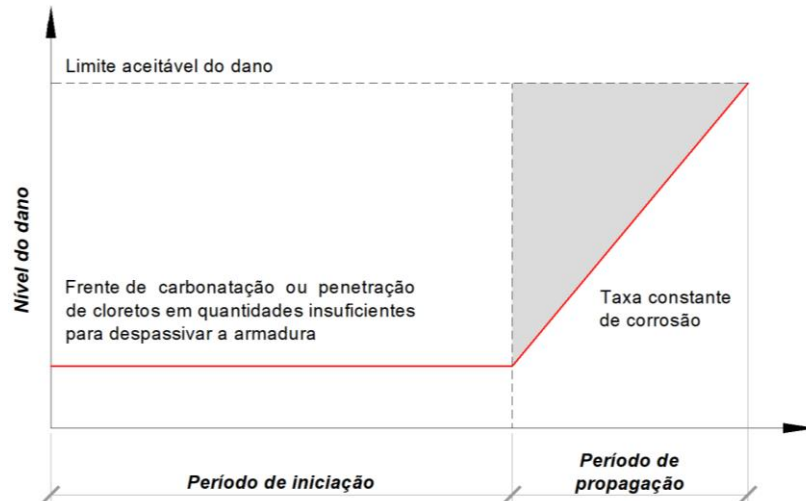
De acordo com a norma brasileira de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021), a vida útil de uma edificação e seus elementos é o período estimado, em anos, durante o qual a construção ou seus sistemas mantêm o desempenho esperado, quando submetidos às atividades previamente definidas em projeto, desde que seja seguido o programa de manutenção estabelecido no manual de operação, uso e manutenção.

Possan (2010) destaca que o projeto, a execução, a seleção de materiais, a caracterização do ambiente de exposição e as estratégias de manutenção e reparo são fundamentais para garantir a durabilidade de uma estrutura ou de um componente. A interação dos materiais com o ambiente em que são empregados é uma das definições-chave de durabilidade. Nesse sentido, pode-se afirmar que a vida útil busca estimar, em anos, a expectativa de duração de uma estrutura ou de parte dela, dentro dos limites especificados no projeto ao longo de seu ciclo de vida.

Na década de 80, Tuutti (1982) propôs um modelo simplificado para a propagação da corrosão nas armaduras de concreto, ilustrado na Figura 5. Nesse modelo, o período de iniciação é o tempo necessário para que os agentes agressivos

ultrapassem o cobrimento da armadura, e o período de propagação é o intervalo entre o início e o fim da corrosão da armadura.

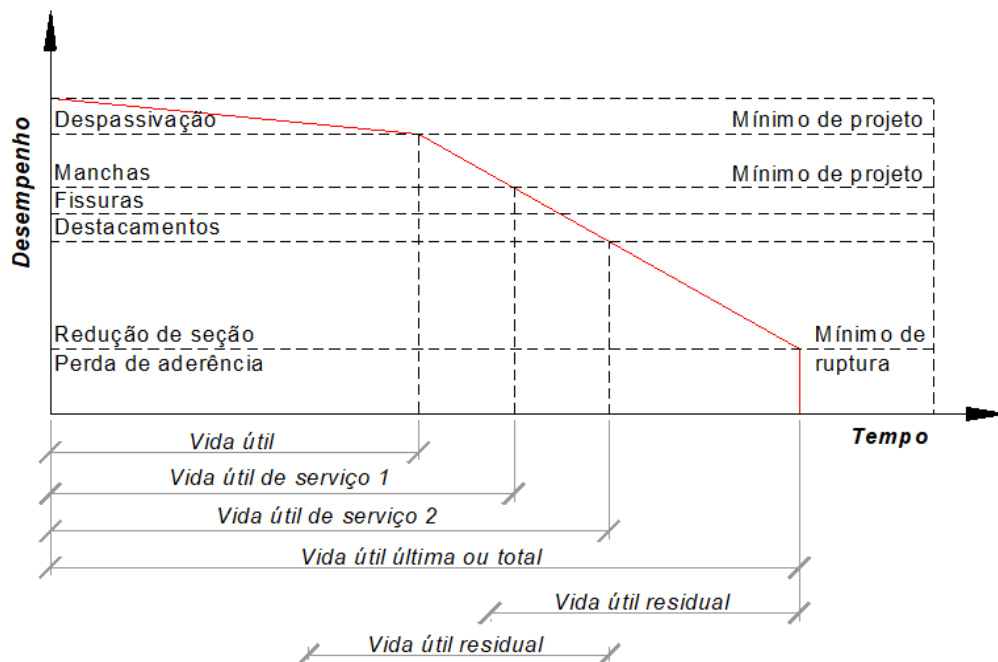
Figura 5: Modelo simplificado da frente de corrosão das armaduras.



Fonte: Traduzido de Tuutti (1982).

Na década de 90, Helene (1993) sugeriu que a vida útil do concreto fosse dividida em três fases, possibilitando uma definição mais abrangente dos estágios da vida útil do concreto conforme a Figura 6.

Figura 6: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado.

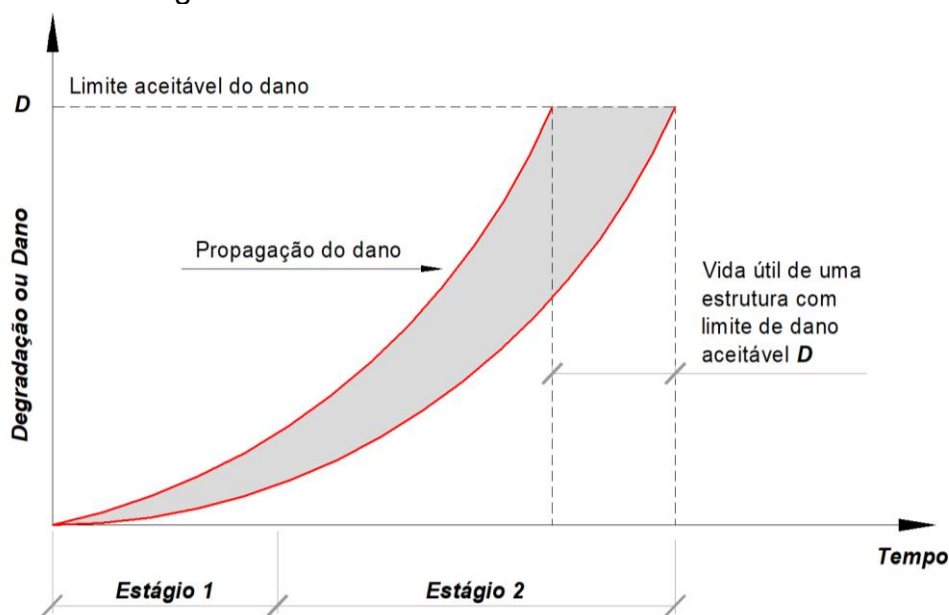


Fonte: Helene (1993).

Para Helene (1993), a vida útil do projeto vai até a despassivação da armadura. A vida útil de serviço inicia-se após a despassivação da armadura e vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, fissuras ou destacamentos do concreto. A vida útil total vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. A vida útil residual corresponde ao período em que a estrutura ainda é capaz de desempenhar suas funções.

Uma década depois da proposição de Tuutti (1982), uma nova proposta foi apresentada por Metha (1994), onde afirmou-se que a vida útil não pode ser descrita de forma linear devido aos efeitos das condições ambientais, carregamento e da interação dos mesmos com a estrutura do concreto fazendo que os agentes de degradação penetram no seu interior dando início aos processos de deterioração conforme Figura 7.

Figura 7: Vida útil das estruturas de concreto.



Fonte: Metha (1994).

Com o aumento da preocupação da comunidade técnico-científica em desenvolver estudos relacionados à previsão da vida útil das estruturas de concreto, foi criada em 1998 a organização internacional FIB (Fédération Internationale Du Béton), resultado da fusão do CEB (Comité Euro-International Du Béton) e da FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte). Por meio de comitês e boletins, essas entidades apresentam modelos relacionados à durabilidade do concreto, abrangendo desde sua concepção até o final de sua vida útil.

Andrade *et al.* (2009) apontam as principais dificuldades no estudo dos efeitos da corrosão, que incluem: a influência das variabilidades ambientais (macro e microclima), a diversidade dos materiais constituintes dos concretos, a influência das práticas construtivas (especialmente o emprego de boas práticas), a ocorrência ou fragmentação de dados e a falta de informações para a condução de estudos probabilísticos.

De acordo com Helene (1997), existem quatro métodos principais para a previsão da vida útil das estruturas de concreto: (i) Experiências anteriores, baseadas em dados de campo e laboratório adquiridos por especialistas, fundamentais para a elaboração das normas de concreto; (ii) Ensaio acelerados, que relacionam os dados da evolução dos danos encontrados em laboratório com as condições naturais, determinando um coeficiente de aceleração; (iii) Métodos determinísticos, que classificam as condições de exposição com base na Lei de Faraday, na equação de Darcy, e nas Leis de Fick, entre outras; (iv) Métodos estocásticos ou probabilísticos, que analisam a confiabilidade do concreto, ou seja, a probabilidade de ele desempenhar suas funções conforme o previsto no projeto, com a abordagem probabilística predominando neste método.

Possan (2010) afirma que a análise do Custo do Ciclo de Vida (CCV) e a previsão da vida útil das estruturas de concreto exigem conhecimentos em engenharia, ciência dos materiais, processos estocásticos e engenharia econômica. Para alcançar o equilíbrio sustentável de uma estrutura de concreto, é fundamental considerar seu ciclo de vida, que abrange desde as definições de projeto até a demolição.

É essencial que a comunidade técnico-científica destaque para os projetistas e outros envolvidos na construção que é na fase de projeto que devem ser adotadas as ações necessárias para garantir que a estrutura de concreto atenda aos valores mínimos exigidos para sua vida útil. De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), na tabela 25, a vida útil de projeto (VUP) deve ser de, no mínimo, 50 anos, conforme estabelecido no Quadro 1, a menos que seja especificado de outra forma no projeto, sempre considerando os processos de manutenção previstos pela NBR 5674 (ABNT, 2024) e detalhados no manual de uso, operação e manutenção fornecido ao usuário, em conformidade com a NBR 14037 (ABNT, 2024).

Quadro 1: Vida útil de projeto.

Sistema	VUP mínima (em anos) *
Estrutura	≥ 50 Conforme NBR 8681 (ABNT,2003)
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20
* Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 (ABNT, 2024) e especificações no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037 (ABNT, 2024).	

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

2.2. DIFUSÃO DE UM GÁS EM UM MEIO

Nesta seção, apresenta-se o processo de difusão em materiais, seguido da difusão de cloretos no concreto, destacando os fatores que influenciam a difusão de íons de cloreto no concreto, bem como os métodos de avaliação da frente de difusão de cloretos.

2.2.1. Processo de difusão em materiais

Para compreender melhor o mecanismo de degradação estudado, é fundamental entender como ocorre a difusão nos materiais. Segundo Callister e Rethwisch (2016), a transferência de massa, tanto no interior de um sólido quanto entre um líquido, um gás ou outra fase sólida, ocorre por meio de um fenômeno denominado transporte de matéria, que se dá pelo movimento atômico conhecido como difusão.

De acordo com a Primeira Lei de Fick Eq. (4), a direção da difusão é contrária ao gradiente de concentração; ou seja, a difusão ocorre da região de maior concentração para a de menor concentração, conforme ilustrado na Figura 8.

Matematicamente, o coeficiente de difusão para regime estacionário em uma única direção (x) é definido pela Eq. (4). Essa condição se dá exclusivamente quando o fluxo difusional (J) não varia com o tempo sendo a massa permanecendo constante e a concentração (C) não variando com o tempo (t) sendo assim denominado como difusão em regime estacionário. Na Figura 9, o processo de difusão em regime estacionário é representado por um gráfico através de uma placa delgada. No gráfico, apresenta-se um perfil de concentração linear para a situação de difusão representada. Quando a concentração (C) é representada em função da distância percorrida (posição) no interior de um sólido (x) a curva resultante é denominada como sendo o perfil de concentração, sendo a inclinação em um ponto particular sobre essa curva o gradiente de concentração conforme Eq. (5).

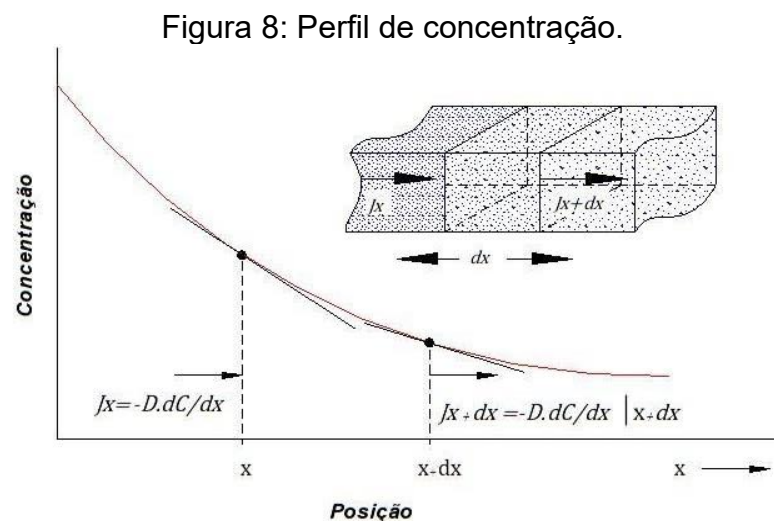
$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

J – Fluxo difusional;

D – Coeficiente de difusão;

$\frac{dC}{dx}$ – Gradiente de concentração.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

$$\frac{dC}{dx} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

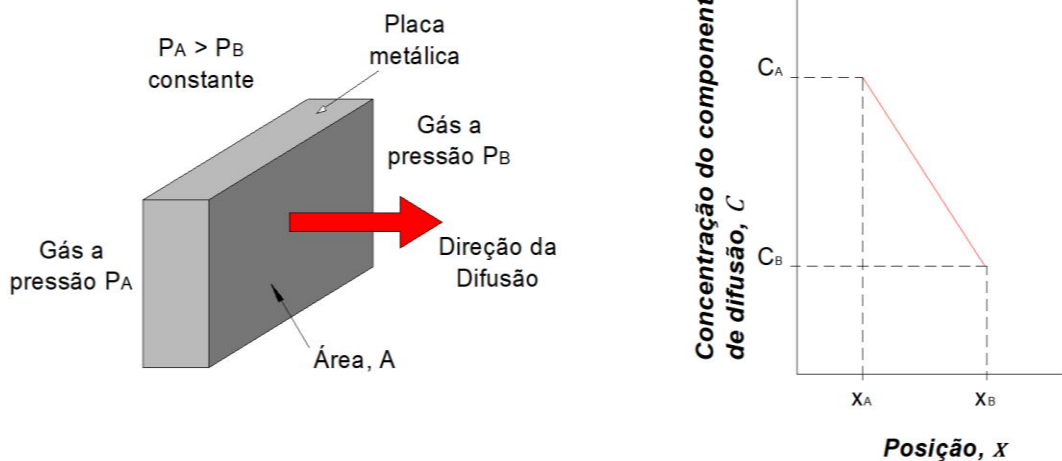
C_A – Concentração face A;

C_B – Concentração face B;

x_A – Posição face A;

x_B – Posição face B.

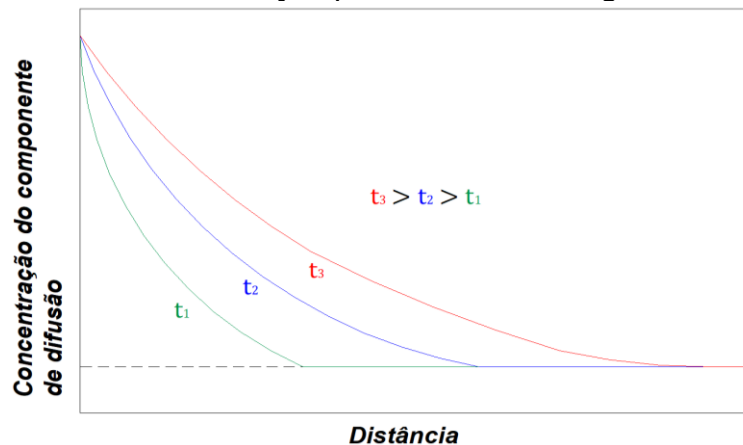
Figura 9: Difusão em regime estacionário e perfil de concentração.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Embora a Eq. (5) possibilite determinar o coeficiente de difusão da maioria dos problemas, a exemplo dos agentes agressivos que difundem no concreto, o mesmo ocorre em regime não estacionário, onde o fluxo difusional (J) e o gradiente de concentração $\frac{dC}{dx}$ em um ponto específico no interior de um sólido variam com o tempo (t) conforme Figura 10.

Figura 10: Perfis de concentração para difusão em regime não estacionário.

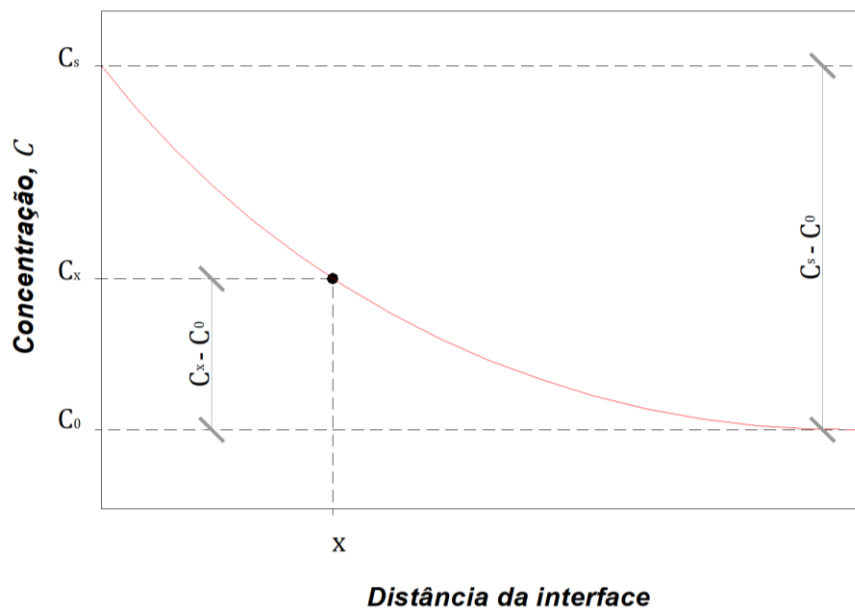


Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Atribuindo na Eq. (5) a equação diferencial parcial $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$, conhecida como Segunda Lei de Fick, considerando $t = 0, C = C_0$ em $0 \leq x \leq \infty$ como condições iniciais e condições de contorno $t > 0, C = C_s$ em $x = 0$ e $t > 0, C = C_0$ em $x = \infty$ encontra-se como solução para regimes não estacionários a Eq. (6), sendo ilustrado na Figura 11 o perfil de concentração.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \text{Eq. (6)}$$

Figura 11: Perfil de concentração em regime não estacionário para tempo e posição conhecidos.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

2.2.2. Processo de difusão de cloretos no concreto

Conforme Reus *et al.* (2021), o setor da construção civil tem um grande impacto financeiro decorrente da degradação de estruturas de concreto armado. Esse fato é potencializado quando essa avaliação é oriunda de estruturas situadas em ambientes com influência marinha, podendo ser de exposição direta no caso de estruturas que estão submersas em águas salinas ou indireta para as estruturas que sofrem o ataque do Cl^- presente na maresia.

Ao avaliar a ação do cloreto em estruturas de concreto, o vetor de difusão aponta para a profundidade. Helene (1993) destaca que os principais fatores que

influenciam na difusão de íons de cloretos são o tempo de exposição ao ambiente agressivo, o índice de vazios, o tipo de cimento, a relação água/cimento, a resistência à compressão, o tipo de agregado e o tipo de proteção superficial, além das boas práticas já mencionadas neste trabalho. No entanto, essa avaliação representa um grande desafio para os profissionais da construção civil, especialmente devido à ausência de uma normativa brasileira específica para essa análise, com todo o controle de manutenção sendo realizado com base em boas práticas recomendadas por pesquisadores e em métodos empregados em outros países.

Diante do exposto, faz-se necessário conhecer os parâmetros que influenciam a difusão de cloretos no concreto, os quais são elencados e descritos na sequência, com base em resultados da literatura.

2.2.3. Fatores que influenciam na difusão de cloretos no concreto

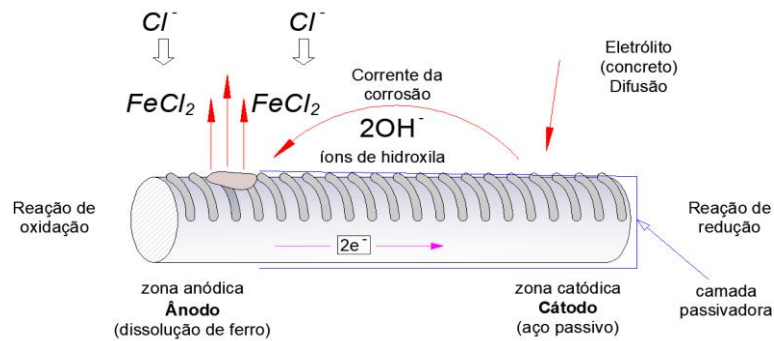
Existem diversos mecanismos envolvidos na avaliação da deterioração de materiais. Mecanismos químicos ocorrem quando variáveis externas ou internas interagem com os compostos do material; nesse caso, a correlação entre a agressividade do ambiente e a qualidade do material é determinante. Quando o mecanismo é biológico, a alteração no material é provocada pela ação de macroorganismos ou microrganismos presentes no ambiente, e condições como ambientes úmidos e baixa insolação atuam como fatores potencializadores. Mecanismos físicos provocam alterações volumétricas nos materiais por meio de um processo denominado termo-higroscópico. Já os mecanismos mecânicos são causados por esforços mecânicos aplicados ao material, como, por exemplo, a sobrecarga não prevista no projeto em uma viga de concreto, conforme Bolina, Tutikian e Helene (2019).

Conforme Helene (1986), a degradação das armaduras em estruturas de concreto armado pode ocorrer devido à oxidação (corrosão química) e/ou à corrosão eletroquímica.

Na corrosão química, a reação ocorre entre o gás e o metal, formando uma película de óxido que envolve o componente metálico (Ribeiro, Cunha e Helene, 2015). Já na corrosão eletroquímica, há a transferência de elétrons e íons entre duas regiões distintas do metal (Strehbloow e Marcus, 1995).

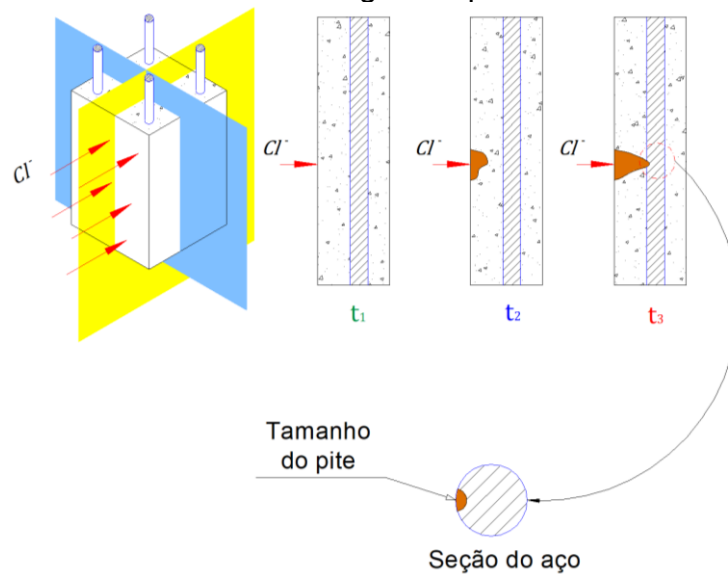
De acordo com Ribeiro, Cunha e Helene (2015), a corrosão causada pela despassivação via difusão de íons de cloreto é denominada corrosão por pites, um tipo de corrosão que ocorre de forma não linear, com seu desenvolvimento concentrado em regiões localizadas da armadura (Figura 12 e Figura 13).

Figura 12: Despassivação da armadura por cloretos.



Fonte: Dourado *et al.* (2022).

Figura 13: Fases da difusão gerada por corrosão localizada.

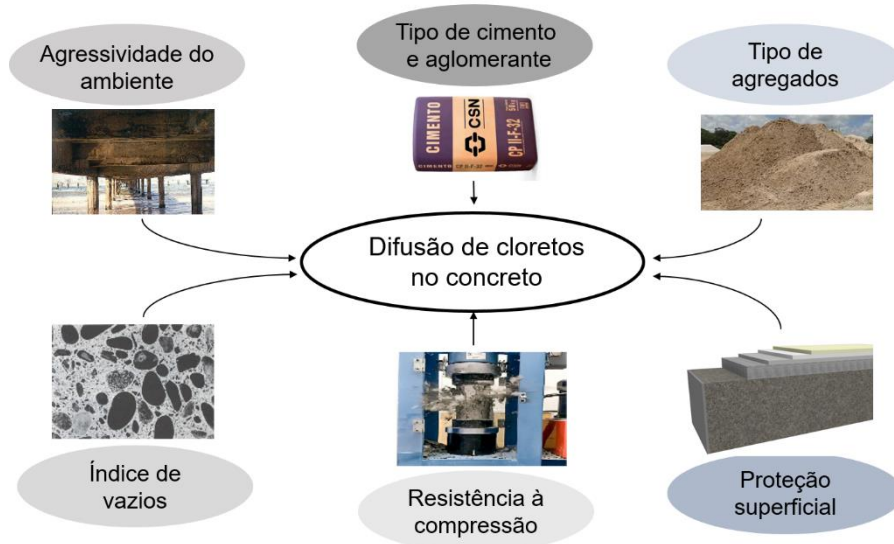


Fonte: Própria autoria.

O período de despassivação das armaduras é influenciado por uma série de variáveis relacionadas ao ambiente em que a estrutura está inserida. Entre as principais variáveis, Meira (2017) destaca: a concentração do agente agressivo no ambiente, como o CO_2 ou os íons cloreto; as características do concreto, incluindo a porosidade, o potencial alcalino e a capacidade de retenção de cloretos na matriz; e, por fim, as condições de interação entre o ambiente e a estrutura. De forma resumida,

a Figura 14 apresenta os principais parâmetros que influenciam o processo de difusão de cloretos no concreto.

Figura 14: Parâmetros de influência na difusão de cloretos no concreto.



Fonte: Própria autoria.

2.2.3.1. Influência do ambiente de exposição

O ambiente no qual as estruturas estão inseridas tem influência direta no processo de deterioração causado pela corrosão. Por isso, é essencial compreender as características ambientais que interferem nesse processo, a fim de considerá-las na etapa de projeto. Esse cuidado é crucial para garantir maior durabilidade aos elementos estruturais, assegurando sua segurança e funcionalidade ao longo de sua vida útil. A durabilidade de uma estrutura de concreto, diretamente associada à sua vida útil, pode ser definida como a capacidade do material de resistir aos efeitos agressivos do meio ambiente (Ramos, 2020). Assim, torna-se indispensável analisar e discutir os impactos que o ambiente exerce sobre os elementos estruturais de concreto armado.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), a agressividade ambiental é definida pelas condições climáticas, que influenciam fatores cruciais ao processo corrosivo, como umidade e temperatura, tanto internas quanto externas. Além disso, está relacionada à presença de substâncias deteriorativas, como íons cloreto, sulfato e sulfeto. Helene (1986) propõe uma classificação da agressividade ambiental com base nas interações entre o macroclima e os tipos de atmosfera em que as estruturas de

concreto armado estão inseridas. Essas atmosferas são categorizadas em rural, urbana, marinha, industrial e viciada, conforme descrições apresentadas a seguir:

- Atmosfera rural: caracterizada por regiões abertas, com baixo teor de poluentes e afastadas de fontes de emissão de contaminantes. Apresenta baixa agressividade às armaduras, com lento processo de despassivação. Os níveis de gases e sólidos agressivos são geralmente desprezíveis, exceto em locais com fontes naturais, como estrume ou rios poluídos, que podem liberar gases corrosivos como NH_3 e H_2S ;
- Atmosfera urbana: abrange áreas abertas em grandes centros populacionais. Possui impurezas, como óxidos de enxofre (SO_2) e fuligem ácida, além de umidade relativa elevada, que aumenta a taxa de corrosão, especialmente próxima de 75%. Contaminantes no ambiente intensificam as reações corrosivas;
- Atmosfera marinha: próxima às zonas costeiras, é caracterizada por elevada presença de íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), substâncias extremamente agressivas que aceleram a corrosão das armaduras. Gases agressivos só aparecem em locais próximos a indústrias ou centros urbanos;
- Atmosfera industrial: localizada em ambientes industriais contaminados por gases e cinzas, como H_2S , SO_2 e NO_x . Esses agentes reduzem a alcalinidade do concreto e aumentam significativamente a velocidade de carbonatação. A alta umidade desses ambientes agrava a corrosão e acelera a degradação das estruturas;
- Atmosfera viciada: corresponde a ambientes fechados com ventilação limitada, onde gases agressivos, como ácido sulfúrico, sulfatos (SO_4^{2-}) e gás sulfídrico (H_2S), se acumulam. Exemplos típicos incluem coletores e interceptadores de esgoto, que intensificam a corrosão.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), altas concentrações de cloreto podem ocasionar a despassivação da armadura em períodos inferiores à vida útil de projeto preconizada pela norma de desempenho NBR 15757 (ABNT, 2013). No Quadro 2 pode-se verificar as classes de agressividade ambiental para cada tipo de

ambiente de exposição em que se encontra uma estrutura de concreto armado. A classificação do ambiente auxilia os projetistas a alterar as condições de projeto ou de construção, a fim de garantir a vida útil requisitada. Ademais, a NBR 12655 (ABNT, 2022) preconiza que o concreto em sua fase endurecida deve apresentar valores de concentração de cloretos em relação à massa de cimento (%) inferiores aos indicados no Quadro 3.

Quadro 2: Classe de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a,b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a,c}	Elevado
		Respingos de maré	

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

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

c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023).

Quadro 3: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto.

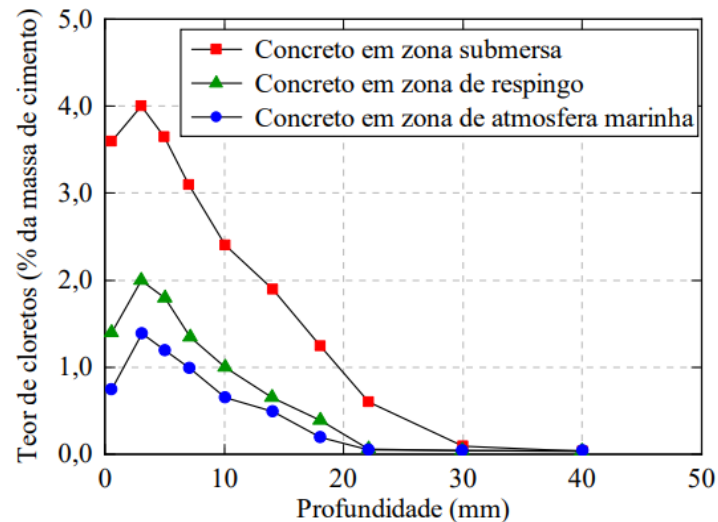
Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl ⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
Concreto armado em brandas condições de exposição (superfície seca ou protegido da umidade, nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2024).

Sandberg *et al.* (1998) destacam que, em concretos situados em zonas submersas, a penetração de íons cloreto é mais intensa do que em estruturas

expostas à atmosfera marinha. A Figura 15 apresenta os perfis de cloretos de uma estrutura de concreto após 5 anos de exposição a ambientes agressivos.

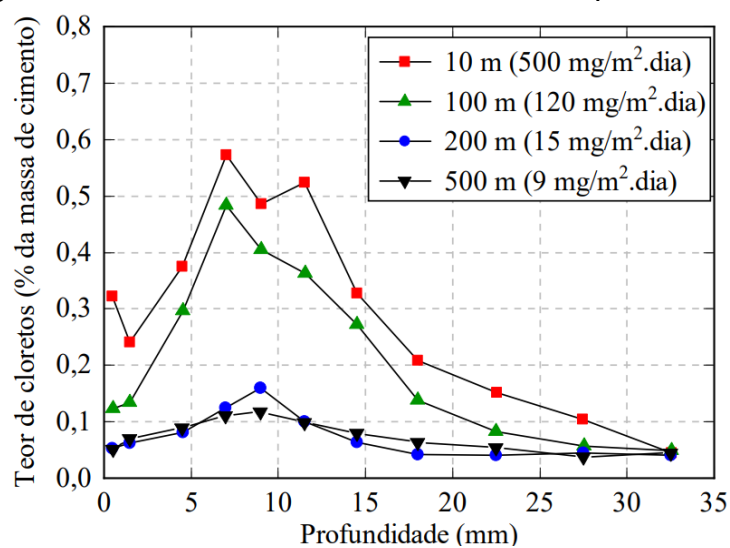
Figura 15: Influência da zona de exposição no perfil de cloretos após 5 anos de exposição.



Fonte: Sandberg, Tang e Andersen (1998), adaptado por Ramos (2020).

A Figura 16 ilustra como a distância da estrutura de concreto em relação ao mar influencia a penetração de íons cloreto. Essa relação deve-se à variação nos níveis de concentração do agente agressivo presente na névoa salina, que diminui à medida que aumenta o afastamento do mar, conforme resultados apresentados por Meira *et al.* (2010).

Figura 16: Influência da distância do mar no perfil de cloretos.



Fonte: Meira *et al.* (2010), adaptado por Ramos (2020).

Em síntese, a durabilidade das estruturas de concreto armado depende diretamente da capacidade do concreto em resistir à penetração de agentes

agressivos provenientes do ambiente onde a estrutura está inserida. Para isso, as normas técnicas têm um papel orientador, estabelecendo os requisitos de projeto necessários para assegurar a durabilidade mínima exigida para as estruturas de concreto.

Assim, é responsabilidade do profissional responsável pelo projeto garantir que os parâmetros essenciais sejam claramente definidos para retardar esses mecanismos de deterioração. Entre esses parâmetros, destaca-se o cobrimento mínimo a ser adotado conforme as condições do ambiente de exposição, além do controle rigoroso do índice de vazios no interior do concreto, fator crucial para minimizar a difusão de cloretos no material.

2.2.3.2. Influência do tipo de cimento, adições, relação água-cimento e resistência à compressão

O cimento, considerado um dos principais constituintes do concreto, desempenha um papel determinante no mecanismo de transporte em uma matriz cimentícia. Isso ocorre devido às diferentes proporções dos componentes presentes nos diferentes tipos de cimento que podem ser utilizados na produção do concreto. A Tabela 1 apresenta alguns dos tipos de cimento Portland comercializados no Brasil, cujas características são definidas pelas normas técnicas NBR 11578 (ABNT, 1991) e NBR 16697 (ABNT, 2018). Essas normas especificam os requisitos para os percentuais de clínquer, de sulfato de cálcio, de material carbonático, de escória de alto-forno e de material pozzolânico que compõem cada tipo de cimento.

De acordo com Cascudo (1997), cimentos com adições de escória de alto-forno e de materiais pozzolânicos, como cinza volante e sílica ativa, apresentam maior compacidade na matriz cimentícia. Isso torna o concreto menos suscetível à penetração de líquidos, gases e íons. Embora essas adições possam reduzir a resistência do concreto à carbonatação, os benefícios, como a melhoria da durabilidade, superam os possíveis efeitos negativos.

No caso das escórias de alto-forno, além de reduzir a taxa de difusão iônica, de aumentar a permeabilidade e de aumentar a resistividade do concreto, sua adição favorece a combinação com íons cloreto, formando o sal de Friedel, que se estabiliza na estrutura do concreto (Cascudo, 1997).

Tabela 1: Características dos cimentos conforme NBR.

NBR	Sigla	Componentes (% em massa)			
		Clinker + Sulfato de Cálcio	Material carbonático	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico
11578	CP II-E	94 - 51	0 - 15	6 - 34	-
	CP II-F	89 - 75	11 - 25	-	-
	CP II-Z	94 - 71	0 - 15	-	6 - 14
16697	CP III	65 - 25	0 - 10	35 - 75	-
	CP IV	85 - 45	0 - 10	-	15 - 50
	CP V-ARI	100 - 90	0 - 10	-	-

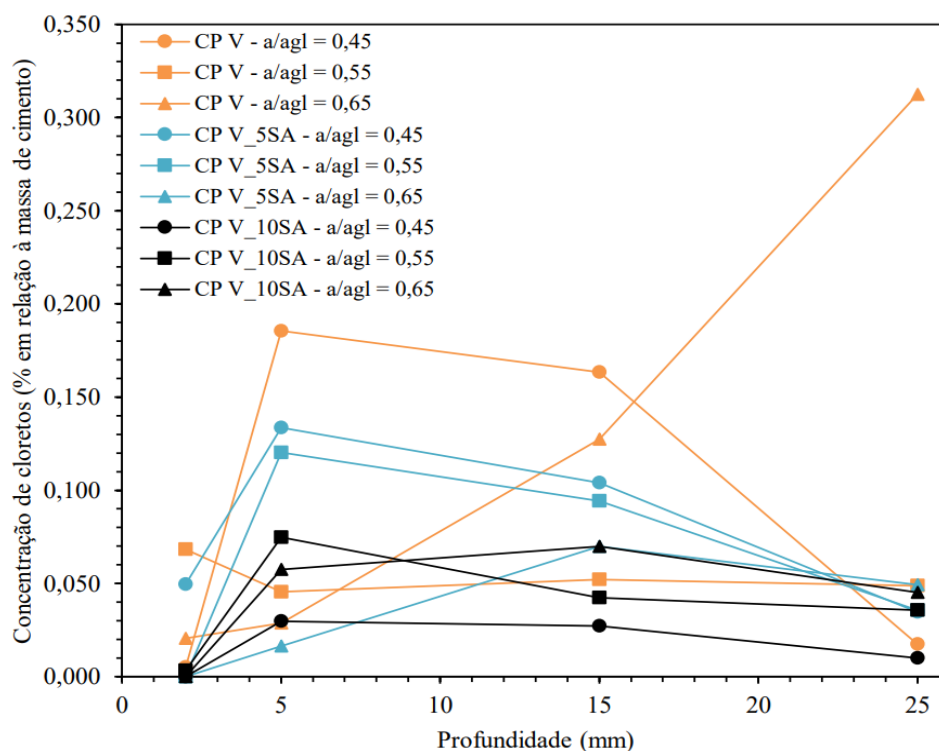
Fonte: Extraído das normas NBR 11578 (ABNT, 1991) e NBR 16697 (ABNT, 2018).

Ferreira (2003) também destaca que adições minerais melhoram significativamente a durabilidade do concreto. Quando utilizadas em teores de até 65%, essas adições reduzem a penetrabilidade dos íons cloreto, diminuem a absorção capilar e aumentam a resistividade elétrica da matriz cimentícia, contribuindo para um melhor desempenho frente a agentes agressivos.

No entanto, a utilização de adições minerais no concreto, com o objetivo de densificar sua porosidade, promove o consumo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e resulta na redução do pH do material. A Figura 17 apresenta os resultados de um estudo conduzido por Silvestro *et al.* (2021), no qual foi avaliada a concentração de cloretos em estruturas de concreto expostas, em condições naturais de uma zona marinha, por um período de 9 anos. O estudo utilizou blocos de concreto moldados com diferentes teores de sílica ativa (5% - CPV_5SA e 10% - CPV_10SA) e relações massa aglomerante ($a/agl = 0,45, 0,55$ e $0,65$). Os resultados apresentados apontam concentrações de cloretos para alguns traços de concreto próxima do limite admitido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) com apenas nove anos de exposição em ambiente agressivo mostrando propensões em não alcançar a vida útil estabelecida pelas normativas brasileiras.

Por meio de técnicas de aprendizado de máquina, Falcão *et al.* (2024) desenvolveram um modelo de predição do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, considerando alternativamente dados da literatura, e observaram que há uma relação entre o índice de vazios e a difusão de cloretos, sendo essa relação mais pronunciada na utilização de cimentos compostos.

Figura 17: Perfis de cloretos dos concretos com tempo de exposição de 9 anos.



Fonte: Silvestro *et al.* (2021).

A resistência à compressão também é um fator relevante, especialmente ao considerar concretos de baixa resistência (inferior a 40 MPa) e aqueles produzidos com CP III e CP IV. Conforme Castro e Pandolfelli (2009), a combinação de aditivos químicos e adições minerais permite melhorar a estrutura dos poros em concretos de alto desempenho. Essa abordagem resulta em uma redução significativa do teor de água na mistura, do tamanho dos poros e da quantidade de ar aprisionado, criando uma microestrutura mais densa no estado endurecido.

Embora a resistência à compressão não esteja diretamente relacionada à penetração de cloretos ou à corrosão, ela pode indicar a suscetibilidade do concreto ao ataque de cloretos. Alencar *et al.* (2016) destacam que concretos de maior resistência, geralmente, apresentam menor permeabilidade, principalmente devido à redução da relação água/cimento (a/c).

Segundo Possan (2010), a relação água/cimento (a/c) e a resistência à compressão são fatores determinantes da quantidade e do tamanho dos poros do concreto endurecido. Relações a/c mais elevadas resultam em maior porosidade e permeabilidade, o que facilita a difusão de agentes agressivos. Cascudo (1997) reforça que a relação água/cimento é um dos parâmetros mais relevantes para a

compacidade ou porosidade da pasta de cimento. Relações a/c mais baixas não apenas dificultam a entrada de umidade e agentes agressivos, mas também retardam a difusão de cloretos.

Estudos de Pereira (2001) e Nepomuceno (2005) corroboram essa visão, indicando que concretos com maiores relações a/c apresentam maior porosidade e permeabilidade, o que aumenta a suscetibilidade à difusão de cloretos. Ollivier e Torrenti (2014) acrescentam que a permeabilidade e a difusão estão diretamente relacionadas à interconexão dos poros capilares, que, por sua vez, dependem da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento. No entanto, a redução dessa interconexão pode gerar efeitos adversos, como o surgimento de microfissuras, o que deve ser cuidadosamente considerado no processo de otimização do concreto.

2.2.3.3. **Influência dos agregados**

Os agregados desempenham um papel crucial na durabilidade do concreto, especialmente no que se refere à difusão de íons cloreto, um dos principais agentes responsáveis pela corrosão das armaduras. A influência dos agregados na penetração de cloretos é determinada por diversos fatores, incluindo sua granulometria, composição mineralógica e tamanho máximo.

Estudos indicam que os agregados miúdos têm maior impacto na difusão de cloretos do que os agregados graúdos. Por exemplo, uma pesquisa realizada por Finkler (2020) revelou que a composição mineralógica dos agregados miúdos afeta significativamente a penetração de cloretos no concreto.

Além disso, a granulometria dos agregados influencia a densidade da matriz cimentícia. Agregados bem graduados, que apresentam uma distribuição adequada de tamanhos de partículas, permitem um empacotamento mais eficiente, resultando em uma microestrutura mais densa e, conseqüentemente, menor permeabilidade ao ingresso de cloretos. Por outro lado, agregados mal graduados podem criar vazios intersticiais que facilitam a penetração de íons cloreto (Sánchez *et al.*, 2019).

A composição mineralógica dos agregados também desempenha papel significativo. Agregados com maior teor de minerais reativos podem interagir com os componentes da pasta de cimento, formando produtos que aumentam a porosidade e a permeabilidade do concreto, facilitando a difusão de cloretos (Santos *et al.*, 2006).

2.2.3.4. Influência do tipo de proteção superficial

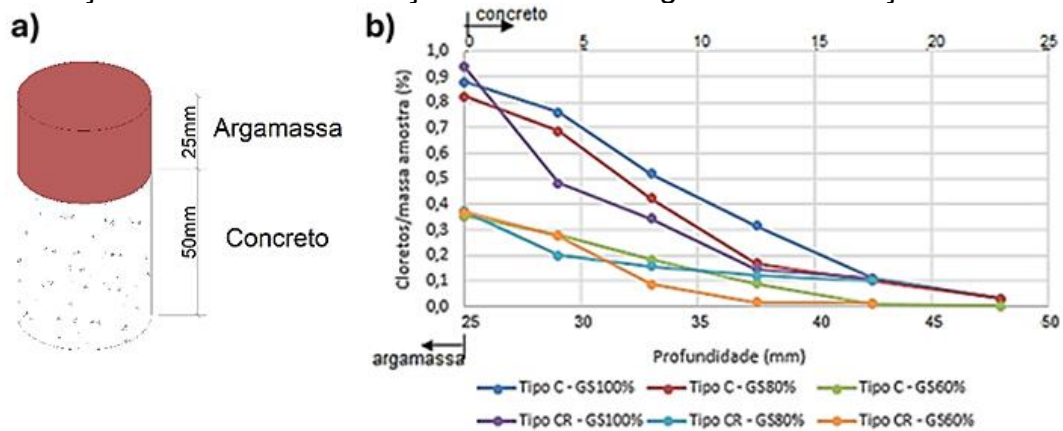
O processo de avaliação da difusão de cloretos em sistemas múltiplos, que consideram uma camada superficial (como argamassa, tinta, resina e materiais similares) e a camada interna (o concreto), ainda apresenta lacunas no âmbito experimental. Segundo Bandeira (2022), revestimentos com argamassa sobre o concreto podem ser uma alternativa vantajosa, especialmente quando a argamassa é composta por cal e apresenta teor mais elevado de cimento.

De acordo com Quarcioni *et al.* (2011), a argamassa é um compósito heterogêneo, de matriz frágil e polifásica, predominantemente composto por fases hidratadas de cimento. Quando carbonatada, a argamassa apresenta carbonatos finamente cristalizados, com grãos de diferentes formas e tamanhos. Além disso, os vazios presentes na argamassa incluem microporos do C-S-H (Hidrato de Silicato de Cálcio), provenientes da carbonatação da cal; poros capilares da pasta (com dimensões superiores a 50 μm); e bolhas de ar milimétricas aprisionadas durante a mistura ou introduzidas por aditivos químicos.

Costa (2001) observa que, no contexto das obras nacionais, um agravante na qualidade das argamassas é a ausência de traços adequados aos diversos ambientes e utilizações. Esses traços seriam essenciais para garantir a qualidade e durabilidade dos revestimentos de argamassa.

No estudo de Bandeira (2022), foi analisada a influência de revestimentos com argamassa sobre o ataque de cloretos em estruturas de concreto saturado e não saturado. Os resultados confirmaram que tal tipo de proteção contribui para reduzir a difusão de íons cloreto no concreto, destacando a eficácia da argamassa como revestimento. A pesquisa utilizou corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10x20 cm, com uma camada de argamassa de 25 cm sobre uma face do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 18.a. A Figura 18.b apresenta uma comparação entre as concentrações de cloretos, mostrando que os corpos de prova com revestimento (Tipo CR) apresentaram concentrações menores do que os corpos de prova sem revestimento (Tipo C). Na Figura 18.b, o termo GS $x\%$ refere-se a uma amostra com grau de saturação de $x\%$.

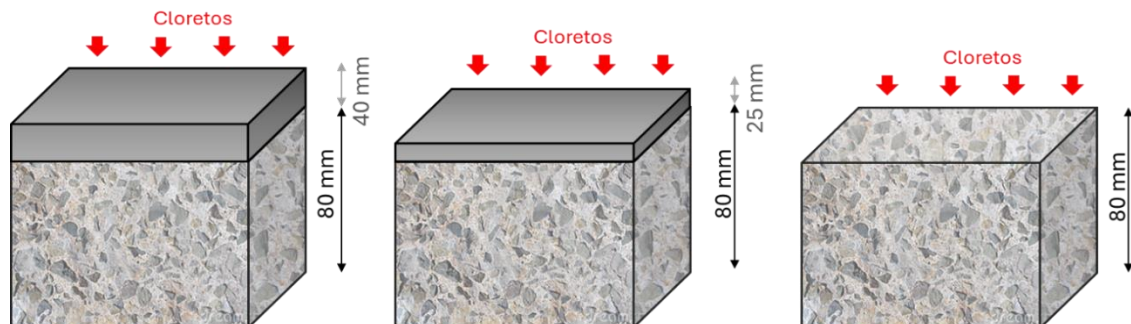
Figura 18: (a) Corpo de prova com argamassa de revestimento; (b) Gráfico da concentração de cloretos em função de diferentes graus de saturação.



Fonte: Bandeira (2022).

Malheiro *et al.* (2014) conduziram ensaios de difusão em corpos prismáticos de 8x8x8 cm, constituídos por um sistema duplo moldado com revestimentos de argamassa, em diversas espessuras, conforme ilustrado na Figura 19. A análise dos resultados indicou uma eficiência favorável do uso da argamassa como sistema de proteção, com variações nos valores de concentração de cloretos entre a face externa da argamassa e a interface do concreto variando entre 0,1% Cl^- para argamassa 1:3 e 0,4% Cl^- para argamassa industrializada utilizada para fins de revestimento externo, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 19: Tipologias dos corpos de prova utilizados na campanha experimental.

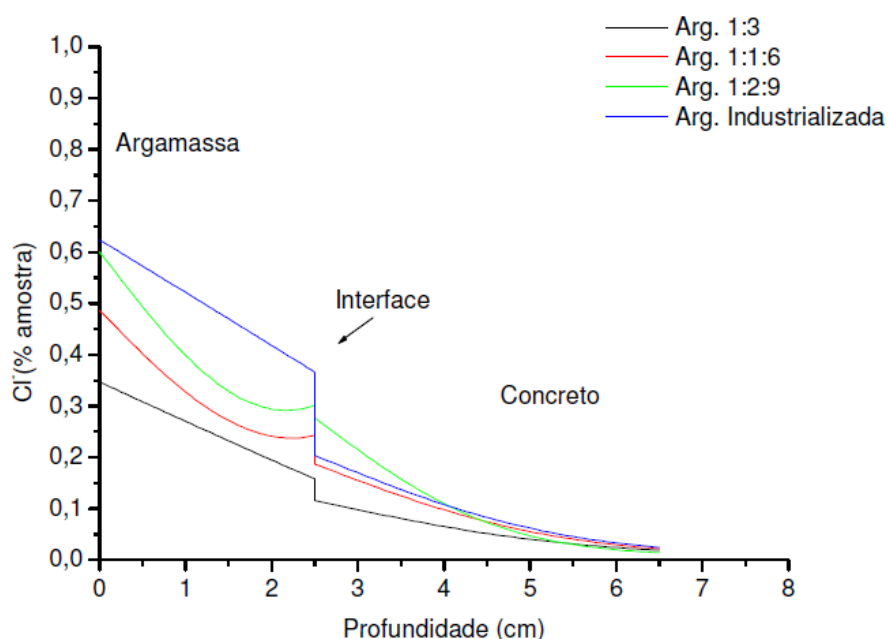


Fonte: Malheiro *et al.* (2014).

Além do uso de argamassa, a proteção superficial de estruturas de concreto pode ser realizada com outros materiais de revestimento, como formadores de película, hidrofugantes de superfície e bloqueadores de poros. Esses sistemas são mais caros e acabam sendo utilizados em estruturas expostas a elevados níveis de

agressividade ou em elementos de infraestrutura urbana, não sendo usuais em elementos de edificações urbanas. Outro ponto para a baixa aplicação desses sistemas refere-se à alta manutenibilidade requerida. Medeiros (2008) destaca que todos os sistemas de proteção têm vida útil relativamente curta em comparação com o concreto, sendo essencial um programa de manutenção contínuo para garantir sua eficácia.

Figura 20: Concentração de cloretos nos elementos protegidos com diferentes argamassas.



Fonte: Malheiro *et al.* (2014).

Revestimentos formadores de película, como tintas e vernizes, atuam criando uma camada protetora na superfície do concreto, impedindo a penetração de agentes agressivos. Esses revestimentos devem ser resistentes ao intemperismo, aos raios ultravioleta e à ação de fungos e bactérias, além de manterem estabilidade química com o concreto (Helene, 1991).

Os revestimentos hidrófobos, como os hidrofugantes, têm como função tornar a superfície do concreto repelente à água, permitindo a passagem de gases e de vapor d'água e prevenindo a formação de bolhas sob o filme (Medeiros, 2008).

Os bloqueadores de poros, como os compostos à base de silicatos de sódio (Na_2SiO_3), reagem com o hidróxido de cálcio (portlandita) nos poros do concreto, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que reduz a permeabilidade e aumenta a durabilidade da estrutura (Medeiros, 2008).

2.2.4. Métodos de avaliação da frente de difusão de cloretos

A presença de cloretos em estruturas de concreto em ambiente urbano é decorrente de vários fatores. Segundo a prática recomendada para determinação do perfil de difusão de cloretos (Meira *et al.*, 2021), a existência de cloretos no interior do concreto pode ser decorrente do uso de aditivos aceleradores de pega, de água de amassamento ou de agregados contaminados ou do meio externo no qual está inserido. Segundo a prática, a profundidade de cloretos livres pode ser obtida de maneira qualitativa ou quantitativa.

Para a determinação, de forma qualitativa, da profundidade de penetração de cloretos, também conhecida como método colorimétrico, o corpo de prova deve ser rompido diametralmente com uma lâmina de corte, a fim de evitar a contaminação de regiões não expostas a cloretos, o que poderia comprometer os resultados. Após o corte, uma solução indicadora de nitrato de prata (Ag NO_3) com concentração de 0,1 M é aspergida sobre a superfície exposta. O nitrato de prata reage com os cloretos livres presentes no concreto, formando duas regiões bem definidas: uma de coloração esbranquiçada, que indica a presença de cloretos, e outra de coloração amarronzada, que corresponde à região livre de cloretos, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Contraste entre cores em amostra de concreto após aspersão de nitrato de prata.



Fonte: Reus *et al.* (2021).

Reus *et al.* (2021) destacam a importância de considerar possíveis interferências em inspeções de estruturas carbonatadas que utilizam o método colorimétrico. Nessas estruturas, podem surgir regiões esbranquiçadas após a aplicação do nitrato de prata, dando a impressão de reação com íons cloreto. No

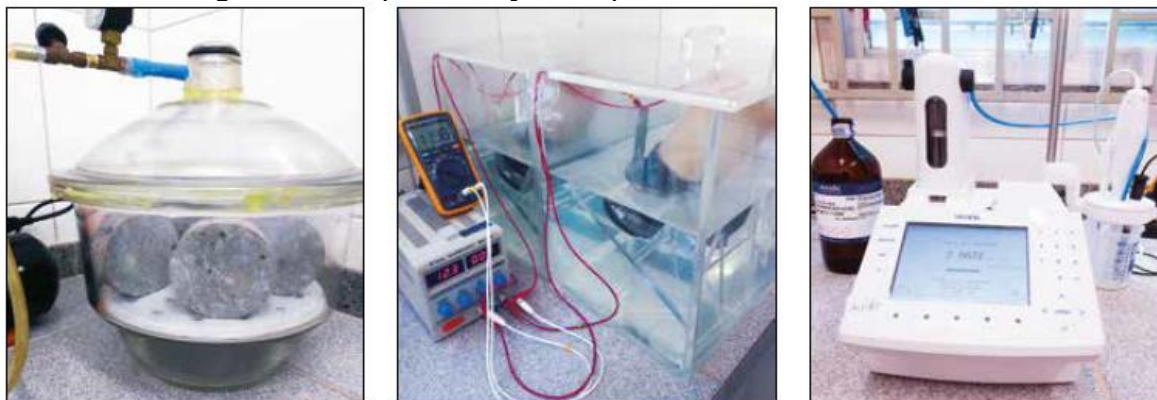
entanto, esse fenômeno ocorre devido à reação entre os íons de prata (Ag^+) da solução de nitrato de prata e o produto da carbonatação (CO_3^{2-}), formando carbonato de prata (Ag_2CO_3) em regiões onde o pH é inferior a 10. Nesses casos, torna-se necessário o uso de métodos complementares para a confirmação dos teores reais de cloreto no concreto.

Entre os métodos quantitativos mais utilizados estão os volumétricos, potenciométricos e a cromatografia. No entanto, até o momento, não há no Brasil uma norma específica que contemple ensaios de determinação de cloretos em materiais cimentícios. Para a avaliação do transporte de cloretos em concretos, destacam-se ensaios preconizados por normas e procedimentos internacionais, como a NT Build 443 (NORDTEST, 1995), NT Build 492 (NORDTEST, 1999), ASTM C1202 (ASTM, 2002) e o Teste LMDC (Truc *et al.*, 2000).

O Teste LMDC (Truc *et al.*, 2000) é realizado em amostras extraídas de cilindros de concreto com dimensões de 100-110 mm e espessura de 30 mm. As amostras devem ser submetidas a um processo de vácuo por 4 horas, seguido de saturação em solução de NaOH (1 g/L) e KOH (4,65 g/L) por 20 ± 1 horas.

O princípio do método baseia-se na migração iônica em estado estacionário, induzida por uma voltagem de 12V, com o monitoramento da concentração de cloretos na solução superior, conforme ilustrado na Figura 22. Esse teste fornece como parâmetro principal o coeficiente de difusão efetivo, sendo amplamente reconhecido como um ensaio que proporciona uma caracterização mais precisa do transporte efetivo de cloretos no concreto.

Figura 22: Representação esquemática do Teste LMDC.



Fonte: Cascudo *et al.* (2022).

Outro método amplamente utilizado é o ensaio descrito na norma ASTM C1202 (ASTM, 2002), também conhecido como RCP (Rapid Chloride Permeability Test) ou Teste Rápido de Permeabilidade de Cloretos. Esse ensaio determina a carga elétrica total que atravessa o concreto em um intervalo de tempo, como indicativo da resistência do material à penetração de cloretos, considerando que os íons de cloreto são partículas eletricamente carregadas.

Os resultados obtidos nesse ensaio são avaliados com base nos critérios de carga passante especificados pela ASTM C1202 (ASTM, 2002), que classifica o nível de penetrabilidade dos cloretos. O Quadro 4, extraído dessa norma, apresenta os intervalos de carga passante e as respectivas classificações de resistência do concreto à penetração de cloretos, facilitando a interpretação e comparação dos resultados.

Quadro 4: Penetrabilidade de cloretos baseada na carga elétrica passante.

Carga passante (coulombs)	Penetrabilidade de cloretos
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Insignificante

Fonte: Traduzido da ASTM C1202 (ASTM, 2022)

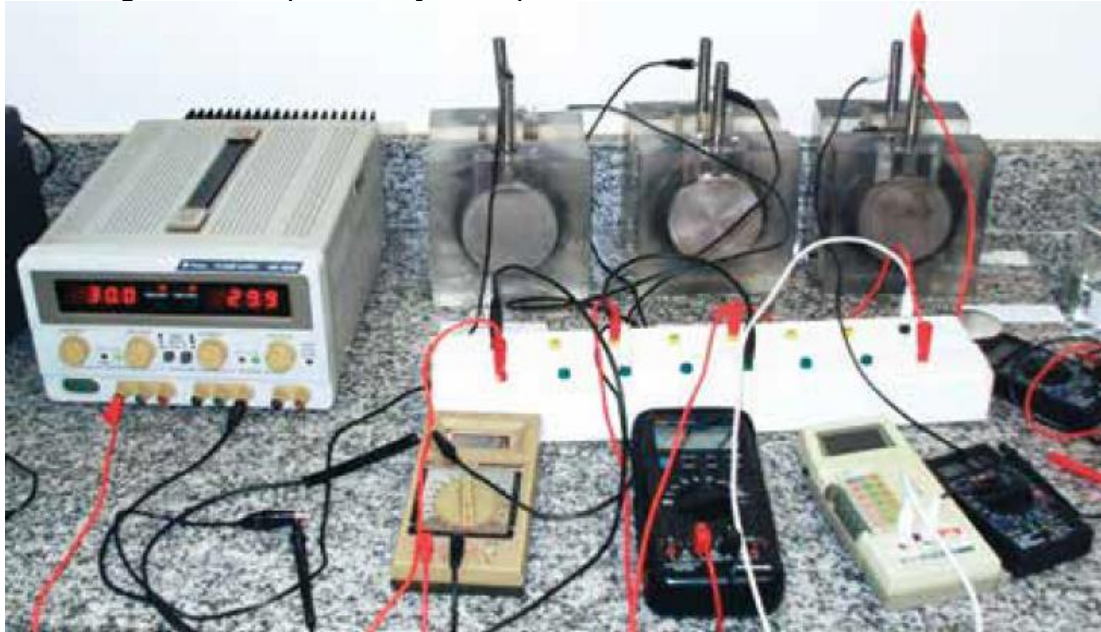
As amostras utilizadas no ensaio são extraídas de cilindros de concreto com 100 mm de diâmetro e 50 ± 3 mm de espessura. As laterais das amostras são impermeabilizadas para evitar infiltrações indesejadas durante o teste. Em seguida, as amostras são submetidas a um processo de vácuo por 3 horas em um bquer, seguido de saturação em água por 19 ± 2 horas após a ebulição, sendo que a primeira hora de saturação ocorre ainda sob vácuo. A Figura 23 ilustra um modelo do Teste Rápido de Permeabilidade de Cloretos em andamento, destacando os equipamentos utilizados.

O princípio do método baseia-se na migração de íons em estado não estacionário, induzida por uma voltagem de 60 V, com o monitoramento da corrente elétrica passante a intervalos de 30 minutos.

O principal parâmetro obtido nesse ensaio é a carga elétrica total que atravessa o concreto, utilizada como indicativo indireto da resistência do material à

penetração de cloretos, conforme descrito na Eq. (7). Esse método permite avaliar, de forma prática e objetiva, a durabilidade do concreto em relação à ação de cloretos.

Figura 23: Representação esquemática do Ensaio ASTM C1202.



Fonte: Cascudo *et al.* (2022).

$$Q = 900 (l_0 + 2l_{30} + 2l_{60} + \dots + 2l_{300} + 2l_{330} + 2l_{360}) \quad \text{Eq. (7)}$$

Sendo:

Q – Carga passante (C);

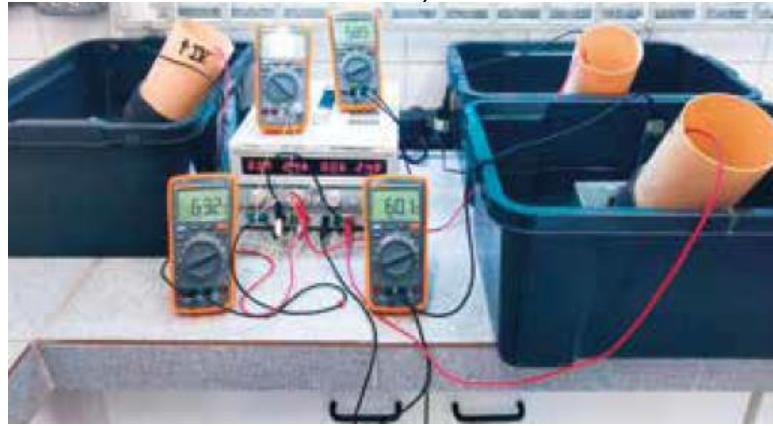
l_0 – Corrente imediatamente após aplicação da voltagem no começo do ensaio (A);

l_t – Corrente em t minutos após o início da aplicação da voltagem (A).

Outro método amplamente utilizado é descrito pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999), no qual se aplica um campo elétrico externo para acelerar a migração dos íons cloreto da solução catódica para a solução anódica, atravessando a amostra de concreto em estado não estacionário, conforme ilustrado na Figura 24.

A voltagem aplicada e o tempo de duração do ensaio são ajustados com base na corrente elétrica inicial, medida quando a fonte é ligada. Esse ajuste é fundamental para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Figura 24: Representação esquemática do Ensaio NT Build 492 (NORDTEST, 1999).



Fonte: Cascudo *et al.* (2022).

As amostras utilizadas no ensaio devem ter diâmetro de 100 mm e espessura de 50 ± 2 mm. Antes do início do teste, as amostras devem ser submetidas a um processo de vácuo por 3 horas, seguido de saturação em solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) por 19 ± 2 horas, sendo que a primeira hora de saturação deve ocorrer ainda sob vácuo.

O coeficiente de migração dos íons cloreto é então calculado com base nos dados obtidos durante o ensaio, utilizando-se da Eq. (8), que permite quantificar, de forma confiável e padronizada, a resistência do concreto à penetração de cloretos.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right) \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

D_{nssm} – Coeficiente de migração em estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U – Valor absoluto da voltagem aplicada (V);

T – Média das temperaturas inicial e final da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);

L – Espessura da amostra de concreto (mm) – média de três medidas;

x_d – Valor médio da profundidade de difusão de cloretos (mm) – de sete medidas individuais;

t – Tempo de duração do ensaio (horas).

O método é amplamente utilizado devido à sua execução relativamente simples, que requer apenas aparatos básicos, além de proporcionar boa repetibilidade e reprodutibilidade nos resultados. No Quadro 5, apresentam-se alguns dos principais parâmetros extraídos da NT Build 492 (NORDTEST, 1999), que auxiliam na interpretação dos resultados e na padronização do ensaio.

Quadro 5: Tensão e duração do ensaio para uma amostra de concreto com teor normal de ligante.

Corrente inicial I_{30V} (com 30V) (mA)	Tensão aplicada U (após ajuste) (V)	Possível nova corrente inicial I_0 (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Traduzido da NT Build 492 (NORDTEST, 1999).

Outro método amplamente utilizado para a determinação do perfil de cloretos totais é descrito na NT Build 443 (NORDTEST, 1995). Esse ensaio envolve a pulverização das amostras, obtida com o auxílio de uma furadeira, e o pó é coletado e separado em recipientes individuais para evitar qualquer contaminação entre as frações.

Antes da extração do material, cada corpo de prova deve ser submetido a uma solução rica em cloretos, com concentração de 165 ± 1 g/L de NaCl, por, no mínimo, 35 dias. Todas as faces do corpo de prova devem ser impermeabilizadas,

exceto a face exposta à solução, utilizando resina epóxi ou poliuretano, com espessura aproximada de 1 mm.

A Figura 25 ilustra o modelo de extração do pó da face exposta de um corpo de prova cilíndrico, utilizado para análise do percentual de cloretos em diferentes camadas do concreto.

Após a realização de diversos procedimentos em laboratório, determina-se o volume de solução de tiocianato de amônio (NH_4SCN) [0,05 M] necessário para a titulação da amostra. Esse volume é então utilizado para calcular o percentual do teor de cloretos no concreto em relação ao peso da amostra seca (%Cl).

O cálculo do teor de cloretos baseia-se em uma regressão não linear dos dados experimentais, utilizando a segunda lei de Fick, conforme expresso na Eq. (9). Esse procedimento permite uma análise quantitativa precisa da penetração de cloretos no concreto, contribuindo para a avaliação da sua durabilidade.

Figura 25: Extração do pó em camadas pré-definidas.



Fonte: Cascudo *et al.* (2022).

$$\%Cl_{con} = \frac{3,5453 V_{Ag} M_{Ag} (V_2 - V_1)}{m V_2} \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo:

$\%Cl_{con}$ – Percentual de cloreto no concreto;

V_{Ag} – Volume de AgNO_3 adicionado (cm^3);

M_{Ag} – Molaridade real da solução de AgNO_3 (0,05 M);

V_1 – Volume da solução de NH_4SCN (cm^3) usado no ensaio da amostra;

V_2 – Volume da solução de NH_4SCN (cm^3) usado no teste em branco;

m – Massa da amostra utilizada (1 g).

Ao considerar as diferentes técnicas apresentadas, observa-se que cada uma possui suas particularidades e que todas buscam estimar as concentrações de cloretos das amostras de concreto, para, em seguida, por meio da Eq. (4), estimar o coeficiente de difusão de cloretos.

Recentemente, Cascudo *et al.* (2022) avaliaram diferentes métodos para determinar o transporte de cloretos no concreto e realizaram uma análise crítica e comparativa. A partir dessa análise, foi possível identificar as principais características de cada método, suas vantagens e limitações, bem como sua aplicabilidade em diferentes contextos.

O método RCPT ASTM C1202 (ASTM, 2022), embora seja de rápida execução e apresente boa sensibilidade para comparações entre diferentes concretos, apresenta limitações quanto à descrição detalhada do transporte de cloretos, sendo mais adequado para análises comparativas, mas com menor capacidade de modelagem precisa.

De acordo com a avaliação realizada por Cascudo *et al.* (2022), os testes nórdicos (NT Build 443, NORDTEST, 1995 e NT Build 492, NORDTEST, 1999) são métodos baseados na difusão e na migração de cloretos em estado não estacionário, enquanto o teste LMDC caracteriza-se como um ensaio de migração no regime estacionário. Esses métodos são fundamentais para a análise do transporte de cloretos no concreto e, ao fornecerem coeficientes específicos, podem ser aplicados em modelos preditivos para estimar a vida útil de estruturas de concreto, especialmente as sujeitas à corrosão das armaduras induzida por cloretos. Entretanto, é importante destacar que, ao utilizar esses coeficientes em modelos preditivos, devem-se considerar as hipóteses e limitações de cada ensaio, de modo a garantir a precisão dos resultados e a adequação das previsões para diferentes condições de exposição e tipos de concreto.

Por outro lado, o teste LMDC (Truc *et al.*, 2000), que opera em regime estacionário, exige mais tempo de execução, mas fornece parâmetros de transporte mais próximos dos mecanismos reais de penetração de cloretos no concreto. Isso torna o LMDC particularmente útil para estimar a vida útil das estruturas, considerando as condições reais de exposição e os processos de corrosão das armaduras.

De modo geral, os resultados desse estudo comparativo contribuem para o amadurecimento técnico e científico necessário à normalização de ensaios no campo da durabilidade do concreto. Cada método tem sua aplicabilidade dependendo do contexto, e a escolha do mais adequado deve levar em conta o tempo disponível, a precisão desejada e o objetivo da análise. Assim, diante da maior facilidade de execução, de demandarem equipamentos com maior facilidade de aquisição para o departamento e, garantia de reprodutibilidade dos resultados oferecidas pelos métodos nórdicos (NT Build 443, NORDTEST,1995 e NT Build 492, NORDTEST,1999), neste estudo foi empregado o método de determinação do perfil de cloretos totais da NT Build 443 (NORDTEST, 1995), sendo utilizadas a Eq. (9) para determinação da concentração de cloretos e Eq. (6) na determinação do coeficiente de difusão.

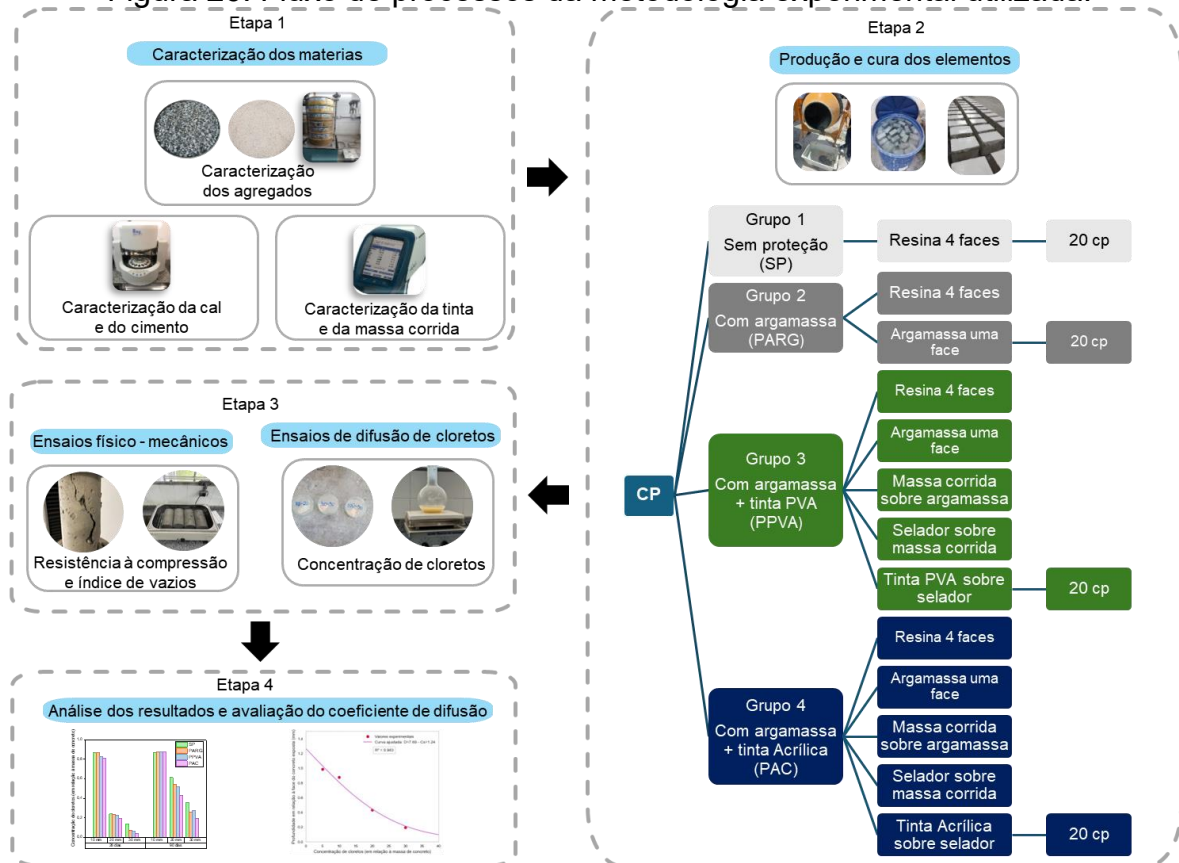
2.3. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os principais fundamentos teóricos relacionados à difusão de cloretos no concreto, abordando o princípio da difusão, a influência dos materiais constituintes do concreto, do meio ambiente e das proteções superficiais. A revisão bibliográfica permitiu verificar a escassez de estudos experimentais que avaliem a influência de múltiplos sistemas de proteção superficial em estruturas de concreto armado de edificações residenciais, compostas por argamassa, massa corrida e tinta. Entre os estudos existentes na literatura que avaliaram o efeito de sistemas de proteção superficial (compostos exclusivamente por camada de argamassa), pode-se inferir que a argamassa se apresenta como uma barreira física, aumentando a resistência à penetração de cloretos nos elementos de concreto, o que pode corroborar a durabilidade das estruturas de concreto armadas com barras metálicas.

3 METODOLOGIA

A Figura 26 apresenta, por meio de um fluxograma dividido em quatro etapas, os principais processos da campanha experimental adotada neste estudo, com o objetivo de avaliar o efeito do uso de sistemas de proteção superficial na durabilidade de estruturas de concreto expostas à ação de cloretos.

Figura 26: Fluxo de processos da metodologia experimental utilizada.



Fonte: Própria autoria.

Considerando a incipiência de trabalhos na literatura que avaliem a durabilidade de estruturas de concreto com proteção superficial, diante da ação de cloretos, foi conduzida uma campanha experimental na qual elementos de concreto com diferentes sistemas de proteção (grupos 1, 2, 3 e 4, conforme Figura 26) foram expostos a cloretos por um período de 90 dias (etapas 1, 2 e 3). Após a aferição dos resultados da campanha experimental, determinou-se a concentração de cloretos em diferentes profundidades e, por meio do ajuste de curvas, calculou-se o coeficiente de difusão para as diferentes condições de contorno investigadas (etapa 4). Na

sequência, apresentam-se os materiais e métodos utilizados na pesquisa, conforme indicado na Figura 26.

3.1. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Nesta seção, apresenta-se o desenvolvimento da campanha experimental para a caracterização dos materiais utilizados na produção do concreto e da argamassa, bem como dos sistemas de proteção múltipla, conforme estipulado na etapa 2 da Figura 26, com quatro grupos de elementos, considerando as condições de proteção superficial, com vinte corpos de prova cada. Transcorridos os devidos períodos de cura e de imersão em ambiente salino, foram realizados os ensaios de índice de vazios, resistência à compressão, módulo de elasticidade e concentração de cloretos. Por fim, foram determinados os coeficientes de difusão de cloretos para cada um dos grupos.

3.1.1. Caracterização dos materiais

Para o desenvolvimento dos concretos e argamassas de revestimento, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI, conforme determinado na NBR 16697 (ABNT, 2018), com resistência à compressão característica de 30 MPa. Segundo os procedimentos da NBR 16605 (ABNT, 2017) e da NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente, determinaram-se a massa específica ($3,15 \text{ g/cm}^3$) e a área superficial específica ($1,7 \text{ m}^2/\text{g}$) do aglomerante.

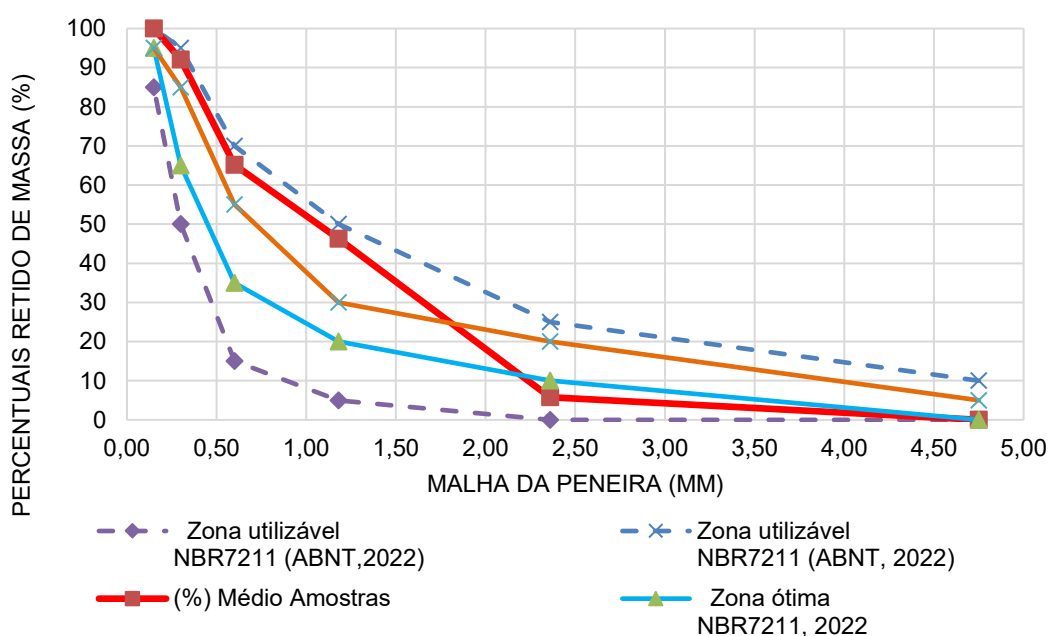
Para a produção de concreto, utilizou-se agregado graúdo derivado de gnaiss, classificado como brita 1, e areia quartzosa média. Para a produção das argamassas, utilizou-se a mesma areia. Estes materiais foram caracterizados por meio de ensaios de composição granulométrica, módulo de finura, massa unitária, massa específica e absorção de água.

Para a obtenção da composição granulométrica dos agregados, tanto miúdos quanto graúdos, foram seguidas as prescrições da NBR 17054 (ABNT, 2022). Para a caracterização dos agregados, foram avaliadas três amostras. As amostras foram secas em estufa durante 24 horas a uma temperatura constante de 105°C . Em cada grupo de agregados, com o auxílio de um agitador mecânico, foram realizadas a separação e classificação dos diferentes tamanhos de grão da amostra. Começando

pela peneira com a maior malha, cada conjunto (peneira + fundo avulso) foi agitado manualmente por 1 minuto, até que a massa de material passante fosse inferior a 1% da massa do material retido. O material retido foi removido com uma escova macia em uma bandeja e, em seguida, conferido e anotado seu peso. Esse procedimento foi repetido para todas as demais peneiras.

Após o ensaio de granulometria, o agregado miúdo foi classificado com dimensões de grãos entre 1,20 mm e 0,42 mm (Figura 27), conforme especificado pela NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 27: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autoria Própria.

Após ensaio de composição granulométrica, o agregado graúdo foi qualificado com distribuição granulométrica compreendida entre 9,5 mm e 19 mm (Figura 28), conforme especificado pela NBR 7211 (ABNT, 2022). A Tabela 2 sintetiza os resultados da caracterização dos agregados miúdos e graúdos.

Na produção da argamassa de proteção, além da areia média e do cimento Portland CP V, ARI também foi utilizada a cal CH-III. Tanto para produção do concreto quanto da argamassa foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento do município de Guaratinguetá (SP).

A análise da composição química do cimento CPV foi realizada no Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-

USP). Para a caracterização foram empregadas análises por fluorescência de raios X e análise semiquantitativa sem padrões, com a determinação de elementos químicos que variam de flúor a urânio. Os resultados obtidos da análise por fluorescência de raios X e da análise semiquantitativa sem padrões, com a determinação de elementos químicos que variam de flúor a urânio, estão apresentados na Tabela 3.

Figura 28: Curva granulométrica do agregado graúdo.

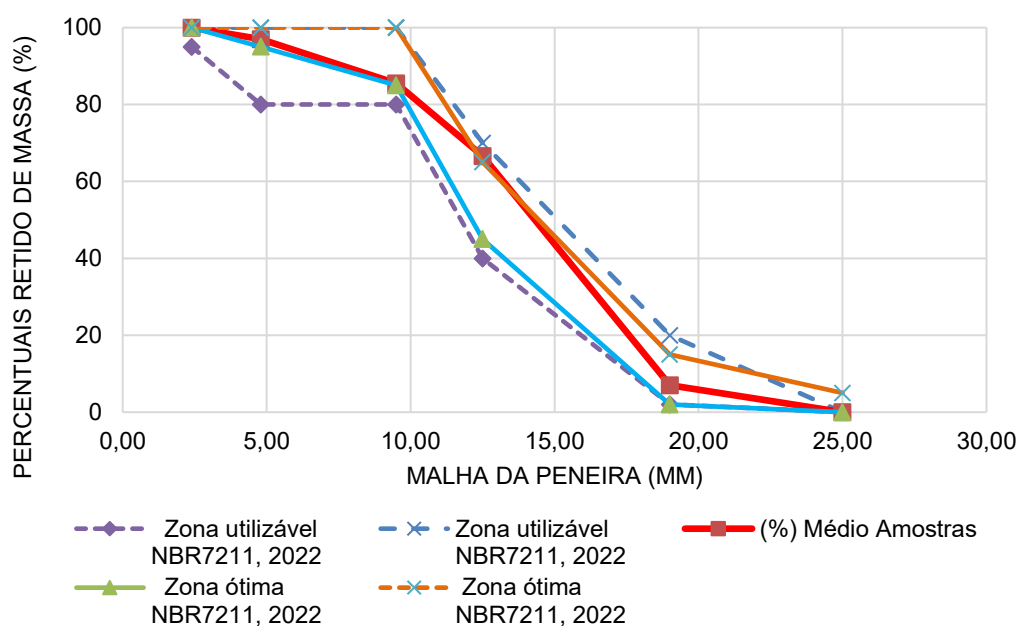


Tabela 2: Propriedades dos agregados.

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa unitária (kg/m³)	1515,10	1530,26
Massa específica (kg/m³)	2332,52	2857,14
Absorção (%)	0,31	2,86
Módulo de finura	2,65	4,52

Fonte: Autoria Própria.

Em algumas faces dos elementos de concreto foi realizada proteção com Sikadur Epóxi¹ (adesivo epóxi de média fluidez), que é um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade (fluido), bicomponente e aderência normal. Possui excelente adesão ao concreto e à argamassa, à prova d'água, alta resistência mecânica à tração e compressão e excelente resistência a óleos graxos, gasolina,

¹Os boletins técnicos podem ser acessados por meio dos endereços: <https://bra.sika.com/dam/dms/br01/i/sikadur-epoxi.pdf> (acessado em 19/02/2024).

solução salina, álcalis ácidos e diluídos, água residual e outros produtos químicos. Essa proteção foi utilizada a fim de garantir que não houvesse difusão de cloretos no material, nas superfícies, e que a concentração de cloretos não fosse aferida.

Tabela 3: Composição química do cimento.

Componente	Proporção obtida pelo ensaio (%)	Proporção média indicada pelo fabricante (%)
CaO	58,85	60,16
SiO ₂	21,74	20,36
SO ₃	5,95	5,20
Al ₂ O ₃	5,27	4,43
Fe ₂ O ₃	4,20	4,04
MgO	1,54	1,72
Na ₂ O	0,79	Sem informação
K ₂ O	0,59	Sem informação
SrO	0,40	Sem informação
P ₂ O ₅	0,29	Sem informação
TiO ₂	0,23	Sem informação
MnO	0,08	Sem informação
Br	0,08	Sem informação

Fonte: Autoria Própria.

Sobre as faces que receberam proteção com tinta Acrílica, aplicou-se: uma demão de Massa Corrida Acrílica² (nas faces com tinta acrílica), caracterizado como resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico e vinílicos modificados, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, fungicidas e bactericidas, glicóis e tensoativo; uma demão de selador acrílico³ composto por resina a base de dispersão aquosa de polímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo. Duas demãos de tinta acrílica⁴ de alta performance, com maior cobertura e durabilidade, para pinturas de áreas externas e internas. Sua fórmula é lavável e sem cheiro, composta por resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno-

²https://static.obrazul.com.br/media/product_technical_file/3362-boletim-tecnico-eucatex-massa-acrilica-premium_1.pdf (acessado em 19/02/2024).

³https://static.obrazul.com.br/media/product_technical_file/3356-boletim-tecnico-eucatex-selador-acrilico-premium.pdf (acessado em 19/02/24).

⁴<https://brasilcoating.com.br/upload/produtos/2523-boletim-tecnico-eucatex-protege-acrilico-premium.pdf> (acessado em 19/02/24).

acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativos, aditivos microbicidas.

Sobre as faces que receberam proteção com tinta PVA, aplicou-se: uma demão de Massa Corrida PVA⁵ (nas faces com tinta PVA), caracterizado como resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico e vinílicos modificados, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, fungicidas e bactericidas, glicóis e tensoativo; duas demãos de Tinta Látex PVA⁶ que possui em sua fórmula tecnologia inovadora com diluição de 80% de água possibilitando uma pintura de alto rendimento, ótima cobertura e durabilidade, composta de resina à base de dispersão aquosa de copolímero, estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo.

3.1.2. Produção dos elementos de concreto e suas proteções

Para o desenvolvimento do estudo experimental, foram preparados e moldados sessenta corpos de prova prismáticos com dimensões de 8x10x20 cm, divididos em quatro cenários distintos de acordo com as condições de proteção superficial: (i) sem proteção, (ii) com proteção de argamassa, (iii) com proteção composta por argamassa + massa corrida + selador + tinta acrílica e (iv) com proteção composta por argamassa + massa corrida + selador + tinta PVA.

Foram produzidos sessenta elementos em vez de oitenta, considerando que as faces opostas às protegidas permaneceriam sem proteção, o que caracteriza a ausência de proteção superficial e reduz o desperdício de materiais. Para garantir essa configuração, aplicou-se resina epóxi nas quatro faces adjacentes às que receberam ou não o sistema de proteção, conforme ilustrado na Figura 29. Na Figura 30, ilustra-se um elemento com proteção superficial completa, composto por argamassa, selador acrílico e tinta acrílica.

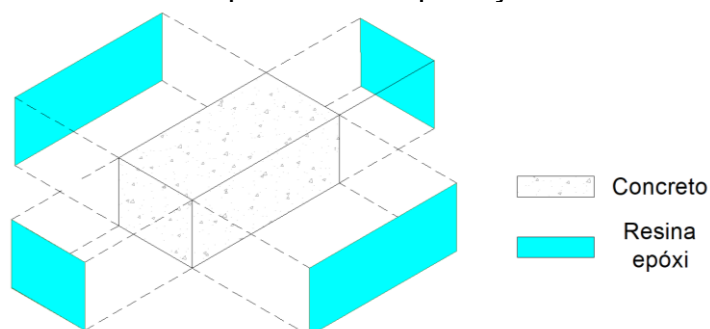
O sistema de proteção foi dividido em quatro grupos, cada um composto por vinte corpos de prova (cp), conforme apresentado na Tabela 4. Para facilitar a identificação dos cenários investigados, adotaram-se as seguintes denominações: SP

⁵<https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/static.eucatex.aatb.com.br/Uploads/Produtos/Downloads/9916-boletim-tecnico-eucatex-massa-corrida-pva.pdf> (acessado em 19/02/2024).

⁶<https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/static.eucatex.aatb.com.br/Uploads/Produtos/Downloads/9889-boletim-tecnico-eucatex-acrilico-rendimento-extra.pdf> (acessado em 19/02/2024).

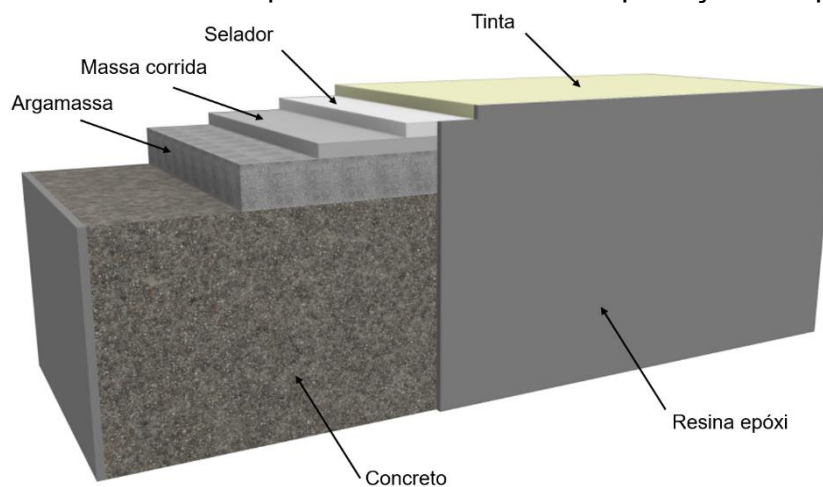
para a condição sem proteção, PARG para a proteção exclusivamente com argamassa, PPVA para o sistema de proteção completa com tinta PVA e PAC para o sistema de proteção completa com tinta acrílica.

Figura 29: Modelo esquemático de proteção com resina epóxi.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 30: Modelo esquemático do sistema de proteção completo.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4: Grupos de sistema de proteção.

Grupo	Sigla	Descrição
1	SP	Sistema sem proteção
2	PARG	Sistema com proteção por argamassa (2 cm)
3	PPVA	Sistema com proteção por argamassa (2 cm), selador, massa corrida e tinta PVA (duas demãos)
4	PAC	Sistema com proteção por argamassa (2 cm), selador, massa corrida e tinta acrílica (duas demãos)

Fonte: Autoria Própria.

A concretagem dos corpos de prova foi realizada em duas etapas, com um intervalo de 24 horas, devido à limitação de formas. A cada dia de concretagem, foram produzidos 30 elementos prismáticos e 12 cilíndricos. Para todas as concretagens, utilizou-se um traço padrão com resistência à compressão de 30 MPa, conforme apresentado na Tabela 5. O proporcionamento do concreto foi definido conforme o apresentado por Félix (2022).

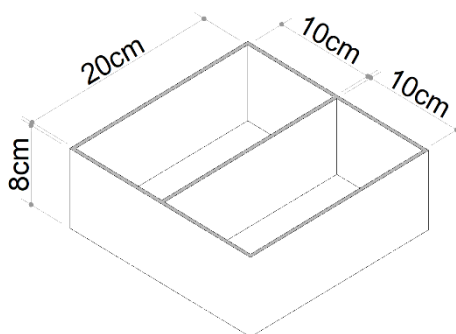
Tabela 5: Traço de concreto em massa para 1 m³ de material.

Resistência média aos 28 dias (MPa)	Cimento CP-V (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Relação a/c
30	354,0	800,4	1023,7	246,7	0	0,5

Fonte: Felix (2022).

Para a produção dos elementos prismáticos, utilizaram-se formas plásticas com dimensões de 10 x 8 x 20 cm (Figura 31). Para os ensaios de caracterização mecânica, utilizaram-se moldes cilíndricos metálicos. As formas cilíndricas têm diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm.

Figura 31: Dimensões das formas prismáticas.



Fonte: Autoria Própria.

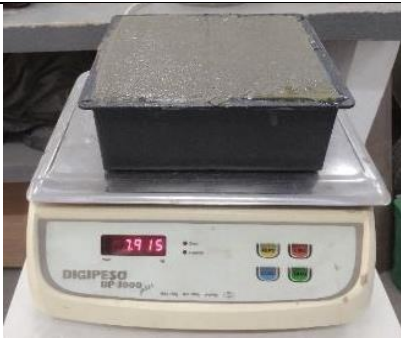
Em cada concretagem, o concreto produzido foi vertido nas formas prismáticas e cilíndricas devidamente vibrado e adensado com vibrador de imersão, onde permaneceu em local apropriado no Laboratório de Materiais e Estruturas da UNESP/FEG.

Após as concretagens, duas amostras foram pesadas para determinar a massa unitária no estado fresco. Também foi realizada a pesagem das mesmas amostras após a desforma, com 24 horas de cura, para definir a massa unitária no

estado endurecido. O Quadro 6 apresenta os pesos (de dois elementos + recipiente) obtidos nos estados fresco e endurecido. O peso da forma prismática é de 495 gramas. Diante disso, no estado fresco, o peso específico do concreto foi de 2.318,75 kg/m³, enquanto, para o estado endurecido, o peso específico foi de 2.299,68 kg/m³.

Em atendimento à NBR 5738 (ABNT, 2016), todos os elementos de concreto foram armazenados por 24 horas em local protegido de intempéries, sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa perturbar o concreto, para, depois, passar ao processo de cura por imersão em água até atingirem 28 dias.

Quadro 6: Pesos nos estados fresco e endurecido.

(a) Estado fresco.	(b) Estado endurecido.
	
Peso de dois elementos + recipiente no estado fresco = 7,915 kg	Peso de dois elementos + recipiente no estado endurecido = 7,845 kg

Fonte: Autoria Própria.

Passado o período para cura, 28 dias, os corpos de prova foram retirados do tanque de imersão para condução dos ensaios de caracterização físico-mecânica (elementos cilíndricos) e aplicação de proteção superficial nos elementos prismáticos.

A primeira etapa do sistema de proteção foi a produção e aplicação da argamassa de revestimento em elementos prismáticos. Para tal produção, considerou-se um traço dosado e testado por Pedry (2020), com as proporções em massa apresentadas na Tabela 6.

Toda a areia, o cimento e a água utilizados foram os mesmos já especificados na produção do concreto. Os materiais foram misturados com auxílio de uma betoneira, Figura 32, e em seguida colocados sobre as faces de concreto a serem protegidas.

Tabela 6: Traço da argamassa de revestimento.

Cimento CP-V (kg/m³)	Agregado miúdo (kg/m³)	Cal CH-III (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Relação a/c
140,92	1477,3	93,3	349,6	0	2,5

Fonte: Pedry (2020).

Figura 32: Produção da argamassa em betoneira.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 33: Metodologia adotada para a proteção superficial com argamassa de revestimento.

(a) Forma da proteção.



(b) Moldagem da aplicada.



(c) Desforma da proteção.



(d) Vista lateral da proteção.



(e) Vista superior dos elementos.



(f) Camada de proteção (2 cm).



Fonte: Autoria Própria.

Tomando o cuidado para garantir a uniformidade na espessura da camada de proteção com argamassa, definida neste trabalho em 2 cm, para representar um valor médio próximo do utilizado em prática na construção civil, foi elaborado um método com auxílio de sarrafos de madeira e ganchos de vergalhão devidamente presos em grupos com vinte elementos prismáticos, conforme a Figura 33.

Para finalização das proteções, nas condições com tinta, foram aplicadas, com rolo de lã, uma camada de massa corrida, uma camada de selador e duas camadas de tinta. Nas faces em que não seria avaliada a concentração de cloretos, realizou-se a proteção com uma camada de resina epóxi, com auxílio de uma espátula metálica. A Figura 34 apresenta os elementos com as devidas proteções antes de serem imersos na solução saturada.

Figura 34: Aplicação dos sistemas de proteção superficial.

(a) Face com selador.

(b) Face com tinta.

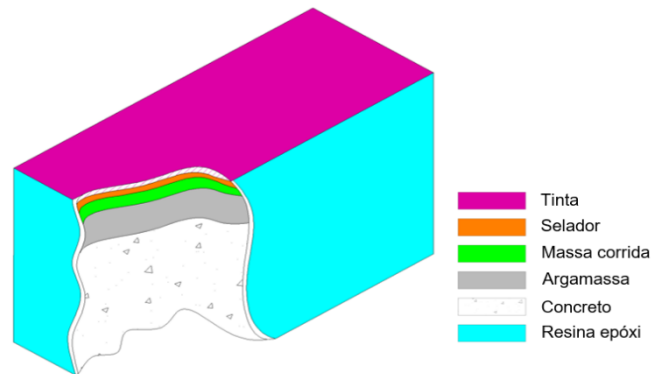
(c) Face com resina.



Fonte: Autoria Própria.

A partir dos elementos com e sem proteção (Figura 35), a etapa seguinte da campanha experimental consiste na exposição dos elementos aos cloretos. A exposição foi feita por meio da imersão dos elementos em um tanque saturado com solução salina (NaCl) com 3% de saturação, ficando imersos até as datas previstas para a extração das amostras pulverizadas e ensaios de titulação para definição das concentrações de cloretos. Os ensaios de titulação foram realizados aos 28 e 90 dias.

Figura 35: Representação 3D do elemento com proteção completa.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.3. Resumo da campanha experimental

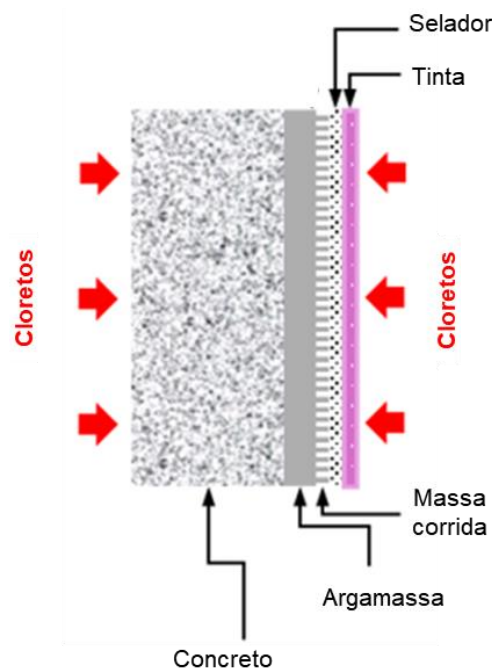
Todos os elementos produzidos obedeceram a uma sequência de processos, passando pela aplicação das proteções, exposição a cloretos, extração das amostras pulverizadas e realização dos ensaios de titulação, conforme a Figura 36. A Figura 37 ilustra, em corte, a condição de exposição aos cloretos.

Figura 36: Atividades experimentais – fev/24 a ago/24.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 37: Vista transversal de um elemento com proteção completa imerso em solução salina.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.4. Ensaio de índice de vazios (IV)

A NBR 9778:2005 (ABNT, 2005) define o índice de vazios como a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, e estabelece as diretrizes para a determinação deste parâmetro. Segundo a norma, os passos para execução do ensaio são:

- I. Coloca-se a amostra em estufa por 72 horas, a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Registra-se então, a massa da amostra (M_s);
- II. A amostra é imersa em água, a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e deve permanecer assim por 72 horas;
- III. Posteriormente à saturação, a amostra deve ser colocada em um recipiente cheio de água, sendo progressivamente levada à ebulição, que deve começar depois de 15 minutos, mas antes de 30 minutos. Esse processo precisa se manter durante 5 horas, com volume constante de água. A água precisa esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. É determinada então, a massa hidrostática (M_i);

- IV. Retira-se a amostra da água e deve enxugá-la com pano úmido. A massa saturada (M_{sat}) é determinada e registrada. O índice de vazios é calculado, em porcentagem, segundo a Eq. (10).

$$IV = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} 100 \quad \text{Eq. (10)}$$

Seguindo as instruções da NBR 9778 (ABNT, 2005), foi realizada a coleta dos dados em quatro amostras, considerando a definição de cada um dos parâmetros da Eq. (10), conforme a Figura 38.

Figura 38: Ensaio para determinação do índice de vazios.

(a) Determinação da M_{sat} .



(b) M_i .



(c) Modelo de pesagem.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.5. Ensaio de resistência à compressão (CS)

A NBR 5739 (ABNT, 2018) define os procedimentos a serem adotados para determinação da resistência à compressão do concreto. Este deve ser moldado em corpos de prova de dimensão definida, em que a altura é o dobro do diâmetro (neste trabalho foi usado elementos cilíndricos de 10x20 cm), adensado e, mantido por 24 horas em local protegido do sol, respingos de água e vibrações ou contatos.

Após o período de cura de 28 dias, as bases do corpo de prova devem ser preparadas para garantir a planicidade e a perpendicularidade em relação ao eixo longitudinal do corpo de prova. Neste trabalho, considerou-se o uso de Neoprene, devido à incipiente disponibilidade de equipamento no laboratório para a retificação das amostras.

O carregamento de ensaio foi aplicado continuamente e sem choques, a uma velocidade de 0,5 MPa/s, e cessado na ocorrência da ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão da amostra é definida pela Eq. (11), expressa em N/m², com base na força de ruptura P (em N) e na área de contato A (em m²).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad \text{Eq. (11)}$$

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos no laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Salesiano de Lorena, utilizando uma máquina de ensaios Kratos, modelo EC, de acionamento servohidráulico, totalmente comandado por software, com capacidade de carga de 1000 kN (Figura 39).

Figura 39: (a) Máquina utilizada nos ensaios e (b) corpo de prova após ruptura por compressão.

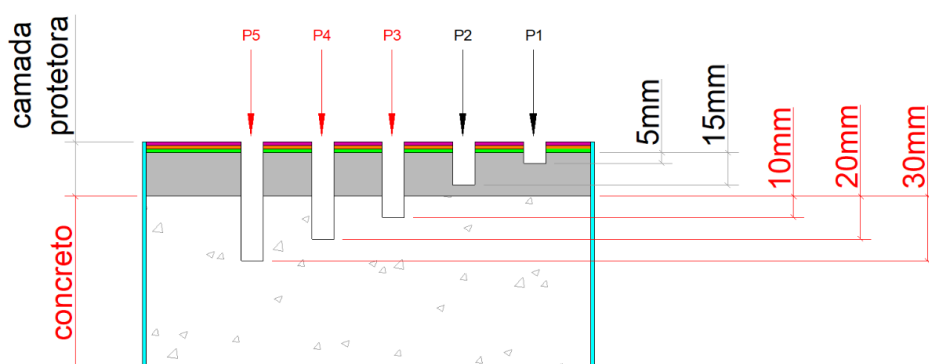


Fonte: Falcão e Santos (2024).

3.1.6. Ensaio de concentração de íons cloreto (%C/)

Após o período de cura e a aplicação dos sistemas de proteção, os corpos de prova foram transferidos para um tanque contendo uma solução de NaCl a 3%, onde permaneceram imersos por 90 dias, sendo metade das amostras coletada aos 28 dias e a outra metade aos 90 dias. Para a realização do ensaio de concentração de cloretos, foram coletadas amostras pulverizadas de quatro elementos, com a mesma condição de contorno, extraíndo-se 1 grama de cada elemento, totalizando 4 gramas, que foram homogeneizadas para considerar a heterogeneidade do concreto e a variabilidade das amostras nas titulações. A fim de obter o volume mínimo necessário para a execução do ensaio, foi preciso realizar múltiplos furos em cada faixa de profundidade, utilizando uma furadeira de bancada e uma broca de Widea de 10 mm de diâmetro, seguindo os seguintes critérios: nas camadas de argamassa, os furos foram perfurados até atingirem profundidades de 5 mm e 15 mm, enquanto no concreto, os furos alcançaram profundidades de 10 mm, 20 mm e 30 mm, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40: Perfil de furação das amostras.



Fonte: Autoria Própria.

Para cada um dos cenários considerados, a extração das amostras pulverizadas obedeceu aos mesmos critérios: furação com auxílio de furadeira até a profundidade prevista, coleta do material com auxílio de pincel macio limpo, conferência da profundidade com paquímetro e armazenamento em recipientes apropriados para evitar contaminações externas, conforme Figura 41.

O ensaio de concentração de cloretos em massa nos concretos de pega normal foi conduzido de acordo com um procedimento rigoroso. Cada amostra permaneceu em estufa por 24 horas a uma temperatura entre 102 e 105 °C e, após esse período, foi separado 1 grama de cada amostra para a realização do ensaio, conforme ilustrado nas Figuras 46(h) e 46(i). Para a correta execução do ensaio, foram utilizados os seguintes reagentes (Figura 42): solução de ácido nítrico (HNO_3) 1:2, solução de ácido nítrico (HNO_3) 1:100, solução de nitrato de prata (AgNO_3) 0,05M, peróxido de hidrogênio 30% (H_2O_2), solução de tiocianato de amônio (NH_4SCN) 0,05M, solução indicadora de sulfato férrico amoniacal [$(\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$] e água deionizada. Além dos reagentes, foram necessários equipamentos e utensílios de laboratório (Figura 43), incluindo uma balança com precisão de 0,0001 g, balão de fundo chato, agitador magnético com aquecimento, pipetas de 0,05 ml, 0,25 ml e 10,0 ml, bomba de vácuo com sistema de filtração a vácuo, bureta e suporte universal.

Figura 41: Etapas de coleta das amostras pulverizadas.

(a) Furadeira de bancada.



(b) Conjunto para furação.



(c) Furos nas faces.



(d) Conferência da profundidade de 10 mm.



(e) Conferência da profundidade de 20 mm.



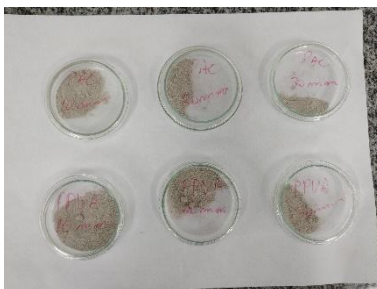
(f) Conferência da profundidade de 30 mm.



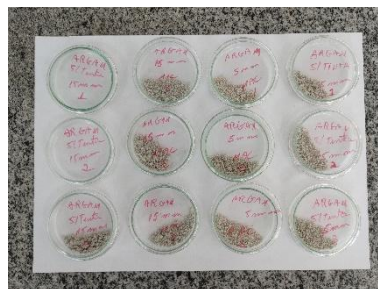
(g) Armazenamento das amostras.



(h) Amostras de concreto para ensaio de íons cloreto.



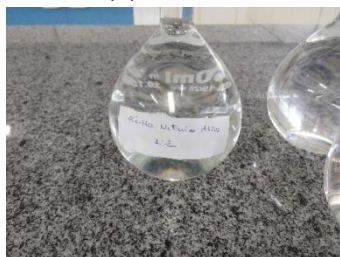
(i) Amostras de argamassa para ensaio de íons cloreto.



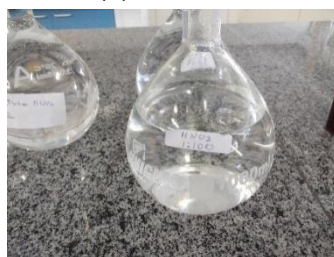
Fonte: Autoria Própria.

Figura 42: Reagentes utilizados no ensaio de concentração.

(a) HNO_3 - 1:2.



(b) HNO_3 1:100.



(c) AgNO_3 0,05M.



(d) H_2O_2 (30%)



(e) NH_4SCN 0,05M.



(f) $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$



Fonte: Autoria Própria.

Figura 43: Equipamentos e utensílios utilizados no ensaio de concentração.

(a) Balão fundo chato e agitador magnético com aquecimento.



(b) Pipetas.



(c) Bomba de vácuo com sistema de filtração a vácuo.



(d) Bureta e suporte universal.



Fonte: Autoria Própria.

A amostra foi colocada em um balão de fundo chato e, com o auxílio de uma pipeta, foram adicionados 50 ml de solução de ácido nítrico 1:2. Em seguida, a mistura foi levada ao agitador magnético com aquecimento até atingir efervescência, permanecendo nesse estado por 1 minuto após a fervura, conforme ilustrado na Figura 44. Concluída essa etapa, foram adicionados 3 ml de peróxido de hidrogênio a 30% e 5 ml de solução de nitrato de prata. Após um curto período de suspensão dos reagentes, a amostra foi novamente submetida ao agitador magnético, com aquecimento até a fervura, onde permaneceu por mais 1 minuto.

Figura 44: Etapas iniciais do ensaio de concentração.

(a) Amostra com 50ml HNO_3 .

(b) Amostra no agitador magnético.



Fonte: Autoria Própria.

Com o auxílio de uma bomba de vácuo com sistema de filtração a vácuo, a amostra foi filtrada utilizando um filtro de papel previamente lavado com solução de ácido nítrico 1:100. Em seguida, o recipiente utilizado para a filtragem, conforme ilustrado na Figura 45, foi lavado com 150 ml de solução de ácido nítrico 1:100 e seu conteúdo transferido de volta para o balão de fundo chato, sendo então agitado manualmente para garantir a homogeneidade da solução e permitir que atingisse a temperatura ambiente.

Figura 45: Etapas iniciais do ensaio de concentração.

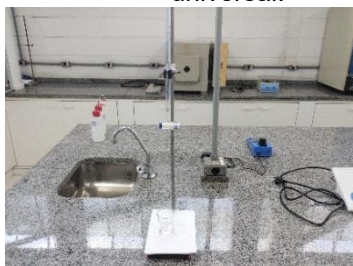


Fonte: Autoria Própria.

Em seguida, foram adicionadas 20 gotas de solução indicadora de sulfato férrico amoniacal, e a mistura foi agitada vigorosamente e titulada com solução de tiocianato de amônio, utilizando uma bureta e um suporte universal, conforme ilustrado na Figura 46. A titulação foi interrompida quando uma gota da solução de tiocianato de amônio produziu uma leve coloração castanho-avermelhada que não desapareceu com a agitação, registrando-se, nesse instante, o volume consumido (V_1) da solução de tiocianato de amônio.

Figura 46: Titulação das amostras.

(a) Bureta e suporte universal.



(b) Amostra antes da titulação.



(c) Amostra depois da titulação.



Fonte: Autoria Própria.

Foi realizado o teste branco utilizando o mesmo procedimento e os mesmos reagentes, porém sem a amostra de concreto, registrando-se o volume de solução de tiocianato de amônio consumido (V_2). A partir da quantidade de solução de tiocianato de amônio utilizada, a porcentagem de cloretos em massa foi calculada pela Eq. (12), proporcionando uma medida precisa da concentração de cloretos nos modelos testados. Esse procedimento assegura resultados confiáveis e precisos na determinação da concentração de cloretos, o que é essencial para avaliar a resistência à penetração de íons cloreto e a durabilidade das estruturas de concreto.

$$\%Cl_{con} = \frac{3,5453 V_{Ag} M_{Ag} (V_2 - V_1)}{m V_2} \quad \text{Eq. (12)}$$

Sendo:

$\%Cl_{con}$ – Percentual de cloreto no concreto;

V_{Ag} – Volume de $AgNO_3$ adicionado (cm^3);

M_{Ag} – Molaridade real da solução de $AgNO_3$ (0,05M);

V_1 – Volume da solução de NH_4SCN (cm^3) usado no ensaio da amostra;

V_2 – Volume da solução de NH_4SCN (cm^3) usado no teste em branco;

m – Massa da amostra utilizada (1 g).

3.1.7. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos (*DCL*)

Com base na Eq. (12), determinou-se quantitativamente o teor de cloretos em relação à massa de concreto, em cada profundidade, para cada amostra analisada. Esses valores permitiram traçar o perfil de cloretos de cada corpo de prova, ou seja, um gráfico que relaciona a concentração de íons cloreto à profundidade de penetração. Esse perfil é essencial para analisar o processo de contaminação por íons cloreto em amostras de concreto.

Utilizando o Python para a construção do perfil de cloretos, aplicou-se o Método dos Mínimos Quadrados na solução da Segunda Lei de Fick (Eq. (13)), ajustando-se o gráfico do perfil para determinar a concentração superficial de cloretos nas amostras. Com a equação ajustada, a concentração de cloretos na superfície (profundidade zero) pôde ser calculada, possibilitando a determinação desse valor e do coeficiente de difusão de cloretos. O código desenvolvido e implementado está disponível no Apêndice 1 e pode ser utilizado para a calibração da curva e a determinação dos parâmetros em outros estudos. A Figura 47 apresenta um exemplo

de calibração para determinação do coeficiente de difusão (D) da amostra de concreto sem proteção superficial. Observa-se que o código implementado já apresenta a curva ajustada aos pontos e os valores obtidos de D e C_{Seq} .

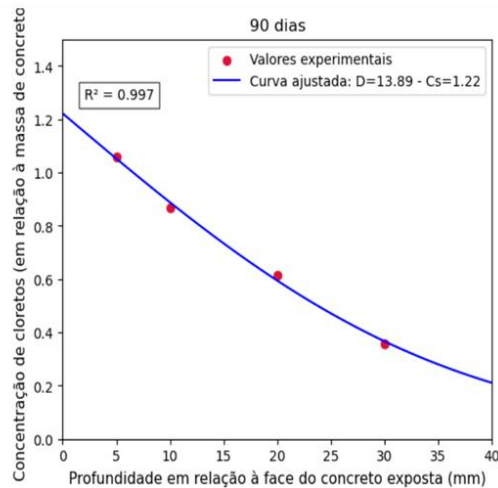
Figura 47: Calibração dos parâmetros da Eq. (12) e definição do coeficiente de difusão de cloretos.

```
# Plotando os dados experimentais e a curva ajustada
plt.scatter(X, y_experimental, color='crimson', label='Valores experimentais') # Pontos conhecidos
plt.plot(X_fit, y_fit, color='blue', label=f'Curva ajustada: D={b1_opt:.2f} - Cs={a1_opt:.2f}') # Curva ajustada

# Configurações do gráfico
plt.xlabel('Profundidade em relação à face do concreto exposta (mm)', fontsize=11)
plt.ylabel('Concentração de cloretos (em relação à massa de concreto)', fontsize=11)
plt.legend(fontsize=10)
plt.xlim(0, 40)
plt.ylim(0, 1.5)
plt.title('90 dias', fontsize=12)
plt.grid(False)

# ♦ Adicionando o valor de R² no gráfico
plt.text(0.05, 0.85, f'R² = {R2:.3f}', fontsize=10, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.7),
        transform=plt.gca().transAxes) # Posição relativa no gráfico

# Exibindo o gráfico
plt.show()
```



Fonte: Autoria Própria.

$$\frac{C_{CL} - C_0}{C_{Seq} - C_0} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{Dt}} \quad \text{Eq. (13)}$$

Na Eq. (13), C_{CL} representa o teor de cloretos na posição x' ; C_0 é o teor inicial de cloretos na mesma posição x' ; C_{Seq} refere-se ao teor de cloretos no pico, ou seja, na superfície do concreto. A variável x' corresponde à distância entre o pico e a posição do teor C_{CL} , considerando ($x' = 0$) no pico. O termo D é o coeficiente de difusão de cloretos no concreto (definido neste trabalho como DCL), que mede a facilidade com que os íons cloreto se difundem no material. Já t representa o tempo, em que $t=0$ marca o início do ataque de cloretos ao concreto. A função $\operatorname{erfc}(Z)$ é definida como 1-

$erf(Z)$, sendo $erf(z)$ a função complementar de erro de Gauss, utilizada em equações que descrevem a difusão de cloretos no concreto.

3.2. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os processos de caracterização dos materiais, os proporcionamentos do concreto e da argamassa, o processo de produção dos elementos de concreto e dos sistemas de proteção superficial (SP, PARG, PPVA e PAC), a caracterização do índice de vazios, da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, da concentração de íons de cloreto e, o procedimento empregado na determinação do coeficiente de difusão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados da campanha experimental, identificando o nível de influência das diferentes condições de proteção superficial sobre a durabilidade do concreto, por meio da mensuração do coeficiente de difusão de cloretos.

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Seguindo as instruções da NBR 9778 (ABNT, 2005), foram coletadas quatro amostras para a definição do índice de vazios (I_v) em %. Os resultados das leituras de cada um dos parâmetros necessários ao cálculo do I_v são apresentados na Tabela 7, assim como os valores médios e os desvios-padrão do concreto e da argamassa. Foi possível observar que a argamassa apresenta porosidade muito superior à do concreto (163% maior), o que provavelmente conferirá menor resistência ao ataque de cloretos, resultando em maiores concentrações de cloretos em relação à massa do material.

Tabela 7: Índice de vazios.

Amostra	Concreto				Argamassa			
	m_{sat} (kg)	m_i (kg)	m_s (kg)	I_v (%)	m_{sat} (kg)	m_i (kg)	m_s (kg)	I_v (%)
1	3,545	2,615	3,410	14,516	3,219	2,221	2,804	41,583
2	3,555	2,610	3,415	14,815	3,231	2,212	2,815	40,824
3	3,550	2,615	3,380	18,182	3,226	2,225	2,811	41,458
4	3,585	2,630	3,440	15,183	3,235	2,231	2,819	41,434
Média	3,558	2,617	3,411	15,674	3,227	2,222	2,812	41,325
Desvio Padrão	0,017	0,006	0,024	1,694	0,016	0,017	0,016	0,340

Fonte: Autoria Própria.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, na Tabela 8 são apresentados os valores da resistência à compressão da argamassa e do concreto utilizados na produção dos elementos.

A fim de visualizar a espessura da camada física de proteção gerada pelo sistema composto por massa corrida, selador e tinta, realizou-se uma análise microscópica. Na Figura 48, são apresentadas as regiões da interface entre a argamassa, a massa corrida, o selador e a tinta. Na Figura 48 (a) é possível ver que

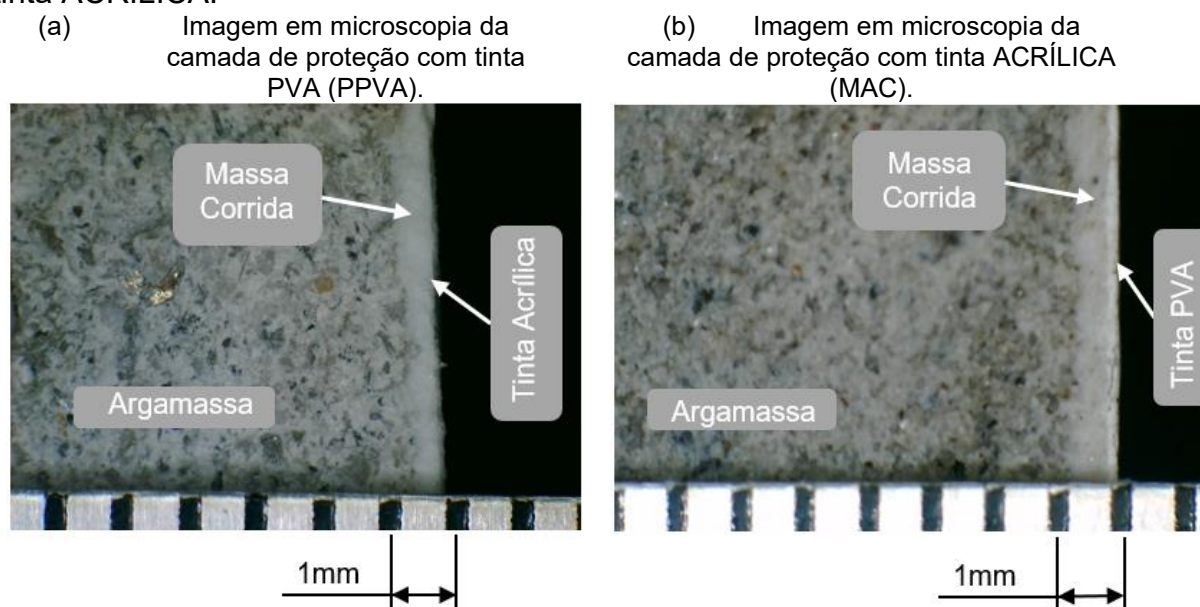
a camada do sistema completo com tinta PVA é de quase 1 mm, enquanto que, para a tinta acrílica é de 0,7 mm (Figura 48 (b)). Também se pode inferir que não é possível definir uma espessura para a tinta acrílica, ao se observar a tinta PVA com espessura de aproximadamente 0,1 mm. Comenta-se que, em ambos os sistemas, foram aplicadas duas camadas de tinta.

Tabela 8: Resistências à compressão dos materiais.

Amostra	f_{ck} concreto (MPa)	f_{ck} argamassa (MPa)
1	32,34	4,41
2	30,30	4,18
3	30,05	4,22
4	34,63	3,92
Média	31,83	4,18
Desvio Padrão	2,12	0,20

Fonte: Autoria Própria.

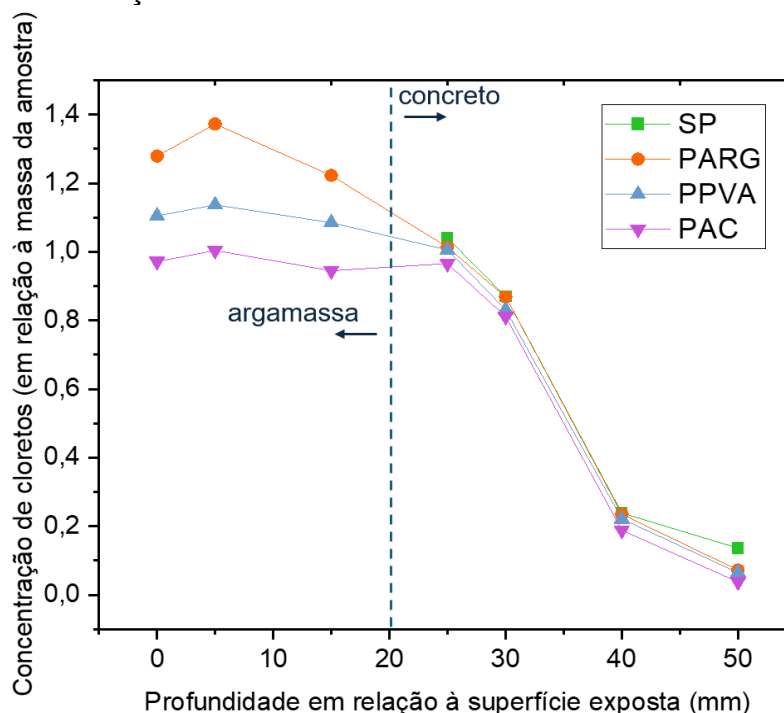
Figura 48: Imagem ampliada das camadas de proteção com argamassa, tinta PVA e tinta ACRÍLICA.



Fonte: Autoria Própria.

Nas análises da concentração de cloretos, para as amostras submetidas a 28 dias de exposição à solução com 3% de NaCl, os resultados foram apresentados na Figura 49, que ilustra a concentração de cloretos ao longo da profundidade, em relação à superfície diretamente em contato com a solução, tanto dos concretos com quanto dos sem proteção superficial.

Figura 49: Concentração de cloretos aos 28 dias de imersão na solução de NaCl.



Fonte: Própria autoria.

Diante dos resultados dispostos na Figura 49, observa-se que, na camada de argamassa, a concentração de cloretos é significativamente maior do que no concreto, indicando que a barreira inicial tem um papel importante na retenção desses íons antes que eles se difundam para camadas mais profundas, o que poderia ser configurado por uma argamassa de menor porosidade, o que foi avaliado por Malheiro *et al.* (2014), em que os resultados mostraram que as argamassas de revestimento influenciam no transporte de cloretos no concreto, sendo que as argamassas menos porosas e mais ricas em cimento proporcionaram menores concentrações de cloretos no concreto.

No caso do concreto sem proteção (SP), a concentração de cloretos na superfície atinge aproximadamente 1,2% em relação à massa do material, o maior valor entre todas as condições analisadas. À medida que a profundidade aumenta, a concentração diminui gradualmente, mas ainda apresenta valores elevados na interface com o concreto, como 1,10% a 5 mm de profundidade.

Para o sistema protegido com argamassa (PARG), a concentração de cloretos na superfície é reduzida para cerca de 1,17%, o que indica que a camada de argamassa contribui para mitigar a entrada de cloretos, embora sua eficácia seja limitada. Aos 5 mm de profundidade, a concentração já está em torno de 1,05%, valor

ligeiramente inferior ao observado no SP. Comparando com os sistemas de proteção mais avançados, observa-se que a proteção com tinta PVA (PPVA) reduz ainda mais a penetração de cloretos, apresentando uma concentração superficial de aproximadamente 1,10%, e, na interface com o concreto, esse valor cai para 0,98%.

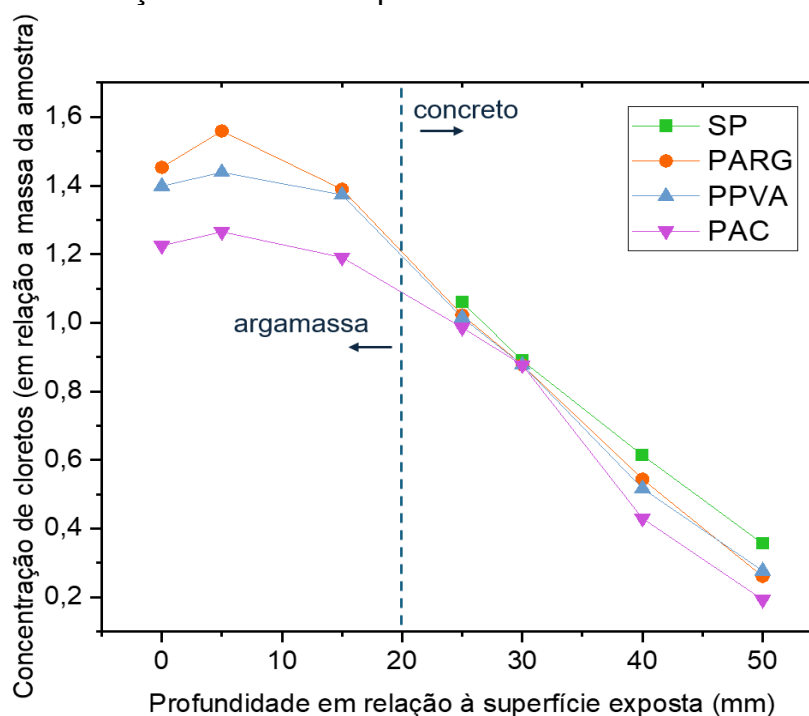
O melhor desempenho é observado no sistema com tinta acrílica (PAC), cuja concentração de cloretos na superfície é a menor entre todas as condições testadas, situando-se em torno de 0,97%. Esse valor representa uma redução de mais de 20% em relação ao concreto sem proteção. Além disso, a difusão dos cloretos para camadas mais profundas também é minimizada, uma vez que a concentração medida a 5 mm de profundidade já se encontra próxima de 0,95%, indicando que a tinta acrílica atua como uma barreira física à entrada de íons agressivos.

A análise das curvas revela que todas as proteções superficiais reduzem a penetração de cloretos, mas com níveis de eficiência distintos. O concreto sem proteção é o mais suscetível, apresentando altas concentrações de cloretos ao longo de toda a profundidade. A proteção com argamassa melhora o desempenho, mas ainda permite uma penetração significativa de cloretos. Já os sistemas PPVA e PAC apresentam desempenho superior, sendo que a tinta acrílica é a mais eficaz na redução da entrada de cloretos. Esses resultados evidenciam que a escolha de um sistema de proteção adequado pode influenciar diretamente a durabilidade das estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos, reduzindo significativamente os riscos de corrosão das armaduras e aumentando a vida útil da estrutura.

A Figura 50 apresenta a variação da concentração de cloretos em função da profundidade para concretos submetidos a diferentes sistemas de proteção superficial, após 90 dias de exposição à solução de 3% de NaCl. A tendência observada após 28 dias de exposição se mantém, indicando que a concentração de cloretos é mais elevada na camada de argamassa e diminui progressivamente à medida que os íons penetram no concreto. O concreto sem proteção (SP) apresenta a maior concentração superficial.

A proteção com argamassa (PARG) reduz parcialmente a concentração de cloretos. No entanto, sua capacidade de proteção não é tão eficiente, uma vez que a concentração ainda é elevada na interface com o concreto, atingindo 1,1% a 5 mm de profundidade. Em contrapartida, os sistemas de proteção com tinta apresentam desempenho superior na mitigação da penetração de cloretos.

Figura 50: Concentração de cloretos após 90 dias de imersão na solução de NaCl.



Fonte: Própria autoria.

O sistema de proteção mais eficiente continua sendo o PAC (proteção completa com tinta acrílica), que apresenta a menor concentração superficial, com redução de 7,5% em relação ao concreto sem proteção. Além disso, a penetração dos cloretos em camadas mais profundas é significativamente reduzida com o PAC, com valores próximos de 0,19% na profundidade de 50 mm, em comparação com 0,38% no concreto sem proteção, o que representa uma redução de 50%, evidenciando a efetividade da tinta acrílica como barreira à entrada de cloretos.

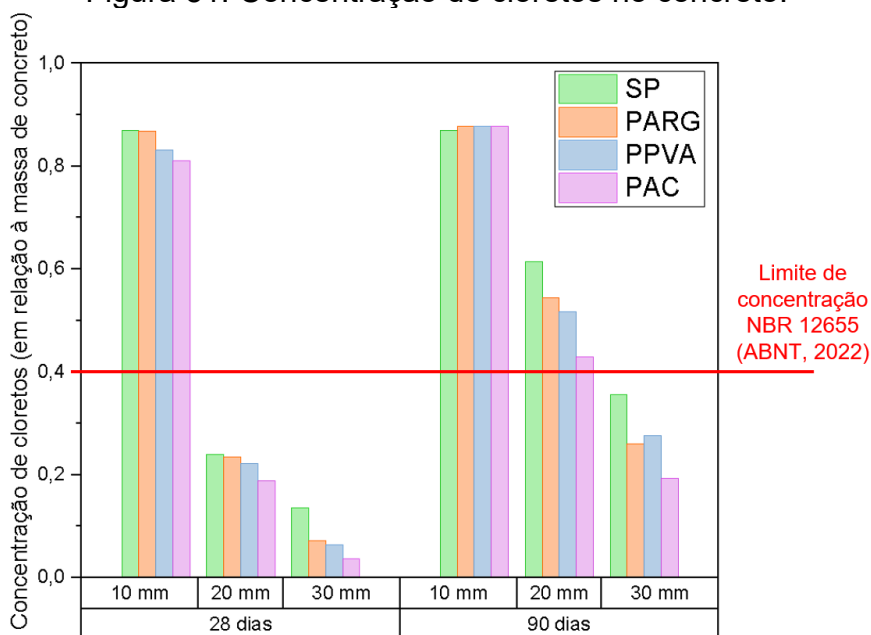
A análise comparativa entre os sistemas de proteção confirma que todos contribuem para reduzir a penetração de cloretos nas camadas mais profundas, mas com níveis de eficácia distintos.

Comparando os valores obtidos nos dois gráficos, que representam a concentração de cloretos nos concretos protegidos e não protegidos após 28 e 90 dias de exposição, observa-se um aumento significativo na penetração de íons cloreto ao longo do tempo. No primeiro gráfico, referente a 28 dias de exposição, a concentração máxima de cloretos no concreto sem proteção (SP) atingiu aproximadamente 0,19% na camada mais profunda. Já na Figura 50, referente a 90 dias de exposição, esse valor aumentou para cerca de 0,38%.

Nos sistemas com proteção, também foram observados aumentos significativos ao longo do tempo. O sistema de proteção com argamassa (PARG) apresentou uma variação de 47% nos valores obtidos nas camadas mais profundas, enquanto os concretos com proteção completa (com tinta) apresentaram uma variação média de 40%. Estes resultados indicam que a proteção com tinta trabalha ao longo do tempo para retardar a difusão dos cloretos no concreto, mas, para confirmar tal tendência, é necessário conduzir mais estudos com diferentes tempos de exposição, conferindo ainda qual seria o período de vida útil, considerando a proteção conferida pelas tintas.

A Figura 51 apresenta a concentração de cloretos, apenas nos concretos, em relação à massa do material para diferentes profundidades (10 mm, 20 mm e 30 mm) após 28 e 90 dias de exposição. Considera-se que esses valores de profundidade se referem à face do concreto, seja ele exposto diretamente aos cloretos ou em relação ao sistema de proteção. A análise dos dados permite verificar o impacto dos diferentes sistemas de proteção superficial (SP - sem proteção, PARG - proteção com argamassa, PPVA - proteção com tinta PVA e PAC - proteção com tinta acrílica) na redução da difusão de cloretos.

Figura 51: Concentração de cloretos no concreto.



Fonte: Própria autoria.

Após 28 dias, a maior concentração de cloretos é observada na profundidade de 10 mm, independentemente do sistema de proteção. O concreto sem

proteção (SP) apresenta o maior teor de cloretos, próximo de 0,9%, seguido pelo sistema PARG, que apresenta comportamento semelhante. Já os sistemas PPVA e PAC apresentam menores concentrações, com valores ligeiramente inferiores a 0,85% e 0,8%, respectivamente. À medida que a profundidade aumenta, há uma redução significativa na concentração de cloretos, sendo que, a 30 mm, os valores ficam abaixo de 0,1% em todos os elementos com proteção, com o PAC apresentando a menor concentração.

Após 90 dias de exposição, observa-se aumento na concentração de cloretos em todas as profundidades, evidenciando o avanço da difusão ao longo do tempo. Na profundidade de 10 mm, os valores permanecem elevados, próximos de 0,9%, em todos os sistemas. Já a 20 mm, a diferença entre os sistemas se torna mais evidente: o concreto sem proteção (SP) apresenta concentração superior a 0,6%, enquanto os sistemas PPVA e PAC reduzem esse valor para aproximadamente 0,5% e 0,4%, respectivamente. Na profundidade de 30 mm, observa-se menor presença de cloretos, com os sistemas de proteção apresentando reduções mais expressivas. O sistema PAC se destaca como o mais eficiente, com valores inferiores a 0,2%, enquanto o SP ainda apresenta teores acima de 0,3%.

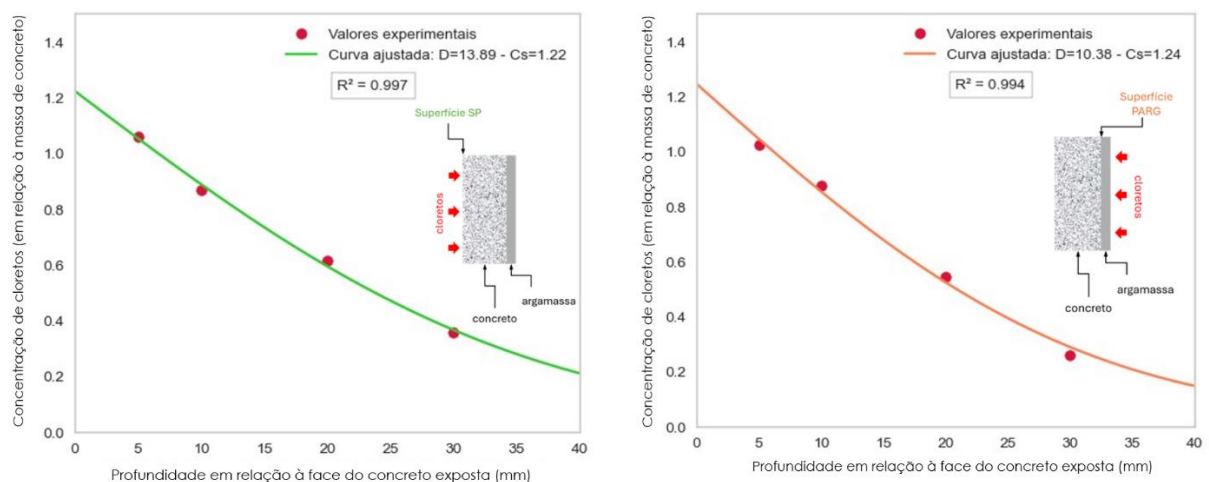
Comparando os períodos de exposição, a influência do tempo na penetração dos cloretos é evidente, especialmente nas menores profundidades. Os sistemas de proteção superficial contribuem para reduzir a difusão de cloretos, sendo o PAC o mais eficiente, seguido pelo PPVA. O sistema PARG apresenta desempenho intermediário, enquanto o concreto sem proteção apresenta as maiores concentrações em todas as profundidades analisadas.

As Figura 52 e Figura 53 apresentam os ajustes de curvas realizados com a Lei de Fick, via código implementado (Apêndice 1), para os diferentes sistemas de proteção superficial contra a difusão de cloretos no concreto, considerando os valores médios das quatro amostras analisadas após 90 dias de exposição aos cloretos. Os gráficos mostram os valores médios experimentais (pontos) ajustados pelo método dos mínimos quadrados (curvas), indicando a relação entre a concentração de cloretos e a profundidade. Além disso, apresentam-se os coeficientes de difusão (D), os coeficientes de concentração superficial de cloretos (C_s) e os coeficientes de determinação (R^2) para cada cenário analisado.

A qualidade dos ajustes é evidenciada pelos elevados valores de R^2 , que variam entre 0,983 e 0,997. Isso indica que o modelo matemático adotado representa

bem o fenômeno de transporte de cloretos nos diferentes sistemas de proteção. O concreto sem proteção (SP) apresentou o maior coeficiente de difusão, com $D=13,89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, e um coeficiente de concentração superficial de $C_s=1,22$. A aplicação de argamassa de proteção (PARG) reduziu o coeficiente de difusão para $D=10,38 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, o que representa uma redução de 25,3% em relação ao SP, enquanto a proteção com tinta PVA obteve um valor ligeiramente inferior, com $D=10,12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, resultando em uma redução de 27,2% em comparação ao concreto sem proteção.

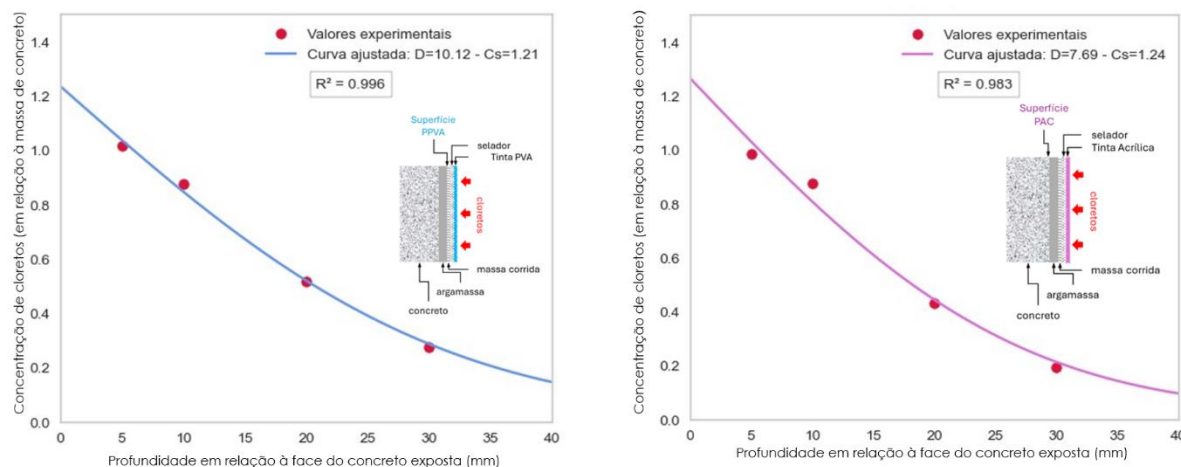
Figura 52: Ajuste da curva e do coeficiente de difusão dos elementos: a) SP e b) PARG.



Fonte: Própria autoria.

O sistema mais eficiente na redução da difusão de cloretos foi o sistema de proteção com tinta acrílica (PAC), que apresentou um coeficiente de difusão de $D=7,69 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, reduzindo em 44,6% a taxa de penetração dos cloretos em relação ao SP. Esse desempenho superior pode ser atribuído à menor porosidade e à maior impermeabilidade do sistema de proteção acrílico, que restringe de forma mais eficaz a entrada de íons cloreto.

Figura 53: Ajuste da curva e do coeficiente de difusão dos elementos: a) PPVA e b) PAC.



Fonte: Própria autoria.

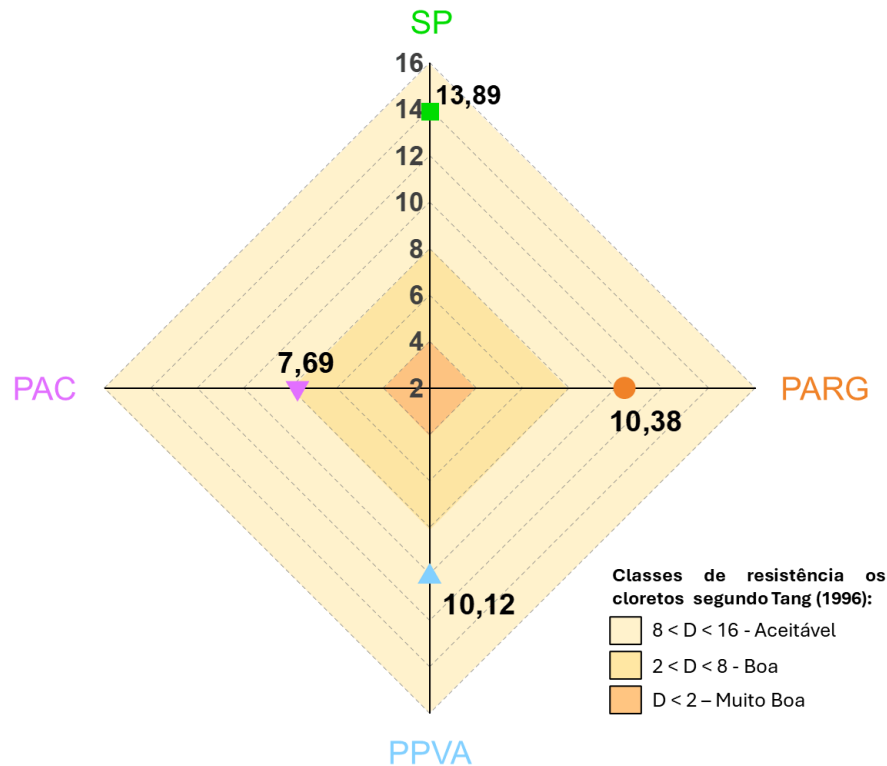
Apesar das diferenças nos coeficientes de difusão, os valores dos coeficientes de concentração superficial (C_s) permaneceram próximos entre as diferentes proteções, variando entre 1,21 e 1,24. Isso sugere que a concentração inicial de cloretos na interface concreto-solução salina foi semelhante em todas as amostras, indicando que a principal variável que afetou a resistência do concreto à penetração de cloretos foi a capacidade da camada superficial de restringir a difusão ao longo do tempo.

A análise dos coeficientes de difusão está diretamente correlacionada com os resultados apresentados na Figura 52 e na Figura 53, onde se observou que as concentrações de cloretos em relação à massa de concreto foram menores para os sistemas de proteção mais eficientes, especialmente nas camadas de 20 mm e 30 mm de profundidade. A proteção PAC, que apresentou o menor coeficiente de difusão, também apresentou as menores concentrações de cloretos nas camadas internas, confirmando sua maior eficiência na redução da penetração de íons agressivos. Por outro lado, a proteção PARG e PPVA teve desempenhos intermediários, reduzindo a difusão de cloretos em aproximadamente 25% a 27% em comparação com o SP, o que também se refletiu nas concentrações obtidas nas diferentes profundidades.

A Figura 54 apresenta uma avaliação da durabilidade dos sistemas de proteção superficial, considerando a classificação dos coeficientes de difusão segundo Tang (1996), que estabelece quatro níveis de resistência à penetração de cloretos: inaceitável, aceitável, boa e muito boa. Essa classificação permite uma

análise direta do impacto dos diferentes tratamentos superficiais sobre a vida útil das estruturas de concreto armado expostas a ambientes urbanos.

Figura 54: Classificação do nível de durabilidade dos elementos avaliados.



Fonte: Própria autoria.

O concreto sem proteção superficial apresentou um coeficiente de difusão elevado, situando-se na classe aceitável, indicando resistência reduzida à penetração de cloretos, porém aceitável para ambiente urbano. Esse resultado implica que, em edificações sem revestimentos adequados, há maior probabilidade de corrosão das armaduras ao longo do tempo, reduzindo a durabilidade da estrutura e aumentando a necessidade de manutenção corretiva.

A aplicação de argamassa com acabamento convencional melhorou a resistência à penetração, demonstrando desempenho mais favorável na contenção da difusão de cloretos. No entanto, essa proteção isolada pode não ser suficiente para estruturas altamente expostas a atmosferas marinhas ou contaminadas por cloretos de origem urbana.

A introdução de camadas adicionais, como massa corrida, selador e tinta, resultou em reduções significativas nos coeficientes de difusão. O sistema de proteção completo com tinta PVA manteve o nível de durabilidade do SP e do PARG, indicando que essa tinta não proporciona maior durabilidade às estruturas de concreto armado. Já o sistema completo de proteção com tinta acrílica demonstrou a maior eficiência, classificando-se na categoria boa, o que representa maior resistência à difusão de cloretos e, conseqüentemente, maior durabilidade da estrutura.

Portanto, a adoção de sistemas de proteção completos, como o uso de argamassa, massa corrida, selador e tinta acrílica, pode garantir maior durabilidade das estruturas de concreto armado em ambiente urbano. A classificação na categoria boa confirma que essa abordagem oferece a melhor proteção contra a difusão de cloretos, sendo recomendada para edificações em ambientes urbanos que buscam maior longevidade e menores custos de manutenção. Porém, para se obter uma classe muito boa, é necessário que a resistência do concreto seja superior a 30 MPa e que a argamassa utilizada na camada protetora seja rica em cimento e apresente menor porosidade.

4.2. ANÁLISE DE CUSTOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL

Com o objetivo de apresentar o quanto custaria a aplicação dos sistemas de proteção utilizados nesta pesquisa, foi realizado um levantamento detalhado dos insumos necessários, com base nos valores da Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO) e da tabela SINAPI do mês de coleta DEZ/24, publicada em 14/01/25. No detalhamento dos serviços, foram divididos em três grupos, sendo classificados da seguinte maneira:

- Emboço com argamassa mista de cimento, cal hidratada e agregado miúdo, com espessura de 20 mm;
- Aplicação de pintura com massa acrílica, selador e tinta PVA;
- Aplicação de pintura com massa acrílica, selador e tinta ACRÍLICA;

Em cada grupo, foram adotados os profissionais necessários (mão de obra) e os materiais, ambos devidamente quantificados para um revestimento padrão de 1 m², conforme apresentado no Quadro 7. Para a avaliação de custos, considerou-se sempre o valor médio de três fornecedores da região do Vale do Paraíba, São Paulo.

Quadro 7: Insumos necessários para a execução de 1 m² de superfície.

EMBOÇO COM ARGAMASSA MISTA DE CIMENTO, CAL HIDRATADA E AGREGADO MIÚDO						
Serviços	Unidade	Consumo	Quantidade	Custo médio	Subtotal	Total
Pedreiro	h	0,82	1,00	21,23	R\$ 17,41	R\$ 41,82
Servente	h	0,66	1,00	19,67	R\$ 12,98	
Agregado Miúdo	m³	0,0305	1,00	78,00	R\$ 2,38	
Cimento CP V ARI	kg	6,075	1,00	0,54	R\$ 3,28	
Cal CH III	kg	6,075	1,00	0,95	R\$ 5,77	
APLICAÇÃO DE PINTURA COM MASSA CORRIDA, SELADOR E TINTA PVA						
DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS	UNID.	CONSUMO	QUANT./ m²	PREÇO médio	SUBTOTAL	TOTAL
Ajudante de pintor	h	0,35	1,00	19,67	R\$ 6,88	R\$ 24,27
Pintor	h	0,4	1,00	21,75	R\$ 8,70	
Massa Corrida	kg	0,28	1,00	5,77	R\$ 1,61	
Selador	litro	0,12	1,00	16,64	R\$ 2,00	
Tinta PVA	litro	0,17	1,00	29,87	R\$ 5,08	
APLICAÇÃO DE PINTURA COM MASSA CORRIDA, SELADOR E TINTA ACRÍLICA						
DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS	UNID.	CONSUMO	QUANT./ m²	PREÇO médio	SUBTOTAL	TOTAL
Ajudante de pintor	h	0,35	1,00	19,67	R\$ 6,88	R\$ 31,67
Pintor	h	0,4	1,00	21,75	R\$ 8,70	
Massa Corrida	kg	0,28	1,00	19,39	R\$ 5,43	
Selador	litro	0,12	1,00	16,64	R\$ 2,00	
Tinta Acrílica	litro	0,17	1,00	50,92	R\$ 8,66	

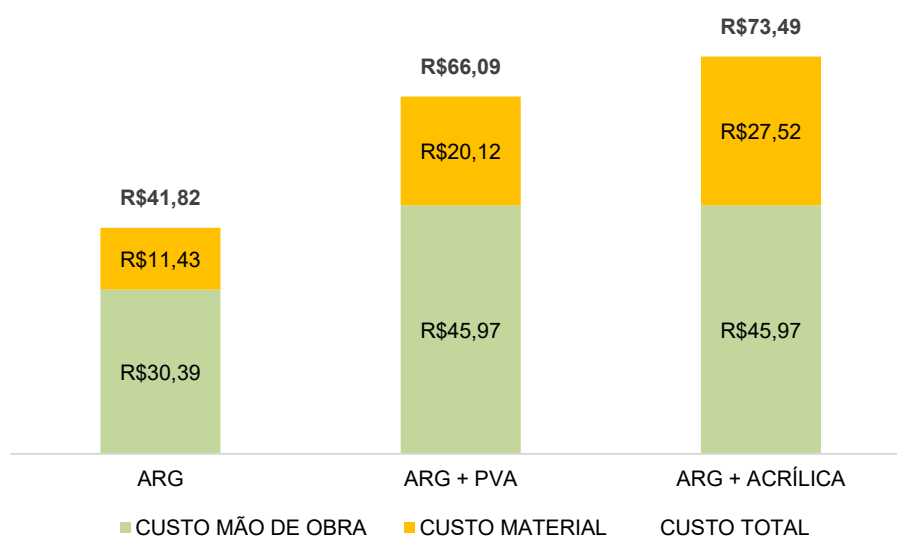
Fonte: Autoria Própria.

Ao relacionar o desempenho técnico obtido nos ensaios com os custos de execução dos diferentes sistemas de proteção superficial, observa-se que a escolha da solução mais adequada para cada contexto construtivo deve considerar tanto a eficiência na contenção da difusão de cloretos quanto a viabilidade econômica de aplicação em larga escala. O levantamento orçamentário, realizado com base nos valores da TCPO e da SINAPI, permitiu quantificar os insumos e a mão de obra necessários para a execução de 1 m² de revestimento em cada um dos sistemas avaliados, conforme a Figura 55.

A aplicação do emboço com argamassa mista, sem pintura de acabamento, resultou em um custo total de R\$ 41,82/m² (ARG). Embora represente a solução de

menor sofisticação tecnológica, este sistema já proporcionou uma melhora significativa na resistência à penetração de cloretos, em comparação com o concreto exposto à ação desses cloretos. Para os sistemas que receberam proteção com tintas acima da argamassa, os valores considerando insumo e mão de obra foram de R\$ 66,09/m² (ARG+PVA) e R\$ 73,49/m² (ARG+ACRÍLICA).

Figura 55: Custo estimado para implantação dos sistemas de proteção em superfície de 1 m².



Fonte: Autoria Própria.

Embora o custo estimado para a aplicação de proteção apenas com argamassa seja 56,9% do valor considerado para argamassa + massa corrida + selador + tinta acrílica, os resultados comprovaram que tal investimento terá impacto positivo na vida útil da estrutura de concreto.

Do ponto de vista técnico, o desempenho das duas alternativas de proteção, com argamassa e argamassa + massa corrida + selador + tinta PVA, não apresentou diferença significativa na classe de durabilidade, conforme a Figura 54, permanecendo ambas na classe aceitável. No entanto, o custo estimado final foi 1,58 vezes maior do que o do sistema com apenas a camada de argamassa. Já para o sistema PAC, houve melhora significativa em relação ao uso isolado da argamassa, o que a levou à classe boa, justificando o investimento do sistema para aplicação em ambientes urbanos.

4.3. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos pelos ensaios físico-mecânicos de índice de vazios, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto utilizado, bem como os resultados do ensaio de concentração de cloretos e do coeficiente de difusão de cloretos. Além desses, foram apresentados os valores dos insumos e do investimento necessários para a implementação em estruturas de concreto com diferentes sistemas de proteção superficial. A análise quantitativa e de precificação mostra que, com um investimento reduzido, é possível atingir uma boa classe de durabilidade com a aplicação de sistemas compostos por tintas acrílicas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa evidenciam a influência significativa dos sistemas de proteção superficial na redução da penetração de cloretos no concreto exposto a ambientes agressivos. A análise da concentração de cloretos ao longo da profundidade revelou que o concreto sem proteção (SP) apresenta a maior absorção de íons cloreto, atingindo uma concentração de 0,38% na camada mais profunda (50 mm) após 90 dias de exposição. Essa elevada absorção favorece a difusão dos cloretos para o interior do concreto, aumentando o risco de corrosão das armaduras ao longo do tempo.

A proteção com argamassa (PARG) demonstrou redução parcial na penetração dos cloretos, limitando a concentração a 0,30% a 50 mm, o que corresponde a uma diminuição de 21% em relação ao concreto sem proteção. No entanto, sua eficácia ainda é limitada em comparação aos sistemas de proteção mais avançados. Já a proteção com argamassa + tinta PVA (PPVA) apresentou desempenho superior, reduzindo a concentração para cerca de 0,23% a 50 mm, indicando uma mitigação mais expressiva da difusão de cloretos em comparação à argamassa.

O melhor desempenho foi obtido com a argamassa + tinta acrílica (PAC), que apresentou a menor concentração de cloretos na camada mais profunda, em torno de 0,19% a 50 mm, o que representa uma redução de 50% em relação ao concreto sem proteção. Esse resultado evidencia a eficiência do sistema acrílico como barreira à difusão de cloretos e sua contribuição significativa para o aumento da durabilidade das estruturas.

A aplicação do sistema com argamassa + tinta acrílica (PAC) mostrou-se de custo estimado maior do que os outros dois sistemas de proteção utilizados; porém, sua colaboração para inibir a ação dos íons de cloreto e para aumentar a vida útil justificam o investimento, principalmente para ambientes urbanos, por se tratar de um método de simples execução.

A análise do coeficiente de difusão de cloretos (D) corrobora com as avaliações obtidas pela concentração de cloretos no interior do material. O concreto sem proteção apresentou o maior coeficiente de difusão, $D = 13,89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto a proteção com argamassa reduziu esse valor para $D = 10,38 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, o que representa uma redução de 25,3%. O sistema PPVA proporcionou uma redução

ainda maior, com $D = 10,12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (queda de 27,2%). O revestimento com tinta acrílica apresentou o menor coeficiente de difusão, $D = 7,69 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, o que representa uma redução de 44,6% em relação ao concreto sem proteção, evidenciando sua eficácia na redução da difusão de cloretos.

Os coeficientes de concentração superficial de cloretos (C_s) apresentaram variações menos expressivas entre os sistemas analisados, variando de 1,21 a 1,24, indicando que a principal diferença entre os sistemas de proteção está na capacidade de impedir a difusão dos íons cloreto para camadas mais profundas, e não necessariamente na absorção inicial.

O concreto sem proteção superficial apresentou um coeficiente de difusão elevado, situando-se na classe aceitável, indicando resistência reduzida à penetração de cloretos, porém aceitável para ambiente urbano.

A aplicação da camada de argamassa, com massa corrida, selador e duas demãos de tinta acrílica, melhorou a resistência à penetração, levando a uma classificação boa, demonstrando um desempenho mais favorável na contenção da difusão de cloretos.

Com base nos resultados obtidos que evidenciam a influência significativa dos sistemas de proteção superficial na mitigação da penetração de cloretos alguns direcionamentos para trabalhos futuros podem ser destacados:

- Avaliação em longo prazo: Realizar ensaios de exposição prolongada, superiores a 90 dias, em diferentes condições ambientais (urbana, marinha e industrial), a fim de verificar a durabilidade e a eficiência dos sistemas de proteção ao longo do tempo, considerando ciclos de molhagem e secagem;
- Comparação entre diferentes tipos de tintas e seladores: Ampliar a gama de revestimentos analisados, incluindo tintas epóxi, poliuretanas, hidrorrepelentes e nanotecnológicos, avaliando seu potencial em comparação à tinta acrílica, que apresentou o melhor desempenho neste estudo;
- Estudo da permeabilidade a outros agentes agressivos: Avaliar não apenas a difusão de íons cloreto, mas também a penetração de dióxido de carbono (CO_2) e sulfatos, possibilitando uma análise mais abrangente da durabilidade em diferentes cenários de agressividade ambiental;

- Análise de custo-benefício em ciclo de vida: Desenvolver estudos que integrem o desempenho técnico e econômico ao longo do ciclo de vida da edificação, considerando os custos de aplicação, manutenção e o tempo de prolongamento da vida útil estrutural, de forma a indicar a solução mais eficiente e economicamente viável;
- Modelagem numérica e preditiva: Empregar modelos numéricos de transporte de cloretos e de corrosão das armaduras para prever o desempenho futuro das estruturas, validados com dados experimentais e que permitem projeções mais seguras em projetos de durabilidade.

REFERÊNCIAS

ADESINA, A.; ZHANG, J. Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. **Next Sustainability**, Oxford, v. 3, p. 100025, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949823624000023>. Acesso em: 15 jun. 2025.

AL-KHAJA, A. W. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. **Construction and Building Materials**, Londres, v. 11, p. 9-13, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061897000044#:~:text=rights%20and%20content-,Abstract,a%20period%20of%20180%20days>. Acesso em: 10 jun. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken, PA: ASTM, 2022.

ANDRADE, C.; DIEZ, J. M.; ALONSO, C. Modeling of skin effects on diffusion process in concrete. **Advanced Cement Based Materials**, New York, v. 6, p. 39-44, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1065735597000023>. Acesso em: 9 fev. 2025.

ANDRADE, J. J. O. **Manual para diagnósticos de obras por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; PINTO FILHO, L. C.; GAMA, J. C. N. Previsão de vida útil de estruturas de concreto atacadas pela corrosão das armaduras: panorama atual e perspectivas futuras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283732656_Previsao_da_vida_util_de_estruturas_de_concreto_atacadas_pela_corrosao_das_armaduras_panorama_atual_e_perspectivas_futuras. Acesso em: 9 fev. 2025.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: cimento portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11578**: cimento portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14037**: diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações: requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372**: cimento portland e outros materiais em pó: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine): Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5674**: manutenção de edificações: requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. *In*: SCHIESSL, P. (ed.). **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM, 1988. p. 22-55.

BANDEIRA, J. L. S. **Desenvolvimento de um método para a avaliação da influência do revestimento argamassado no ataque de cloretos às estruturas de concreto saturado e não saturado**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas, 2022.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN B. F.; HELENE P. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BYFORS, K. **Chloride initiated reinforcement corrosion**: chloride binding. Stockholm: CBI, 1990. 121 p. (Report 1:90). Disponível em: <https://trid.trb.org/view/364628>. Acesso em: 23 fev. 2025.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução, 9. ed. LTC, 2016.

CARMONA, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil: estudo estatístico. *In*: JORNADAS EM ESPAÑOL Y PORTUGUÊS SOBRE ESTRUCTURAS E MATERIALES, 1988, Madrid. **Proceedings** [...] Madrid: CEDEX, IET, 1988. p. 325-348

CASCUDO, O. **O controle de corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: PINI, 1997.

CASCUDO, O.; LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. Métodos de transporte de cloretos em concreto: uma análise crítica e comparativa. **Concreto & Construção**, São Paulo, v. 50, n. 108, p. 58, 2022. Disponível em:

https://www.ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao108/P%C3%A1ginas%20de%20Revista%20Concreto%20IBRACON%20108_M%C3%A9todos%20de%20transporte.pdf. Acesso em: 2 maio 2025.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para produção de concretos especiais aplicados na construção civil.

Cerâmica, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ce/a/6jsRNJDKJHCNCczb3fMfLFv/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 2 maio 2025.

COSTA, E. A. L. **Determinação do potencial de agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento na região metropolitana de Salvador**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DOURADO, D. R. *et al.* Métodos de recuperação, proteção e monitoramento de estruturas de concreto armado em processo de corrosão: revisão de literatura. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, Jundiaí, v. 3, n. 9, p. e391820, 2022.

FALCÃO, I. S.; SANTOS, L. G. **Contribuições ao proporcionamento otimizado de concretos com RCD visando durabilidade e performance mecânica**: estudo numérico e validação experimental. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2024.

FELIX, E. F. **Modelagem da deformação do concreto armado devido à formação dos produtos de corrosão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FELIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Vida útil à fadiga do concreto: estudo experimental da influência das condições de carregamento e da resistência do material. **Revista ALCONPAT**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2022.

FERREIRA, R. C.; FREIRE, W. J. Propriedades físico-mecânicas de solos estabilizados com cimento e silicato de sódio avaliadas por meio de testes destrutivos e não-destrutivos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 221-232, 2003.

FINKLER, F. A. **Ingresso de íons cloreto no concreto**: estudo da influência dos agregados. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11624/3045>. Acesso em: 10 mar. 2025.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. Chloride Diffusion and the Influence of the Saturation Degree of the Concrete. *In*: RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, 3., 2005, Madrid. **Proceedings** [...]. Paris: RILEM, 2005. p. 237-256. Disponível em: https://www.rilem.net/publication/publication/43?id_papier=838. Acesso em: 15 fev. 2025.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.1993.tde-15102025-084830>. Acesso em: 20 jan. 2025.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. *In*: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., 1997, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: CONPAT, 1997.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI; Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47 p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/423411516/Corrosao-em-armaduras-para-concreto-armado-pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

IBRAHIM, M.; JERRY, A. N.; KHALIL, A. I. Use of surface treatment materials to improve concrete durability. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 11, n. 1, p. 36-40, 1999. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281999%2911%3A1%2836%29>. Acesso em: 15 jan. 2025.

JAEGERMANN, C. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 87, n. 4, p. 333- 339, 1990.

JONES, M. R.; MCCARTHY, M. J.; DHIR, R. K. Chloride ingress and reinforcement corrosion in carbonated and sulphated concrete. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE, 1994, Sheffield. **Proceedings** [...]. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. p. 365-376. Disponível em: <https://www.academia.edu/29588818/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

KREIJGER, P. C. The skin of concrete: composition and properties. **Matériaux et Constructions**, Dordrecht, v. 17, n. 100, p. 275-283, 1984. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/11527>. Acesso em: 8 jan. 2025.

MALHEIRO, R. M. C.; MEIRA, G. R.; LIMA, M. S. Influência da camada do revestimento de argamassa na penetração de cloretos em estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 41-55, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/yd3YXD8hyP3xCzxNKbDYbKB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 nov. 2024.

MANGAT, P. S.; GURUSAMY, K. Chloride diffusion in steel fiber reinforced marine concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 17, n. 3, p. 385-396, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884687900020>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**, Dordrecht, v. 27, n. 6, p. 338-346, 1994. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02473426>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20072009-174802/pt-br.php>. Acesso em: 3 out. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIRA, G. R. *et al.* Durability of concrete structures in marine atmosphere zones: the use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 427-435, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946510000399>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MEIRA, G. R. *et al.* Procedimento de ensaios de difusão e migração de cloretos visando à estimativa de VUP em concretos. *In*: RIBEIRO, D. V.; MEIRA, G. R. (org.). **Prática Recomendada IBRACON: Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702**. São Paulo: IBRACON, 2021. v. 1, p. 1-48.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: IFPB, 2017.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p. 793-827.

NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 133-138, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602009390>. Acesso em: 10 nov. 2024.

NORDTEST. **NT BUILD 443**: concrete, hardened: accelerated chloride penetration. Finland: Nordtest, 1995.

NORDTEST. **NT BUILD 492**: concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo, Finland: Nordtest, 1999.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. *In*: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (org.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 11, n. 3, p. 395-406, 1981. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884681901113>. Acesso em: 23 out. 2024.

PEDRY, G. R. **Avaliação do efeito da proteção superficial (pintura) na captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/4347>. Acesso em: 13 jan. 2025.

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**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2801/000326378.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 jan. 2025.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estrutura de concreto em ambiente urbano**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

QUARCIONI, V. A. *et al.* Caracterização microestrutural de argamassas selecionadas de cimento e cal hidratadas cálcica e dolomítica por microscopia óptica. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 9., 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Bandeira-2/publication>

369224904_ESTRUTURAS_DE_CONCRETO_ARMADO_REVESTIDAS_COM_ARGAMASSA_UM_METODO_PARA_AVALIAR_O_GRAU_DE_SATURACAO_E_O_COEFICIENTE_DE_DIFUSAO_DO_CONCRETO_E_ARGAMASSA_NO_MESMO_AMBIENTE_FRENTE_AO_ATAQUE_DE_CLORETOS/links/6414a5a7a1b72772e4067c33/ESTRUTURAS-DE-CONCRETO-ARMADO-REVESTIDAS-COM-ARGAMASSA-UM-METODO-PARA-AVALIAR-O-GRAU-DE-SATURACAO-E-O-COEFICIENTE-DE-DIFUSAO-DO-CONCRETO-E-ARGAMASSA-NO-MESMO-AMBIENTE-FRENTE-AO-ATAQUE-DE-CLORETOS.pdf. Acesso em: 5 dez. 2024.

RAMOS, E. S. **Modelagem numérica da propagação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22072025-150138/en.php>. Acesso em: 20 dez. 2024.

RASHEEDUZZAFAR; HUSSAIN, S. E.; AL-SAADOUN, S. S. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 20, n. 5, p. 723-738, 1990. Disponível: https://eurekamag.com/research/099/102/099102677.php?srltid=AfmBOopqjrzzzB4cXDZJOw85a2cJHo2M_rSHY20chh3A527j8taQ-23K. Acesso em: 20 nov. 2024.

REUS, C. G. *et al.* Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado. **Revista ALCONPAT**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 76-88, 2021. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/480>. Acesso em: 5 jan. 2025.

RIBEIRO, D. V. *et al.* **Corrosão e degradação em estruturas e concreto**: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 272 p.

RUIZ-SÁNCHEZ, A.; SÁNCHEZ-POLO, M.; ROZALEN, M. Waste marble dust: an interesting residue to produce cement. **Construction and Building Materials**, Londres, v. 224, p. 99-108, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819316940>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 28, n. 10, p. 1489-1503, 1998. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698001240>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SAGÜÉS, A. A.; KRANC, S. C.; MORENO, F. J. P. Computational and experimental investigation of cathodic protection distribution in reinforced concrete marine. *In*: CORROSION CONFERENCE, 1997, New Orleans. **Proceedings** [...]. New Orleans: NACE International, 1997. p. 1-12. Disponível em: <https://doi.org/10.5006/c1997-97231>. Acesso em: 14 jan. 2025.

SANTOS, R. E.; OLIVEIRA, B. A cultura do concreto armado no Brasil: educação e deseducação dos produtores do espaço construído. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO, 4., 2006, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: Universidade Católica de Goiânia, 2006. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/331446935/A-Cultura-Do-Concreto-Armado-No-Brasil-SANTOS-Roberto-Eustaaquio-Dos-2006>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVESTRO, L.; ROMANO, F. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 101-118, jan./mar. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/TW3b6SfQh7x6qYpkZwpHNKK/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

STANISH, K. D.; HOOTON, D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete**: a literature review. Toronto: University of Toronto, Department of Civil Engineering, 2000. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/chlconcrete.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2025.

STREHBLOW, H. H.; MARCUS, P. **Corrosion mechanisms in theory and practice**. New York: Marcel Dekker, 1995.

TANG, L. **Chloride transport in concrete-measurement and prediction**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) – Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1996. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699272380160>. Acesso em: 6 fev. 2025.

TRUC, O.; OLLIVIER, J. P.; CARCASSÈS, M. A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 30, n. 2, p. 217-226, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888469900232X>. Acesso em: 6 mar. 2025.

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

YI, Y. *et al.* A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 113, 103696, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894652030202X>. Acesso em: 18 mar. 2025.

APÊNDICE 1: CÓDIGO PYTHON DE CALIBRAÇÃO

Código desenvolvido em Python para realizar a calibração e ajuste dos coeficientes de concentração superficial (C_s) e de difusão de cloretos (D).

```
# Importação das bibliotecas
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import least_squares
from scipy import special

# Carregamento da base de dados e exclusão da primeira coluna
base = pd.read_csv('CLORETOS_DADOS_90.csv', sep=';')

# Definição dos inputs e outputs
X = base.iloc[:, 0].values # Inputs (Profundidade)
y_experimental = base.iloc[:, 1].values # Outputs (Concentração)

# Definição da função de erro para o ajuste
def residuals(params, X, y):
    a1, b1 = params
    y_pred = special.erfc((X / (2 * np.sqrt(b1 * 28))) * (a1 - 0.0301) + 0.0301
    return y_pred - y # Diferença entre valores preditos e reais

# Chute inicial para os parâmetros [a1, b1]
initial_guess = [1.0, 100.0]

# Executando o ajuste com least_squares
result = least_squares(residuals, initial_guess, args=(X, y_experimental))

# Parâmetros ajustados
a1_opt, b1_opt = result.x
print(f"Parâmetros ajustados: a1 = {a1_opt:.5f}, b1 = {b1_opt:.5f}")

# Geração de pontos para a curva ajustada
X_fit = np.linspace(0, 40, 100) # 100 pontos suaves para melhor visualização
y_fit = special.erfc((X_fit / (2 * np.sqrt(b1_opt * 28))) * (a1_opt - 0.0301) + 0.0301

# Gerando valores preditos para cálculo do R²
y_pred = special.erfc((X / (2 * np.sqrt(b1_opt * 28))) * (a1_opt - 0.0301) + 0.0301

# Cálculo do coeficiente de determinação R²
SS_res = np.sum((y_experimental - y_pred) ** 2) # Soma dos quadrados dos resíduos
SS_tot = np.sum((y_experimental - np.mean(y_experimental)) ** 2) # Soma total dos quadrados
R2 = 1 - (SS_res / SS_tot) # Coeficiente de determinação
print(f"Coeficiente de determinação R² = {R2:.5f}")

# Criando a figura para o gráfico
plt.figure(figsize=(6, 5))

# Plotando os dados experimentais e a curva ajustada
plt.scatter(X, y_experimental, color='crimson', label='Valores experimentais') # Pontos conhecidos
plt.plot(X_fit, y_fit, color='coral', label=f'Curva ajustada: D={b1_opt:.2f} - Cs={a1_opt:.2f}') # Curva ajustada

# Configurações do gráfico
plt.xlabel('Profundidade em relação à face do concreto exposta (mm)', fontsize=11)
plt.ylabel('Concentração de cloretos (em relação à massa de concreto)', fontsize=11)
plt.legend(fontsize=10)
plt.xlim(0, 40)
plt.ylim(0, 1.5)
plt.title('PARG-90 dias', fontsize=12)
plt.grid(False)

# * Adicionando o valor de R² no gráfico
plt.text(0.05, 0.85, f'R² = {R2:.3f}', fontsize=10, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.7),
        transform=plt.gca().transAxes) # Posição relativa no gráfico

# Exibindo o gráfico
plt.show()
```


DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	PAULO GUILHERME CORNELIO 26/07/1982
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Cornelio, Paulo Guilherme Cornelio, P, G.
Currículo Lattes	https://wwws.cnpq.br/cvlattesweb/PKG_MENU.menu?f_cod=22A614C155CD8803F90762A2CA1D8463#
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
MAIO/2017	Formação acadêmica (Bacharel em Engenharia Civil) Centro Universitário Salesiano de São Paulo
JAN/2022	Formação complementar (Especialização em Projeto de Arquitetura de Interiores) Faculdade Metropolitana de São Paulo
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
LUNARDI, L. R., CORNELIO, P. G., PRADO, L.P., FELIX, E. F. Hybrid Machine Learning Model for Predicting the Fatigue Life of Plain Concrete Under Cyclic Compression, Cidade de realização. Buildings , 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings15101618 . Acesso em: 10 jul. 2025.	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
CORNELIO, P. G.; FELIX, E. F.; PRADO, L. P. Participação em banca de Isabela da Silva Falcão. Contribuições ao Proporcionamento otimizado de concretos com RCD visando durabilidade e performance mecânica: estudo numérico e validação experimental. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. 2024. CORNELIO, P. G.; FELIX, E. F.; PRADO, L. P. Participação em banca de Larissa Gabriela dos Santos. Contribuições ao Proporcionamento otimizado de concretos com RCD visando durabilidade e performance mecânica: estudo numérico e validação experimental. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. 2024.	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	

CINPAR, 17., 2012, (Brasília). Experimental assessment of surface protection systems on chloride diffusion in concrete structures. 2025. (Congresso).