

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JEFFERSON RODRIGO BONADEU

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO  
ARMADO EXPOSTOS EM AMBIENTE NATURAL E SIMULADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

JEFFERSON RODRIGO BONADEU

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO  
ARMADO EXPOSTOS EM AMBIENTE NATURAL E SIMULADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado ao Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Arthur Medeiros.

CURITIBA

2016



Ministério da Educação

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

*Campus Curitiba – Sede Ecoville*

**Departamento Acadêmico de Construção Civil**

**Curso de Engenharia Civil**

---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO ARMADO EXPOSTOS EM AMBIENTE NATURAL E SIMULADO**

Por

**JEFFERSON RODRIGO BONADEU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 24 de Novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Arthur Medeiros, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Aduino José Miranda de Lima, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu professor orientador, Arthur Medeiros, por toda a parceria e ajuda disponibilizada para possibilitar a realização desse trabalho de conclusão de curso.

Aos membros que participaram na realização desta pesquisa: Adam, Daniel, Estela, Rodolfo e Thiago. Sem eles, a realização deste projeto seria impossível.

Ao professor Wellington, à almoxarife Olga e a colega Rhaísa, por sua ajuda essencial para a realização do ensaio de titulação potenciométrica.

À minha mãe Reni, minha irmã Taiuska, meu tio Nilton, e todos os demais membros da minha família. Esta rede de suporte me permitiu chegar quão longe eu quisesse e é responsável por onde cheguei.

Agradeço, finalmente, aos meus amigos e amigas por todo o período que permaneci em Curitiba: Ana, Carlos, Erick, Gabriel, Lara, Nathália, Ricardo, Sophia, e tantas outras pessoas que eu possa ter esquecido. Seu companheirismo e apoio facilitaram os diversos percalços do caminho.

Muito obrigado a todos.

## RESUMO

BONADEU, Jefferson R. **Análise da penetração de cloretos no concreto armado expostos em ambiente natural e simulado**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

A corrosão de armaduras é uma patologia do concreto armado bastante comum. Uma das formas mais sérias que essa patologia se apresenta é com a penetração de íons cloreto na camada de cobrimento, devido a uma elevada velocidade de perda de seção de aço nesse caso. Essa pesquisa apresenta uma análise da penetração de íons cloreto dentro do concreto armado quando exposto ao ambiente marinho, variando a distância dos corpos de prova em relação ao mar, a classe de resistência com mudanças de materiais usados e suas situações de exposição, após 16 semanas de exposição. Também apresenta a análise de concretos que foram expostos em uma câmara fechada preenchida com uma solução salina de concentração 10%, após 4 semanas de exposição. Essas análises utilizaram três ensaios: resistividade elétrica superficial, colorimetria com aspersão de nitrato de prata e titulação potenciométrica. Com isso, foi possível revelar o impacto negativo da utilização de concretos de baixa qualidade. Os resultados também revelam uma grande variedade na gravidade da exposição, inclusive entre a região de respingos de maré e locais a 50 metros de distância do mar, indicando problemas na simplificação das situações de exposição e na utilização de ensaios com simulação acelerada.

**Palavras-chave:** Tecnologia do concreto. Patologias do concreto armado. Corrosão de armaduras. Simulação de exposição ao ambiente marinho. Íons cloreto.

## ABSTRACT

BONADEU, Jefferson R. **Analysis on the penetration of chloride ions in reinforced concrete exposed to natural and simulated environments.** 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Rebar corrosion is a common pathology in reinforced concrete. One of the more worrisome ways this pathology presents itself is with the penetration of chloride ions in the concrete cover layer, due to the rapid loss of the rebar cross-section to corrosion in this situation. This study presents an analysis on the penetration of chloride ions in reinforced concrete exposed to the natural sea environment, varying the distance in relation to the sea between the specimens, the resistance class with changes in the materials used and their exposition situations, after 16 weeks of exposition. It also presents an analysis on concrete inside a closed chamber filled with a 10% concentration saline solution, after 4 weeks of exposition. The analysis used three tests: superficial electrical resistivity, colorimetry with aspersion of silver nitrate and potentiometric titration. With that, it was possible to reveal the negative impact in the usage of low quality concrete. The results also reveal a great variety on the gravity of the exposition, even between direct sea spray region and 50 meters away from the sea, indicating problems in the simplification of exposition situations and in the use of simulated accelerated environment tests.

**Keywords:** Concrete technology. Reinforced concrete pathology. Rebar corrosion. Simulation of exposure to the sea environment. Chloride ions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix no sistema Fe – H <sub>2</sub> O a 25°C.....	15
Figura 2 – Modelo de vida útil de Tuutti. ....	17
Figura 3 – Esquema de distribuição de estribos nos corpos de prova. ....	23
Figura 4 – Localização dos corpos de prova.....	25
Figura 5 – Ensaio de simulação acelerado. ....	26
Figura 6 – Esquema de distribuição de eletrodos no método de Wenner. ....	27
Figura 7 – Aparelhagem para o ensaio de resistividade elétrica superficial.....	28
Figura 8 – Aparelhagem para o ensaio de titulação potenciométrica.....	31
Figura 9 – Identificação das faces da fatia cortada. ....	36
Figura 10 – Penetração de cloretos na lateral do concreto V12.....	39
Figura 11 – Desenho esquemático do eletrodo.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental .....	19
Tabela 2 – Cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade ambiental.....	21
Tabela 3 – Relação a/c e classe de concreto de acordo com a agressividade .....	22
Tabela 4 – Consumo de materiais para a produção do concreto C15 .....	24
Tabela 5 – Consumo de materiais para a produção do concreto C30 .....	24
Tabela 6 – Resumo das concentrações de $\text{AgNO}_3$ e % de cloretos para detecção de coloração.....	29
Tabela 7 – Exemplo da determinação do ponto de equivalência .....	32
Tabela 8 – Resumo e identificação dos concretos trabalhados .....	34
Tabela 9 – Medidas da frente de penetração de íons cloreto em exposição externa, em mm. ....	36
Tabela 10 – Medidas da frente de penetração de íons cloreto em simulação, em mm. ....	36
Tabela 11 – Medidas da frente de carbonatação, em mm. ....	37
Tabela 12 – Percentual de penetração em relação ao maior valor detectado .....	38
Tabela 13 – Concentração de íons cloreto na amostra analisada.....	42
Tabela 14 – Concentração corrigida de íons cloreto na amostra analisada.....	42



## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

°C	Graus Celsius
a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm	Centímetros
m <sup>2</sup> /s	Metro quadrado por segundo
mL	Mililitro
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
mV	Milivolt
pH	Potencial hidrogeniônico

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1. OBJETIVOS GERAIS .....	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.3. JUSTIFICATIVA.....	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
2.1. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO .....	12
2.2. CORROSÃO DO AÇO POR CLORETOS .....	14
2.3. VIDA ÚTIL.....	16
2.4. FATORES RELEVANTES À PENETRAÇÃO DE CLORETOS E CORROSÃO .	17
2.4.1. Temperatura.....	18
2.4.2. Ambiente de exposição .....	18
2.4.3. Tipo de cimento e adições minerais .....	19
2.4.4. Resistividade elétrica do concreto .....	20
2.4.5. Cobrimento das armaduras .....	20
2.4.6. Relação água/cimento.....	21
2.4.7. Resistência à compressão .....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	23
3.1. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	23
3.2. SITUAÇÕES DE EXPOSIÇÃO .....	24
3.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.....	27
3.4. COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA (AgNO <sub>3</sub> ) .....	28
3.5. TITULAÇÃO POTENCIOMÉTRICA .....	30
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	35
4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.....	35
4.3. COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA.....	35
4.4. TITULAÇÃO POTENCIOMÉTRICA .....	40
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	44
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	45
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46
<b>APÊNDICE A</b> .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é a opção estrutural de maior uso dentro da construção civil por suas qualidades, como flexibilidade de uso e custo. No entanto, devido à natureza de sua produção e utilização, é um material que está sujeito à diversas manifestações patológicas durante sua vida útil, como fissuras, eflorescências, corrosão de armaduras, entre outras. Essas patologias afetam negativamente a durabilidade do concreto armado e com o alto custo para a realização de reparos estruturais, é preferível a realização da prevenção dessas patologias.

Uma maneira de se prever os efeitos do ambiente no concreto armado envolve a utilização de câmaras simuladoras que criam situações extremas para simular uma situação de ambiente agressivo de maneira acelerada e possibilitam avaliar sua resistência à este ambiente. Entretanto, existe uma dificuldade em se traçar um paralelo entre o que se encontra nessas simulações e a realidade, devido à dificuldade em se realizar uma pesquisa com corpos de prova com todas as suas propriedades conhecidas ao longo de décadas, além das situações únicas de exposição ao ambiente, como variações térmicas, incidência de ventos, mudanças ambientais e a natureza climática do Brasil. Segundo Paulo Helene (GJØRV, 2015), existe uma carência de dados e informações confiáveis quando se fala na durabilidade de estruturas, especialmente quando essa estrutura está em um ambiente agressivo.

A falta de dados vai de encontro com o aspecto econômico da construção civil. A busca pelo aumento da eficiência faz com que certos métodos e boas práticas sejam ignoradas, como um receio em se criar estruturas superdimensionadas ou de qualidade incompatível. Essa falta de balanço e precisão agrava a situação, aumentando a possibilidade de aparecimento de manifestações patológicas ou, no outro extremo, desperdiçando recursos financeiros.

## 1.1. OBJETIVOS GERAIS

Esse estudo busca analisar a resistência de corpos de prova de concreto armado à penetração de íons cloreto, colocados em exposição em ambiente simulado e em ambiente natural com diferentes agressividades.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são: analisar a concentração e a profundidade de penetração dos íons cloreto, e medir a resistividade elétrica do concreto, após exposição prolongada em ambientes reais e simulados.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

A pesquisa de Ferreira (2013) coloca em questão a confiabilidade dos modelos de previsão com base em ensaios acelerados com CO<sub>2</sub> (gás carbônico) para carbonatação, que tem mecanismos semelhantes de difusão dos cloretos.

Para o caso da corrosão das armaduras, uma das piores situações que pode ser encontrada é o caso de ataque por íons cloreto. A corrosão de armaduras no concreto armado causada por cloretos é um processo de rápida evolução, chegando em casos extremos à 5 mm/ano, em comparação com os 0,05 mm/ano no caso de carbonatação (BASHEER *et al.*, 2001). Portanto, é essencial o conhecimento dos mecanismos propulsores deste ataque para a determinação da vida útil da estrutura.

Além disso, os íons cloretos têm presença generalizada no país, principalmente na costa marítima, mas também em caixas de água e regiões afetadas por processos industriais, como o de produção de papel, entre outros.

Portanto, esse trabalho pretende avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos em ambientes acelerados, comparando com os resultados obtidos em ambientes de exposição naturais de diferentes agressividades.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto armado, como qualquer outro material, tem uma vida útil limitada. Versões mais antigas da norma ABNT NBR 6118 estabeleciam como expectativa da vida útil de projeto de uma estrutura em concreto armado em de 50 anos. No entanto, a versão mais atual desta norma não prevê mais um prazo de validade fixo. Situações imprevistas e erros podem levar à alteração desse valor com o surgimento de manifestações patológicas.

Segundo Cascudo (1997), os íons cloreto podem ter diversas origens. Estes íons podem estar presentes intencionalmente, em aceleradores de pega, ou de forma não intencional, em agregados e água de amassamento contaminados. Também podem surgir da penetração de sais de degelo, das salmouras e processos industriais, ou da ação de maresia ou névoa de ambiente marinho.

Os aditivos com base em cloretos foram proibidos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Essa norma também obriga o controle de contaminantes nos componentes do concreto. A utilização de sais de congelamento é isolada e rara, devido ao clima predominante no Brasil. Portanto, duas formas de penetração de cloretos se destacam: a ação da água do mar e os processos industriais. Pode-se então assumir que o teor de cloretos inicial no concreto é praticamente nulo e a preocupação para a preservação da sua vida útil em relação ao ataque de cloretos é de impedir a sua penetração.

### 2.1. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO

Segundo Ferreira (2003) e Nepomuceno (2005), o concreto apresenta quatro mecanismos de transporte de agentes agressivos de maior importância: absorção capilar, permeabilidade, difusão iônica e migração iônica. Entende-se agente agressivo toda substância que pode afetar a estabilidade do concreto armado: águas puras, íons cloreto e sulfatos, gás carbônico e oxigênio.

Fox e McDonald (1998) apontam que o efeito de capilaridade ocorre em espaços finos, onde a tensão superficial do líquido gera uma pressão negativa que

promove o transporte através desse espaço. No concreto, isso significa que a água pode vencer a força da gravidade, penetrando na estrutura. Poros menores causam maiores pressões capilares e aumentam a altura que pode ser vencida.

Segundo Basheer *et al.* (2001), concretos com relação água/cimento reduzida apresentam poros com diâmetros menores. No entanto, esses poros também apresentam menor número de interconexões, reduzindo a altura de sucção e o volume de íons cloreto absorvido.

Permeabilidade é a propriedade pela qual um líquido escoar através de um meio poroso sob ação de uma pressão diferencial. A penetração de cloretos no concreto por permeabilidade ocorre com íons dissolvidos, geralmente em água, significando que poros maiores facilitam a penetração. Fatores que afetam a distribuição de poros na pasta de cimento influenciam a permeabilidade, destacando a importância dessa propriedade para a penetração de íons cloreto (BAUER, 1995).

A composição do cimento, a relação a/c e o grau de hidratação influenciam diretamente na permeabilidade e, portanto, nos índices de penetração de íons (HELENE, 1993). A busca por um concreto menos permeável, de poros menores vai em contraponto com a penetração por absorção capilar. No entanto, segundo Cascudo (1997), estruturas mais compactas tem absorção e permeabilidade reduzida, sendo preferível um concreto pouco permeável.

A difusão iônica é o movimento de íons ou moléculas devido a um gradiente de concentração. O movimento dessas partículas tende a reduzir esse gradiente, buscando um equilíbrio dentro do meio. Segundo Basheer *et al.* (2001), a difusão pode ser modelada a partir das leis de Fick. Entretanto, segundo Gjørv (2015), essa modelagem passa por simplificações grosseiras, devido à complexidade do mecanismo de difusão. Seu uso é mais indicado como um critério de escolha entre opções estruturais e não como um modelo de previsão confiável.

Este mecanismo é predominante para a movimentação de cloretos no interior do concreto, considerando boa interconexão entre poros e a presença de um eletrólito. Valores típicos de difusão são da ordem de  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (CASCUDO, 1997).

A migração iônica é o transporte realizado pela ação de campos elétricos. Como os íons de cloreto apresentam carga negativa, eles se movimentam de acordo com a polaridade do campo aplicado. Essa movimentação pode ocorrer pela corrente existente no processo eletroquímico de corrosão, atraindo os íons para a

armadura, ou repelindo-os, quando aplicada a técnica de proteção catódica (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

O fator de maior importância no transporte de substâncias dissolvidas no interior do concreto é a porosidade. A interconexão dos poros, sua distribuição e tamanho determinam a possibilidade de transporte de substâncias e sua velocidade de transporte (CASCUDO, 1997).

## 2.2. CORROSÃO DO AÇO POR CLORETOS

Segundo Andrade (1992), o aço tem uma tendência a retornar ao seu estado natural por meio de um processo de oxidação, que ocorre espontaneamente. A corrosão metálica supõe a existência de uma reação de oxidação e uma de redução, com a circulação de íons por um meio aquoso, criando o efeito de uma pilha. Quando existe a presença de íons agressivos, o efeito é acelerado.

A corrosão desenvolve-se com a presença de reações nas zonas anódicas (corroídas), que leva à dissolução do aço (Equação 1). Estas reações são balanceadas nas zonas catódicas (não corroídas), produzindo ânions hidroxilas (2). Portanto, para que ocorra corrosão em armaduras, é necessária a presença de água e oxigênio. Por fim, os íons  $Fe^{2+}$  migram em direção ao ânodo, produzindo hidróxido ferroso, ou hidróxido de ferro II (3) (CASCUDO, 1997).



Segundo Souza e Ripper (1998), o interior do concreto, de pH bastante alcalino ( $pH > 9$ ) garante a criação da película passivante, uma fina camada de óxido que protege a armadura, processo esse também conhecido como passivação. Isso é demonstrado pelo diagrama de Pourbaix (Figura 1), que relaciona a diferença de potencial em um material com o pH do meio. Este diagrama estabelece as situações de imunidade, passivação, ou corrosão da armadura (CASCUDO, 1997).

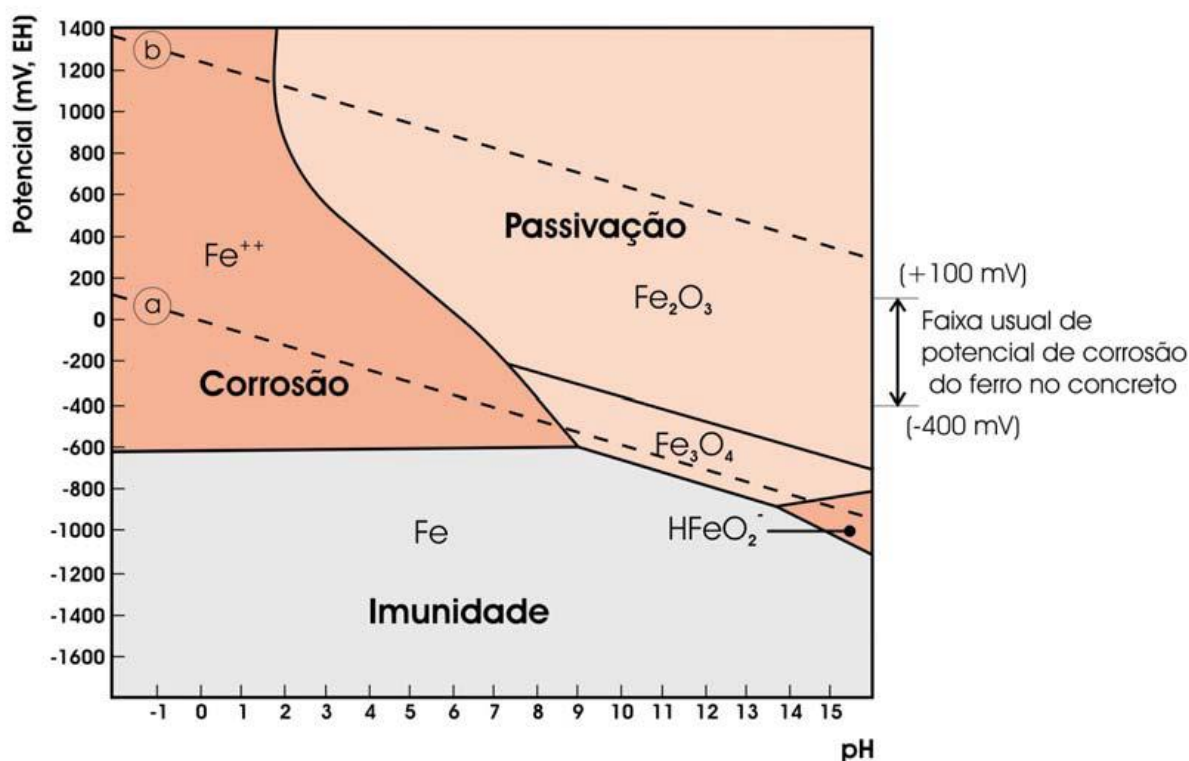


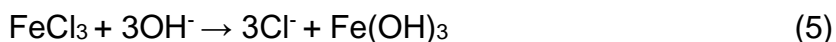
Figura 1 – Diagrama de Pourbaix no sistema Fe – H<sub>2</sub>O a 25°C.  
Fonte: CASCUDO (1997).

No entanto, essa camada não impede que a armadura seja atacada por cloretos e outros íons agressivos. São apontados três mecanismos de corrosão do aço no concreto (SOUZA e RIPPER, 1998):

- Corrosão por tensão fraturante: caso de aços submetidos a grandes esforços mecânicos, como protensão. Em meio agressivo, pode sofrer fratura frágil;
- Corrosão por pites, que surge de forma localizada, provocado pela combinação da presença de íons agressivos, umidade e oxigênio;
- Corrosão generalizada, provocada pelo processo de carbonatação e a consequente redução do pH do concreto.

Segundo Helene (1986), quando existe a presença de íons cloreto, existe a quebra da película existente de passivação, com o elemento funcionando como um catalizador, acelerando a corrosão. Em um primeiro momento, os íons cloreto se conectam ao aço (4) e, após a hidrólise, os íons cloreto são liberados sem serem consumidos e existe a formação de hidróxido de ferro III (5).





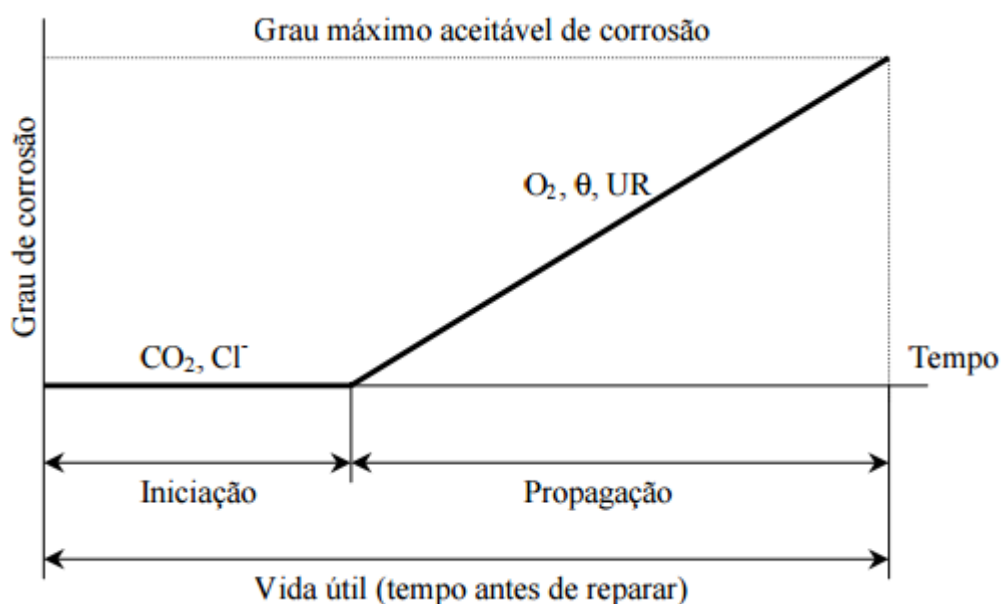
Devido ao alto potencial de corrosão, o teor limite de cloretos é geralmente aceito em 0,4% em relação à massa de cimento, ou entre 0,05% e 0,1% em relação à massa de concreto. Tal limite se refere aos cloretos totais, pois mesmo que uma parcela se combine à componentes do cimento e forme cloroaluminatos, que ficam incorporados às fases sólidas do cimento hidratado, esses cloretos combinados podem voltar à dissolução quando sobre efeito de outros processos, como a carbonatação (ANDRADE, 1992).

O primeiro produto da corrosão é o hidróxido de ferro II,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , que então se transforma em outros produtos. Em meio sem ar, se torna  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetita, em cor preta ou esverdeada. Com a presença do ar, evolui para hidróxido de ferro III,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que tem coloração castanho-alaranjada. A coloração pode ser utilizada, portanto, para identificar se o meio tem excesso ou deficiência de oxigênio. O aparecimento da coloração castanho-alaranjada no concreto indica que a armadura já está em corrosão (GENTIL, 2003).

### 2.3. VIDA ÚTIL

A vida útil de uma estrutura tem diversas interpretações. Segundo Andrade (1992), a vida útil é o período em que a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigidos. No aspecto de corrosão de armaduras, o modelo de vida útil de Tuutti (Figura 2) fornece uma maneira simplificada de observar a vida útil da estrutura.

O período de iniciação é aquele em que os agentes agressivos penetram na camada de cobrimento das armaduras, até que atingem a armadura em quantidade suficiente para eliminar a proteção da camada de passivação e iniciar a corrosão. Uma vez iniciada, entra-se no período de propagação, em que a armadura é consumida pelo processo corrosivo (HELENE, 1993).



**Figura 2 – Modelo de vida útil de Tuutti.**  
**Fonte: ANDRADE (1992)**

Segundo Andrade (2005), existem diversos métodos para determinar a vida útil remanescente de uma estrutura: com base em experiências anteriores, com base em ensaios acelerados, métodos considerando mecanismos específicos de degradação, e as abordagens determinísticas e probabilísticas.

No entanto, não existe consenso entre os modelos. Em exemplo, uma estrutura em orla marítima com vida útil de projeto de 50 anos recebeu a recomendação de utilização de 4,6 cm de concreto de cobrimento para proteção contra cloretos, utilizando a abordagem determinística pela segunda lei de Fick. A mesma situação, sobre o olhar da análise probabilística, recebe a recomendação de 8,3 cm de concreto de cobrimento, para que a probabilidade de iniciação da corrosão após 50 anos seja de 20% (ANDRADE, 2005).

#### 2.4. FATORES RELEVANTES À PENETRAÇÃO DE CLORETOS E CORROSÃO

Diversos fatores influenciam a velocidade e a profundidade de penetração de cloretos no concreto armado, assim como a conseqüente corrosão da armadura uma vez que a frente de penetração a atinge. Os fatores mais relevantes serão abordados a seguir.

### 2.4.1. Temperatura

A temperatura pode atuar de duas maneiras: quando incrementada, aumenta a velocidade de corrosão e a mobilidade iônica, favorecendo seu transporte pela microestrutura; e quando reduzida, promove condensações, que incrementa localmente o teor de umidade, que também pode agir facilitando o transporte (CASCUDO, 1997; ANDRADE, 1992; FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Pereira (2001), quando incrementada a temperatura na cura dos concretos, os concretos utilizando cimento portland CP II F e CP IV obtiveram dois resultados: a redução da penetração de cloretos e o aumento da sua resistência à compressão axial.

Temperaturas baixas durante a cura tem o efeito inverso, aumentando a difusão de cloretos na estrutura. O efeito negativo de temperaturas baixas de cura é reduzido, mas não eliminado, com o aumento do tempo de cura (GJØRV, 2015).

### 2.4.2. Ambiente de exposição

O ambiente é crucial para que uma estrutura esteja em risco de ser atacada por íons cloretos. Além disso, o ambiente pode apresentar outros riscos e influências sobre a estrutura. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) aborda a preocupação com a proteção geral das estruturas com as classes de agressividade ambiental, demonstradas na Tabela 1. Esta tabela serve como base para a determinação de critérios mínimos de cobrimento, resistência, relação a/c e fissuração.

Segundo Gjørv (2015), em algumas situações na atmosfera marítima, o grau de saturação capilar varia entre 80 e 90% na camada de 40 a 50 mm, uma espessura comum para o concreto de cobrimento em ambientes agressivos. A presença de um teor de umidade tão elevado estimula a difusão iônica.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a, b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a, c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

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

<sup>b</sup> 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 menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

#### 2.4.3. Tipo de cimento e adições minerais

Segundo Cascudo (1997), cimentos com adições de escória de alto-forno e materiais pozolânicos (como a cinza volante ou a sílica ativa) apresentam maior compacidade, significando que o concreto se torna menos suscetível a penetração de líquidos, gases e íons. Mesmo que tais adições tendam a piorar a performance do concreto frente à carbonatação, os benefícios causados superam os efeitos deletérios que podem surgir eventualmente.

Quanto às escórias de alto-forno, além de proporcionar menor taxa de difusão iônica, permeabilidade e resistividade, essa adição proporciona maior capacidade de combinação com os íons cloreto, formando o sal de Friedel, que se fixa ao concreto de maneira estável (CASCUDO, 1997).

Segundo Ferreira (2003), as adições minerais melhoram as condições de durabilidade do concreto. As adições minerais, da ordem de até 65%, reduziram a

penetrabilidade dos íons cloreto, também reduzindo a absorção capilar e aumentando a resistividade.

#### 2.4.4. Resistividade elétrica do concreto

Segundo Cascudo (1997), a resistividade elétrica é um parâmetro que depende de outros três fatores: a umidade, a permeabilidade e o grau de ionização do eletrólito do concreto. A resistividade é um dos fatores controladores das reações eletroquímicas dentro do concreto e pode-se observar uma direta relação entre a taxa de corrosão e a condutividade elétrica, inverso da resistividade.

De acordo com Canovas (1988), uma vez que a resistividade elétrica do revestimento que envolve o aço cai abaixo de valores entre 5000 e 10000 Ohm · cm, em conjunto com outros fatores, o processo de corrosão se inicia.

Gjørnv (2015) afirma que, quando a resistividade elétrica do concreto se torna alta o suficiente, em um patamar entre 50 e 70 x 10<sup>3</sup> ohm · cm, a taxa de corrosão pode se tornar muito pequena ou mesmo insignificante.

#### 2.4.5. Cobrimento das armaduras

Segundo Cascudo (1997), o concreto de cobertura sobre a armadura é a primeira barreira física de proteção das armaduras, contra agentes agressivos, oxigênio e umidade, além de garantir um meio alcalino para a criação de uma proteção química. Portanto, quanto maior a camada de cobertura, maior a proteção esperada para as armaduras.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) estipula cobrimentos mínimos, de acordo com a classe de agressividade do ambiente, descritos na Tabela 2.

**Tabela 2 – Cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade ambiental**

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

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contra piso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências deste quadro podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

**Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).**

#### 2.4.6. Relação água/cimento

Segundo Cascudo (1997), a relação água/cimento é um dos parâmetros de maior importância, pois afeta diretamente as características de compacidade, ou porosidade, da pasta de cimento. Uma baixa relação a/c retarda a difusão de cloretos, além de dificultar a entrada de umidade e outros agentes agressivos.

Isso foi corroborado por Nepomuceno (2005) e Pereira (2001), que apontaram que quanto maior a relação a/c, maior porosidade e permeabilidade de um concreto e, à princípio, maior será a penetração de cloretos.

Segundo Olliver e Torrenti (2014), a permeabilidade e a difusão dependem da interconexão dos poros capilares, que por sua vez estão associados à relação água/cimento e à hidratação do cimento. Porém, trabalhar na redução da

interconexão dos poros capilares pode não ter o efeito desejado, pois pode promover o aparecimento de microfissuras.

#### 2.4.7. Resistência à compressão

Embora não seja uma característica diretamente ligada à penetração de cloretos ou à corrosão, a resistência à compressão pode ser utilizada como indicativo da susceptibilidade do concreto ao ataque de cloretos. Segundo Alencar *et al* (2016), concretos de maior resistência em geral apresentam menor permeabilidade, devido a redução da relação a/c.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece resistências mínimas de acordo com o tipo de estrutura e a classe de agressividade ambiental, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 – Relação a/c e classe de concreto de acordo com a agressividade**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	Concreto armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	Concreto protendido	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	Concreto armado	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	Concreto protendido	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

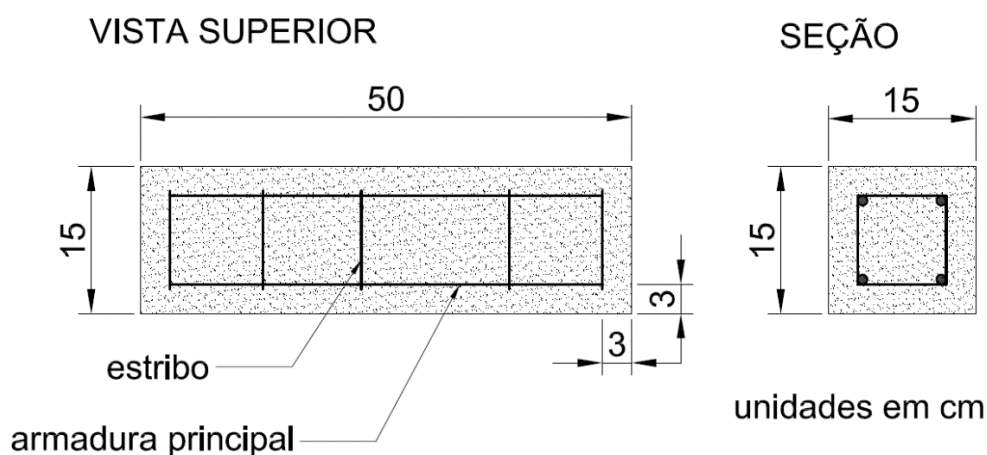
**Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).**

Tendo visto as variáveis que governam a penetração de cloretos e influenciam o processo de corrosão das armaduras no concreto armado, o presente trabalho desenvolveu uma metodologia para que pudesse ser feita uma análise da influência de alguns desses fatores considerando o ambiente de exposição real e um ambiente de exposição simulado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para que fosse possível avaliar a degradação do concreto ao longo do tempo, foram confeccionados 12 corpos de prova prismáticos de dimensões 15 x 15 x 50 cm, armadura principal de 10 mm de diâmetro, cinco estribos de 5 mm de diâmetro distribuídos conforme esquema na Figura 3, e cobrimento de 30 mm. Para garantir esse cobrimento, foram utilizados espaçadores plásticos.



**Figura 3 – Esquema de distribuição de estribos nos corpos de prova.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Produziram-se dois concretos: Um de resistência característica à compressão axial de 30 MPa (C30) e um de 15 MPa (C15), com o consumo de materiais descrito nas tabelas 4 e 5. Esse concreto foi produzido em uma concreteira e após retirado do caminhão-betoneira, foi transportado com carrinhos de mão. O concreto foi distribuído nas formas de madeira utilizando conchas para concreto, em duas camadas distintas, para permitir o correto adensamento manual.

Após a concretagem, as vigas foram cobertas com lonas, para evitar a perda de água. A desforma ocorreu nos dias posteriores e após identificação das peças com caneta pilot, as vigas foram transportadas da concreteira para o laboratório da universidade, onde permaneceram 28 dias em cura dentro de câmara úmida com temperatura de 20°C e umidade relativa do ar superior a 95%.



Tabela 4 – Consumo de materiais para a produção do concreto C15

	CP II-F 32	Areia Natural	Areia Artificial	Brita 1	Água
<b>Consumo (kg)</b>	164	515	515	1112	164
<b>Traço</b>	1,00	3,14	3,14	6,78	1,00

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Consumo de materiais para a produção do concreto C30

	CP II-F 32	Areia Natural	Areia Artificial	Brita 0	Água
<b>Consumo (kg)</b>	280	492	492	926	195
<b>Traço</b>	1,00	1,76	1,76	3,31	0,70

Fonte: Autoria Própria.

Antes de serem colocados em seus ambientes de exposição, os locais de posicionamento dos estribos foram identificados nos corpos de prova com a utilização de um pacômetro Bosch D-tect 150, para facilitar o eventual corte do concreto em etapas futuras. Também foi realizada a medida do peso e dimensões reais dos corpos de prova, para que sua densidade fosse determinada.

Para o controle de qualidade do concreto, e de forma a garantir um padrão nos concretos utilizados, foi realizada a determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias, determinada a partir da metodologia descrita na norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

### 3.2. SITUAÇÕES DE EXPOSIÇÃO

Os corpos de prova prontos foram então distribuídos. A exposição em ambiente real foi realizada em Barra Velha, Santa Catarina, por uma facilidade maior de acesso a diversas situações de exposição. Foram distribuídas 8 vigas da seguinte maneira:

- Uma viga C30 (Identificada como A12) e uma C15 (A24) em zona de respingos de maré, classe de agressividade 4, em um rochedo adentrando o mar, como na Figura 4;

- Duas vigas C15 (A21 e A22) na entrada de uma garagem fechada no térreo, classe de agressividade 3, a aproximadamente 45 metros de distância do mar;
- Duas vigas C30 (A08 e A11) na laje do primeiro pavimento, expostas ao ambiente externo, classe de agressividade 3, a aproximadamente 60 metros de distância do mar;
- Uma viga C30 (A10) e uma C15 (A23) dentro de um apartamento no 5º andar do mesmo edifício, que permaneceu majoritariamente fechado, classe de agressividade 2, com distância direta de aproximadamente 160 metros do mar.



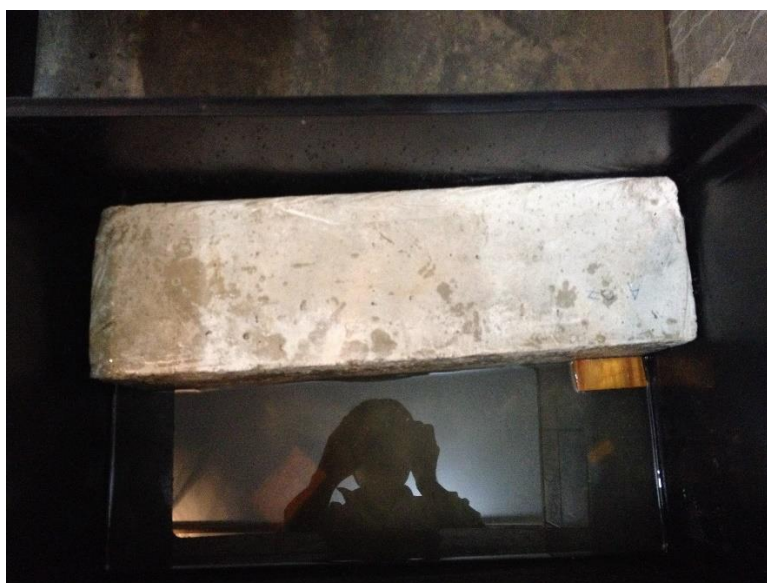
**Figura 4 – Localização dos corpos de prova.**  
**Fonte: Adaptado de Google Earth.**

As vigas foram colocadas e posicionadas de tal maneira que sua exposição fosse maximizada, com a lateral maior exposta na direção do mar e avisos foram pintados nas vigas para que as mesmas não fossem movidas.

Após 16 semanas de exposição, foi realizado o ensaio de resistividade elétrica superficial e a retirada de amostras para análise do estado da viga. Com uma cortadora à disco Stihl TS 420, realizou-se o corte de uma fatia do corpo de prova, para utilização nos ensaios. A superfície exposta pelo corte foi então

protegida com uma camada de epóxi antes de serem devolvidas aos seus ambientes de exposição.

Também foi realizada uma simulação de exposição acelerada ao ambiente marinho com quatro vigas C30. Essas vigas foram colocadas dentro de duas caixas plásticas, preenchidas com solução salina suficiente para que fossem cobertas até próximo de sua metade. Cada viga repousou em dois pequenos tocos de madeira, de forma a também expor o fundo das vigas à solução salina. A Figura 5 ilustra o ambiente de realização do ensaio.



**Figura 5 – Ensaio de simulação acelerado.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Foram utilizados dois sais: cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), nas vigas A05 e A07, e cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), nas vigas A17 e A18. Em ambos os casos, a solução salina foi misturada dentro de um balde até sua dissolução, em uma proporção de 10% de sal em relação ao peso de água, antes de ser despejada dentro da caixa.

Após 4 semanas e 3 dias, as vigas foram removidas de dentro da caixa plástica para a retirada de amostras e realização de ensaios. A superfície exposta foi coberta com uma camada de epóxi, e após seca, os corpos de prova foi devolvida ao ambiente de exposição simulado.

### 3.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

O ensaio de resistividade elétrica é um dos parâmetros utilizados para controlar a velocidade de corrosão das armaduras. Apesar da grande dispersão de dados entre a velocidade de corrosão e a resistividade elétrica, esse método pode ser utilizado para se ter uma escala de grandeza da velocidade de corrosão. (ANDRADE, 1992).

O método de Wenner, descrito na norma ASTM G 57 (2006), utiliza quatro eletrodos conectados ao concreto, espaçados entre si por uma distância “a”, conforme indicado na Figura 6. Nos fios externos, aplica-se uma corrente elétrica e é feita a leitura da diferença de potencial nos pontos internos com um voltímetro. Com esses dados, utiliza-se a equação (6) para a determinação da resistividade elétrica.

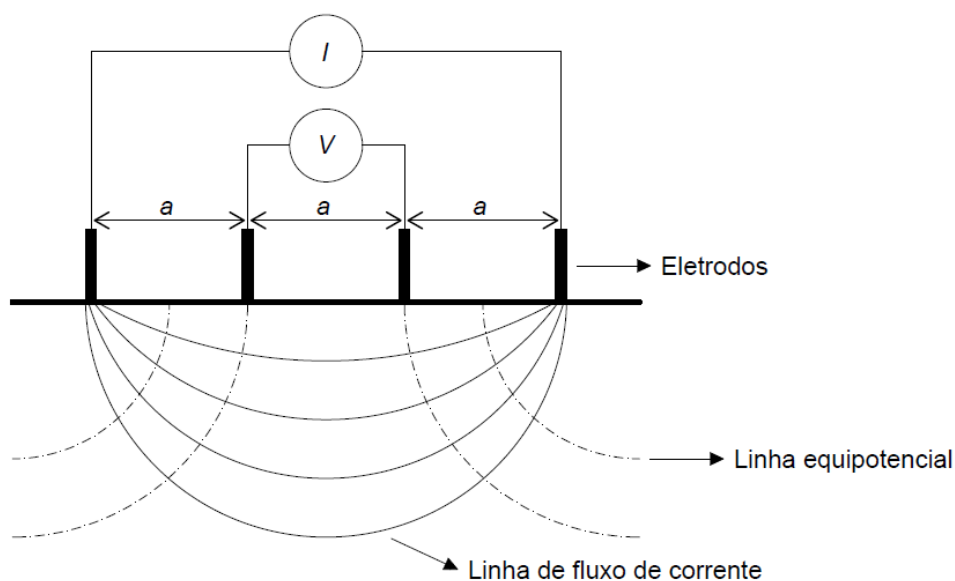


Figura 6 – Esquema de distribuição de eletrodos no método de Wenner.  
Fonte: GJØRV (2015).

$$\rho = 2 * \pi * a * \frac{V}{I} \quad (6)$$

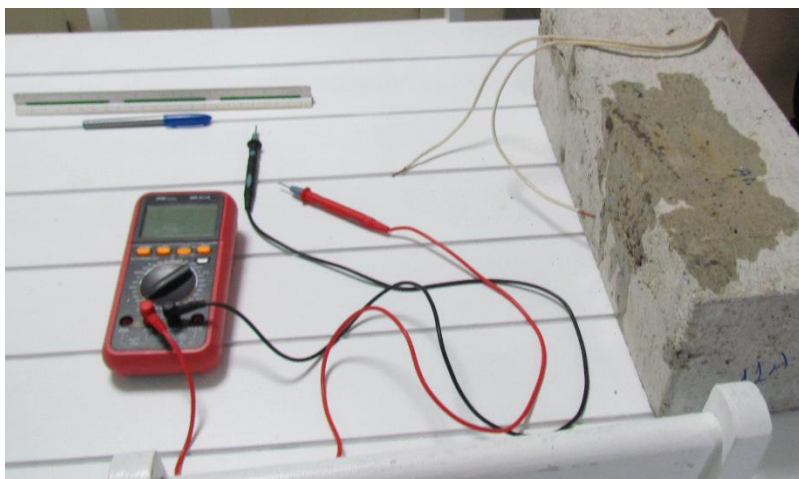
Onde:  $\rho$  é a resistividade elétrica do concreto (ohm.cm);

$a$  é a distância entre os eletrodos (cm);

$V$  é a diferença de potencial medida (Volts);

$I$  é a corrente elétrica aplicada (Amperes).

Para a aplicação dessa metodologia, por falta de uma sonda Wenner específica para a realização desse ensaio, foi desenhado nas vigas quatro pontos equidistantes. Nos pontos externos foram conectados fios elétricos, ligados diretamente à rede elétrica, e nos pontos internos, com o auxílio de um multímetro, foi realizada a medição da diferença de potencial interno. A Figura 7 ilustra os equipamentos utilizados.



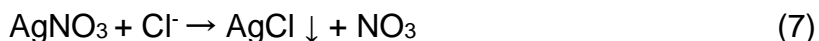
**Figura 7 – Aparelhagem para o ensaio de resistividade elétrica superficial.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A leitura da corrente passando entre os pontos externos é feita conectando-se o multímetro em série ao circuito. Para tal, uma das pontas de prova do multímetro é associada a uma ponta do fio elétrico e a outra ponta de prova fica em contato com um dos pontos externos. Dessa maneira, a corrente atravessa o interior do multímetro, que então realiza sua medição.

### 3.4. COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA ( $\text{AgNO}_3$ )

De acordo com França (2011), o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata foi originalmente normalizado pela norma italiana UNI 7928 (1978), para determinação da penetração da frente de cloretos livres. Tal metodologia é possível pois, quando o nitrato de prata entra em contato com íons cloreto, ocorre a precipitação de cloreto de prata, uma substância de cor branca, conforme a reação

de (7). No entanto, mesmo em situações sem cloretos, o nitrato de prata pode também precipitar como carbonato de prata (8).



Segundo Real *et al.* (2015), não existe consenso acadêmico sobre o ponto em que uma certa concentração de nitrato de prata reage com um teor de cloretos e passa a ser claramente perceptível, conforme demonstrado na Tabela 6. Devido aos mecanismos demonstrados em (8), deve-se preocupar também com o pH do concreto, pois a metodologia se torna inviável em concretos com pH abaixo de 10.

**Tabela 6 – Resumo das concentrações de  $\text{AgNO}_3$  e % de cloretos para detecção de coloração**

<b>Autor</b>	<b>Concentração de <math>\text{AgNO}_3</math></b>	<b>% de cloretos sobre o peso de cimento</b>
Otsuki <i>et al.</i> (1993)	0,1N	0,15%
Collepari (1997)	0,1N	0,01%
Andrade <i>et al.</i> (1999)	0,1N	1,14% $\pm$ 1,4%
Meck & Sirivivatnanon (2003)	0,1N	0,90%
He <i>et al.</i> (2011)	0,1N	0,011% a 2,27%
Kim <i>et al.</i> (2013)	Acima de 0,05N	0,05%

**Fonte: REAL *et al.* (2015)**

Com essas preocupações em mente, optou-se por realizar um ensaio de aspersão de fenolftaleína para avaliar a frente de carbonatação, e utilizar o ensaio colorimétrico para apenas detectar e comparar a frente de penetração de cloretos e não necessariamente determinar a concentração de íons de cloreto no concreto.

O ensaio foi realizado com a aspersão de nitrato de prata 0,05N na superfície cortada. O concreto foi deixado deitado, de forma que o concreto pudesse absorver superficialmente a solução e esta não escorresse, contaminando outras regiões. Após um minuto de exposição, foi medida a distância entre a superfície e a fronteira entre o concreto escuro e claro com o auxílio de um paquímetro. A aspersão e medição da profundidade de penetração foi realizada nas quatro faces.

### 3.5. TITULAÇÃO POTENCIOMÉTRICA

Por limitações de tempo, a análise por titulação potenciométrica foi realizada apenas na superfície mais contaminada, de acordo com a colorimetria. As amostras foram extraídas da fatia de concreto com o auxílio de uma furadeira. Os furos foram realizados numa camada a 1 cm de profundidade em relação à superfície. Como foram utilizadas brocas de até 6 mm de diâmetro, a camada analisada corresponde efetivamente à camada entre 0,7 e 1,3 cm de profundidade do concreto.

Para a determinação da concentração de cloretos, aplicou-se a metodologia usada na norma ASTM C 114 (2007), de forma adaptada e descrita a seguir.

Foram realizados diversos furos, removendo até 20 gramas de concreto. Disso, entre 3 e 5 gramas foram pesadas para utilização. Optou-se pelo peso reduzido, apesar da recomendação de 5 gramas de cimento, pois as concentrações de íons cloretos associa esse peso a teores de até 0,15% de íons na amostra. Também foi realizado o procedimento apenas com água deionizada, para que fosse determinada o ponto de equivalência *blank*.

As amostras foram misturadas dentro de um beaker com 75 mL de água deionizada e 25 mL de ácido nítrico com concentração de 65%. Após a mistura, foi adicionado 1 mL de dióxido de hidrogênio e 3 gotas de indicador metila de laranja diluído em uma proporção de 0,02 g de indicador para 10 mL de álcool etílico 92,8%. A solução foi deixada coberta e em repouso por dois minutos.

Sua coloração era então avaliada. A coloração rosa ou avermelhada indica que o pH se encontra ácido o suficiente para a dissolução dos cristais de concreto. Quando essa coloração não era atingida, adicionava-se mais 2 mL de ácido nítrico, misturava-se e aguardava-se um minuto para que as reações se completassem, até que a amostra atingisse a coloração desejada.

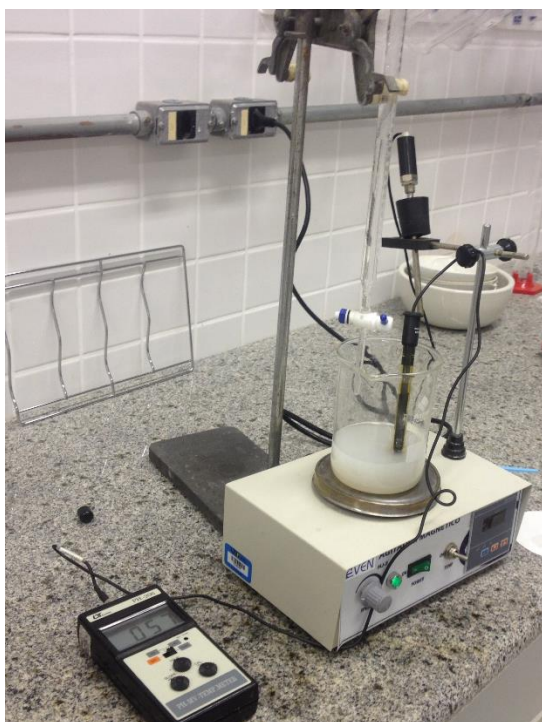
Atingida a coloração, a solução era aquecida até próximo do ponto de ebulição, com a intenção de decompor o ácido remanescente, em uma chapa dentro de uma capela. Ao entrar em ebulição, a solução emitia um gás amarelo-marrom. Nesse ponto, removia-se o beaker da chapa e a solução era mantida em repouso dentro da capela até a eliminação dos gases remanescentes.

A solução já fria era filtrada associando um funil de Büchner com papel filtro a um kitasato de 500 mL e uma bomba de vácuo. Água deionizada foi utilizada para

ajudar na remoção de partículas maiores de dentro do beaker. A solução filtrada era passada para um novo beaker e iniciava-se o processo de titulação potenciométrica.

Com um potenciômetro de bancada Lutron PH-206, também conhecido com PHmêtro, associado a um eletrodo combinado íon-seletivo para cloretos Hanna Instruments HI 4107 colocado dentro da solução, foram realizadas leituras do potencial elétrico (mV) dentro da solução. A Figura 8 ilustra a montagem da aparelhagem. Essas leituras foram realizadas nos seguintes passos sucessivos:

- A solução em seu estado inicial;
- A solução após a adição de 2 mL de cloreto de sódio 0,05 N, com auxílio de uma pipeta graduada e pera de sucção;
- A solução após a adição de 0,5 mL de nitrato de prata 0,05 N, com uma bureta com divisões de 0,05 mL, visando eliminar a parcela estabelecida com água deionizada;
- A solução após adições de 0,2 mL de nitrato de prata sucessivas, com a mesma bureta, até que fossem realizadas pelo menos duas leituras além do ponto de equivalência.



**Figura 8 – Aparelhagem para o ensaio de titulação potenciométrica.  
Fonte: Autoria Própria.**



O ponto de equivalência foi estabelecido com o auxílio da Tabela 7. Adições sucessivas de nitrato de prata alteram o potencial da solução em variações cada vez maiores (Delta mV), até o ponto de equivalência, quando a variação passa a ser menor. O ponto de equivalência exato se encontra dentro do maior valor de Delta mV, e é encontrado com a interpolação descrita na equação (9).

**Tabela 7 – Exemplo da determinação do ponto de equivalência**

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
1,60	125,30		
		5,8	
1,80	119,50		1,5
		7,3	
2,00	112,20		1,1
		8,4	
2,20	103,80		1,4
		9,8	
2,40	94,00		0,6
		9,2	
2,60	84,80		2,3
		6,9	
2,80	77,90		0,8
		6,1	
3,00	71,80		1,3
		4,8	
3,20	67,00		

Fonte: ASTM C 114 (2007).

$$Eq. = Vmin + \left[ \frac{mV1}{mV1+mV2} \right] * \Delta V \quad (9)$$

Onde: Eq. é o ponto de equivalência (mL);

Vmin é o menor volume dentro do maior Delta mV;

mV1 é o valor de Delta<sup>2</sup> mV da linha acima do maior Delta mV;

mV2 é o valor de Delta<sup>2</sup> mV da linha abaixo do maior Delta mV;

$\Delta V$  é a variação volumétrica das adições (mL).

Por fim, com o ponto de equivalência determinado, utiliza-se a equação (10) para determinar a concentração de íons cloreto na amostra analisada.

$$Cl, \% = 3,545 * \frac{[(V1-V2)*N]}{W} \quad (10)$$

Onde: Cl, % é a concentração de cloretos da amostra, em porcentagem;  
 V1 é o ponto de equivalência da amostra (mL);  
 V2 é o ponto de equivalência *blank*, em água deionizada (mL);  
 N é a normalidade exata da solução de 0,05N AgNO<sub>3</sub>;  
 W é o peso da amostra de concreto.

Normalidade é uma forma de expressão da concentração de uma solução, em função da equivalência das reações dentro de uma solução. A normalidade do nitrato de prata foi estabelecida a partir da metodologia de titulação potenciométrica, diferenciando-se da realizada para a leitura *blank* por não passar pelo processo de preparação da amostra e sem a realização de uma adição inicial de 0,5 mL de nitrato de prata 0,05 N. Também foi estabelecida a normalidade do cloreto de sódio ( $N_{NaCl}$ ), a partir da equação (11). Com o valor da média do volume do ponto de equivalência de dois ensaios nessas condições ( $V_N$ ), utilizou-se a equação (12) para determinar a normalidade exata do AgNO<sub>3</sub>.

$$N_{NaCl} = \frac{g_{NaCl}}{V_{H_2O} * PM_{NaCl}} \quad (11)$$

Onde:  $g_{NaCl}$  é o peso de NaCl utilizado da solução de 0,05 N (g);  
 $V_{H_2O}$  é o volume da solução de 0,05 N (mL);  
 $PM_{NaCl}$  é o peso molecular do NaCl, 58,443 g/mol.

$$N = \frac{N_{NaCl}}{V_N} \quad (12)$$

O estabelecimento da normalidade do nitrato de prata a partir desse procedimento, ao invés da determinação da normalidade direta como realizada para o cloreto de sódio, se mostra necessário pois nem todo o nitrato de prata pode ser consumido no período entre leituras, além da concentração do nitrato de prata ser de grande importância para a determinação da concentração exata.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 8 apresenta um resumo dos corpos de prova trabalhados, assim como uma nomenclatura utilizada apenas para fins deste trabalho.

**Tabela 8 – Resumo e identificação dos concretos trabalhados**

<b>Exposição</b>	<b>Nome</b>	<b>Classe de resistência</b>
Respingo de maré	V1	C30
	V2	C15
Laje externa	V3	C30
	V4	C30
Garagem fechada	V5	C15
	V6	C15
Apartamento	V7	C30
	V8	C15
Simulação - NaCl	V9	C30
	V10	C30
Simulação - CaCl <sub>2</sub>	V11	C30
	V12	C30

**Fonte: Autoria Própria.**

Embora tivessem sido tomadas medidas para evitar que a posição das vigas não fossem alteradas no ambiente de exposição externo, nenhuma viga em ambiente externo se manteve na mesma posição que foi deixada.

A viga V1 em exposição aos respingos de maré foi derrubada para dentro do mar, enquanto a V2 ficou “escondida” dentro do rochedo, reduzindo sua exposição. As vigas V5 e V6 dentro da garagem foram movidas durante uma pintura, trocando o seu lado de exposição, assim como as da laje V3 e V4, que por sua vez ficaram “escondidas” atrás de uma viga invertida do prédio. As vigas dentro do apartamento foram movidas durante uma limpeza e ficaram mais protegidas ao serem colocadas contra uma parede.

Por essa variação do posicionamento afetar diretamente o grau de exposição aos agentes agressores e a sua propagação, esses resultados não foram analisados em função da posição de exposição da superfície, mas sim, em função da face com maior contaminação detectada.

#### 4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Após 28 dias da produção do concreto, os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados pela empresa concreteira. A média dos valores de resistência, para o concreto C30, foi de 38 MPa, e para o concreto C15, 17 MPa. Portanto, a resistência de projeto foi atingida, e devem ser observadas divergências razoáveis nos valores de contaminação entre as classes de resistência.

#### 4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

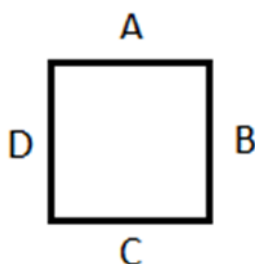
O ensaio foi repetido em três vigas diferentes: V1, V2 e V4. Em todas, não foi obtida leitura alguma com o multímetro utilizado no modo de leitura de corrente, independente da superfície testada. Também tentou-se repetir o ensaio reduzindo a distância entre os eletrodos para 2 cm. O ensaio foi repetido na viga V9, com o mesmo resultado.

Existem duas possibilidades para tal resultado: Uma resistividade elétrica superficial extremamente alta, que impediu a ocorrência de uma corrente; ou algum erro na metodologia utilizada. Devido à falta de leitura no multímetro mesmo em condições extremamente propícias, é provável que a metodologia foi aplicada incorretamente, com superfície de contato insuficiente nos eletrodos utilizados, ou utilização incorreta do multímetro.

#### 4.3. COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA

Para a realização do corte, a cortadora à disco utiliza de água de torneira durante o corte, molhando o concreto e expondo ele a mais cloretos, situação não esperada inicialmente. Optou-se por ignorar essa parcela de cloretos e diminuir a contaminação, realizando cortes rápidos, e secando a superfície do concreto com

panos após o corte. Uma vez que a superfície aparentava estar seca, foram realizadas as aspersões. As faces foram identificadas com auxílio da Figura 9.



**Figura 9 – Identificação das faces da fatia cortada.**  
Fonte: Autoria Própria.

Como as vigas foram movidas em algum ponto durante sua exposição, não fez sentido identificar o sentido do mar em relação as faces, ou organizar os dados em função da face com maior exposição ao mar. As medidas obtidas nos concretos expostos ao ambiente marítimo externo estão compiladas na Tabela 9.

**Tabela 9 – Medidas da frente de penetração de íons cloreto em exposição externa, em mm.**

	Respingo de maré		Laje externa		Garagem do térreo		Apartamento	
Concreto	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
A	4,0	<b>18,0</b>	0,0	1,5	<b>5,0</b>	3,0	1,0	<b>3,0</b>
B	10,0	10,0	<b>6,0</b>	0,0	2,0	2,5	0,0	<b>3,0</b>
C	<b>17,2</b>	<b>18,0</b>	3,0	0,0	3,0	<b>7,0</b>	<b>2,5</b>	2,5
D	12,0	8,0	2,0	<b>2,0</b>	2,0	3,5	1,5	<b>3,0</b>

Fonte: Autoria Própria.

Para os concretos expostos em ambiente simulado, optou-se por não realizar a aspersão em uma das laterais após a realização de um ensaio mostrar os mesmos resultados nas faces B e D. Os resultados se encontram compilados na Tabela 10. O valor destacado na tabela é o máximo do corpo de prova.

**Tabela 10 – Medidas da frente de penetração de íons cloreto em simulação, em mm.**

	Simulação - NaCl		Simulação - CaCl <sub>2</sub>	
Concreto	V9	V10	V11	V12
A	0,0	0,0	0,0	0,0
B	8,0	3,0	10,2	<b>7,3</b>
C	<b>11,5</b>	<b>8,3</b>	<b>12,0</b>	6,5

Fonte: Autoria Própria.

Também foi realizado o ensaio de aspersão com fenolftaleína, com resultados compilados na Tabela 11. Não foi observada a necessidade de continuar a realização desse ensaio, uma vez que nenhum dos corpos de prova testados apresentou uma frente de carbonatação mais avançada que a frente de íons cloreto.

**Tabela 11 – Medidas da frente de carbonatação, em mm.**

	Respingo de maré		Laje externa		Garagem do térreo		Apartamento	
	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	
Concreto	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	
A	1,0	0,0	0,0	<b>3,0</b>	<b>2,3</b>	0,0	<b>1,3</b>	
B	<b>1,6</b>	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	
C	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	
D	0,8	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	

**Fonte: Autoria Própria.**

O ensaio da frente de carbonatação demonstra duas coisas: O concreto C30, por fatores como uma menor relação a/c, maior consumo de cimento e utilização de agregado mais fino e fácil de ser compactado, não apresentou carbonatação de maneira sensível ao ensaio. O concreto C15, pelos motivos opostos, apresentou carbonatação em todas as situações de exposição, sendo ainda maior na pior situação de exposição, dentro de uma garagem. No entanto, a frente de carbonatação ficou atrás da frente de penetração de cloretos, portanto, o ensaio tem validade.

Devido dificuldades relacionadas a manutenção da situação de exposição dos corpos de prova, torna-se difícil realizar uma comparação direta da penetração de íons cloreto. No caso dos concretos em zona de respingo de maré, o concreto mergulhado passou a receber uma exposição mais elevada, justificando os valores apresentados pelo concreto V1 em relação ao V2. Mesmo assim, o concreto de menor resistência apresentou um valor de penetração absoluto maior. Em ambos, o efeito de 16 semanas de exposição é mais grave do que inicialmente esperado quando compara-se o resultado obtido ao estudo de Romano (2009). Isso se deve principalmente à relação a/c utilizada, muito acima do limite estabelecido em norma.

Uma situação similar ocorre ao se comparar o concreto V3 e os concretos V5 e V6, que apresentam valores de penetração semelhantes. Todavia, a situação de exposição mais grave do concreto V3, de uma laje externa em relação à uma

garagem protegida, demonstra a tendência do concreto de menor resistência a também ter maiores índices de penetração de cloretos.

Na exposição na laje externa, é provável que a proteção provida pela viga V3 estar acima da V4, combinada com a presença de outros corpos de prova, tenha sido suficiente para que a exposição do V4 tenha sido tão baixa em relação ao outro corpo de prova. Todavia, não é possível confirmar essa possibilidade ao invés de atribuir a divergência à mera aleatoriedade, inerente da produção do concreto.

Ao compararmos os resultados no geral, se torna bastante claro que o ambiente de exposição é um fator de grande importância para a análise da frente de penetração de íons cloreto. Diferente do que as questões simplificadas indicam, existe uma variação muito grande dentro do universo de exposição na região à beira-mar. O V2, por exemplo, teve um valor de penetração 3,6 vezes que o maior valor do V5, 2,57 vezes para o V6 e 6 vezes para o V8. Algo semelhante ocorre ao compararmos o concreto V1 aos demais: 2,87 para o V3, 8,6 vezes para o V4 e 6,88 vezes para o V7. Mesmo com outros fatores a serem considerados, existe a sinalização de que esses ambientes são distintos e não devem ser simplificados dentro de uma mesma categoria.

Outro fator de importância é a face analisada. A Tabela 12 ilustra a divergência entre as faces em exposição, colocando o percentual de penetração da frente de íons cloreto em relação ao maior valor da peça. Somente um concreto, o V8, teve uma distribuição semelhante de cloretos detectada em todas as suas faces. Logo, apesar de questões simplificadoras pedirem por um cobrimento de concreto igual em todas as faces, esses resultados preliminares apontam que é possível trabalhar com cobrimentos menores sem pôr em risco a armadura da estrutura.

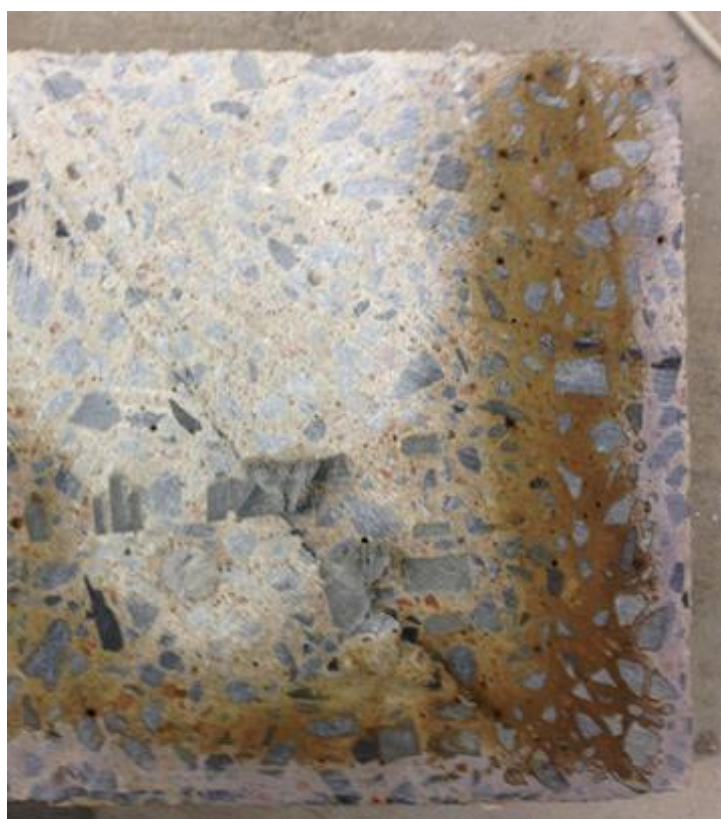
**Tabela 12 – Percentual de penetração em relação ao maior valor detectado**

	Respingo de maré		Laje externa		Garagem do térreo		Apartamento	
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Concreto	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
A	23	100	0	75	100	43	40	100
B	58	56	100	0	40	36	0	100
C	100	100	50	0	60	100	100	83
D	70	44	33	100	40	50	60	100

**Fonte: Autoria Própria.**

Em relação aos ensaios em ambiente simulado, é possível notar uma grande variação entre as faces dos corpos de prova, mesmo os presentes dentro da mesma caixa, como a penetração quase dobrada entre a face C dos concretos V11 e V12, e na face B dos concretos V9 e V10. Essa alta variabilidade utilizando o mesmo sal foi provavelmente causada, novamente, pela natureza não-homogênea do concreto. Os resultados também apontam que a utilização de  $\text{CaCl}_2$ , mesmo com um dobro de íons cloreto para possível formação de cloreto de prata, não modificou os resultados obtidos na mesma proporção que a disponibilidade extra de íons.

É também notável que, com a água permanecendo parada na simulação, a penetração de cloretos na lateral do concreto não mostra uma fronteira entre o concreto mergulhado e o concreto exposto ao ar, em nenhum dos concretos. Isso é exemplificado na Figura 10, que aponta para uma maior complexidade nos efeitos da difusão dos íons cloreto dentro da simulação.



**Figura 10 – Penetração de cloretos na lateral do concreto V12.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A utilização da metodologia para ensaio acelerado apresentou resultados mistos. Embora a simulação tenha atingido valores altos e de forma mais rápida do



que a exposição real, a falta de diferença entre o ponto exposto ao ar e o exposto à água torna difícil extrapolar os valores para a situação real, pois a atuação de diferentes mecanismos de transporte de íons entram em ação e se tornam mais um fator a ser considerado. Devido à falta de dados, não foi possível criar uma extrapolação do ambiente simulado para o ambiente real.

#### 4.4. TITULAÇÃO POTENCIOMÉTRICA

Para a realização desse ensaio em específico, foram encontradas diversas dificuldades no caminho. A primeira delas foi a realização da preparação da amostra. A princípio, utilizando-se de amostras de concreto acima de 8 gramas, existia uma demanda de adições muito além dos 25 mL iniciais de ácido nítrico para que o pH desejado fosse atingido. Com o excesso de ácido, não era possível decompor o ácido de forma suficiente para a realização do ensaio, sem também arriscar a perda de íons cloreto no vapor de água. Além disso, devido aos riscos envolvidos na manipulação de ácido nítrico, assim como a liberação de gases tóxicos quando aquecido, se mostrou necessária a utilização de uma capela para a execução segura do ensaio.

Reduzindo a amostra e a demanda por ácido nítrico, precisou-se avaliar o estado de funcionamento do eletrodo combinado. Inicialmente, o eletrodo não detectava variações entre soluções distintas, nem eram observadas variações do potencial durante a realização da titulação potenciométrica. Ou, quando detectava variações, elas ocorriam lentamente, na ordem de 1 mV a cada 15 segundos. Após diversas tentativas de reparo, estabeleceu-se que os problemas surgiram de um erro na conservação do eletrodo, que foi guardado por anos sem a remoção de sua solução interna de nitrato de potássio 1 M. Essa solução interna secou e cristalizou, impedindo o livre fluxo da solução para a câmara interna do eletrodo, acessada pela junção cerâmica demonstrada na Figura 11, e portanto, impedindo a execução das leituras.

Outro fator foi a idade da solução de nitrato de potássio disponível, que poderia já não estar em um estado de utilização confiável. Optou-se por também produzir uma nova solução de nitrato de potássio 1 M para ser usada. Após uma

limpeza com água deionizada buscando eliminar qualquer cristalização externa, e utilizando a nova solução interna, o eletrodo aparentou passar a funcionar normalmente. Infelizmente, não foi possível determinar se o eletrodo se encontrava em um estado confiável.



Figura 11 – Desenho esquemático do eletrodo.  
Fonte: HANNA Instruments (2016).

Todavia, com o eletrodo em estado de funcionamento aparente, foram realizados os ensaios de titulação no concreto sem maiores problemas. A leitura *blank* determinou que um volume de 0,766 mL de nitrato de prata era consumido pelo cloreto de sódio adicionado de maneira inerente ao processo. A Tabela 13 apresenta as concentrações obtidas ao aplicar a equação (10). As leituras de todas as etapas realizadas dos ensaios de titulação encontram-se no Apêndice A.

Até então, estava sendo utilizada o valor temporário de  $N = 0,21$  para a normalidade do nitrato de prata, para avaliação dos resultados durante a execução dos ensaios. Infelizmente, foi somente nesse ponto que se percebeu que o cloreto de sódio adquirido estava na concentração de 5% ao invés da concentração de 0,05 N. Para a produção de uma concentração de 0,05 N, utiliza-se 2,9222 gramas de NaCl por litro de água, enquanto para produção de uma concentração de 5% utiliza-se 50 gramas de NaCl por litro de água, concentração 17 vezes maior. Aplicando-se a equação (11), a normalidade dessa concentração de 5% NaCl é de 0,856 N.

**Tabela 13 – Concentração de íons cloreto na amostra analisada**

Situação	Concreto	Cl (%)
Respingo de maré	V1	0,251
	V2	0,619
Laje externa	V3	0,074
	V4	0,014
Garagem do térreo	V5	0,134
	V6	0,027
Apartamento	V7	0,083
	V8	0,114
Simulação - NaCl	V9	0,020
	V10	0,506
Simulação - CaCl <sub>2</sub>	V11	0,186
	V12	0,206

**Fonte: Autoria Própria.**

Após essa correção da normalidade da solução de NaCl, foram realizados dois ensaios para avaliação da normalidade do nitrato de prata e com a aplicação da equação (12), a média calculada é de 3,544 N, valor 16,88 vezes maior que o temporário de 0,21. A Tabela 14 apresenta o resultado utilizando essa normalidade.

**Tabela 14 – Concentração corrigida de íons cloreto na amostra analisada**

Situação	Concreto	Cl (%)
Respingo de maré	V1	4,236
	V2	10,444
Laje externa	V3	1,250
	V4	0,233
Garagem do térreo	V5	2,254
	V6	0,453
Apartamento	V7	1,398
	V8	1,917
Simulação - NaCl	V9	0,337
	V10	8,537
Simulação - CaCl <sub>2</sub>	V11	3,142
	V12	3,471

**Fonte: Autoria Própria.**

Comparando os valores entre si, ao se levar em consideração o ensaio de aspersão de nitrato de prata, temos algumas tendências que dão validade para o ensaio. Em geral, concretos C15 apresentaram concentrações de cloreto mais elevadas que os concretos C30. Ambientes de exposição mais agressivos, como a

região de respingo de maré, apresentou resultados mais elevados que os demais ambientes de exposição. Em concretos iguais, mas com penetração de íons cloreto divergente, caso do V3 e V4, a concentração detectada foi maior no concreto que aparentou estar mais contaminado. Concretos com penetração de íons semelhantes, caso do V7 e V8, apresentaram concentrações semelhantes.

No entanto, diversas divergências também aparecem. No caso dos concretos V5 e V6, colocados na mesma situação de exposição, o concreto mais contaminado segundo a aspersão de nitrato de prata tem apenas uma fração de concentração de íons cloreto na camada de 1 cm. O mesmo ocorre, de maneira ainda mais díspar, entre os concretos V9 e V10. E no caso dos concretos V11 e V12, a disparidade dos resultados na penetração da frente de íons resultou em uma semelhança bastante grande de concentração de íons cloreto.

Além disso, é extremamente improvável que concentrações tão altas sejam reais, levando em consideração estudos como o realizado por Romano (2009). Uma explicação para tais valores é a adição de 2 mL de NaCl 5% corresponder a 0,1 g de sal puro. Isso corresponde de 2,5% até 8% do peso de concreto em pó utilizado nos ensaios, sendo que o limite recomendado pela norma é de até 0,15% de cloretos. É também possível que o eletrodo, embora esteja funcionando, não está em um estado confiável para a obtenção de resultados a partir da metodologia de titulação potenciométrica. Portanto, conclui-se que os resultados aqui apresentados por este ensaio não correspondem com a concentração real de íons cloreto presente no concreto, e não podem ser utilizados para realizar qualquer tipo de avaliação da qualidade ou da exposição do concreto.

Foram realizadas diversas metodologias para verificar o avanço da frente de penetração de cloretos. Embora os ensaios realizados não tenham provido todas as informações desejadas, devido alguns erros e imprevistos, os resultados apresentam indícios para a existência de uma maior concentração de cloretos no concreto menos resistente, assim como diferenças razoáveis entre as faces analisadas dentro de um mesmo corpo de prova.

## 5 CONCLUSÕES

Diferente do que as simplificações apresentadas na norma NBR 6118 (ABNT, 2014) indicam, é possível encontrar uma enorme divergência de valores dentro de uma mesma categoria de exposição. Dentro de um mesmo concreto, a mudança da face avaliada pode reduzir significativamente o valor de penetração. No entanto, o afastamento de 50 metros do mar provoca uma grande redução de exposição aos íons cloreto, justificando a separação das classes de agressividade.

Os valores de penetração de cloretos encontrados preocupam ao se considerar que versões anteriores eram menos exigentes quanto aos requerimentos do concreto utilizado, mas também indicam que existem dois fatores de grande importância na determinação do risco do aparecimento de patologias: a real concentração de agentes agressores no ambiente; e a relação entre esses agentes agressores e a face do concreto avaliada.

Contudo, devido à limitações no estudo, na execução dos ensaios e no tempo disponível, não foi possível a realização da análise como foi inicialmente proposta. O real efeito da progressão da frente de penetração de íons cloreto não é possível de ser exposta com apenas um ensaio no tempo, pois esta não avança de maneira linear. É necessária a continuação dos ensaios antes que os resultados da simulação possa ser extrapolado para o ambiente real.

Com os dados atualmente disponíveis, o comportamento da frente de penetração de íons cloreto na simulação, em conjunto com as variações de resultados em concretos produzidos e ensaiados de forma idêntica, sinaliza que essa metodologia deve ser utilizada com cuidado no futuro para que possa gerar qualquer garantia da resistência da estrutura contra agentes patológicos.

A metodologia adotada tem potencial para ser utilizada novamente. A aspersão de nitrato de prata, devido a simplicidade de realização e razoável confiabilidade uma vez associada à aspersão de fenolftaleína, pode ser utilizada no futuro como meio de controle da progressão da frente de íons cloreto. Faltou a associação do ensaio a uma concentração de íons cloreto, que deveria ter sido realizada pelo ensaio de titulação potenciométrica. Devido ao pouco tempo de exposição, o concreto armado ainda não havia atingido um estado que propicia o

início de corrosão, reduzindo a importância da realização do ensaio resistividade elétrica do concreto.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Buscar uma metodologia simplificada para a realização da concentração de íons cloreto no concreto, devido ao alto custo e demanda de tempo apresentada pela execução da titulação potenciométrica;
- Desenvolvimento de um melhor sistema para a manutenção do concreto em seus ambientes de exposição, para que não sejam movidos e exista maior controle sobre a exposição das diferentes faces;
- Utilização de concretos de qualidade mais baixa, principalmente na relação a/c, de forma que resultados mais sensíveis sejam produzidos em um curto espaço de tempo;
- Avaliar o processo de carbonatação do concreto, ao invés de apenas o efeito de íons cloreto, pois a progressão das patologias raramente ocorre exclusivamente em apenas uma das duas categorias.
- Unir o estudo da carbonatação do concreto com o estudo de cloretos. Embora mais trabalhoso, a ação dos agentes patológicos é bastante semelhante, assim como sua influência dentro do concreto, fazendo sentido realizar um trabalho estudando ambas as frentes.
- Observar a influência da água utilizada no arrefecimento da máquina de corte de concreto. Não se sabe exatamente a influência que a utilização de água tratada, com cloretos, teve sobre o estudo, e a mesma pode não ser desprezível, conforme foi considerado aqui.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, R. T. RODRIGUES, R. L. OLIVEIRA, K.M.D. VASCONCELOS, N. R. DIÓGENES, A. G. Análise comparativa entre ensaios da penetração de água e da resistência do concreto. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT, 2, 2016, Belém do Pará. **Anais...** São Leopoldo: Casa Leiria, 2016. 1 CD-ROM.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 8094 - Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à névoa salina - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement – C 114. **Annual Book of ASTM Standard**, 2007.

\_\_\_\_\_. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method – G 57. **Annual Book of ASTM Standard**, 2006.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, J. J. de O. Vida útil das estruturas de concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2.

BASHEER, L.; KROOP, J.; CLELAND, D. J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review**. Construction and Building Materials, 2001.

BAUER, E. **Avaliação da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CANOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2.

FOX, R., MCDONALD, W., ALAN, T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

FRANÇA, C. B. de. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HANNA INSTRUMENTS. **Manual de Instruções Eletrodo de Íons Específicos de Cloreto**. São Paulo, 2016. Disponível em: < [http://hannainst.com.br/suporte/downloads/doc\\_download/119-manual-hi-4007-hi-4107-brasil](http://hannainst.com.br/suporte/downloads/doc_download/119-manual-hi-4007-hi-4107-brasil)>, acessado em: out. 2016.

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



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

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2.

OLLIVER, J. P. TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014.

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 Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

REAL, L. V. OLIVEIRA, D. R. B. SOARES, T. MEDEIROS, M. H. F. Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista ALCONPAT**, Mérida, México, v. 5, n. 2, p. 151-161, ago. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-68352015000200151&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000200151&lng=es&nrm=iso)>. Acesso em: 6 out. 2016.

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

ROMANO, F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

**APÊNDICE A – Dados obtidos no preenchimento de tabelas para o ensaio de titulação potenciométrica**

**Água Deionizada – *Blank***

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	123		
		3	
0,50	126		0
		3	
0,70	129		1
		4	
0,90	133		2
		2	
1,10	135		0
		2	
1,30	137		1
		1	
1,50	138		

Amostra	0 g
Leitu. s/ NaCl	121 mV
V2	0,767 mL

**V1**

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	102		
		1	
0,50	103		0
		1	
0,70	102		0
		1	
1,10	101		0
		1	
1,50	102		0
		1	
2,00	103		2
		3	
2,20	106		1
		2	
2,40	108		0
		2	
2,60	110		1
		1	
2,80	111		

Amostra	4,054 g
Leitu. s/ NaCl	101 mV
Eq.	2,133 mL
Cl (%)	0,251
Cl (%) Real	4,236

## V2

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	115		
0,50	113	2	2
0,70	113	0	1
0,90	112	1	1
1,10	112	0	1
1,30	111	1	0
1,50	110	1	0
1,70	109	1	0
1,90	108	1	1
2,10	106	2	0
2,30	104	2	1
2,50	103	1	0
2,70	102	1	1
2,90	100	2	1
3,10	99	1	2
3,30	102	3	1
3,50	104	2	4
3,70	110	6	3
3,90	113	3	0
4,10	116	3	

Amostra	3,426 g
Leitu. s/ NaCl	130 mV
Eq.	3,614 mL
Cl (%)	0,619
Cl (%) Real	10,444

## V3

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	145	4	
1,00	141	41	37
1,20	182	15	26
1,40	197	9	6
1,60	206	7	2
1,80	199	5	2
2,00	194	28	23
2,20	166	18	10
2,40	148		

Amostra	3,525 g
Leitu. s/ NaCl	160 mV
Eq.	1,117 mL
Cl (%)	0,074
Cl (%) Real	1,250

## V4

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	109,00		
0,60	108,00	1	0
0,80	107,00	0	1
1,00	107,00	0	0
1,20	107,00		

Amostra	1,796 g
Leitu. s/ NaCl	109 mV
Eq.	0,8 mL
Cl (%)	0,014
Cl (%) Real	0,233

## V5

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	99,00	0	
0,60	99,00	0	0
0,80	99,00	1	1
1,00	100	4	3
1,20	104	1	3
1,40	105	0	1
1,60	105		

Amostra	1,858 g
Leitu. s/ NaCl	97 mV
Eq.	1,1 mL
Cl (%)	0,134
Cl (%) Real	2,254

## V6

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	108		
0,60	107	1	1
0,80	105	2	2
1,00	101	4	2
1,20	99	2	1
1,40	96	3	2
1,60	95	1	

Amostra	3,697 g
Leitu. s/ NaCl	129 mV
Eq.	0,9 mL
Cl (%)	0,027
Cl (%) Real	0,337

## V7

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	62,00	1	
0,60	63,00	2	1
0,70	65,00	1	1
0,80	66,00	3	2
0,90	69,00	2	1
1,00	71,00	1	1
1,10	72,00	1	0
1,20	73,00		

Amostra	1,498 g
Leitu. s/ NaCl	59 mV
Eq.	0,933 mL
Cl (%)	0,083
Cl (%) Real	1,398

## V8

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	83,00	1	
0,60	84,00	1	0
0,80	83,00	1	0
1,00	84,00	2	1
1,20	86,00	1	1
1,40	87,00	1	0
1,60	88,00	1	0
1,80	89,00		

Amostra	2,185 g
Leitu. s/ NaCl	80 mV
Eq.	1,1 mL
Cl (%)	0,114
Cl (%) Real	1,917

**V9**

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	138,00	0	
0,50	138,00	2	2
0,70	140,00	4	2
0,90	144,00	2	2
1,10	146,00	1	1
1,30	147,00		

Amostra	1,242 g
Leitu. s/ NaCl	132 mV
Eq.	0,8 mL
Cl (%)	0,020
Cl (%) Real	0,337

**V10**

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	95,00		
2,00	97,00	2	1
2,50	98,00	1	0
2,70	99,00	1	4
2,90	104,00	5	1
3,10	110,00	6	5
3,30	111,00	1	0
3,50	112,00	1	0
3,70	111,00	1	

Amostra	3,189 g
Leitu. s/ NaCl	93 mV
Eq.	2,933 mL
Cl (%)	0,506
Cl (%) Real	8,537

## V11

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	101,00	1	
0,50	100,00	3	2
0,70	103,00	3	0
0,90	106,00	3	0
1,10	109,00	4	1
1,30	113,00	6	2
1,50	119,00	4	2
1,70	123,00	4	0
1,90	127,00	4	0
2,10	131,00		

Amostra	2,533 g
Leitu. s/ NaCl	92 mV
Eq.	1,4 mL
Cl (%)	0,186
Cl (%) Real	3,142

## V12

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0,00	61,00		
0,50	64,00	3	3
0,70	64,00	0	1
0,90	65,00	1	1
1,10	67,00	2	1
1,30	70,00	3	2
1,50	75,00	5	3
1,70	77,00	2	1
1,90	80,00	3	



Amostra	2,220 g
Leitu. s/ NaCl	69 mV
Eq.	1,38 mL
Cl (%)	0,206
Cl (%) Real	3,471

### Normalidade 1

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0	36		
0,2	38	2	0
0,4	40	2	1
0,6	37	3	2
0,8	38	1	0
1	37	1	

### Normalidade 2

AgNO <sub>3</sub> (mL)	Leitura (mV)	Delta mV	Delta <sup>2</sup> mV
0	33		
0,2	34	1	0
0,4	35	1	2
0,6	32	3	2
0,8	33	1	0
1	32	1	