

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

GABRIELA GUZZO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO  
CONVENCIONAL E DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO FRENTE À CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

GABRIELA GUZZO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO  
CONVENCIONAL E DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO FRENTE À CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer.

CURITIBA

2018

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO CONVENCIONAL E DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO FRENTE À CONTAMINAÇÃO POR CLORETOS**

Por

**GABRIELA GUZZO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no segundo semestre de 2018 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

---

Orientador – Wellington Mazer, Dr.

UTFPR

---

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dra.

UTFPR

---

Prof. Arthur Medeiros, Dr.

UTFPR

---

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso aqui minha gratidão a todos aqueles que me deram incentivo e apoio durante toda a trajetória dessa pesquisa.

À minha família, por me amparar em todas as situações que eu, sozinha, não conseguia carregar. À minha mãe, pai e irmã, que sempre estiveram presentes mesmo que distantes, me apoiando e me dando esperanças de que tudo daria certo.

Às minhas amigas, Camila Betanin, Camila Sequinel e Elisa Lowen que sempre me deram amor e carinho em todos os momentos e estiveram sempre ao meu lado, e aos demais amigos que fizeram da minha vida mais alegre.

Ao meu orientador Wellington Mazer pela disposição em colaborar com a minha pesquisa e me mostrar o caminho a ser percorrido, e aos professores Aduino José Miranda de Lima e Arthur Medeiros, que compartilharam seus conhecimentos comigo.

Por fim, agradeço a Deus, por me proporcionar saúde física e mental para que eu pudesse realizar essa tarefa, e por colocar no meu caminho pessoas maravilhosas que tornaram a caminhada mais agradável e bonita.

## RESUMO

GUZZO, Gabriela. Avaliação do Comportamento do Concreto Convencional e do Concreto de Ultra-Alto Desempenho Frente à Contaminação por Cloretos. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A durabilidade das estruturas de concreto armado vem sendo preocupação constante no campo da engenharia civil. Dentre as causas mais comuns de degradação está a corrosão das armaduras, que pode ser ocasionada pelo ataque de íons cloreto. Diversos fatores influenciam na penetração desses íons, inclusive os materiais, a relação água/cimento e o ambiente de exposição no qual esses elementos estruturais se encontram. Este trabalho teve por objetivo analisar e comparar o comportamento do concreto convencional e do concreto de ultra-alto desempenho frente à contaminação por cloretos. Os ensaios utilizados para avaliação foram o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata e o método de Volhard, aplicados a corpos de prova imersos em solução de cloreto de sódio havia 24 meses. O estudo revelou que, ainda que apresente maior concentração superficial de cloretos, em torno de 0,88% em relação à massa de cimento, o concreto de ultra-alto desempenho se mostra mais resistente à penetração desses íons quando comparado ao concreto convencional, uma vez que a média de profundidade de penetração obtida foi de 1,41 milímetros, o que pode ser explicado pelas características desse material, que o torna superior ao concreto convencional e dificulta a entrada desse agente agressivo.

**Palavras-chave:** Corrosão. Cloretos. Concreto de ultra-alto desempenho.

## ABSTRACT

GUZZO, Gabriela. Evaluation of the Behavior of Conventional Concrete and Ultra-High Performance Concrete Against Chloride Contamination. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The durability of reinforced concrete structures has been a constant concern of civil engineering. Among the most common causes of degradation is the corrosion of the reinforcement, which can be caused by the attack of chloride ions. Several factors influence the penetration of these ions, including materials, the water/cement ratio and the exposure environment in which these structural elements meet. The objective of this research was to analyze and compare the behavior of conventional concrete and ultra-high performance concrete against chloride contamination. The tests used for the evaluation were the colorimetric method of silver nitrate spray and the Volhard method, applied to specimens immersed in sodium chloride solution for 24 months. The research revealed that, although it presents a higher surface concentration of chlorides, around 0,88% in relation to the cement mass, the ultra-high performance concrete is more resistant to the penetration of these ions when compared to conventional concrete, since the average depth of penetration obtained was 1,41 millimeters, which can be explained by the characteristics of this material, which makes it superior to the conventional concrete and hinder the entry of this aggressive agent.

**Keywords:** Corrosion. Chlorides. Ultra-high performance concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo esquemático da vida útil das estruturas de concreto baseado nos modelos propostos por Tuutti (1982) e Helene (1993b). .....	17
Figura 2 - Modelo de corrosão das armaduras do concreto .....	18
Figura 3 - Corrosão em aço por ataque de cloretos .....	20
Figura 4 - Efeito da resistência à compressão na profundidade de penetração de íons cloreto.....	23
Figura 5 - Zonas de agressividade marinha .....	24
Figura 6 - Comparação de texturas entre CAD (esquerda) e CPR (direita) .....	28
Figura 7 - Passarela Seonyu, Coréia do Sul. ....	31
Figura 8 - Curvas granulométricas das areias.....	34
Figura 9 – Verificação da concentração superficial de cloretos.....	38
Figura 10 – Armazenamento e identificação das amostras.....	39
Figura 11 – Preparação da solução. ....	39
Figura 12 - Concentração superficial de cloretos no concreto convencional.....	43
Figura 13 - Concentração superficial de cloretos no concreto de pós-reativos. ....	43
Figura 14 - Penetração de cloretos no CCV (esquerda) e no CPR (direita).....	45
Figura 15- Perfil de penetração de íons Cloretos para a amostra de 18 meses de idade na temperatura de 20°C. ....	48
Figura 16 - Teores de cloretos obtidos em corpos de prova de concreto de alto desempenho após 15 meses de exposição em solução e NaCl .....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações técnicas do cimento CP V-ARI .....	33
Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do superplastificante .....	34



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de Variância ANOVA.....	40
Tabela 2 - Resultados obtidos de profundidade de penetração de cloretos nos concretos.....	44
Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA Profundidade de penetração de cloretos...	44
Tabela 4 - Resultados obtidos da determinação do teor de cloretos pelo Método de Volhard.....	46
Tabela 5 - Resultados obtidos de teores de cloretos em relação à massa de cimento pelo Método de Volhard .....	47
Tabela 6 - Análise da Variância ANOVA Método de Volhard .....	47

## LISTA DE SIGLAS

$C_3A$	Aluminato tricálcico
$C_4AF$	Ferroaluminato de cálcio
CAD	Concreto de Alto Desempenho
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
CAR	Concreto de Alta Resistência
CCV	Concreto convencional
$Cl^-$	Íon cloro
$CO_2$	Dióxido de carbono
CPR	Concreto de Pós-Reativos
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CUAD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
$Fe^{2+}$	Íon ferro 2+
$FeCl_2$	Cloreto de ferro (II)
$Fe(OH)_3$	Hidróxido de ferro (III)
$\gamma-Fe_2O_3$	Gama-óxido de Ferro (III)
$K^+$	Íon potássio
$Na^+$	Íon sódio
NaCl	Cloreto de sódio
$OH^-$	Íon hidroxila

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. JUSTIFICATIVA DO ESTUDO .....	13
1.2. OBJETIVOS .....	15
1.2.1. Objetivo geral .....	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
2.1. CORROSÃO DAS ARMADURAS .....	16
2.1.1. Generalidades .....	16
2.1.2. Mecanismo de corrosão eletroquímica.....	18
2.2. AÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	20
2.2.1. Fontes e tipos de cloreto .....	20
2.2.2. Fatores que influenciam na penetração de cloretos .....	21
2.2.3. Mecanismos de transporte de íons cloreto.....	24
2.2.4. Concentração crítica de cloretos .....	25
2.2.5. Medidas de teor de íons cloreto .....	25
2.3. MÉTODO DE VOLHARD .....	26
2.4. CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO .....	27
2.4.1. Definição do concreto de ultra-alto desempenho .....	27
2.4.2. Materiais constituintes .....	29
2.4.3. Aplicações .....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1. MATERIAIS .....	32
3.1.1. Cimento CP V-ARI .....	32
3.1.2. Agregado miúdo .....	33
3.1.3. Agregado graúdo.....	34
3.1.4. Aditivo superplastificante.....	34
3.1.5. Fibra de polipropileno .....	35
3.1.6. Pó de quartzo .....	35
3.1.7. Adições minerais .....	35
3.1.8. Água de amassamento.....	35
3.2. MÉTODOS .....	36
3.2.1. Moldagem dos corpos de prova .....	36
3.2.2. Ensaio de resistência à compressão axial.....	37
3.2.3. Método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata .....	37
3.2.4. Método de Volhard .....	38
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
4.1. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL .....	42
4.2. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS .....	42
4.3. ANÁLISE DO TEOR DE CLORETOS .....	46
5. CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que, atualmente, a durabilidade do concreto é tão importante quanto a sua resistência mecânica. A vida útil das estruturas depende de diversos fatores ligados às fases de projeto, execução, preparação do concreto e manutenções preventivas e corretivas, além das propriedades dos materiais e do ambiente de exposição.

Muitas condições ambientais aceleram a deterioração das estruturas de concreto devido ao nível de agressividade na região. Ambientes industriais, regiões marinhas e cidades com alto índice de impurezas atmosféricas contribuem para a degradação das estruturas, principalmente pelo fenômeno da corrosão, considerada a pior e mais frequente manifestação patológica presente em obras de concreto armado, comprometendo-as dos pontos de vista estético, econômico e da segurança.

Entre os processos de deterioração que causam corrosão encontra-se a contaminação por íons cloretos. Esses íons podem ser incorporados involuntariamente durante o preparo do concreto, através de aditivos, agregados e águas contaminadas. Podem também penetrar do exterior para o interior, como em casos onde a estrutura encontra-se próxima a regiões litorâneas ou em ambientes industriais. Segundo Ihekwaba *et al.* (1996), em concreto armado a proteção oferecida pelo meio altamente alcalino ( $\text{pH} > 12,5$ ) pode ser destruída pela entrada de íons cloreto.

O teor de íons cloreto que representa um problema para as estruturas de concreto armado não se encontra uniforme na literatura, devido aos diversos fatores que interferem na quantidade de cloretos necessária para que ocorra corrosão das armaduras. Uma das causas que favorecem a ocorrência da despassivação é a migração de íons dentro do concreto, que podem gerar diferenças de concentrações onde pequenos teores concentrados podem ser mais perigosos que altos teores uniformemente distribuídos. Já a combinação com aluminatos minora o efeito da ação agressiva dos cloretos (HELENE, 1986).

Segundo Sharp *et al.* (2002), além da corrosão das armaduras, a contaminação por íons cloreto é responsável por um segundo fator prejudicial. O produto da corrosão requer um volume maior de espaço do que requeria a armadura

inicial. Isso cria tensões dentro da estrutura de concreto, que acabam por gerar fissuras e rachaduras. Assim, se faz necessário algum método que alivie o ataque corrosivo no aço.

Para reabilitação de estruturas usam-se métodos tradicionais ou eletroquímicos. O método destrutivo é a reabilitação tradicional, onde se remove o concreto contaminado e o substitui por novos materiais específicos para a reabilitação. Dentre os métodos eletroquímicos, existe a extração eletroquímica de cloretos, que extrai ou remove íons cloreto de estruturas de concreto armado contaminadas, através da aplicação de uma corrente elétrica que causa a migração dos íons para fora do concreto.

Além da necessidade de intervenção quando existe a contaminação por cloretos, é fundamental também o conhecimento acerca das propriedades dos materiais utilizados no concreto. Menor permeabilidade à água e ao ar, menor fissuração por retração, menor porosidade, levam à busca por novas tecnologias que minimizem o ataque de cloretos, principalmente em regiões onde as estruturas estejam mais expostas a este tipo de manifestação patológica. Daí advém a seleção de novos materiais, como o concreto de alto desempenho (CAD), o concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e diferentes tipos de aditivos, que vem sendo foco de estudo dentro da construção civil.

## 1.1. JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Segundo Neville (1997), durante décadas o desenvolvimento tecnológico do concreto se baseou na busca de resistências à compressão cada vez maiores, alimentado pelo paradigma de que resistência significava durabilidade. Porém, nas últimas décadas tem crescido o número de estruturas afetadas por manifestações patológicas, principalmente pela corrosão, devido ao envelhecimento precoce das construções existentes (HELENE, 1997).

A consequência advinda da ação da corrosão é um dos maiores problemas enfrentados pela engenharia civil, devido aos aspectos da eficiência dos reparos para prolongar a vida útil e também pelo custo econômico que tais manifestações patológicas geram para a sociedade (ISAIA, 1995 *apud* SILVA, 2006). Deve-se levar

em conta que muitas obras afetadas são públicas e de grande porte, como pontes, viadutos e reservatórios.

Vários estudos foram realizados acerca da incidência da corrosão nas estruturas de concreto armado. No Brasil, um levantamento realizado por Carmona e Marega (1988) constatou que 27% das manifestações patológicas deram-se pela corrosão de armaduras. Na região centro-oeste, Nince (1996) encontrou incidência de corrosão em 30,1% das construções degradadas de Brasília, enquanto Andrade (1997) e Dal Molin (1988) encontraram 62% em Pernambuco e 30% no Rio Grande do Sul, respectivamente.

Os aspectos econômicos relacionados à reabilitação de estruturas atacadas por corrosão também são alvo de pesquisas. Sitter, em 1986, estabeleceu a “Lei dos 5”, afirmando que os custos de recuperação de uma estrutura que se deteriora por corrosão aumentam exponencialmente com o tempo, em função do estado de deterioração em que se encontra (MONTEIRO, 2002). Elsener (2008) cita que, nos Estados Unidos, os custos diretos de corrosão induzida por íons cloreto em pontes e superestruturas foram estimados sendo da ordem de 6,4 a 10,1 bilhões de dólares por ano. Andrade e González (1988) demonstraram índices de perdas causadas pela corrosão em torno de 1,25% a 3,5% do Produto Nacional Bruto (PNB). No Brasil, Figueiredo (1994) confirmou esses dados, estimando que os gastos com corrosão na construção civil equivalem a 0,6% do PNB.

As considerações acima ressaltam a necessidade de pesquisas na área de patologia das construções, não só sobre concretos convencionais, mas também sobre novos materiais que se encontram no mercado, a exemplo do concreto de ultra-alto desempenho. Além de haver pouca aplicação desse material no Brasil, o país ainda apresenta aproximadamente 7,5 mil km de litoral, onde a contaminação por cloretos ocorre com frequência devido à maresia, e onde se encontra um grande número de capitais e grandes cidades.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho e do concreto convencional quanto à contaminação por cloretos.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar qualitativamente a penetração por cloretos, através de aspensão com nitrato de prata;
- Quantificar o teor de cloretos pelo método de Volhard;
- Comparar o desempenho dos dois tipos de concreto frente ao ataque de íons cloreto.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. CORROSÃO DAS ARMADURAS

#### 2.1.1. Generalidades

A corrosão das armaduras é um processo físico-químico ocasionado pela interação destrutiva entre um material e o meio ambiente, gerando óxidos e hidróxidos de ferro, denominados produtos da corrosão, que ocupam um volume maior do que o volume original das barras de aço (ANDRADE, 2001). Esse mecanismo, de acordo com Gentil (1996), pode acontecer basicamente de duas formas: corrosão puramente química, chamada de oxidação; e corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado, causada principalmente pela carbonatação e ataque de cloretos (CASCUDO, 1997).

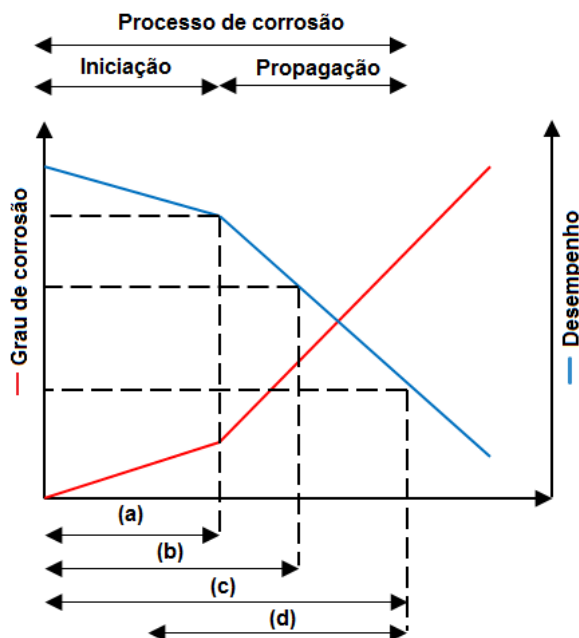
Para Mehta e Monteiro (2014), esse fenômeno, de natureza expansiva, pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o lascamento do revestimento do material. Esses fatores causam a perda de aderência entre o concreto e a armadura, e a perda da seção transversal do aço, podendo levar ao colapso da estrutura.

Segundo Helene (1993a), a armadura, dentro do concreto, geralmente encontra-se protegida devido à alta alcalinidade deste material. O pH entre 12,7 e 13,8 favorece a formação de uma camada de óxidos submicroscópica passivante, compacta e aderente de gama-óxido de ferro (III) ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) sobre a superfície da armadura, que a protege de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial e pH permaneçam estáveis. No entanto, essa passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos, como  $\text{CO}_2$  e íons cloreto, que podem alterar o pH junto à armadura de forma generalizada ou pontual (HELENE, 1993a; FIGUEIREDO, 1994).

De acordo com Tuutti (1982), o mecanismo de corrosão das armaduras pode ser representado através do modelo esquematizado na Figura 1, que divide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação. Helene (1993b) apresenta



um modelo semelhante, porém sob a ótica do desempenho e vida útil da estrutura, que é representado na mesma figura.



**Figura 1 - Modelo esquemático da vida útil das estruturas de concreto baseado nos modelos propostos por Tuutti (1982) e Helene (1993b).**

Fonte: adaptado de Saciloto (2005)

Define-se período de iniciação como o intervalo de tempo necessário para que os diversos agentes agressivos penetrem no concreto até atingir as armaduras. Quando uma determinada concentração desses elementos chega até o nível das barras ocorre a sua despassivação, ou seja, ocorre a quebra da camada protetora de  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  existente (ANDRADE, 2001). Esse período corresponde à vida útil de projeto (a), sendo o marco inicial para a propagação da corrosão, onde surgem fissuras que podem conduzir ao lascamento do concreto de cobertura (GÜNEYISI, 2005 *apud* SACILOTO, 2005). No final deste período já houve uma redução significativa da seção resistente do aço ou perda de aderência entre a armadura e o concreto, acarretando ruptura e colapso total ou parcial da estrutura (HELENE, 1993b).

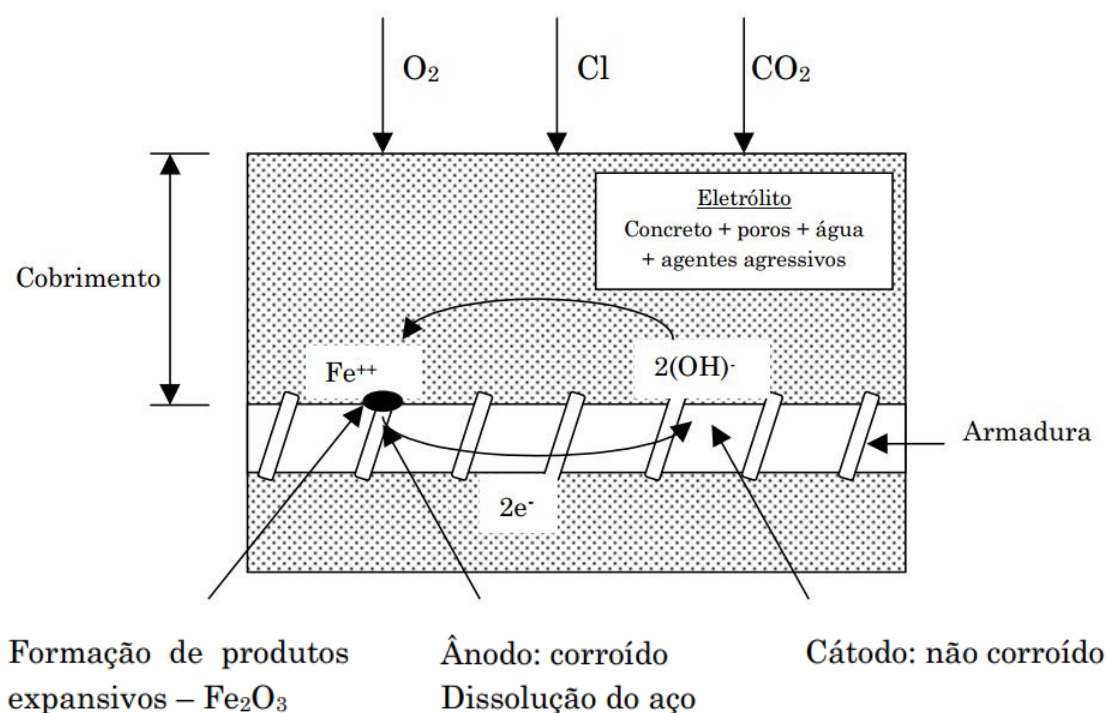
Durante o período de propagação da corrosão, a vida útil da estrutura ainda passa por duas fases, segundo Helene (1993b), que são a vida útil de serviço ou de utilização (b) e a vida útil residual (d). Durante a vida útil de serviço ocorrem as manifestações dos efeitos dos agentes agressivos, como manchas, trincas e

desplacamentos do concreto. É nesse período que acontecem os reparos e manutenções para a recuperação das condições de segurança, funcionalidade e estética da estrutura. A vida útil residual é o período de tempo no qual a estrutura manterá sua funcionalidade após a intervenção.

A vida útil total (c) é o período de tempo contado desde a iniciação da corrosão, com começo da perda da durabilidade, até o término de sua utilização, ou seja, até o fim da sua funcionalidade.

### 2.1.2. Mecanismo de corrosão eletroquímica

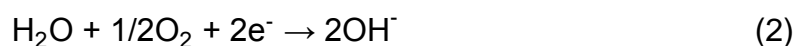
Conforme Andrade (2001), a corrosão eletroquímica é baseada na existência de um desequilíbrio elétrico entre metais diferentes ou entre distintas partes do mesmo metal, configurando o que se chama de pilha ou célula de corrosão, conforme observado na Figura 2.



**Figura 2 - Modelo de corrosão das armaduras do concreto**

Fonte: Andrade (2001)

De acordo com Cascudo (1997), as reações que ocorrem na célula de corrosão são duas: na zona anódica, ocorrem as reações de oxidação do ferro, com perda de elétrons e redução de massa (Equação 1); na zona catódica, ocorre a redução do oxigênio, sem perda de massa do aço (Equação 2). Para que ocorra a formação da pilha de corrosão é necessário um meio de transporte para que os elétrons e íons se movimentem entre as duas regiões, sendo que normalmente os elétrons migram via contato direto metal-metal e os íons por dissolução em solução (ANDRADE, 2001).

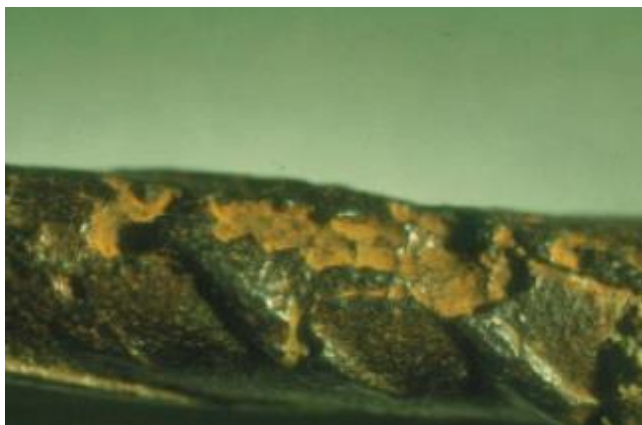


Na pilha de corrosão, os íons hidroxilas deslocam-se através do eletrólito, que são os poros saturados do concreto, para a região anódica, combinando-se com os íons  $\text{Fe}^{2+}$ , originando os produtos da corrosão, cuja reação é apresentada na Equação 3, que representa a formação do hidróxido de ferro. Porém, em reações similares, são formados o hidróxido de ferro expansivo e o hidróxido de ferro hidratado, que também são compostos expansivos (HELENE, 1993a).

O óxido de ferro expansivo  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , em meio a água, se precipita na superfície do aço sob a forma de gama-óxido de ferro (III), também chamado de ferrugem, como apresentado na Equação 4.



Na figura 3 é possível observar a presença da ferrugem em uma barra de aço que sofreu corrosão por íons cloreto, caracterizada pela coloração marrom ao longo do comprimento da barra.



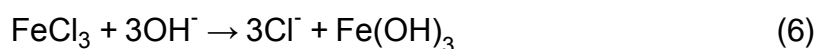
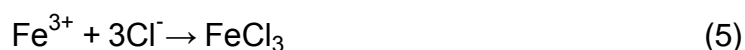
**Figura 3 - Corrosão em aço por ataque de cloretos**

Fonte: Tritthan (2009) *apud* Hamaali (2010)

## 2.2. AÇÃO DE ÍONS CLORETO

### 2.2.1. Fontes e tipos de cloreto

Para Orellan Herrera *et al.* (2006), a ação de íons cloreto é considerada a principal causa de corrosão prematura das armaduras. Essa corrosão acontece por meio de reações que ocorrem na presença de íons cloretos na região da armadura. Essas reações estão descritas nas Equações (5) e (6) (SACILOTO, 2005).



Reações semelhantes ocorrem na formação do  $\text{FeCl}_2$ , resultando em  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Os íons cloreto agem como catalisadores nas reações de formação do hidróxido de ferro III ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) que, através da Equação 4, precipita na forma de ferrugem. Assim, os íons cloreto são sempre liberados para reagirem novamente com o metal e tornam a corrosão cada vez mais intensa.

Segundo Figueiredo (2005), tais íons podem penetrar em uma estrutura por diversas formas, através do uso de aceleradores de pega que contenham  $\text{CaCl}_2$ ,

impurezas, ação da maresia e contato com a água do mar, além de alguns processos industriais e uso de sal de degelo.

Podem estar presentes no concreto de duas formas: combinados ou livres. Quando quimicamente combinados, os íons cloreto se associam ao  $C_3A$  e ao  $C_4AF$ , não estando disponível para promover a despassivação da armadura (ANDRADE, 2001). Os cloretos livres são aqueles dissolvidos ou precipitados na fase aquosa entre os poros (SILVA, 2006). Esses últimos são os que atuam no processo de corrosão das armaduras, representando, segundo Bishara (1991) *apud* Monteiro (2002), 75 a 80% do total de íons cloreto, que é soma a das quantidades de cloretos combinados e de cloretos livres.

A capacidade de se combinar dos íons cloreto depende, principalmente, da quantidade de  $C_3A$  disponível, para a formação do Sal de Friedel ( $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ ). Porém, caso haja algum processo de carbonatação, esse sal pode se decompor e liberar os íons cloreto na água, agravando a corrosão (KROPP, 1995 *apud* MAZER, 2010).

## **2.2.2. Fatores que influenciam na penetração de cloretos**

Os fatores que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto armado podem ser tanto ligados às características inerentes ao concreto quanto à condições ambientais e de exposição.

### **2.2.2.1. Fatores inerentes ao concreto**

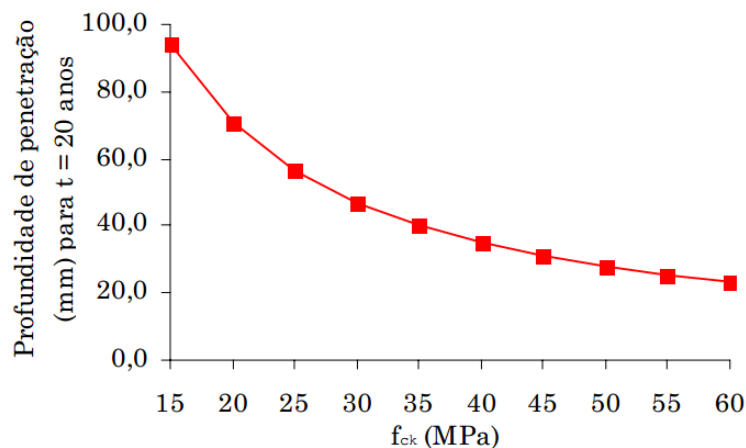
a) Tipo de cimento: A composição química do cimento tem grande influência na penetração de íons cloreto, já que o silicato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato de cálcio ( $C_4AF$ ) se combinam com os íons cloreto para formar cloroaluminatos (MONTEIRO, 2002). Andrade (2001) afirma que cimentos com maiores teores de  $C_3A$  e  $C_4AF$  apresentam melhor desempenho frente à ação de cloretos, justamente pela formação do Sal de Friedel e consequente redução dos íons livres, observando melhor comportamento do cimento CP III. Rasheeduzzafar *et al.* (1990) *apud*

Monteiro (2002) também afirmam que, quanto maior o conteúdo de  $C_3A$ , mais tempo levará para se iniciar a corrosão das armaduras.

b) Relação água/cimento: quanto menor a relação água/cimento, menor a porosidade e, conseqüentemente, menor a possibilidade de entrada de agentes agressivos (TORRES, 2011). Além disso, um aumento da relação água/cimento conduz ao aumento do coeficiente de difusão de cloretos, possibilitando a penetração mais profunda desses íons na estrutura (PEREIRA, 2011).

c) Presença de adições: O uso de cimentos contendo materiais pozolânicos, cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa está aumentando a cada dia. A influência benéfica das pozolanas em relação à penetração de íons cloreto inclui o aumento da resistividade elétrica do concreto e a diminuição do tamanho dos poros (MONTEIRO, 2002). Barata (1998) *apud* Silva (2006) observou uma redução de 90% na difusão de cloretos, para um concreto com relação a/c de 0,47 e adição de 20% de sílica ativa. Hoffmann (2001) também observou efeitos benéficos com o mesmo teor de sílica ativa, reduzindo em 85% a penetração de íons cloreto. Silva (2006) observou maior proteção das armaduras ao ataque de íons cloreto quando adicionada cinza de casca de arroz e sílica ativa oriunda da fabricação de silício metálico.

d) Resistência à compressão axial: esse fator está ligado diretamente à porosidade do concreto, uma vez que quanto menos poroso for, maior será sua resistência à compressão e, como consequência da baixa porosidade, têm-se uma baixa penetração de íons cloreto. Andrade (2001) observou, em concretos fabricados com os mesmos materiais, porém com diferentes resistências à compressão, que quanto maior a resistência, menor a penetração dos cloretos, como pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4 - Efeito da resistência à compressão na profundidade de penetração de íons cloreto.**  
Fonte: Andrade (2001)

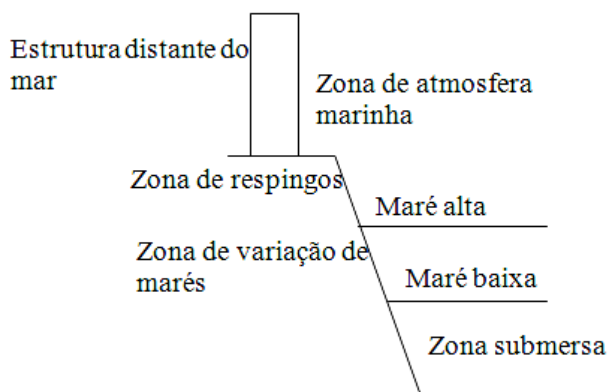
e) Compactação: Collepardi *et al.* (1972) *apud* Monteiro (2002) verificaram que concretos mais bem compactados têm coeficiente de difusão de cloretos inferior àqueles não compactados.

#### 2.2.2.2. Fatores ambientais

a) Temperatura: o efeito da temperatura pode ser avaliado em dois momentos distintos. No processo de cura, quando há aumento da temperatura, há aumento da velocidade de hidratação do concreto e redução do coeficiente de difusão de cloretos (PEREIRA, 2001 e HOFFMANN, 2001). Ainda, com o aumento da temperatura ambiente, há aumento da mobilidade dos íons no interior do concreto, o que acarreta em uma maior penetração dos cloretos (ANDRADE, 2001).

b) Umidade relativa: uma vez que o transporte de íons se dá em meio aquoso, o aumento da umidade relativa e, conseqüentemente, da quantidade de água no concreto, facilita a movimentação dos íons cloreto através do cobrimento até que estes atinjam a armadura (ANDRADE, 2001).

c) Condição de exposição e tipo de ambiente: alguns ambientes possuem uma maior quantidade de íons cloreto, que podem se depositar sobre a estrutura de concreto armado e possivelmente iniciar corrosão, como é o caso de ambientes marinhos (FIGUEIREDO, 2005). Alguns autores dividem o ambiente marinho em 4 zonas, de acordo com a quantidade de oxigênio e umidade. Essas regiões estão representadas na Figura 5, onde, nas zonas de atmosfera marinha a penetração de íons cloreto se dá pela ação do vento; na zona de respingos e de variação de marés, os danos são causados pela corrosão por cloretos e pela erosão devido às ondas; e nas zonas submersas, onde não há presença de oxigênio, a degradação se dá por sulfatos, magnésio e microrganismos (LIMA, 2005 *apud* MAZER, 2010).



**Figura 5 - Zonas de agressividade marinha**  
 Fonte: Duracrette (1999) adaptado por Mazer (2010)

d) Concentração superficial: esse fator é influenciado por diversos parâmetros, entre estes os ciclos e molhagem/secagem, a direção dos ventos e a topografia (HELENE, 1993a). Muitos modelos matemáticos utilizam este fator para avaliar a concentração de íons cloreto em uma dada profundidade (MAZER, 2010).

### 2.2.3. Mecanismos de transporte de íons cloreto

A penetração de agentes agressivos no concreto ocorre basicamente por transporte, através dos poros da matriz do cimento e das microfissuras. Geralmente, o mecanismo de transporte dos íons cloreto presentes no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica (MONTEIRO, 2002).



Por absorção capilar, a água penetra através dos poros do concreto devido à tensão superficial, principalmente em ciclos de molhagem e secagem, e levam consigo os íons cloreto (SILVA, 2006).

A difusão é um processo espontâneo de transporte de massa num sistema físico-químico, por efeito de gradientes de concentração proporcionado pelos dois diferentes meios em contato. No caso do concreto esse contato se dá entre a solução presente nos poros e o meio ambiente (MONTEIRO, 2002). Durante esse processo, os íons se movimentam de modo a igualar as concentrações, eliminando o gradiente (MAZER, 2010).

#### **2.2.4. Concentração crítica de cloretos**

Pode existir um valor limite de concentração a partir do qual os íons cloreto podem romper a camada de óxidos passivante e provocar a corrosão da armadura. Esse limite não está associado a um valor fixo, embora algumas normas ou recomendações apresentem valores orientativos (MONTEIRO, 2002). Isso se deve à dificuldade de estabelecer um limite seguro, acima do qual existe risco de despassivação do aço, já que esse limite depende de diversas variáveis: tipo e proporção de cimento, umidade e relação água/cimento, entre outras (HELENE, 1986).

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), não fornece um teor limite para a concentração de íons cloreto, mas proíbe o uso de aditivos à base de cloreto em estruturas de concreto. Já a NBR 12655 (ABNT, 2015), apresenta teores máximos em relação à massa de cimento para diversas situações, variando de 0,05 a 0,40%, sendo de 0,15% para situações onde o concreto seja exposto a íons cloreto nas condições de serviço, como é o caso de estruturas em ambientes marinhos.

#### **2.2.5. Medidas de teor de íons cloreto**

Segundo Monteiro (2002), o conteúdo de íons cloreto totais e livres é um parâmetro que tem sido amplamente utilizado para indicar risco de corrosão de armaduras. Os íons cloreto totais significam todos os íons cloreto presentes no concreto e podem ser determinados quando solúveis em ácido. Já os íons cloreto

livres podem ser determinados quando solúveis em água, porém essa determinação é muito sensível ao procedimento do teste.

A determinação da concentração de íons cloreto presentes na massa de concreto a diferentes níveis de profundidade tem como objetivo analisar o estado atual da estrutura em relação à contaminação por esses íons, e também permitir estimar o tempo que estes demorarão para alcançar a armadura (MONTEIRO, 2002).

Conforme Andrade (1992) *apud* Monteiro (2002), vários são os métodos que podem ser utilizados na análise do teor de íons cloreto, desde os químicos como o de Volhard e o de Mohr até o método do eletrodo de íon seletivo.

### 2.3. MÉTODO DE VOLHARD

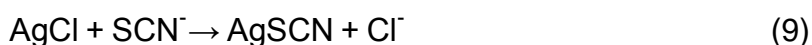
A determinação da quantidade de íons cloretos no concreto pode ser feita através do método de Volhard, que foi descrito pela primeira vez por Jacob Volhard, um químico alemão, em 1874. Esse método envolve a titulação do íon prata, na presença de ácido nítrico livre, com tiocianato de potássio ou de amônio (VOGEL, 2002).

O indicador é uma solução de nitrato de ferro(III) ou sulfato de amônio e ferro(III) e a solução torna-se vermelha com um excesso de íon tiocianato. A concentração de indicador não é crítica na titulação. Cálculos demonstram que o erro do indicador varia muito pouco à medida que a concentração de íons ferro(III) aumenta de 0,005 a 1,5 mol/L. Na prática, concentrações maiores que 0,2 mol/L devem ser evitadas pois dão à solução uma coloração amarelada que mascara a mudança de cor do indicador. Assim, utiliza-se geralmente concentração de 0,1 mol/L (SKOOG, 2006).

Esse método pode ser aplicado na determinação de cloretos, brometos e iodetos em solução ácida. Adiciona-se excesso de nitrato de prata padrão e titula-se o excesso com solução padrão de tiocianato. Na determinação de cloretos, ocorrem os seguintes equilíbrios durante a titulação do excesso de íons prata, expressos nas Equações 7 e 8 (VOGEL, 2002)



O tiocianato de prata é menos solúvel que o cloreto de prata e, conseqüentemente, no método de Volhard, a reação expressa na Equação 9 ocorre antes do início da reação com os íons ferro(III), o que torna a localização do ponto final de titulação menos nítida e, assim, leva a um erro considerável de titulação (SKOOG, 2006).



É necessário, então, evitar a reação entre o tiocianato e o cloreto de prata. Isto pode ser feito adicionando-se um líquido imiscível para cobrir as partículas de cloreto de prata e evitar que interajam com o tiocianato, sendo o nitrobenzeno o líquido mais indicado nesse caso.

## 2.4. CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

### 2.4.1. Definição do concreto de ultra-alto desempenho

Nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia do concreto, o conceito de concreto de alta resistência foi se alterando. Não apenas a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade e a durabilidade passaram a ser parâmetros para concretos de qualidade. Essas evoluções nas características do concreto fizeram com que houvesse diferenciação entre concreto de alta resistência (CAR) e concreto de alto desempenho (CAD) (SILVA, 2006).

Nos anos 1950, os concretos com 35 MPa foram considerados CAR, passando para 40 a 50 MPa dez anos depois. No início dos anos 1970 já se produziam concretos com quase 60 MPa, passando para 100 MPa nos anos 1980. Há algum tempo, concretos com resistência à compressão de 140 MPa vêm sendo

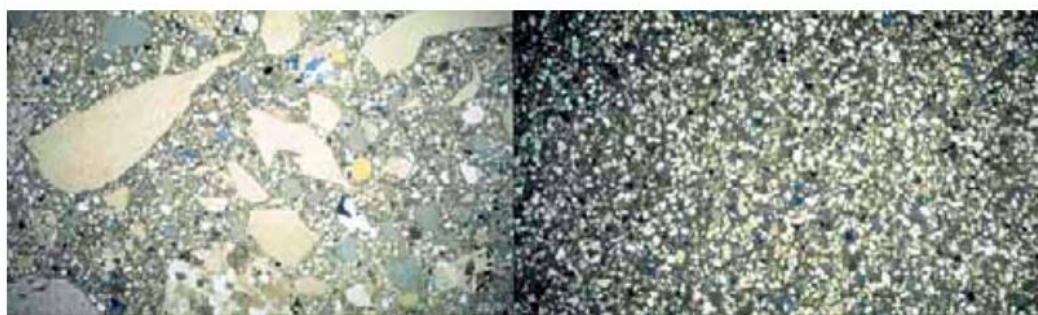
empregados na construção de edifícios em algumas partes do mundo (AİTCIN, 2000).

Assim como o concreto de alto desempenho (CAD) é uma evolução do concreto convencional, a evolução do CAD é o concreto de pós-reativos (CPR) – *Reactive Powder Concrete* (RPC), que é um tipo de Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

As primeiras pesquisas relacionadas ao CPR foram realizadas na França, pelos pesquisadores Richard e Cheyrezy, nos anos 1990. Foi desenvolvido, inicialmente, para atender as exigências de estruturas de concreto pré-fabricado submetidas a ambientes agressivos (BIZ, 2001). Após uma década de pesquisas e melhoramentos foi lançado, pela empresa Lafarge, o primeiro concreto de ultra-alto desempenho, comercializado hoje com o nome de Ductal.

Conforme Tutikian *et al.* (2011), o princípio do CPR é a ausência de agregados graúdos, com tamanho médio das partículas de 0,2 mm, sendo, sob o ponto de vista granulométrico, uma argamassa e não um concreto, ao qual podem ser adicionadas fibras. Como as propriedades apresentadas são as mesmas do concreto em grau muito mais elevado, o termo “concreto” prevaleceu em função do seu desempenho.

É formulado com o intuito de produzir um material com mínimo defeito, através do aumento da compacidade e resistência dos produtos constituintes da matriz do concreto (BIZ, 2001). Na Figura 6 é possível observar a diferença no aspecto granulométrico e na textura entre o CAD e o CPR.



**Figura 6 - Comparação de texturas entre CAD (esquerda) e CPR (direita)**

Fonte: Resplendino (2011) *apud* Tutikian *et al.* (2011)

Os materiais que compõem o CPR conferem a esse material uma resistência à compressão entre 150 e 200 MPa, muito superiores aos 30 MPa dos concretos convencionais e até mesmo aos 120 MPa dos CAD (TÉCHNE, 2018).

#### **2.4.2. Materiais constituintes**

Composto basicamente por pós (areia de quartzo, cimento comum, pó de quartzo e sílica ativa), fibras de aço, superplastificante e água, onde os sólidos possuem dimensões inferiores a 2 mm, os CPR são fabricados em condições semelhantes ao concreto convencional, porém com baixíssima relação água/cimento, chegando a valores de 0,15 (VANDERLEI, 2004). Já as fibras de aço, segundo Tutikian *et al.* (2011), aumentam a ductilidade e a resistência à tração e flexão.

##### 2.4.2.1. Cimento

A seleção do cimento precisa estar de acordo com o aditivo superplastificante sendo que, do ponto de vista da composição química, os com baixo teor de  $C_3A$  apresentam melhor resultado. O melhor cimento em termos de propriedades reológicas e desempenho mecânicos são os com alto teor de sílica, porém este possui a pega muito lenta, impedindo o seu uso em certas aplicações (VANDERLEI, 2004). O cimento convencional CP V-ARI, que possui pega rápida e alto desempenho, também é indicado, porém, por ter uma finura elevada, demanda água em excesso (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

##### 2.4.2.2. Areia e pó de quartzo

De acordo com Vanderlei (2004), a areia deve possuir partículas com diâmetro médio de 250  $\mu\text{m}$ , sendo limitado a 600  $\mu\text{m}$ . Quando à composição mineral, a areia de quartzo possibilita uma melhor interface pasta/agregado e a adição de pó de quartzo à mistura contribui para o fechamento do pacote granulométrico, preenchendo os vazios deixados pela areia e intensifica as reações pozolânicas quando submetido ao tratamento térmico (BIZ, 2001).

#### 2.4.2.3. Superplastificante

Atualmente existem superplastificantes denominados de última geração, sendo à base de poliacrilato ou policarboxilato, considerados mais eficientes. Para o CPR, as dosagens experimentais com superplastificante de última geração utilizaram um teor de 2% em relação à massa de cimento (VANDERLEI, 2004).

#### 2.4.2.4. Adições minerais

A sílica ativa é a adição mineral indicada para o CPR, devido à forma e ao tamanho de suas partículas, sendo arredondada e muito menor que o cimento, agindo no preenchimento de vazios na zona de transição e entre os agregados (TUTIKIAN *et al.*, 2011). Normalmente a taxa sílica/cimento usada para a fabricação do CPR é de 0,25 (VANDERLEI, 2004).

#### 2.4.2.5. Fibras de aço

As fibras de aço são as mais utilizadas e comprovam sua eficiência através da melhora nas propriedades de ductilidade do concreto, fadiga e aumento da tenacidade ou capacidade do concreto em absorver energia (BIZ, 2001).

### 2.4.3. Aplicações

O uso do CPR é bastante interessante em estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, passarelas e pré-fabricados de túneis. Um exemplo da aplicação desse tipo de tecnologia é apresentado na Figura 7.

Na passarela de Sherbrooke, no Canadá, o uso do CPR se deu basicamente para viabilizar a estrutura, onde o comprimento de 60 m e a largura de 3 m provocaram grande esbeltez.



**Figura 7 - Passarela Seonyu, Coréia do Sul.**

Fontes: Tutikian *et al.* (2011)

O uso da tecnologia do CPR ainda é inacessível à maioria das empresas do Brasil, devido às técnicas de execução, que envolvem cura do material a altas temperaturas e grande pressão, além do custo de importação das fibras. Por isso a necessidade de estudos que comprovem a viabilidade de se empregar tal material (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O programa experimental foi definido de forma a permitir avaliar qualitativa e quantitativamente a penetração de íons cloreto em corpos de prova de concreto convencional (CCV) e de concreto de pós-reativos (CPR), com o objetivo de obter uma análise comparativa entre esses dois tipos de concretos e sua maior ou menor resistência ao ataque de cloretos.

Para esse estudo foram utilizados corpos de prova que estavam em solução de cloreto de sódio 5% m/m havia 24 meses. Optou-se por essa linha de pesquisa devido ao período de tempo no qual os corpos de prova se encontravam em meio agressivo ser suficiente para que o cloreto penetrasse no concreto e, assim, fosse possível realizar os ensaios. A concentração da solução foi escolhida para simular o ambiente marinho e, assim, obter uma situação mais parecida com a realidade em que se encontram as estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos.

Para essa pesquisa, foram utilizados quatro corpos de prova de cada tipo de concreto, que foram analisados pelo método colorimétrico de aspensão de nitrato de prata e pelo método de Volhard.

Nesse capítulo será apresentada a caracterização dos materiais utilizados na confecção dos concretos, bem como a metodologia empregada na realização dos ensaios.

#### **3.1. MATERIAIS**

##### **3.1.1. Cimento CP V-ARI**

Designado pela sigla CP V-ARI, o cimento Portland de alta resistência é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência em baixas idades, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos ao qual se adiciona uma ou mais formas de sulfato de



cálcio. Esse tipo de cimento atinge um mínimo de resistência à compressão aos 7 dias de idade de 34,0 MPa (ABNT, 1991).

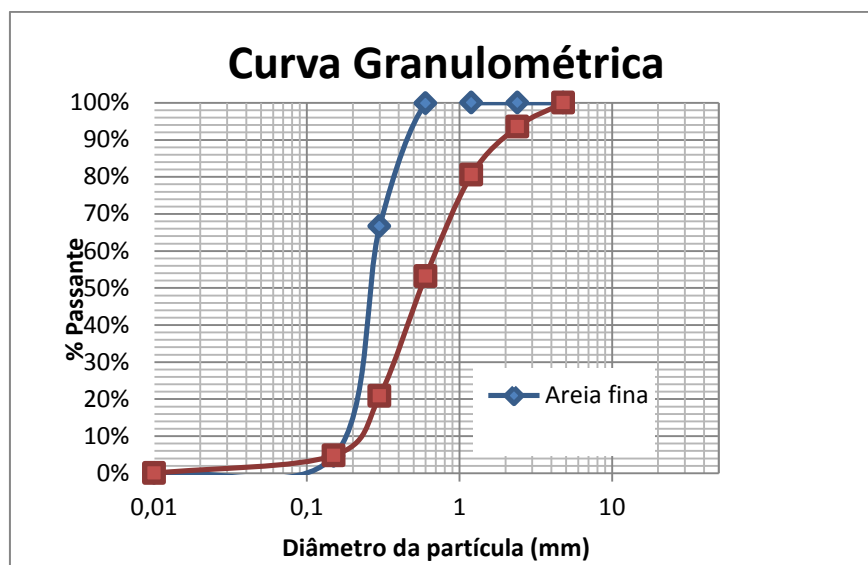
No Quadro 1 estão apresentadas as especificações técnicas do CP V-ARI com base na norma regulamentadora NBR 5733 (ABNT, 1991) e de acordo com a fabricante.

Parâmetros	
Tempo de início de pega (horas)	≥1
MgO (%)	≤6,5
Perda ao fogo (%)	≤6,5
Resíduo insolúvel (%)	≤3,5
SO <sub>3</sub> (%)	≤4,5
Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	≥14
3 dias	≥24
7 dias	≥34
28 dias	-
Adições permitidas (%)	
Escória	0
Fíler calcário	0 a 10
Material pozolânico	0

**Quadro 1 - Especificações técnicas do cimento CP V-ARI**  
Fonte: Fabricante (2018)

### 3.1.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na confecção dos corpos de prova constituiu-se de uma mistura de areia muito fina, com módulo de finura de 1,29, com areia média, com módulo de finura de 2,47. Essa composição teve como objetivo obter um melhor empacotamento de grãos nos concretos. As curvas granulométricas dessas areias estão representadas na Figura 8, onde é possível observar que a maior parte dos grãos dessa mistura se encontra na faixa de 0,15 a 0,3 mm, o que caracteriza uma areia fina.



**Figura 8 - Curvas granulométricas das areias**

Fonte: a autora (2018).

### 3.1.3. Agregado graúdo

Para a escolha do agregado graúdo a ser utilizado na fabricação do concreto convencional foi seguida a norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Segundo sua determinação, o agregado graúdo deve possuir diâmetro máximo de 1/4 da menor dimensão da peça. Assim, optou-se por utilizar a brita 1, por possuir diâmetro máximo de 12,5 mm e, assim, seguindo a norma.

### 3.1.4. Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante de uma fabricante nacional, e suas propriedades estão descritas no Quadro 2.

Características	Valor
Aparência	Líquido amarelo claro
Base química	Polímero policarboxilato
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,07
Teor de cloretos (%)	<0,1
Teor de álcalis (%)	<1,0

**Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do superplastificante**

Fonte: Fabricante (2018)

### **3.1.5. Fibra de polipropileno**

Foi utilizada fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos indicada para reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração. É comercializada por uma fabricante nacional, em sacos hidrossolúveis de 600 gramas.

### **3.1.6. Pó de quartzo**

O pó de quartzo empregado tem a função de contribuir no fechamento do pacote granulométrico e reagir durante o tratamento térmico, possibilitando o acontecimento das reações pozolânicas. Segundo Vanderlei (2004), o tamanho médio das partículas de pó de quartzo é de 10  $\mu\text{m}$ , portanto da mesma classe granular do cimento, o que torna esse material passível de reagir durante o processo de cura, favorecendo a reação pozolânica.

Nesse estudo utilizou-se pó de quartzo de uma fabricante nacional.

### **3.1.7. Adições minerais**

Foi utilizada sílica ativa nacional, do tipo não-densificada, proveniente de um mesmo lote de fabricação, fornecida em sacos de papel kraft de 20 kg. Possui diâmetro médio da ordem de 0,8  $\mu\text{m}$  e área superficial específica de 2.222  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

### **3.1.8. Água de amassamento**

Utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento da cidade de Curitiba, tanto para a fabricação dos corpos de prova quanto para os ensaios em laboratório.

## 3.2. MÉTODOS

A metodologia iniciou-se na confecção dos corpos de prova seguida da preparação das amostras e realização dos ensaios.

### 3.2.1. Moldagem dos corpos de prova

#### a) Concreto convencional

O concreto convencional foi confeccionado com cimento CP V-ARI, areia média, brita 1 e água, na relação 1:2:3:0,5 e, após a mistura e homogeneização na betoneira, foram moldados 8 corpos de prova de 10 x 20 cm, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003)

Os corpos de prova permaneceram em cura ao ar livre por três dias, sendo desmoldados após esse período, quando quatro destes foram imersos em solução de cloreto de sódio 5% em massa e o restante em câmara úmida até completar 28 dias de cura, sendo esses últimos sujeitos ao ensaio de resistência à compressão axial.

#### b) Concreto de pós-reativos

Os materiais utilizados para a confecção do CPR foram cimento CP V-ARI, sílica ativa, pó de quartzo, areias fina e média, água, aditivo superplastificante e fibras de polipropileno. O traço do CPR foi obtido pela dosagem estabelecida por Henche e Alessi (2010), sendo a proporção 1:0,1:0,15:1,4:0,22:0,03:0,0012.

Os materiais secos foram pesados e misturados, na ordem de areias, cimento, pó de quartzo, sílica ativa e fibra de polipropileno e, após essa mistura, foram levados à argamassadeira junto com os demais materiais para sua homogeneização.

Logo após o amassamento, o concreto foi moldado em 8 corpos de prova prismáticos de 10 x 10 x 20 cm de acordo com as especificações da NBR 7215 (ABNT, 1997), sendo desmoldados depois de três dias. Quatro amostras foram imersas em solução de cloreto de sódio 5% em massa, e as outras quatro

permaneceram em câmara úmida até completar 28 dias de cura, quando foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial.

### **3.2.2. Ensaio de resistência à compressão axial**

Após 28 dias de cura, os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão axial foram retirados da imersão. O concreto convencional foi ensaiado segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), enquanto o de concreto de pós-reativos obedeceu à norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

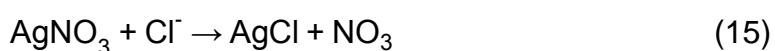
Os corpos de prova foram rompidos em prensa específica para esse tipo de ensaio, disponível nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba.

### **3.2.3. Método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata**

Esse estudo teve como objetivo determinar a frente de penetração de cloretos, através do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata. Foi verificada a profundidade de penetração dos íons cloreto no concreto após 24 meses imersos em solução de 5% de NaCl.

Assim, após a retirada dos corpos de prova da câmara de imersão, foi aspergida solução de nitrato de prata 0,05 N em toda a superfície exposta para verificar a existência de concentração superficial de cloretos. Após, através de um corte de 5 mm na sua superfície, foi medida com auxílio de paquímetro a profundidade de penetração dos íons cloreto.

A aspersão da solução de nitrato de prata gera o cloreto de prata, em presença de cloretos livre, e o óxido de prata, na ausência de cloretos, cujas colorações são contrastantes. A reação entre os íons cloreto do concreto e a solução de nitrato de prata é descrita conforme a Equação 15.



Na Figura 9 são mostrados dois corpos de prova após aspersão de nitrato de prata. As regiões com cloretos são marcadas pela tonalidade clara e, o restante dos corpos de prova que não possuem cloretos, escura.

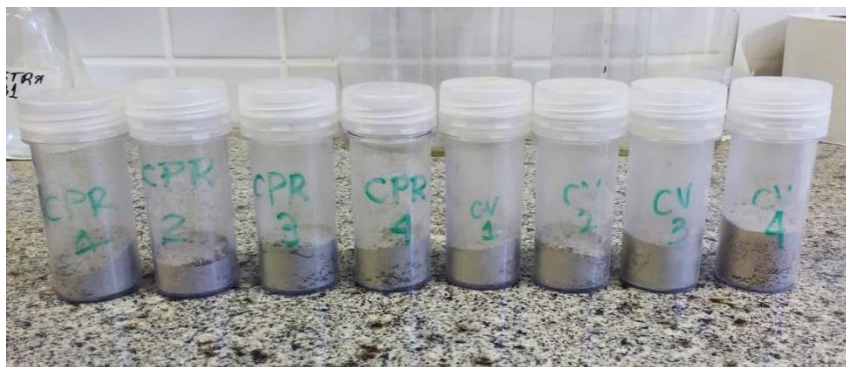


**Figura 9 – Verificação da concentração superficial de cloretos**  
Fonte: a autora (2018).

#### **3.2.4. Método de Volhard**

A determinação do teor de cloretos nos concretos foi feita pelo método de Volhard, após completar 24 meses de imersão e utilizando os mesmos corpos de prova já analisados qualitativamente pela aspersão de nitrato de prata, ou seja, 4 corpos de prova de cada tipo de concreto.

Assim, retirou-se dos corpos de prova uma amostra de aproximadamente 20 g, proveniente do corte de 5 mm de espessura do concreto com o uso de uma serra circular. Essa amostra foi moída manualmente com o auxílio de gal e pistilo e armazenada em frasco plástico devidamente identificado, como pode ser observado na Figura 10.



**Figura 10 – Armazenamento e identificação das amostras.**

Fonte: a autora (2018).

Posteriormente, a amostra foi pesada e colocada em um frasco de erlenmeyer de 250 ml, onde se adicionou 50 ml de água destilada e 10 ml de ácido nítrico. Essa solução foi aquecida até o completo ataque da amostra, agitada durante uma hora com o auxílio de agitador magnético e filtrada com papel filtro, como observado na Figura 11.



**Figura 11 – Preparação da solução.**

Fonte: a autora (2018).

Depois, adicionou-se mais 10 ml de ácido nítrico ao material filtrado e nitrato de prata até obter a precipitação dos íons cloreto na forma de cloreto de prata. A solução foi aquecida até a ebulição para que ocorresse a coagulação do cloreto de prata e, após o esfriamento a temperatura ambiente, adicionou-se 10 ml de ácido benzílico e 10 ml de sulfato de amônia e ferro(III) e agitou-se a mistura manualmente.

Por último, foi feita titulação com tiocianato de amônio. O volume necessário para tornar a solução laranja-avermelhada foi determinado e o teor de cloretos calculado a partir da Equação 16, conforme Pereira (2003) *apud* Mazer (2010).

$$(\%)Cl^- = 0,1773 * \frac{V_2 - V_1}{m_1} * 100 \quad (16)$$

Onde:

(%)Cl<sup>-</sup> = quantidade de íons cloreto (%)

V<sub>1</sub> = volume de tiocianato de amônio utilizado na amostra padrão (ml)

V<sub>2</sub> = volume de tiocianato utilizado na amostra de concreto (ml)

m<sub>1</sub> = massa da amostra de concreto (g)

Para V<sub>1</sub> tem-se o valor de 0,07 ml, já determinado através de procedimento experimental por Mazer (2010).

### 3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA), que é o processo de decomposição da variação total nas componentes explicadas e não explicadas ou residuais, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1 - Análise de Variância ANOVA**

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Função F de Snedecor
Explicada	$\sum(Y_{est} - Y_{med})^2$	$k$	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k}$	
Não Explicada	$\sum(Y - Y_{est})^2$	$(n - k - 1)$	$\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k} \cdot \frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$
Total	$\sum(Y - Y_{med})^2$	$(n - 1)$		

Fonte: Lima (2013).



Neste trabalho, para determinação da Análise de Variância foi utilizado o software *Statgraphics® Plus 4.1*.

Uma vez que as variâncias apresentassem diferenças significativas, é importante determinar quais grupos de médias, em particular, são importantes. Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento denominado *Multiple Range Test*, através do teste de *Tukey-Kramer*, mediante o uso do mesmo software.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados médios obtidos de resistências à compressão axial foram de 24 MPa para o concreto convencional e de 174 MPa para o concreto de pós-reativos.

Esses resultados indicam que houve uma escolha correta dos materiais utilizados na confecção dos concretos, além de uma boa moldagem e cura dos corpos de prova.

Em relação ao concreto de pós-reativos, a resistência à compressão obtida confirma as teorias acerca de suas propriedades físicas. A ausência de agregados graúdos, a escolha de areias finas e a incorporação de fibras e adições minerais colaboraram para o melhor empacotamento de grãos e diminuição da porosidade, o que ocasionou um aumento significativo da sua resistência mecânica se comparada à do concreto convencional.

### 4.2. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A profundidade de penetração de íons cloreto foi determinada após a aspersão da solução de nitrato de prata com concentração 0,05 N em corpos de prova de concreto. Nas Figuras 12 e 13 podem ser observados os acúmulos de íons cloreto nas superfícies dos corpos de prova, identificados pela coloração branca. Nota-se que o CPR aparentemente possui maior concentração superficial se comparado ao CCV, uma vez que mais regiões da sua superfície obtiveram tonalidades claras.



**Figura 12 - Concentração superficial de cloretos no concreto convencional.**  
Fonte: a autora (2018).



**Figura 13 - Concentração superficial de cloretos no concreto de pós-reativos.**  
Fonte: a autora (2018).

Contudo, ao ser analisada a profundidade de penetração desses íons em ambos os concretos, foi possível observar que o CPR apresentou média em torno de 1,4 mm, enquanto o CCV apresentou aproximadamente 4,8 mm.

Esses resultados estão expressos na Tabela 2, obtidos de acordo com o procedimento denominado *Multiple Range Test*, através do teste de *Tukey-Kramer*, mediante o uso do *software Statgraphics® Plus 4.1* e a Análise da Variância ANOVA obtida através do mesmo *software* está apresentada na Tabela 3.

**Tabela 2- Resultados obtidos de profundidade de penetração de cloretos nos concretos**

Concreto	Amostra	Profundidade de penetração de cloretos (mm)	Média (mm)	Sd (mm)	CV (%)	Erro (mm)
CCV	CCV1	4,55	4,83 A	0,22	4,52	0,11
	CCV2	4,75				
	CCV3	5,00				
	CCV4	5,00				
CPR	CPR1	1,10	1,41 B	0,40	28,37	0,20
	CPR2	1,30				
	CPR3	2,00				
	CPR1	1,25				

Fonte: a autora (2018).

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

**Tabela 3 - Análise da Variância ANOVA Profundidade de penetração de cloretos**

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados médios	Função F	P Valor
Explicada	23,2903	1	23,2903	223,81	0,0000
Não explicada	0,624375	6	0,104063		
Total	23,9147	7			

Fonte: a autora (2018).

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Como já mencionado, o resultado de penetração de cloretos se apresentou menor no CPR do que no CCV. Além disso, a análise *Tukey-Kramer* demonstrou que existem diferenças estatísticas significantes entre as médias, o que confirma a superioridade do CPR na resistência à penetração desses íons. Para melhor visualização e comparação, é apresentada a Figura 14, onde se observa a penetração de cloretos nos corpos de prova dos dois tipos de concreto.



**Figura 14 - Penetração de cloretos no CCV (esquerda) e no CPR (direita)**

Fonte: a autora (2018).

Noat-se que, para além do corte de 5 mm, no concreto de pós-reativos não há mais nenhuma região com mudança de coloração, o que indica que no interior do corpo de prova não há penetração de cloretos, ficando estes apenas na sua superfície e regiões próximas a ela. Já no concreto convencional é possível verificar a existência de cloretos não apenas na face externa, mas também nas áreas mais centrais do corpo de prova, mostrando que houve penetração de íons cloreto de forma mais profunda se comparado ao CPR.

Com essas verificações é possível analisar dois principais aspectos, sendo estes ambiental e físico. No que diz respeito ao fator ambiental, deve-se considerar que a concentração de NaCl presente na câmara de imersão era de 5%, ou seja, uma concentração saturada que possivelmente contribuiu para o maior acúmulo de cloretos na superfície do CPR.

Quanto ao aspecto físico, a análise da profundidade de penetração de cloretos possibilita observar que o CPR possui maior resistência ao ataque de cloretos, pois um número menor desses íons adentrou os corpos de prova, quando em comparação ao CCV. Isso provavelmente se dá pela baixa porosidade do CPR, dificultando o transporte de íons por difusão e absorção capilar uma vez que sua matriz cimentícia é mais compactada. Essa condição é ocasionada pela baixíssima relação água/cimento de 0,22 e pela presença de aditivos e adições, que contribuem para a menor granulometria e menor número de vazios.

Em relação ao concreto convencional, verifica-se que a profundidade de penetração dos íons cloreto foi maior na região analisada, fato já esperado uma vez que esse tipo de concreto possui propriedades físicas inferiores ao CPR. Devido aos materiais utilizados serem os convencionais e não haver qualquer tipo de adição,

como pó de quartzo, sílica e fibras, e nem o uso de superplastificante, esse concreto possui maior porosidade, ou seja, maior número de vazios intersticiais que dão acesso ao interior do elemento e facilitam o transporte de agentes agressivos vindos do exterior.

#### 4.3. ANÁLISE DO TEOR DE CLORETOS

O teor de cloretos totais nos corpos de prova foi determinado a partir do método de Volhard, após 24 meses de exposição à solução de NaCl 5% em massa, na profundidade de 5 mm.

A determinação do ponto de viragem da solução se deu pela coloração avermelhada a partir da titulação com tiocianato de amônio. As concentrações de cloretos totais em relação à massa de concreto foram calculadas a partir da Equação 16 e os resultados se encontram na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados obtidos da determinação do teor de cloretos pelo Método de Volhard**

Concreto	Amostra	Massa da amostra (g)	Volume titulado (ml)	Teor de Cl- (%)
CCV	CCV1	22,4	0,25	0,14%
	CCV2	24,82	0,50	0,31%
	CCV3	33,12	0,10	0,02%
	CCV4	36,77	0,20	0,06%
CPR	CPR1	25,27	0,25	0,13%
	CPR2	23,64	0,75	0,51%
	CPR3	30,79	0,75	0,39%
	CPR1	28,44	0,15	0,05%

Fonte: a autora (2018).

Verifica-se que alguns teores de cloretos obtidos foram altos, se comparados ao teor crítico estabelecido por Andrade (1992) *apud* Monteiro (2002) para despassivar a armadura: de 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto. Como o estudo trata de dois diferentes tipos de concreto, decidiu-se calcular essas concentrações em relação à massa de cimento.

Assim, foi realizado o cálculo do consumo de cimento para cada tipo de concreto, obtendo-se os valores de 370 kg/cm<sup>3</sup> para o CCV e 734 kg/cm<sup>3</sup> para o CPR. Na Tabela 5 são apresentados os teores de cloretos obtidos em relação à massa de cimento, a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o erro, de acordo com o procedimento denominado *Multiple Range Test*, através do teste de *Tukey-Kramer*, mediante o uso do *software Statgraphics® Plus 4.1*. A Análise da Variância ANOVA obtida através do mesmo *software* está apresentada na Tabela 6.

**Tabela 5 - Resultados obtidos de teores de cloretos em relação à massa de cimento pelo Método de Volhard**

Concreto	Amostra	Teor de Cl <sup>-</sup> (%)	Média (%)	Sd (%)	CV (%)	Erro (%)
CCV	CCV1	0,91	0,86 A	0,84	97,69	0,42
	CCV2	2,01				
	CCV3	0,10				
	CCV4	0,41				
CPR	CPR1	0,39	0,88 A	0,72	81,95	0,36
	CPR2	1,67				
	CPR3	1,28				
	CPR1	0,16				

Fonte: a autora (2018).

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; Sd: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação; Erro: Erro Estatístico.

**Tabela 6 - Análise da Variância ANOVA Método de Volhard**

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados médios	Função F	P Valor
Explicada	0,0006125	1	0,0006125	0,00	0,9757
Não explicada	3,64758	6	0,607929		
Total	3,64819	7			

Fonte: a autora (2018).

Nota: Se o P-valor é superior a 0,05 (5%) não existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

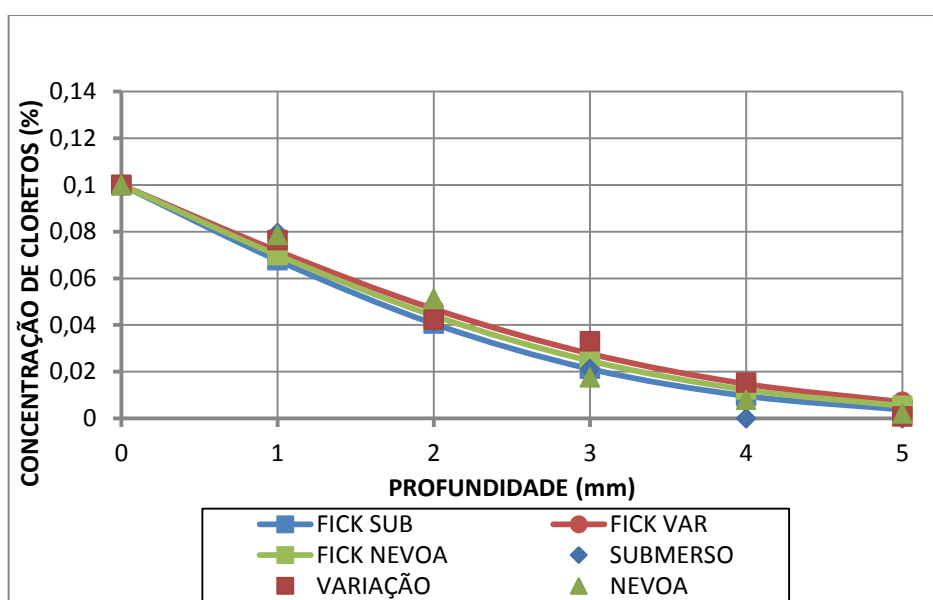
A análise *Tukey-Kramer* em conjunto com a análise de variância demonstraram que não existem diferenças estatísticas entre os dois tipos de concreto no que se refere ao teor de cloretos. Isso significa que, na profundidade estudada, ambos os concretos possuem concentrações similares. Além disso, os teores obtidos se mostraram altos, se comparados aos teores máximos

estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015), sendo de 0,05 a 0,40% em relação à massa de cimento.

Esses resultados, se analisados isoladamente, anulam a hipótese de que o CPR é superior ao CCV quando se fala em teor de íons cloreto. Porém, se for levado em consideração outros aspectos em torno do estudo e da metodologia, pode-se especular que resultados diferentes poderiam ser determinados.

No que diz respeito à metodologia, como já dito anteriormente, a concentração da solução de NaCl era saturada, o que pode ter contribuído para o acúmulo de íons cloreto na superfície do corpo de prova do CPR. Isso pode ser observado na profundidade de penetração dos íons, que foi muito inferior à do CCV, obtendo valor médio de 1,4 mm.

Ainda considerando esse aspecto, pode ser levantada outra questão relacionada à forma de estudo, a profundidade na qual foram extraídas as amostras analisadas. Sendo a profundidade de remoção de concreto de 5 mm, pode-se considerar que os resultados obtidos expressam muito mais a superfície do corpo de prova do que seu interior. Mazer (2010) construiu um perfil de penetração de íons cloreto para concretos convencionais, relacionando a concentração de cloretos com a profundidade analisada, como pode ser observado na Figura 15.



**Figura 15- Perfil de penetração de íons Cloretos para a amostra de 18 meses de idade na temperatura de 20°C.**

Fonte: Mazer (2010)



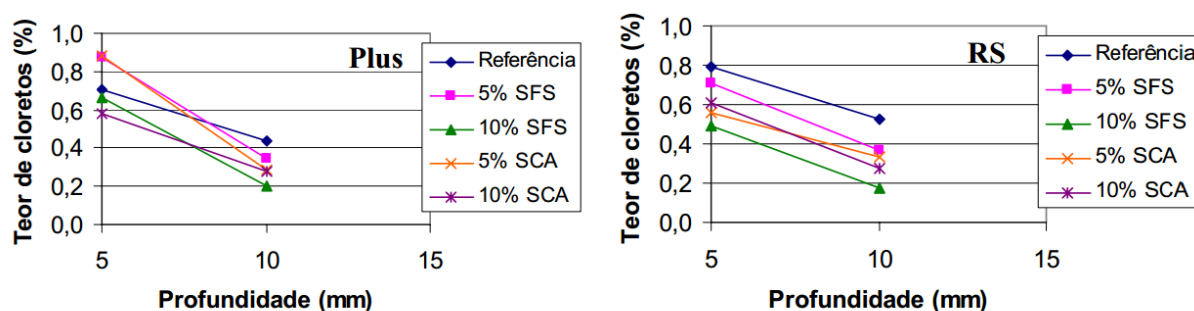
Conforme visto, o teor de cloretos tende a diminuir de acordo com o aumento da profundidade, sendo maior na região mais próxima da superfície, ou seja, nos primeiros milímetros.

No caso do CPR, foi exatamente nessa região que houve maior acúmulo, variando entre 1,10 a 2,00 mm. Assim, mesmo que esse concreto apresente teores de cloretos muito próximos aos obtidos no CCV, é provável que representem a concentração dessa camada mais externa, e não mais internamente ao corpo-de-prova como no caso do concreto convencional.

Isso significa que o CPR é mais resistente ao ataque de cloretos quando comparado ao CCV, uma vez que os resultados obtidos expressam a concentração superficial, ficando limitados às camadas externas dos corpos de prova.

Quando se aborda os valores obtidos dessas concentrações de íons cloreto, altos teores de íons cloreto também foram alcançados em outros estudos, como o de Kayali e Zhu (2005) *apud* Silva (2006). Os autores estudaram concretos com e sem adição de sílica ativa e verificaram que, após 90 dias em exposição à solução de NaCl 3,5%, os concretos sem sílica apresentaram concentrações de cloretos acima de 1% em relação à massa de cimento.

Silva (2006), estudando concretos de alto desempenho com diferentes tipos de cimento CP V-ARI e adições, expostos à solução de NaCl 3,5% por 15 meses e também utilizando o método de Volhard, construiu perfis de penetração de cloretos que podem ser analisados através da Figura 16.



**Figura 16 - Teores de cloretos obtidos em corpos de prova de concreto de alto desempenho após 15 meses de exposição em solução e NaCl**

Fonte: Silva (2006)

Como se pode observar, Silva (2006) também obteve altos teores de íons cloreto, sendo que os resultados variaram de 0,2 a 0,9% em relação à massa de concreto.

Ainda deve-se considerar que os resultados obtidos no presente estudo apontam para séries não homogêneas, ou seja, valores muito distantes entre si. Esse fato pode ser provado através dos altos valores de CVs (coeficientes de variação) e erros estatísticos obtidos no teste de *Tukey-Kramer*. Assim, é necessária uma investigação maior a fim de se obter resultados mais significativos, o que pode ser alcançado através do aumento da amostragem e da profundidade de coleta da amostra, com o objetivo de se obter concentrações nas regiões mais centrais dos corpos de prova e avaliar se realmente existe o risco de iniciação de corrosão.

## 5. CONCLUSÃO

Após o término das atividades planejadas nesta pesquisa, a respeito do estudo de concretos de ultra-alto desempenho e de concretos convencionais frente à contaminação por cloretos, foi possível esclarecer algumas questões relacionadas ao comportamento de ambos os tipos de concreto quando se trata da penetração de cloretos.

O concreto de pós-reativos, sendo objeto de estudo no que diz respeito ao concreto de ultra-alto desempenho, se mostrou mais resistente à penetração de íons cloreto, ainda que o teor de cloretos obtido na profundidade analisada seja estatisticamente igual ao do concreto convencional. O que acontece é que, por ter propriedades físicas, químicas e mecânicas superiores às do CCV, o CPR torna-se mais resistente ao ingresso desses íons para seu interior, barrando a entrada desses agentes agressivos para o interior, que, conseqüentemente, se acumulam na superfície do elemento.

Já o concreto convencional é mais propício a sofrer corrosão por ação de íons cloreto, uma vez que possibilita que esses íons adentrem seu interior de forma mais profunda, o que pode, dependendo das condições de exposição, ocasionar a despassivação da armadura em elementos de concreto armado.

Por fim, conclui-se, com o presente estudo e metodologias adotadas, que o CPR se apresenta mais resistente do que o CCV quando se fala de ataque de íons cloreto. Contudo, entende-se a necessidade de estudos mais aprofundados, com o uso de diferentes métodos e análises, para se obter uma análise mais completa a fim de se obter resultados mais concretos e provar essa superioridade.

Para trabalhos futuros sugere-se, então, o uso de diferentes métodos de medição de cloretos, como o método potenciométrico, a fim de se avaliar os resultados obtidos através de diferentes procedimentos. Ainda, sugere-se que se trace um perfil de cloretos para o concreto de pós-reativos e o compare aos perfis obtidos para os concretos convencionais em estudos já realizados. A microscopia eletrônica de varredura também pode ser utilizada como ferramenta para o estudo, para se obter a análise química do interior do concreto e verificar a existência de íons cloreto.

## REFERÊNCIAS

- AÍTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução Geraldo Serra. Ed: Pini. São Paulo, 2000.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas do estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- \_\_\_\_\_, J. J. O. **Contribuição à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Tendências actuales em la investigación sobre corrosión de armaduras**. Informes de La Construcción, V. 40, n. 398, p. 7-14, 1988.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland de alta resistência inicial. **NBR 5733**. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. **NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. **NBR 13279**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **NBR 5739**. Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **NBR 5738**. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – procedimento. **NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. **NBR 12655**. Rio de Janeiro, 2015.
- BARBOSA, P.; MONTEIRO, E. C.; HELENE, P.; COSTA, I. **A avaliação da técnica de extração eletroquímica de cloretos na reabilitação de estruturas de concreto armado**. Instituto Brasileiro do Concreto, 44º Congresso Brasileiro, 2002.
- BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.
- CARMONA, A.; MEREGA, A. **Retrospectiva da patologia no Brasil, estudo estatístico**. COLLOQUIA 1988, JORNADA EM ESPAÑOL Y PORTUGUES SOBRE ESTRUCTURAS Y MATERIALES, Madrid, 1988. Anais. Madrid: COLLOQUIA, vol. 6, pg. 101-123, 1988.

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

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** 1988. 220p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

ELSENER, B. **Long-term durability of electrochemical chloride extraction.** In: Materials and Corrosion, 2008, 59, No. 2, pg. 91-97. Alemanha, 2008.

ELSENER, B.; BOHNI, H. **Electrochemical chloride removal - field test.** In: SWAMY, R.N. ed. Corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield: Sheffield Academic Press, p.1451-1462, 1994.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção de armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

FIGUEIREDO, E. P. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** In: ISAIA, G.C., IBRACON. São Paulo, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HAMAALI, A. L. **A study of selecting an efficient procedure for intermittent electrochemical chloride extraction.** Norwegian University of Science and Technology NTNU, pg. 8, 2010.

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

\_\_\_\_\_, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993a.

\_\_\_\_\_, P. R. L. **Durabilidade das estruturas de concreto armado.** In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 3., 1993b, São Paulo. Anais...São Paulo: EPUSP, pg-37-48, 1993b.

\_\_\_\_\_, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto.** Ambiente Construído, São Paulo: ANTAC, v.1, n. 2, pg. 45-57, 1997.

HENCHE, D.; ALESSI, E. **Concreto de Pós-Reativos: Estudo de dosagem e propriedade.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

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

HUANG, T.; HUANG, X.; WU, P. **Review of recente developments of electrochemical chloride extraction on reinforced concrete in civil engineering.** International Journal of Electrochemical Science, vol.9, pg.4589-4597, 2014.

IHEKWABA, N. M.; HOPE. B. B.; HANSSON, C. M. **Carbonation and Electrochemical Chloride Extraction from concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 7, pg. 1095-1107, 1996.

KIM, K. B.; HWANG, J. P.; ANN, K. Y. **Influence of cementitious binder on chloride removal under electrochemical treatment in concrete.** Construction and Building Materials, 104, p. 191-197, 2016.

LIMA, A. J. M. **Engenharia de Avaliações.** 348p. Apostila dos cursos de graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MAZER, W. **Metodologia para a previsão da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado utilizando lógica difusa.** Tese (Doutorado) – Pró Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2010.

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

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** 2002. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

NINCE, A. A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas nas regiões Centro-Oeste.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 1996.

ORELLAN HERRERA, J. C.; ESCADEILLAS, G.; ARLIGUIE, G. **Electro-chemical chloride extraction: Influence of C3A of the cement on treatment efficiency.** Cement and Concrete Research, vol. 36, pg.1939-1946, 2006.

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.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos à diferentes períodos de cura.** 2001. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SHARP, S. R.; CLEMENA, G. G.; VIRMANI, Y. P.; STONER, G. E. **Electrochemical Chloride Extraction: influence of concrete surface on treatment.** 2002.

SILVA, F. G. **Estudo de concreto de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236p. Tese (Doutorado) – Área de Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**, 8ª ed. Ed: Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2006.

TÉCHNE. **Ultrafinos**. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo285469-1.aspx>>. Acesso em: 16 de maio de 2018.

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, G.C. Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed: IBRACON. 2011.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research, Fo nº 504. Stockholm, 1982.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

VOGEL, A. I.; MENDHAM, J.; DENNEY, R. C.; BARNES, J. D.; THOMAS, M. **Análise Química Quantitativa**. 6ª ed, Ed: LTC. São Paulo, 2002.