



**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE
CIMENTO NO GRAU DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM
ARGAMASSAS**

CURITIBA
2016



ANA PAULA IMAI
RICARDO HENRIQUE DEMETERKO
RODRIGO MOITA AIKIN

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE
CIMENTO NO GRAU DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM
ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

CURITIBA
2016

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil prof. De Luca pela orientação deste trabalho

A todos os professores do IDD que transmitiram o conhecimento necessário para realização deste trabalho.

Aos colegas do curso pelas experiências trocadas durante todo o curso.

Aos familiares dos integrantes pelo apoio a nova etapa de conhecimentos e pela paciência pelo período de estudos.

Aos funcionários da UFPR pela disponibilização do espaço e material para realização do preparo dos corpos de prova.

A todos que de certa forma contribuíram para execução deste trabalho.

FOLHA DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CONCRETO NO GRAU DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Por

ANA PAULA IMAI

RICARDO HENRIQUE DEMETERKO

RODRIGO MOITA AIKIN

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS OBRAS CIVIS, DO
INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A
SEGUIR MENCIONADOS.

Curitiba (PR) ____ de ____ de ____.

Nome do Professor Orientador

Nome do Prof. Co-orientador

Nome do terceiro professor integrante da banca

RESUMO

A durabilidade de uma estrutura de concreto armado é sua capacidade de manter a integridade frente aos agentes que a danificam. Existem diversos agentes que contribuem para a corrosão da armadura presente na estrutura, diminuindo assim a durabilidade da estrutura. No Brasil, devido a sua extensa faixa litorânea, há muitas construções expostas ao ambiente agressivo do litoral. A proteção da estrutura pode ser dada tanto pela aplicação de agentes protetores quanto pela escolha adequada de seus constituintes. A inadequação em projeto da edificação ao seu uso acarreta em gastos excessivos com manutenção corretiva. O uso de recursos naturais também está presente nas manutenções corretivas. Para esta pesquisa abordou-se os íons de cloro como agente agressivos. O ingresso de cloretos no concreto pode ocorrer principalmente por mecanismos de absorção e difusão. O cimento é formado pelo clínquer e adições. O presente estudo teve por objetivo avaliar a penetração de cloretos em corpos de prova de argamassas produzidos com três tipos de cimento: CP II-F, CP II-Z e CP IV a penetração de cloretos. Para completa ação as adições no cimento os corpos de provas foram curados em via úmida durante 84 dias. A penetração de cloretos foi avaliada por aspersão de AgNO_3 após imersão em solução de cloreto. As medições ocorreram em 30, 60 e 90 dias no corpo de prova seccionado ao meio. A profundidade de penetração do cloreto foi medida a partir da borda externa do corpo de prova. A diferença entre os valores de penetração de cloreto nos corpos de prova de argamassa evidenciou o comportamento das adições na resistência na penetração de cloretos. Os cimentos com adição de pozolana tiveram maior resistência a penetração. As penetrações médias no corpo de prova com cimento CP IV foram muito inferiores aos demais corpos de prova. A escolha do cimento CP IV para construções em ambientes agressivos pode garantir maior resistência a penetração de cloretos.

Palavras chave: cloretos, corrosão, durabilidade, concreto, argamassa, cimento, pozolana.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de reações de oxirredução. Adaptado de GENTIL (1982).....	15
Figura 2: Regiões anódicas e catódicas no metal. Adaptado de PANNONI (2015)..	16
Figura 3: Modelos de formação de macrocélulas de corrosão devido a presença de fissura (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).....	17
Figura 4: Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013)	18
Figura 5: Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos (TREADAWAY, 1988, apud FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).....	20
Figura 6: Esquema do programa experimental	23
Figura 7: Corpos de prova moldados	25
Figura 8: Corpos de prova desmoldados	26
Figura 9: Medição da penetração de cloretos na argamassa	28
Figura 10: Posições de medições da profundidade de penetração de cloretos.....	28
Figura 11 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP II-F	29
Figura 12 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP II-Z.....	31
Figura 13 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP IV	32
Figura 14 - Diagrama tempo de submersão x Penetração de cloretos	33
Figura 15: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata	34
Figura 16: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata	35
Figura 17: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata	35
Figura 18: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata	36

Figura 19: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata 36

Figura 20: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Distribuição de materiais adaptado de NBR 7215:1996	25
Tabela 2 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP II-F	29
Tabela 3 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP II-Z	30
Tabela 4 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP IV	32
Tabela 5 - Profundidade média de penetração de cloretos nas amostras	33
Tabela 6 - Profundidade média de penetração de cloretos nas amostras calculado pela equação 1	34

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Profundidade de penetração de íons cloreto em relação ao tempo	24
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA	2
1.2.	OBJETIVOS	2
1.2.1.	Objetivo Geral	2
1.3.	HIPÓTESE	3
1.4.	JUSTIFICATIVAS	3
1.4.1.	Tecnológicas	3
1.4.2.	Econômicas	3
1.4.3.	Sociais	4
1.4.4.	Ecológicas	4
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	5
1.6.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	CIMENTO PORTLAND	7
2.1.1	Composição do Cimento Portland	7
2.1.2	Tipos de Cimento Portland	10
2.2	CORROSÃO EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO	14
2.2.1.	Mecanismos de corrosão	14
2.2.2.	Conceitos de corrosão	15
2.2.3.	Fatores de Influência	16
2.2.4.	Teor de cloretos	20
2.2.5	Mecanismos de penetração de cloretos	21
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1.	SISTEMATIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.2.	DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA	24
3.3.	ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR IMERSÃO	26
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
4.1.	RESULTADOS PARA O CIMENTO CP II-F	29

4.2.	RESULTADOS PARA O CIMENTO CP II-Z	30
4.3.	RESULTADOS PARA O CIMENTO CP IV	31
4.4.	COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS	33
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

Estruturas em concreto armado é mundialmente um dos principais sistemas construtivos adotado para construção de edificações sejam elas residenciais, comerciais, industriais independente do seu porte (MARCELLINO, s.l.). Tais estruturas estão sujeitas a processos de corrosão ocasionados por elementos presentes no meio ambiente no qual a edificação está inserida (HELENE *et al.*, 2005), que penetram na estrutura principalmente pela rede de poros da mesma (CRAUSS, 2010). Dentre os elementos causadores de corrosão de armadura destaca-se a ação de íons cloreto que resultam num rompimento pontual da camada passivadora da armadura e início da processo de corrosão por oxidação direta (TORRES, 2011), criando um ciclo autossustentável já que o íons cloreto não são consumidos na reação (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

A porosidade das peças em concretos podem ser minimizadas através da adição de materiais pozolânicos ao cimento (GUEDERT, 1989). Desta forma, com diversos tipos de concreto que a indústria civil dispõem e com o conhecimento do local e a agressividade do meio ambiente em que a edificação será executada, é possível reduzir a porosidade dos elementos da estrutura e garantir uma maior proteção da armadura contra a corrosão a que ela estará suscetível.

Assim sendo, busca-se com este estudo, definir a influência do tipo de cimento adotado para o concreto de uma determinada estrutura na proteção contra a penetração de cloretos na mesma.

O conhecimento sobre a influência do cimento na proteção da estrutura permite redução das intervenções corretivas ao longo da vida útil da estrutura além de aumentar a sua durabilidade. Tais consequências também reduzem gastos com obras de reparo, que já chegaram a custar 2,6% do PIB brasileiro (BONIN, 1988), permitem a manutenção da arquitetura inicial da edificação que por sua vez reduz a deterioração urbana e favorece o turismo na região (IBAPE/SP, 2005) e ainda reduz o consumo de recursos naturais já escassos em diversos locais do globo.

Cabe ressaltar também, que qualquer edificação deve garantir um conforto satisfatório ao seu usuário final, aumentando a importância de um bom projeto, uma boa execução e redução de manutenção corretivas.

Para comprovação do objetivo deste trabalho optou-se pela realização de um ensaio de penetração de cloretos em corpos de prova moldados com argamassa, totalizando 9 amostras (3 corpos de prova com 3 tipos de cimento diferentes). As amostras foram curadas em via úmida por 84 dias, permitindo a ação das adições do cimento, e inseridas em solução salina com NaCl. Nos marcos de 30, 60 e 90 dias 3 corpos de prova, 1 de cada tipo de cimento, foi seccionado e aspergido com uma solução de nitrato de prata, cuja produto de reação com o cloreto penetrado na peça é um sal esbranquiçado, que permite medir a profundidade de penetração dos íons cloreto.

Com a comparação das profundidades aferidas, foi possível determinar o cimento mais resistente a penetração de cloretos e orientar a escolha do melhor tipo de cimento para ambientes com presença de cloretos.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Argamassas executadas com diferentes tipos de cimento possuem diferentes resistências a difusão de íons cloretos?

1.2. OBJETIVOS

A seguir será exposto o objetivo geral deste trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar se argamassas executadas com diferentes tipos de cimento possuem diferentes resistências a penetração de íons cloreto.

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que cimentos diferentes utilizados em argamassas influenciam na resistência a penetração de cloretos devido a redução de vazios na peça produzida pelas adições do cimento utilizado.

1.4. JUSTIFICATIVAS

A seguir serão apresentadas as justificativas para a elaboração deste estudo.

1.4.1. Tecnológicas

A proteção da estrutura contra a penetração de cloretos ou de outros agentes agressivos pode se dar atuando sobre o aço ou sobre o concreto através de pinturas, proteção catódica, aditivos e outros (PERDRIX, 1982), porém a composição do cimento também pode influenciar na proteção da mesma, portanto torna-se importante estudar a influência dos tipos de cimento contra esta forma de degradação da estrutura.

1.4.2. Econômicas

A manutenção predial gera gastos substanciais para usuários de edificações em geral. No Brasil, há grande carência de estudos estatísticos acerca da importância da manutenção predial na economia como um todo. Carece-se de dados pontuais sobre obras de manutenção. Grande parte dos dados encontrados provem da indústria da construção (dados de quantidades de materiais). Entretanto

para BONIN (1988), cerca de 2,6% do PIB brasileiro é destinado a obras de reparos.

O processo de recuperação de uma estrutura de concreto armado cuja armadura encontra-se corroída pela presença de íons cloretos envolve a remoção do cobrimento da armadura danificada, lixamento e tratamento com tinta a base de zinco (HELENE et al., 2005), processo com elevado custo, enquanto a escolha de um diferente tipo de cimento não se significa, necessariamente, um aumento do custo da obra. Portanto, o resultado deste estudo, comprovando-se a hipótese proposta, pode representar em uma economia ao longo da vida útil da estrutura por reduzir a frequência de manutenções corretivas visto que o cloreto terá maior resistência a sua penetração na estrutura dependendo do cimento escolhido.

1.4.3. Sociais

Estruturas mais duráveis requerem menos manutenção e geram menos gastos aos usuários. Obras com menos manifestações patológicas correm menos riscos de possuírem danos significativos. Obras duradouras não causam deterioração urbana que favorece o aumento criminalidade e repele o turismo (IBAPE/SP, 2005).

1.4.4. Ecológicas

Para MATOS (2008), o homem vem tomando consciência dos impactos e da escassez de recursos naturais que ele mesmo vem gerando. Com a percepção vem o entendimento de que seu estilo de vida deve ser alterado. Para o autor, a população consome 25% a mais de recursos do que o planeta tem a capacidade de restaurar. Em diversos locais ao redor do globo vemos pessoas sofrendo com escassez de água, poluição urbana, aquecimento global e falta de demais recursos

naturais. Por isso, estruturas mais duráveis, são adequadas ao momento em que vivemos e à consciência que adquirimos.

Conforme exposto anteriormente, a redução de manutenções corretivas frequentes, também reduzem o impacto ambiental ao longo da vida útil da estrutura já que o ciclo de vida dos materiais necessários para a recuperação de uma estrutura danificada pela presença de cloretos envolve consumo de recursos naturais.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir-se os objetivos propostos este trabalho será elaborado da seguinte forma:

- a) Revisão bibliográfica acerca dos diferentes tipos de cimento, da degradação por cloretos, citando seus mecanismos de ação, das formas de proteção da estrutura e do ensaio de penetração de cloreto por imersão;
- b) Determinação dos traços de cimentos;
- c) Realização dos ensaios pertinentes a fim de comparar os traços e proteções escolhidas

Após a conclusão destas etapas analisar-se-á os resultados tornando possível a resolução do problema proposto e a apresentação das devidas orientações quanto a escolha do tipo de cimento e proteção a ser aplicada.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em 5 capítulos conforme disposto a seguir.

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa proposto assim como os objetivos deste trabalho propondo uma hipótese para solução do problema. Além disso apresenta as justificativas para elaboração deste trabalho e determina os procedimentos metodológicos para a execução do mesmo.

O **Capítulo 2** consta a revisão bibliográfica pertinente ao assunto e apresenta o cimento Portland, seus componentes principais e os tipos existentes de acordo com as porcentagem de adições praticadas em cada tipo. Após é descrito os mecanismos de corrosão com enfoque na corrosão por íons de cloreto e as formas de penetração dos mesmos na estrutura. E por fim apresenta alguns sistemas de proteção da estrutura contra agentes agressivos, a determinação do traço de argamassa para o estudo e o ensaio utilizado.

O **Capítulo 3** discorre sobre o programa experimental do presente estudo explicitando a maneira adotada para dosagem, mistura e cura dos materiais e o ensaio de penetração de cloretos.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados obtidos através do ensaio de penetração e compara com o esperado.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os mecanismos de corrosão, a definição do ataque por cloretos à armadura de estruturas em concreto armado, assim como as características dos concretos e proteções contra a penetração de cloretos

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento é um dos materiais de construção mais utilizados na construção civil, por conta da sua larga utilização em diversas fases da construção. O cimento pertence à classe dos materiais classificados como aglomerantes hidráulicos, esse tipo de material em contato com a água entra em processo físico-químico, tornando-se um elemento sólido com grande resistência a compressão e resistente a água e a sulfatos. (E-CIVIL, 2015)

2.1.1 Composição do Cimento Portland

De acordo com a ABCP (2002), o cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

2.1.1.1 Clínquer

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso

calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante. (ABCP, 2002)

2.1.1.2 Adições

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos. (ABCP, 2002)

2.1.1.2.1 Gesso

De acordo com (ABCP, 2002) O gesso tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa.

2.1.1.2.2 Escórias de Alto-forno

As escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Antigamente, as escórias de

alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também tinham a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final. (ABCP, 2002)

2.1.1.2.3 Materiais Pozolânicos

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Da mesma forma que no caso da escória de alto-forno, pesquisas levaram à descoberta de que os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, se bem que de forma distinta. Isto porque não basta colocar os materiais pozolânicos, sob forma de pó muito fino, em presença de água, para que passem a desenvolver as reações químicas que os tornam primeiramente pastosos e depois endurecidos. A reação só vai acontecer se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença de mais um outro material. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana.

Esse é o motivo pelo qual a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade, por exemplo, aos concretos e às argamassas. (ABCP, 2002)

2.1.1.2.4 *Materiais Carbonáticos*

Segundo (ABCP, 2002), os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante. Quando presentes no cimento são conhecidos como filler calcário.

2.1.2 Tipos de Cimento Portland

Atualmente, o cimento Portland é normalizado e existem onze tipos no mercado:

- a) **CP I:** Cimento Portland comum;
- b) **CP I-S:** Cimento Portland comum com adição;
- c) **CP II-E:** Cimento Portland composto com escória;
- d) **CP II-Z:** Cimento Portland composto com pozolana
- e) **CP II-F:** Cimento Portland composto com filler;
- f) **CP III:** Cimento Portland de alto-forno;
- g) **CP IV:** Cimento Portland pozolânico;
- h) **CP V-ARI:** Cimento Portland de alta resistência inicial;
- i) **RS:** Cimento Portland Resistente a Sulfatos;
- j) **BC:** Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação;
- k) **CPB:** Cimento Portland Branco.

2.1.2.1 Cimento Portland Comum (CP-I)

A NBR 5732 descreve o cimento Portland comum como aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos. A única adição presente no CP-I é o gesso (cerca de 3%, que também está presente nos demais tipos de cimento Portland). O gesso atua como um retardador de pega, evitando a reação imediata da hidratação do cimento.

2.1.2.2 Cimento Portland Comum com Adição (CP I-S)

Segundo a NBR 5732, O CP I-S, tem a mesma composição do CP I (clínquer e gesso), porém com adição reduzida de material pozzolânico (de 1 a 5% em massa). Este tipo de cimento tem menor permeabilidade devido à adição de pozzolana.

2.1.2.3 Cimento Portland Composto com Escória (CP II-E)

Segundo a NBR 11578, os cimentos tipo CP II são aglomerantes hidráulicos obtidos pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais. O CP II-E, contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. O CP II-E é composto de 94% à 56% de clínquer + gesso e 6% à 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. O CP II-E, é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento.

2.1.2.4 Cimento Portland Composto com Pozolana (CP II-Z)

O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. O cimento CP II-Z, também pode conter adição de material carbonático (filler) no limite máximo de 10% em massa. (NBR 11578, 1991)

2.1.2.5 Cimento Portland Composto com Filler (CP II-F)

De acordo com a NBR 11578, o CP II-FO CP II-E é composto de 90% à 94% de clínquer + gesso com adição de 6% a 10% de material carbonático (filler) em massa. Este tipo de cimento é recomendado desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento porém não é indicado para aplicação em meios muito agressivos. (NBR 11578, 1991)

2.1.2.6 Cimento Portland de Alto-forno (CP III)

A NBR 5735 define o cimento Portland de alto-forno como aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto forno, moídos em conjunto ou em separado. Contém adição de escória no teor de 35% a 70% em massa, que lhe confere propriedades como; baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividade (barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, etc.) como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento, estruturas de concreto simples, armado ou protendido, etc.

2.1.2.7 Cimento Portland Pozolânico (CP IV)

Aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozzolânicos, moídos em conjunto ou em separado. Durante a moagem é permitido adicionar uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos. O teor de materiais pozzolânicos secos deve estar compreendido entre 15% e 50% da massa total de aglomerante. (NBR 5736, 1991)

2.1.2.8 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)

De acordo com a NBR 5733, o CP V ARI é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos. O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do concreto em suas primeiras idades, podendo atingir 26 MPa de resistência à compressão em apenas 1 dia de idade. É recomendado o seu uso, em obras onde seja necessário a desforma rápida de peças de concreto armado.

2.1.2.9 Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)

Qualquer um dos tipos de cimento Portland anteriormente citados pode ser classificado como resistente a sulfatos, desde se enquadrem dentro de uma das características abaixo:

- a) Teor de aluminato tricálcico (C3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;

- b)** Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- c)** Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- d)** Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

É recomendado para meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos.

2.2 CORROSÃO EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

Neste capítulo será apresentado os conceitos de corrosão eletroquímica, os mecanismos de corrosão e os mecanismos de proteção da estrutura.

2.2.1. Mecanismos de corrosão

A corrosão das armaduras somente ocorre pela penetração de agentes agressivos na estrutura através da adição destes na fase de amassamento do concreto (PERDRIX, 1992) ou através da interação da estrutura com um ambiente agressivo (HELENE *et al.*, 2005).

Sabe-se, porém, que o concreto atua como agente protetor da armadura protegendo-a fisicamente do contato direto com o meio externo e quimicamente devido ao elevado pH que auxilia na formação de uma película protetora em torno do aço, chamado de película passivadora. A sua formação se dá através de uma reação eletroquímica que forma uma camada de óxidos sobre o aço (Enio *et al.*, 2013).

Segundo PERDRIX (1992) a despassivação do aço se dá por 2 principais motivos: a redução do PH do concreto através da reação com substâncias acidas e presença de íons de cloretos que promovem a destruição pontual da película passivadora.

A seguir será abordado em mais detalhes a corrosão por íons cloretos e as formas de penetração do mesmo na estrutura.

2.2.2. Conceitos de corrosão

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material metálico ou não através de uma ação eletroquímica ou química do meio ambiente em conjunto ou não com um esforço mecânico (GENTIL, 1982).

A corrosão derivada de um esforço mecânico, conhecida como corrosão sob tensão, ocorre apenas em aços submetidos a grandes tensões que ocasionam uma microfissura que progride rapidamente causando a ruptura do metal (PERDRIX, 1992). Ainda segundo PERDRIX (1992) este fenômeno é visto em estruturas com aço protendido e, como o objeto deste trabalho é avaliar a resistência do cimento a penetração de cloretos, abordaremos detalhadamente apenas a corrosão eletroquímica.

Já a corrosão eletroquímica nada mais é que uma reação de oxirredução na qual há a troca de elétrons entre duas substâncias onde a espécie química oxidada perde elétrons e a espécie química reduzida ganha elétrons (GENTIL, 1982). Tal fenômeno pode ser exemplificado pelas reações apresentadas na Figura 1:

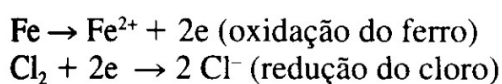


Figura 1: Exemplo de reações de oxirredução. Adaptado de GENTIL (1982)

No caso dos metais a corrosão eletroquímica ocorre em meio aquoso com a transferência de íons através do eletrólito, que resulta na formação de uma zona anódica (que doa elétrons) e um zona catódica (que recebe os elétrons) sob a superfície do aço. (PERDRIX, 1992). Este processo apenas ocorrerá quando houver a presença de um eletrólito, oxigênio e uma diferença de potencial (MOTA *et al.*, 2012).

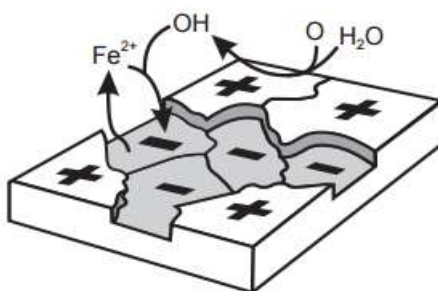


Figura 2: Regiões anódicas e catódicas no metal. Adaptado de PANNONI (2015)

Por fim a corrosão pode ainda ser classificada de acordo com a sua forma sendo os mais frequentes a corrosão (GENTIL, 1982):

- Uniforme: corrosão em toda a superfície do metal de forma generalizada
- Por placas: a corrosão se limite a regiões do metal;
- Alveolar: apesar de também ocorrer em regiões, esta corrosão promove sulcos no metal em formato de alvéolos
- Puntiforme ou por pite: a corrosão ocorre em pontos do metal

2.2.3. Fatores de Influência

Neste tópico serão apresentados os principais fatores que influenciam o início ou a velocidade do processo corrosivo.

2.2.3.1. Fissuras

A presença de fissuras na peça de concreto resultado num caminho mais rápido para o acesso de agentes agressivo ao interior da estrutura. Quando estes chegam até a armadura a corrosão inicia-se na porção que não se encontra recoberta pelo concreto (PERDRIX, 1982). Segundo (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013) quando a fissura é longitudinal em relação a armadura a região inferior da armadura atuará como ânodo e em quando a fissura é transversal as regiões laterais a fissura atuarão como ânodo. Em ambos os casos o cátodo será atuado pela região sem o recobrimento.

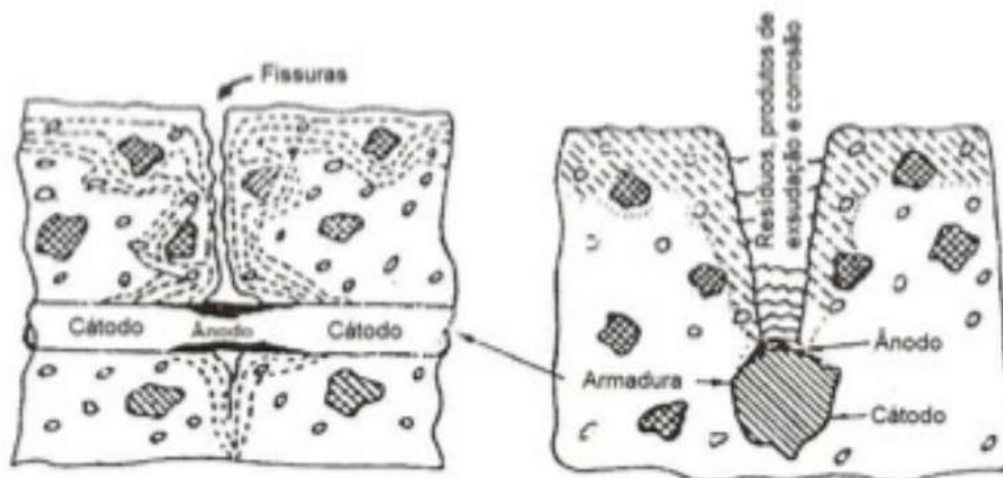


Figura 3: Modelos de formação de macrocélulas de corrosão devido a presença de fissura (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013)

Cabe citar que estudos recentes mostram que não há diferença significativa do comportamento da estrutura em relação a corrosão quando as fissuras possuem aberturas da ordem de 0,4mm. Este fato ocorrer pois o produto de corrosão fecham a abertura da fissura, dificultando o acesso dos agentes agressivos (PERDRIX, 1982).

2.2.3.2. Umidade

O concreto possui facilidade na absorção de água e sua umidade impacta na velocidade de corrosão (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013)

A velocidade de corrosão neste caso dependerá da resistividade do concreto e do acesso de oxigênio no interior do mesmo, ou seja, se os seus poros estiverem saturados a sua resistividade será a menor possível, porém o oxigênio não terá acesso ao interior da estrutura inviabilizando a corrosão. Mas se os poros estiverem com pouca umidade, apesar do oxigênio acessar a estrutura, a sua resistividade será baixa o que impedirá o processo corrosivo. E por fim quando o concreto estiver com um teor de umidade alto mas com os poros não saturados de água este possuirá uma alta resistividade e livre acesso do oxigênio acelerando a velocidade de corrosão (PERDRIX, 1982).

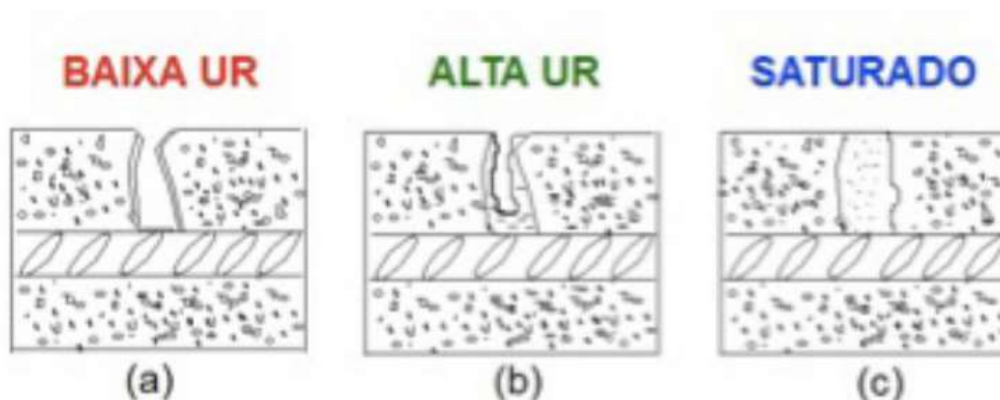


Figura 4: Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013)

2.2.3.3. Temperatura

A influência da temperatura na velocidade de corrosão pode ter sentidos opostos pois quando há um aumento da temperatura no concreto há aumento da mobilidade de íons que favorece a reação de oxirredução (GOÑI et al., 1989 *apud* FIGUEIREDO E MEIRA, 2013). Porém este no processo inverso, ou seja, com a redução da temperatura, há a possibilidade de aumento da condensação no concreto, que resulta em aumento de água nos poros que por sua vez também acelera o processo corrosivo (HELENE, 1993).

Desta forma a interpretação da temperatura como fator acelerante do processo corrosivo pode trazer conclusões errôneas (PERDRIX, 1982).

2.2.3.4. Macropares Galvânicos

A formação de macropilhas galvânicas ocorre na interação entre duas áreas distintas onde uma é corroída e a outra mantém-se passiva, ou seja, um age como ânodo enquanto a outra como cátodo, respectivamente. Este efeito soma-se a micropilha já existente acelerando a velocidade de corrosão (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Esse efeito é bem característico de pontes onde a parte superior do tabuleiro é agredida pelos sais de geada enquanto a parte inferior mantém-se passiva (PERDRIX, 1982)

2.2.3.5. Íons de cloreto

Um dos agentes causadores da despassivação da armadura e da corrosão da mesma são os íons de cloreto que penetram no concreto através da interação deste com o meio ambiente, da presença dos íons em compostos utilizados para a produção de concreto ou ao empregar sais de degelo (HELENE *et al.*, 2005).

Este fenômeno pode ocorrer por corrosão eletroquímica na qual há a formação de uma pilha devido a presença de eletrólitos na superfície da barra ou na camada de concreto que a envolve. (TORRES, 2011) ou por oxidação direta que se dá através de uma reação química direta entre o metal e o agente agressivo sem deslocamento de elétrons.

A ruptura pontual da película passivadora (oxidação direta) ocorre pela combinação dos cloretos com os íons de Fe^{+2} resultando no composto FeCl_2 . Através da hidrólise deste composto os íons de cloreto ficam novamente livres para novas reações e, como há também a presença de íons H^+ e OH^- , estes elevam a acidez das áreas anódicas e aumentam o pH das áreas catódica, respectivamente, potencializando a corrosão. Desta forma a corrosão por pites é autossustentável e a progressão da corrosão permite a entrada de novos íons aumentando ainda mais a velocidade de corrosão (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

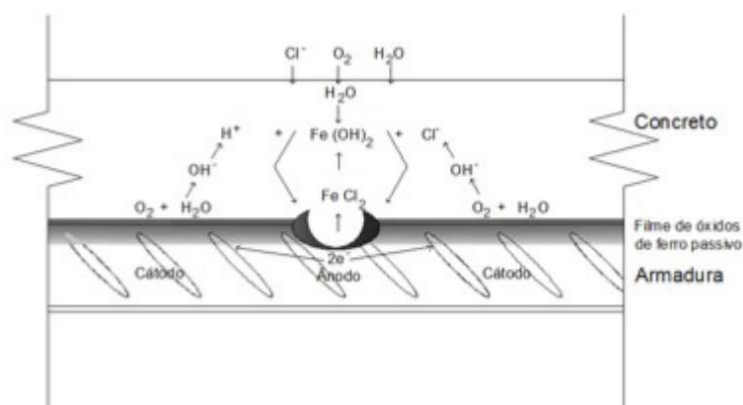


Figura 5: Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos (TREADAWAY, 1988, apud FIGUEIREDO & MEIRA, 2013)

2.2.4. Teor de cloretos

A presença de cloretos dentro da estrutura, por si só, não representa o início da corrosão, para isto se faz necessário a presença de uma quantidade mínima na estrutura para início do processo corrosivo, sendo esta chamada de limite crítico de cloretos (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

A determinação deste limite depende de diversas variáveis, como tipo de cimento, proporção de cimento, relação a/c, entre outros, o que torna difícil a determinação de um limite seguro. Sabe-se, porém, que apenas os cloretos dissolvidos na fase aquosa são potencialmente perigosos, pois parte dos cloretos presentes na estrutura encontram-se incorporados a fase sólida do cimento hidratado, principalmente na forma de cloroaluminatos. (PERDRIX, 1992).

Mesmo assim, o teor de cloretos totais se refere a massa de cimento, devido a dificuldade de mensurar a concentração de hidroxilas no poro do concreto e ao fato que os cloretos já ligados podem vir a participar de um processo de corrosão (GLASS & BUENFELD, 1997 *apud* FIGUEIREDO & MEIRA, 2013), evento que pode ser iniciado pela carbonatação do concreto (PERDRIX, 1992).

Sendo assim, tem se apresentado como valor seguro para cloretos totais em relação a massa de cimento os limites de 0,4% para estruturas em concreto armado e 0,2% para concreto protendido. (DURAR, 1997 *apud* FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

2.2.5 Mecanismos de penetração de cloretos

O transporte dos íons de cloreto no concreto se dão por 4 mecanismos.

São eles: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica. (CASCUDO, 1997)

2.2.5.1 Permeabilidade

A permeabilidade é a facilidade com que um líquido escoar através de material sendo impulsionado com um gradiente de pressão hidráulica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Desta forma, os cloretos quando dissolvidos em água, penetram na estrutura por este mecanismo.

2.2.5.2 Absorção Capilar

A absorção capilar é o principal mecanismo para ingresso de íons de cloreto na estrutura, sendo facilitado pelos ciclos de secagem e molhagem, o que mais se aproxima do comportamento de estruturas expostas a ambientes externos. (SILVEIRA, 1996).

Segundo Mota (*et al.*, 2012) a absorção depende dos poros da estrutura, sendo que quanto menor forem mais fácil se dará a penetração de líquidos para o interior da estrutura. Além disso, a interconexão destes poros também é um fator que afeta no grau de absorção (CASCUDO, 1997)

2.2.5.3 Difusão

A difusão nada mais é que o movimento de massa entre camadas com diferentes concentrações de um determinado composto, sempre no sentido da maior

concentração para a menor, causado por uma diferença do potencial químico ou um gradiente de concentração (TANG, 1999)

Para a ocorrência deste mecanismo os poros devem estar preenchidos com água e os íons devem romper a barreira superficial do concreto (CRAUSS, 2010).

2.2.5.4 Migração

O processo de corrosão da armadura gera um campo elétrico na estrutura permitindo a migração iônica (CASCUDO, 1997).

Este mecanismo ganhou evidência após a aplicação de técnicas de dessalinização e re-alkalinização de estruturas, porém ainda carece de informações. (HISADA *et al.*, 1999)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho possui como objetivo determinar a influência do tipo do cimento na resistência contra a penetração de cloretos. Para tanto, foi realizado o ensaio de penetração de cloretos por imersão no qual as amostras de argamassa permaneceram submersas por um período de 3 meses com avaliação mensal da profundidade de penetração dos íons de cloro.

3.1. SISTEMATIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental segue, resumidamente, o esquema mostrado na Figura 6:

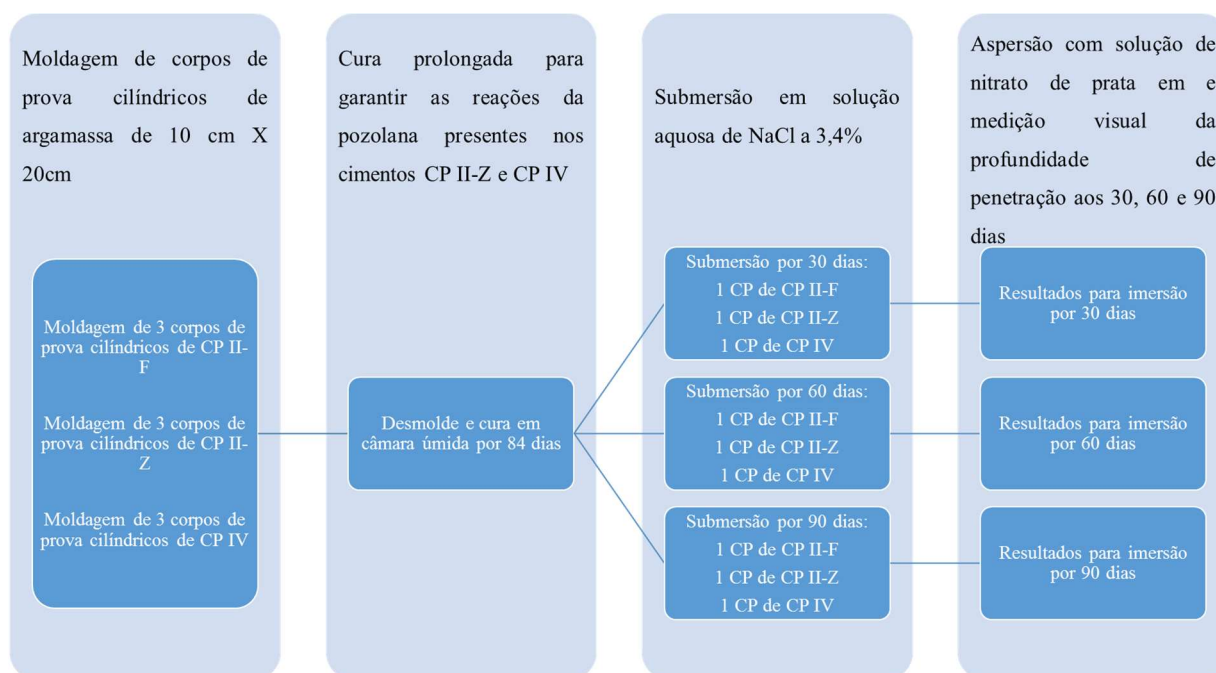


Figura 6: Esquema do programa experimental

Os corpos de provas foram moldados no traço de 1:3 com relação a/c de 0,61 utilizando 3 tipos de cimento: CP II-F-32, CP II-Z-32 e CP IV-32. Como a profundidade de penetração será avaliada a cada 3 meses foram elaborados 3 corpos de prova para cada cimento, resultando em 9 amostras no total. O número de amostras foi limitado

devido ao tempo disponível no laboratório e devido a esta limitação, para não incorrer em medições com discrepância excessiva entre elas, visto que foi moldado apenas um corpo de prova para cada tipo de cimento em cada idade analisada, a moldagem de corpos de prova de argamassa ao invés de concreto tornou-se a melhor opção já que a presença de agregados pode bloquear a frente de penetração de cloretos (NT 492, 1999).

Além disso, como forma de validar os resultados, estes foram comparados com a equação de penetração (Equação 1) proposta por Bakker que correlaciona as profundidades de penetração com o tempo de imersão da amostra na solução salina em semanas (SCHNEIDER *apud* Bakker, 2005).

$$X = a + k'\sqrt[2]{t}$$

Equação 1: Profundidade de penetração de íons cloreto em relação ao tempo

Ainda de acordo com SCHNEIDER *apud* Bakker (2005) como o parâmetro “a” assume valores baixos e inconsistentes o mesmo pode ser definido como nulo.

3.2. DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

Como não serão realizados ensaios para determinação da resistência do corpo de prova, tomou-se como base no traço de 1:3 como orientado na NBR 7215:1996, porém serão moldados 3 corpos de prova por cada cimento.

Além disso, como limitação do trabalho, escolheu-se os cimentos com adição de material pozolânico, pois a presença deste material no concreto diminui a porosidade do mesmo e aumenta a sua resistência a penetração de agentes agressivos externos (GUEDERT, 1989).

Assim sendo, a dosagem da argamassa deu-se conforme a Tabela 1. A seguir, a mistura foi realizada em misturador mecânico de argamassa obedecendo as características e metodologia propostas pela NBR 7215:1996.

Tabela 1– Distribuição de materiais adaptado de NBR 7215:1996

Material	Qte (g)	Material	Qte (g)	Material	Qte (g)
Cimento Portland CII-F-32	468	Cimento Portland CII-Z-32	468	Cimento Portland CIIV-32	468
Água	225	Água	225	Água	225
Areia normal		Areia normal		Areia normal	
-fração grossa	321	-fração grossa	321	-fração grossa	321
-fração média grossa	321	-fração média grossa	321	-fração média grossa	321
-fração média fina	321	-fração média fina	321	-fração média fina	321
-fração fina	321	-fração fina	321	-fração fina	321

Finalizada a mistura dos materiais a argamassa foi moldada em corpos de provas cilíndricos nas dimensões de 10x20cm. A moldagem foi realizada em 2 camadas sendo cada uma adensada manualmente com 12 golpes. A Figura 7 mostra os corpos de prova após a moldagem.



Figura 7: Corpos de prova moldados

Após 24 horas os moldes foram removidos (Figura 8) e os corpos de provas foram movidos para cura em câmara úmida, onde permaneceram por 84 dias para a cura. As reações entre cimento e compostos pozolânicos necessitam de cura mais prolongadas do que outros compostos, sem qualquer adição. (AMORIM et al, 2000)

Segundo Neville (1997), a reação pozolânica das cinzas é lenta e prolongada, podendo iniciar-se apenas ao fim de uma semana ou mais.



Figura 8: Corpos de prova desmoldados

Este tempo prolongado de cura visou garantir o tempo de reação da pozolana para os cimentos CP II-Z e CP IV.

3.3. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR IMERSÃO

Para analisar a resistência a utilizou-se um ensaio acelerado de penetração de cloretos através da imersão dos corpos de prova em solução aquosa de NaCl a 3,4%. Esta concentração é amplamente utilizada por ser a mesma concentração média encontradas nos oceanos (NEVILLE, 1997; HELENE, 1993). Como o objetivo do trabalho é a comparação de resistência de penetração de cloretos entre concretos diferentes foram imersos nesta solução 3 corpos de prova para cada tipo de cimento determinado durante 3 meses.

Para aferição da profundidade de penetração dos cloretos foi retirado mensalmente um corpo de prova para cada tipo de concreto e o mesmo foi cortado radialmente. Na face cortada, foi aspergido nitrato de prata (AgNO_3) a 0,1M resultando no esbranquiçamento da área onde os íons de cloro penetraram. Este composto em contato com o cloro livre reage com o mesmo resultando em cloreto de prata (AgCl) de cor esbranquiçada, ou seja, nas áreas do corpo de prova onde houver penetração de cloro, ao aspergir a solução de nitrato de prata, forma-se uma precipitação esbranquiçada tornando possível avaliar a profundidade de penetração dos íons de cloro na peça.

Este ensaio, método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata, foi criado pelo Dr. Mario Collepardi em 1970 sendo incorporado a norma italiana UNI 7928 (MEDEIROS *et al*, 2015) e foi adotado neste trabalho pela sua praticidade e eficácia. O mesmo procedimento de medida da profundidade de penetração encontra-se descrito na NT 492. Além disso o ensaio padronizado pela ASTM C1202 é criticado por pesquisadores por representar a condutividade elétrica do concreto e não a resistência a penetração de cloretos (CRAUSS, 2010 *apud* ANDRADE, 1993; ISAIA, 1996; SHI *et al*, 1998; WEE *et al*, 2000; CALÇADA, 2002).

Por fim, após a medição mês a mês da profundidade de penetração foi possível determinar qual amostra resistiu por mais tempo ao ataque de cloretos.

.

.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o tempo em submersão em solução salina, os corpos de prova foram aspergidos com solução de nitrato de prata, que evidenciou o quanto os íons de cloro penetraram na argamassa. A medição foi realizada com auxílio de paquímetro digital, conforme mostra a Figura 9.



Figura 9: Medição da penetração de cloretos na argamassa

As medidas foram tomadas em 7 posições ao longo da altura do corpo de prova e espaçadas em 10 mm. Tanto os 10 mm iniciais quanto os finais serão desprezados conforme esquemático apresentado na Figura 10.

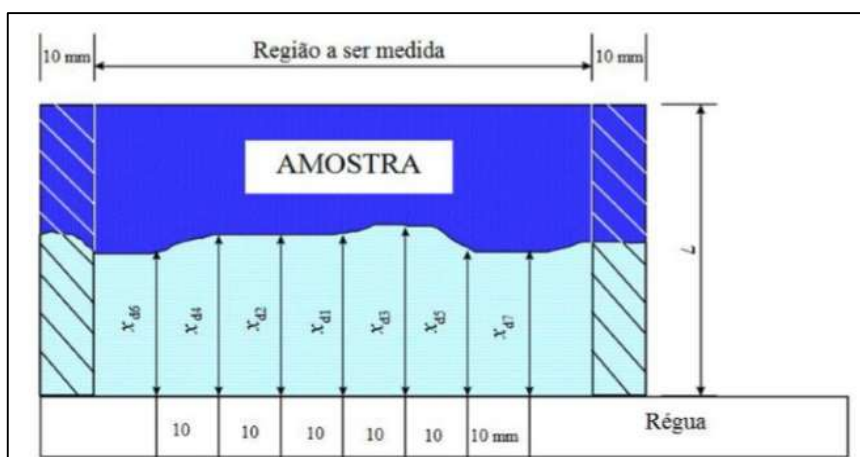


Figura 10: Posições de medições da profundidade de penetração de cloretos

4.1. RESULTADOS PARA O CIMENTO CP II-F

A penetração de cloretos no corpo de prova moldado com cimento CP II-F foi bastante evidente e evoluiu de forma continua com o tempo. Na Tabela 2 estão representados os valores aferidos:

Tabela 2 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP II-F

Posição	Tempo (dias)		
	30	60	90
X _{d1}	9,37	18,77	27,01
X _{d2}	8,69	19,75	25,85
X _{d3}	13,94	18,25	26,92
X _{d4}	9,74	20,39	27,35
X _{d5}	21,87	18,10	27,62
X _{d6}	10,94	20,67	28,06
X _{d7}	32,88	18,68	28,54
Média	15,35	19,23	27,34
Desvio Padrão	8,97	1,04	0,87

O gráfico com os resultados é apresentado na Figura 11:

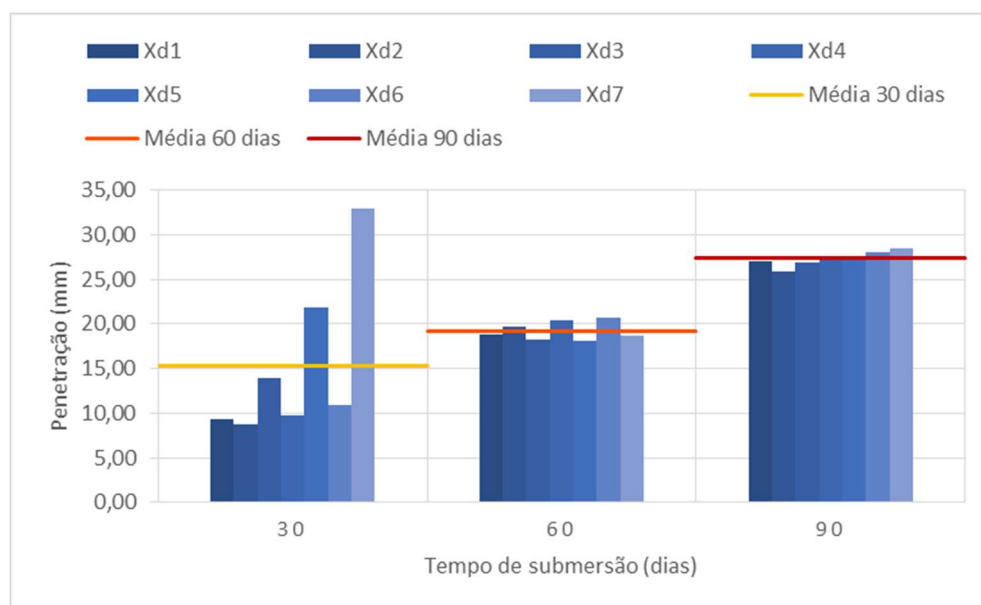


Figura 11 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP II-F

É possível observar que a amostra ensaiada aos 30 dias possui um valor médio de penetração expressivo. Contudo, ao observarmos o desvio padrão elevado, e valores como X_{d5} e X_{d7} muito superiores aos demais, pode-se assumir que a penetração nestes pontos tenha se dado através de uma fissura decorrente do processo de retração na cura, e não pela porosidade intrínseca da argamassa produzida com CP II-F. Esta retração é denominada retração autógena e ocorre em duas etapas (a primeira durante o estado plástico da argamassa e a segunda no estado endurecido) (Bastos *et al*, 2001).

Nos meses decorrentes, o desvio padrão apresenta-se mais baixo, reafirmando que os dados divergentes aos 30 dias foram apenas nesta amostra.

4.2. RESULTADOS PARA O CIMENTO CP II-Z

Para o cimento CP II-Z a penetração de cloretos no corpo de prova também se deu de forma bastante evidente e com evolução contínua com o tempo, porém, como este cimento possui adição de pozolana, a frente avançou mais lentamente. Na Tabela 3 estão representados os valores aferidos:

Tabela 3 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP II-Z

Posição	Tempo (dias)		
	30	60	90
X_{d1}	8,16	18,44	19,24
X_{d2}	7,50	17,14	19,74
X_{d3}	7,07	17,81	20,26
X_{d4}	7,11	17,25	21,24
X_{d5}	7,16	18,24	20,86
X_{d6}	7,68	19,56	22,99
X_{d7}	9,65	18,37	23,21
Média	7,76	18,12	21,08
Desvio Padrão	0,92	0,82	1,53

O gráfico com os resultados é apresentado na Figura 12:

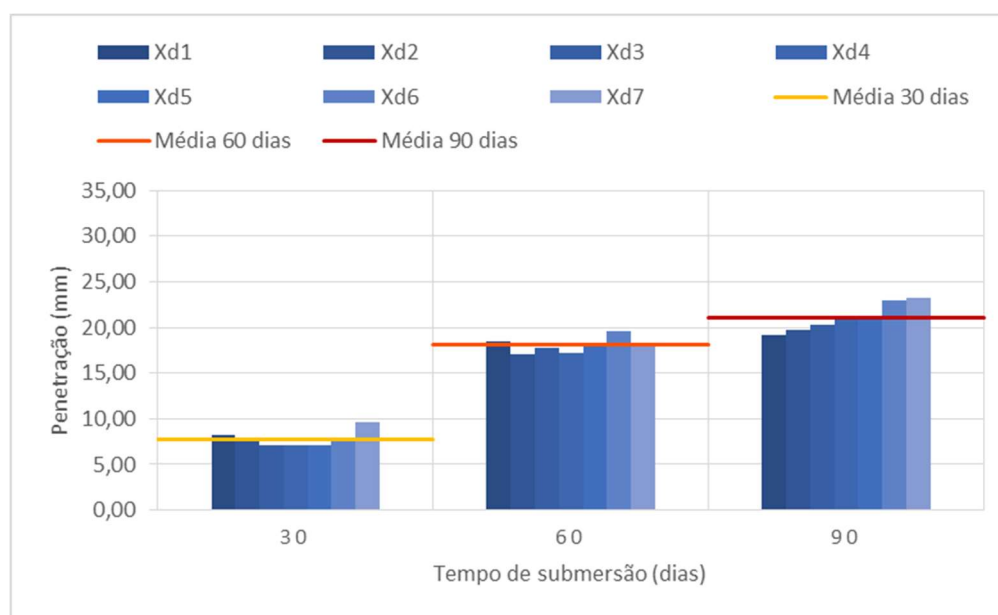


Figura 12 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP II-Z

Analisando os dados dos ensaios das amostras de CP II-Z, nota-se um salto dos valores de penetração medidos aos 30 dias para os dados obtidos aos 60 dias. Dos 60 dias aos 90 dias, o valor é pouco alterado. Como os valores de desvio padrão permanecem baixos nos três casos, presume-se que uma maior penetração de cloretos ocorre entre o primeiro e segundo mês de submersão dos corpos de prova.

4.3. RESULTADOS PARA O CIMENTO CP IV

Para o corpo de prova moldado com CP IV, já que esse cimento possui maior adição de pozolana resultando em uma menor porosidade, a penetração de cloretos se deu de forma muito mais lenta, porém ainda de forma continua ao longo do tempo. Na Tabela 4 estão representados os resultados para este corpo de prova:

Tabela 4 - Valores de profundidade de penetração para o cimento CP IV

Posição	Tempo (dias)		
	30	60	90
X _{d1}	4,19	6,13	6,31
X _{d2}	4,51	5,71	6,69
X _{d3}	3,72	6,50	7,59
X _{d4}	3,85	5,11	7,22
X _{d5}	5,02	5,64	7,10
X _{d6}	4,49	5,88	8,00
X _{d7}	6,73	3,55	8,58
Média	4,64	5,50	7,36
Desvio Padrão	1,02	0,96	0,77

O gráfico com os resultados é apresentado na Figura 13:

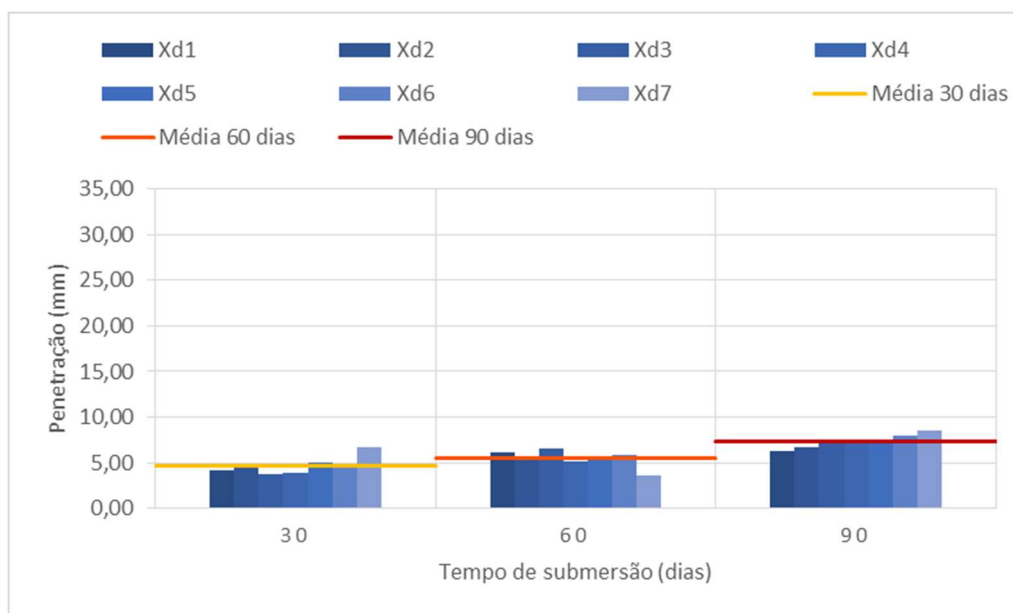


Figura 13 - Profundidade de penetração X Tempo de submersão para o cimento CP IV

Os dados resultantes dos ensaios realizados nos corpos de prova de argamassa produzida com CP IV mostram um crescimento quase linear, sem grandes saltos nos valores de penetração de cloretos. Observando-se o valor encontrado aos 30 dias, é notável que no primeiro mês a taxa de penetração de cloretos é maior que nos

meses subsequentes. Uma das possíveis causas é a presença de fissurações superficiais devido à retração da argamassa durante o processo de cura.

4.4. COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme relatado anteriormente a penetração dos cloretos ficou evidente após a aspersão da solução de nitrato de prata formando uma frente continua que evolui de forma gradativa ao longo do tempo. A Tabela 5 apresenta uma compilação dos valores médios das profundidades de penetração de cloretos nos corpos de prova, e a Figura 14 permite comparar a evolução da penetração ao longo do tempo das amostras.

Tabela 5 - Profundidade média de penetração de cloretos nas amostras

Penetração (mm)	Cimento	Tempo (dias)		
		30	60	90
	CP II F	15,35	19,23	27,34
	CP II Z	7,76	18,12	21,08
	CP IV	4,64	5,50	7,36

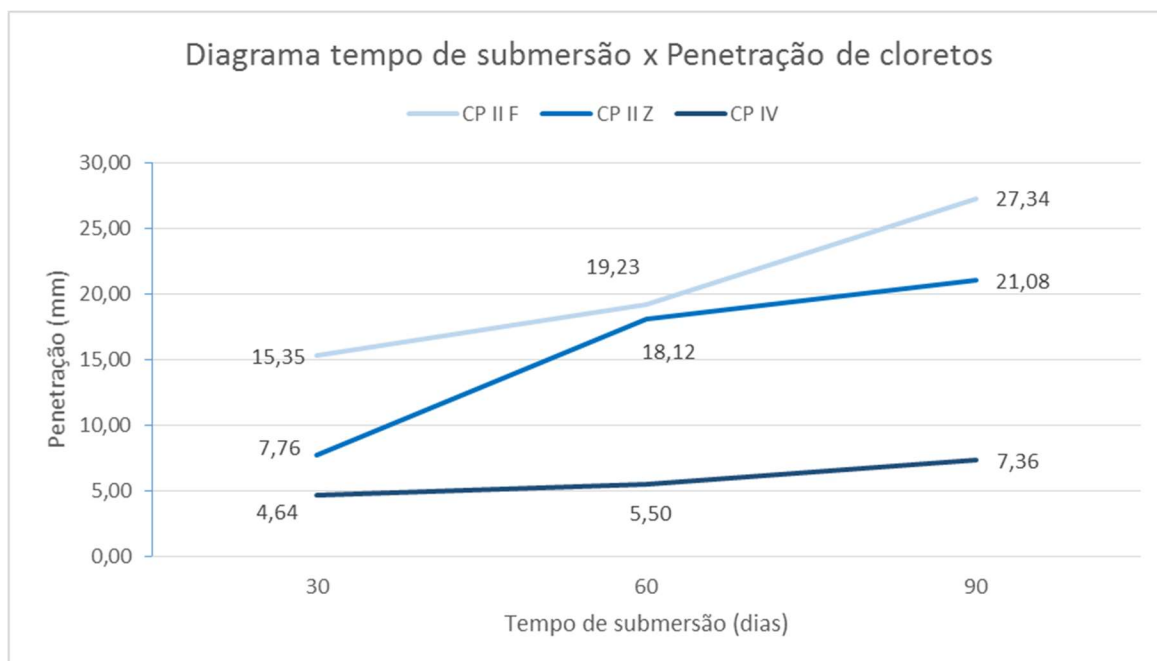


Figura 14 - Diagrama tempo de submersão x Penetração de cloretos

Para validação dos resultados utilizou-se a Equação 1 para determinar a profundidade esperada para cada tipo de cimento, estando os resultados demonstrados na Tabela 6 juntamente com o R^2 para a equação. Como o valor de cada R^2 encontra-se próximo de 1 os valores encontrados no ensaio estão de acordo com a equação proposta pelo estudo realizado por Bakker (1988).

Tabela 6 - Profundidade média de penetração de cloretos nas amostras calculado pela equação 1

Penetração (mm)	Cimento	Tempo (dias)			
		30	60	90	R^2
	CP II F	15,35	19,23	27,34	0,9603
	CP II Z	7,76	18,12	21,08	0,9068
	CP IV	4,64	5,50	7,36	0,9571

A Figura 15 e a Figura 16 mostram as fotos retiradas durante o ensaio das amostras aos 30 dias.



Figura 15: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata



Figura 16: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata

É visualmente notável, já no primeiro mês de ensaio, a proteção que a pozolana deu aos corpos de prova CP II-Z e, especialmente, ao CP IV. A camada cinza na borda externa das amostras representa a profundidade que os íons de cloreto alcançaram na argamassa.

Pode-se perceber, também, a possível fissuração no corpo de prova de CP II-F, na borda inferior direita, o que ocasionou a medição de valores notavelmente mais altos que os demais no mesmo corpo de prova.

A Figura 17 e a Figura 18 mostram as fotos retiradas durante o ensaio das amostras aos 60 dias.



Figura 17: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata



Figura 18: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata

Analisando as fotos, podemos perceber que aos 60 dias, as amostras de argamassa de CP II-F e CP II-Z apresentam penetração de cloretos em níveis similares, enquanto na amostra de CP IV, a camada cinza é notavelmente menor que nas outras duas.

A Figura 19 e a Figura 20 mostram as fotos retiradas durante o ensaio das amostras aos 90 dias.



Figura 19: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, antes da aspersão de nitrato de prata



Figura 20: CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente, após a aspersão do nitrato de prata

Pode-se notar que a penetração de cloretos na amostra de argamassa produzida com CP II-F apresenta-se quase integralmente na peça. A amostra de CP II-Z apresenta um nível intermediário de penetração, enquanto a amostra de CP IV ainda apresenta uma fina camada cinza na borda exterior, mostrando a eficácia da pozolana na proteção da argamassa na penetração de cloretos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados de tais ensaios permitiu a avaliação do efeito da presença de adições no cimento como meio de proteção da ação dos cloretos.

A hipótese inicial, que presumia que cimentos diferentes utilizados em argamassas influenciam na resistência a penetração de cloretos devido à redução de vazios na peça mostrou-se verdadeira, uma vez que as argamassas produzidas com cimentos que possuem adição de pozolana apresentaram melhores resultados em relação à penetração de íons de cloreto.

Isto foi evidenciado tanto pela comparação dos 2 cimentos que possuem esta adição com o cimento aditivado com filler carbonático quanto pela comparação entre diferente concentração de material pozolânico no cimento CP II Z e CP IV. Em todas as idades o CP IV demonstrou-se ser mais resistente a penetração de cloretos dos que os demais cimentos sendo a menor diferença de 40,16% (entre CP II Z e CP IV na idade de 30 dias) e maior diferença de 73,09% (entre CP IV e CP II F na idade de 90 dias). Nota-se também que a com um maior percentual de adição de pozolana obteve-se maior resistência em comparação ao cimento sem adição, visto que em relação ao CP F, o CP IV apresentou uma resistência até 73,09% maior quanto o CP II Z apresentou uma diferença máxima de 49,43%. Credita-se este aumento de resistência a redução da porosidade da peça provocada pela pozolana, desta forma os íons de cloreto encontram maior resistência a penetração.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do número de traços estudados permitindo evidenciar ainda a influência da porosidade na resistência a penetração de

cloretos. Além disso pode-se fazer a avaliação da resistência à penetração de cloretos para diferentes f_{ck} do concreto, visto que para concretos de alta resistência há uma menor porosidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (**NBR 5732**). Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991

___ **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência. Rio de Janeiro, 1991

___ **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003

___ **NBR 5735**. Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991

___ **NBR 5736**. Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991

___ **NBR 7214**. Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982

___ **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996

___ **NBR 11578**. Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. West Conshohocken, 2005

AMORIM, L. V.; PEREIRA, A. S. G.; NEVES, G. A.; FERREIRA H. C.; **Reciclagem de rejeitos de cerâmica vermelha e da construção civil para obtenção de aglomerantes alternativos**, Universidade Federal da Paraíba, 2000

BAKKER, R. F., **Initiation period**. In: SHIESSL, P. (ed.). **Corrosion of steel in concrete**. RILEM Report TC 60-CSC, London, p.22-25, 1988.

BASTOS, P. K. X.; DÉTRICHÉ, C.; BALAYSSAC, J.; CINCOTTO, M. A., **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas de revestimento**. Ambiente construído, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 57-70, 2001

BONIN, Luis Carlos. Manutenção de edifícios: uma revisão conceitual. In: Seminário Sobre Manutenção de Edifícios, 1988, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: UFRGS/PPGEC, 1988. v. 1. p. 1-31.

CASCUDO, O., **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, GO: Editora UFG, 1997

CRAUSS, C., **Dissertação de mestrado: Penetração De Cloretos Em Concretos Com Diferentes Tipos De Cimento Submetidos A Tratamento Superficial**. Santa Maria, 2010

E-CIVIL. **Artigos técnicos**. Disponível em <http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland.htm> Acesso em 01 de agosto de 2015.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. **Boletim Técnico: Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. Disponível em <http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B6-Corros%C3%A3o-das-armaduras-das-estruturas-de-concreto.pdf> Acesso em 12 de outubro de 2016

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro, 1982

GUEDERT, L. O., **Dissertação: Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz com material pozolânico.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1989.

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

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado.** São Paulo, 1993.

HELENE, P. *et al*, **Manual de reparo, proteção e reforço de Estruturas de concreto.** São Paulo, 2005

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. **Evaluation of mineral admixture on the viewpoint of chloride ion migration through mortar.** Cement & Concrete Composites, Great Britain: Elsevier Science, 1999.

IBAPE/SP (Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia de São Paulo). **Inspeção predial: Check-up predial: Guia da boa manutenção.** São Paulo, Livraria e Editora Universitária de Direito, 2005.

NETTO, R. M., **Monografia: Materiais Pozolânicos.** Belo Horizonte, 2006

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

MATTOS, M. L., **Faça a sua parte! Revista Casa e Construção.** São Paulo, n.37, p.60- 63, (s/d).

MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; OLIVEIRA, D. R. B.; SOARES, T., **Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração**

de cloretos em concreto: estado da arte. *Revista ALCONPAT*, Mérida, v. 5, n. 2, p. 149-159, 2015

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

MOTA, J. V. *et al*, **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto.** Maceió – Alagoas, 2012. Disponível em <http://www.vieiramota.com.br/corrosao-0880.pdf>. Acesso em 06/08/2015 às 17 horas.

NORDTEST METHOD (NT), **NT BUILD 492 Concrete, mortar and cement-Based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.** Oslo, 1999

PANNONI, F. D. **PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE CORROSÃO E INCÊNDIO.** Disponível em <https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/manual-protecao-de-estruturas.pdf> Acesso em 12 de outubro de 2016.

PERDRIX, M.D.C.A **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armadura.** São Paulo, 1992

SCHNEIDER, J. A., **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura.** Santa Maria, 2005

SILVEIRA, A. Dissertação: A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

TANG, L. Concentration dependence of diffusion and migration os chloride íons. Part 2. Experimental evaluation. Cement and Concrete Research, USA: Pergamon, 1999.

TORRES, A. S., Tese De Doutorado: Corrosão De Cloretos Em Estruturas De Concreto Armado: Uma Meta-Análise. Porto Alegre, 2011