

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO
SUBMETIDOS A TRATAMENTO SUPERFICIAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Camila Crauss

**Santa Maria, RS, Brasil
2010**

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM
DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO SUBMETIDOS A
TRATAMENTO SUPERFICIAL**

por

Camila Crauss

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS, Brasil
2010**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Dissertação de Mestrado

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM DIFERENTES
TIPOS DE CIMENTO SUBMETIDOS A TRATAMENTO SUPERFICIAL**

elaborada por
Camila Crauss

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)

Ruy Alberto Cremonini, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, 31 de agosto de 2010

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio incondicional, pelo carinho e confiança que me acompanham durante toda vida. As minhas irmãs Mariana e Giana pelo incentivo e companheirismo.

Ao professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini pela oportunidade, orientação e paciência durante o estudo.

A todos os bolsistas e voluntários do grupo GEPECON, pelo conhecimento dividido, pela ajuda durante os ensaios e pelo bom humor.

Aos colegas de mestrado pela troca de informações, conversas esclarecedoras e companheirismo.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil pela disponibilidade e apoio.

À empresa MC-Bauchemie pela cessão dos materiais para a pesquisa.

A CAPES, CNPq e FAPERGS pelos recursos disponibilizados.

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

RESUMO

Dissertação de mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO SUBMETIDOS A TRATAMENTO SUPERFICIAL

AUTORA: CAMILA GRAUSS

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de agosto de 2010

As características de durabilidade devem ser parâmetros de concepção das estruturas de concreto tanto quanto a sua resistência à compressão. O concreto deve manter a integridade frente aos agentes que o danificam, além de atuar como camada protetora à entrada de substâncias que venham a promover a corrosão das armaduras em seu interior. A corrosão das armaduras pode ser devido à carbonatação e à ação dos íons cloretos. O ingresso de cloretos no concreto pode ocorrer por mecanismos de absorção e difusão. Quando este não apresenta resistência à penetração de cloretos faz-se necessário a aplicação de tratamento superficial de proteção. O presente estudo teve por objetivo avaliar a penetração de cloretos em concretos que foram submetidos a três tipos de tratamento superficial: uma argamassa polimérica monocomponente aplicada em camada de 4mm, e um produto obturador dos poros como tratamento simples ou duplo. Os concretos submetidos ao tratamento superficial foram produzidos com três tipos de cimento, CP IV 32, CP II F e CP V, e para os níveis de resistência característica à compressão (f_{ck}) de 15 MPa, 20 MPa e 25 MPa. A penetração de cloretos foi avaliada segundo a norma ASTM C 1202 e por aspersão de $AgNO_3$ após imersão em solução de cloreto.

Os tratamentos superficiais do tipo bloqueadores de poros mostraram capacidade de diminuir o fluxo de entrada de cloretos devido ao tamponamento dos poros da camada superficial do concreto através das reações com os produtos de hidratação do cimento. O tratamento duplo com o bloqueador de poros (XCM) mostrou-se mais efetivo, promovendo uma maior redução na carga total passante e no coeficiente de difusão (k). Essa redução foi maior para os cimentos pozolânicos e no menor nível de resistência investigada, $f_{ck} = 15$ MPa. Já os concretos compostos com cimentos CPIIF e CPV-ARI mostraram maiores valores de carga passante e coeficiente k . Entretanto, a utilização da argamassa polimérica (Z4) com espessura de 4mm foi a melhor alternativa dentre as investigadas, promovendo uma maior redução da carga total passante assim como melhor eficiência na diminuição da penetração de cloretos, apresentando boa aderência com o concreto de substrato e compacidade.

Palavras-chave: concreto; cloretos; tratamento superficial

ABSTRACT

Master' s Thesis
Program of Postgraduation in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil

CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE PRODUCED WHIT DIFFERENT CEMENT TYPES AFTER SURFACE TREATMENT

AUTHOR: CAMILA CRAUSS

THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Date and Local of Defense: Santa Maria, de August 31, 2010

The durability characteristics of concrete should be given the same importance as compressive strength when designing concrete structures. Concrete should be able to withstand the effects of aggressive agents and behave as a protective layer that can block the penetration of substances that could corrode the steel in concrete. The corrosion of reinforcing steel in concrete structures can be caused by factors such as carbonation and the action of chloride ions, which can penetrate the concrete through absorption and diffusion processes. When the concrete does not show resistance to chloride penetration, the use of surface treatment is required. This study investigates chloride penetration in concrete samples that received three different kinds of surface treatment: a single component polymer mortar applied in a 4-mm thick layer, a pore blocker with a single coat and a pore blocker with a double coat. The concrete samples used were produced with cement types CP IV 32, CP II F and CP V and compressive strength values of 15MPa, 20MPa and 25MPa. Chloride penetration was assessed using ASTM C 1202 and AgNO_3 aspersion after immersion in a salt solution in concrete samples with and without surface treatment.

Surface treatments like pore blockers were able to reduce the chloride flow inwards concrete due to the sealing effect in the superficial pore layer, caused by the reactions with the cement hydration products. The double treatment with pore blocker (XCM) showed to be more effective, providing bigger reduction in total passing charge. This reduction was greater in pozzolanic cements and in those with the lowest resistance, $f_{ck}=15$ MPa. The concrete produced with cements type CP II F and CP V showed bigger values of passing charge and diffusion coefficient. The use of polymeric mortar (Z4) with 4 mm thickness was considered the best alternative among those investigated. It produced the greatest reduction in total passing charge as well as the best efficiency in decreasing chloride penetration, and showed a good adherence in the concrete substratum and compactness.

Keywords: concrete; chlorides; surface treatment.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1.1 - Teores limite de cloretos totais segundo ACI 201 | 23 |
| TABELA 1.2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR 12655) | 25 |
| TABELA 4.1 – Caracterização física e mecânica dos cimentos | 44 |
| TABELA 4.2 - Análise química dos cimentos utilizados | 45 |
| TABELA 4.3 – Características físicas dos agregados | 46 |
| TABELA 4.4 – Traços unitários de cada mistura | 48 |
| TABELA 4.5 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloreto de acordo com a carga passante (ASTM C1202/05) | 54 |
| TABELA 5.1 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 91 dias (ASTM C1202) | 60 |
| TABELA 5.2 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 182 dias (ASTM C1202) | 60 |
| TABELA 5.3 – Classificação quanto ao risco de penetração de cloretos segundo ASTM C1202 aos 91 e aos 182 dias | 64 |
| TABELA 5.4 – Coeficientes de penetração k | 72 |
| TABELA 5.5 – Consumo de materiais e custo por m ³ das três misturas de referência | 84 |
| TABELA 5.6 – Consumos e custo dos tratamentos utilizados | 85 |
| Tabela 5.7 – Tempo necessário para os que os íons cloreto penetrem através do cobrimento até atingirem a camada de passivação do aço (<i>tp</i> em anos), calculados a partir dos coeficientes de difusão obtidos no ensaio de penetração de cloretos por aspersão de AgNO ₃ para os diferentes níveis de resistência investigados | 87 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1 – Elementos do mecanismo de corrosão (Cunha&Helene, 2001) | 19 |
| FIGURA 1.2 – Vida útil em relação a corrosão Tuutti (1982, apud Andrade 1992) | 20 |
| FIGURA 1.3 – Variação do teor crítico em função da UR e da qualidade do concreto. (Figueiredo, 2005 apud Pedroso, 2008) | 24 |
| FIGURA 2.1 – Processos de transporte de massa no concreto (Isaia, 1995) | 28 |
| FIGURA 2.2 – Perfil de concentrações para o estado estacionário | 32 |
| FIGURA 2.3 – Perfil de concentrações no estado não estacionário para três tempos diversos | 32 |
| FIGURA 3.1 – Tratamento formador de película (Medeiros, 2008) | 36 |
| FIGURA 3.2 – Tratamento hidrófobo (Medeiros, 2008) | 37 |
| FIGURA 3.3 – Tratamento obturador de poros (Medeiros, 2008) | 39 |
| FIGURA 3.4 – Aplicação do tratamento obturador de poros aplicado nas arquibancadas do estádio do Pacaembu (Site do fabricante, 12/07/2010) | 40 |
| FIGURA 3.5 – Figura esquemática de reparo utilizando argamassa polimérica (Site do fabricante 12/07/2010) | 42 |
| FIGURA 4.1 – Distribuição granulométrica da areia | 46 |
| FIGURA 4.2 - Distribuição granulométrica da brita | 47 |
| FIGURA 4.3 – Aspersão de solução de nitrato de prata nos corpos-de-prova após ensaio ASTM C1202/05 | 55 |
| FIGURA 5.1 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPIV aos 91 dias | 56 |
| FIGURA 5.2 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPII-F aos 91 dias | 57 |
| FIGURA 5.3 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPV-ARI aos 91 dias | 57 |
| FIGURA 5.4 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPIV aos 182 dias | 58 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.5 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPII-F aos 182 dias | 58 |
| FIGURA 5.6 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPV-ARI aos 182 dias | 59 |
| FIGURA 5.7 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV aos 91 dias | 62 |
| FIGURA 5.8 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIIF aos 91 dias | 62 |
| FIGURA 5.9 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV-ARI aos 91 dias | 63 |
| FIGURA 5.10 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV aos 182 dias | 64 |
| FIGURA 5.11 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIIF aos 182 dias | 65 |
| FIGURA 5.12 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV-ARI aos 182 dias | 65 |
| FIGURA 5.13 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CP IV aos 91 dias | 66 |
| FIGURA 5.14 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPII-F aos 91 dias | 67 |
| FIGURA 5.15 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPV-ARI-RS aos 91 dias | 67 |
| FIGURA 5.16 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CP IV aos 182 dias..... | 68 |
| FIGURA 5.17 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPII-F aos 182 dias | 68 |
| FIGURA 5.18 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPV-ARI-RS aos 182 dias | 69 |
| FIGURA 5.19 – Resultados de carga passante nas idades de 91 e 182 dias para os três níveis de resistência e tipos de cimento investigados | 70 |
| FIGURA 5.20 – Valor percentual dos resultados de carga passante aos 182 dias em relação aos resultados de 91 dias(100%) | 71 |
| FIGURA 5.21 – Gráficos para obtenção do coeficiente k dos concretos de referência | 74 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.22 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com obturador dos poros em camada única – XC | 75 |
| FIGURA 5.23 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com tratamento obturador dos poros em dupla camada – XCM | 76 |
| FIGURA 5.24 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com tratamento com argamassa polimérica - Z4 | 77 |
| FIGURA 5.25 – Coeficientes k em função dos tratamentos superficiais e níveis de resistência para cada um dos tipos de cimento | 78 |
| FIGURA 5.26 – Variação do coeficiente k em função do tipo de cimento e tratamento superficial | 79 |
| FIGURA 5.27 – Variação percentual do coeficiente k de cada tratamento em relação ao concreto de referência | 80 |
| FIGURA 5.28 – Confronto entre os resultados de coeficiente de penetração k e carga passante Q, de todas as misturas com os resultados de 91 dias | 82 |
| FIGURA 5.29 – Confronto entre os resultados de coeficiente de penetração k e carga passante Q, de todas as misturas com os resultados de 182 dias | 82 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| LISTA DE TABELAS | 6 |
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| INTRODUÇÃO | 12 |
| 1 CORROSÃO DAS ARMADURAS | 17 |
| 1.1 Introdução | 17 |
| 1.2 Mecanismo de corrosão | 17 |
| 1.3 Corrosão generalizada – Carbonatação | 20 |
| 1.4 Corrosão por pites – Íons cloreto | 21 |
| 1.5 Delimitação de teores de cloretos | 24 |
| 1.6 Propriedades normalizadas para o concreto quanto à agressividade do ambiente | 23 |
| 2 MECANISMOS DE TRANSPORTE | 26 |
| 2.1 Introdução | 25 |
| 2.2 Permeabilidade | 29 |
| 2.3 Absorção capilar | 30 |
| 2.4 Difusão | 31 |
| 2.5 Migração | 34 |
| 3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL | 35 |
| 3.1 Formadores de película | 35 |
| 3.2 Hidrófobos | 36 |
| 3.3 Bloqueadores de poros | 37 |
| 3.4 Argamassas | 41 |
| 4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL | 43 |
| 4.1 Introdução | 43 |
| 4.1 Caracterização dos materiais | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.1 Cimento | 44 |
| 4.2.2 Agregados | 44 |
| 4.3 Métodos de dosagem, moldagem e cura | 47 |
| 4.4 Produtos de proteção – processos de aplicação e cura | 49 |
| 4.5 Ensaio realizado | 51 |
| 4.5.1 Ensaio de penetração a cloretos por imersão (EPCI) | 51 |
| 4.5.2 Ensaio acelerado de penetração de cloretos - ASTM C 1202/05 | 53 |
| 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 56 |
| 5.1 Método ASTM C1202 | 56 |
| 5.2 Penetração de cloretos por imersão | 72 |
| 5.3 Integração dos resultados dos dois métodos | 81 |
| 5.4 Viabilidade da produção das misturas estudadas e da aplicação dos produtos de proteção | 83 |
| 5.4.1 Viabilidade econômica..... | 83 |
| 5.4.2 Viabilidade técnica | 85 |
| CONCLUSÃO | 88 |
| SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 92 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |
| ANEXOS | 98 |

INTRODUÇÃO

Dentre os materiais de construção disponíveis, o concreto armado tem sido o escolhido como solução estrutural para a construção de moradias, serviços e infraestrutura urbana. Isto porque, segundo Mehta & Monteiro (2008), os seus constituintes são relativamente baratos e comumente disponíveis na maior parte do mundo. Além disso, adequa-se às mais variadas formas arquitetônicas, e possui boa resistência mecânica.

Devido à grande utilização do concreto, existe também uma preocupação sobre os impactos que o acompanham, tanto referentes ao meio ambiente quanto ao âmbito social e econômico. Segundo Gomes et al. (2003) a indústria da construção civil é responsável por cerca de 10% da economia mundial, no entanto os impactos ambientais alcançam proporções semelhantes. O autor afirma que o setor representa aproximadamente 40% de todo o lixo produzido pelo homem.

A produção do cimento tem uma carga bastante considerável no que diz respeito aos impactos ambientais gerados pelo concreto. É amplamente conhecida a afirmação de que a produção de uma tonelada de cimento gera a emissão de uma tonelada de CO₂ na atmosfera, sendo a indústria do cimento responsável por cerca de 5% do total mundial de emissões de CO₂ (MEHTA, 1998). De acordo com o Sinduscon-SP, o consumo de cimento em 2009 no Brasil foi de 51,8 milhões de toneladas, e a expectativa para 2010 é de que este número alcance a marca de 55 milhões.

De acordo com Neville (1997), o concreto armado, devido a sua capacidade de resistência mecânica, foi idealizado e admitido como dotado de durabilidade por período de tempo ilimitado. Durante muito tempo, a tecnologia do concreto se concentrou na busca de resistências cada vez maiores à compressão, baseada na afirmativa de que concreto resistente era concreto durável. Porém o número de manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado tem aumentado significativamente, principalmente devido ao envelhecimento precoce das construções manifestado através da corrosão das armaduras (HELENE, 1997). Isto

se deve a erros de projeto, à dosagem incorreta, para o f_{ck} e não para o f_{cj} , sem privilegiar a durabilidade, a práticas construtivas inadequadas e ainda à cura deficiente (Resista Tèchne, 2009).

Em conseqüência disso há a necessidade de reparo, ou mesmo reposição em curto espaço de tempo, o que demanda maior consumo de matéria-prima e energia, aumentando a emissão de gases poluentes e a geração de resíduos no decorrer dos anos. Isso tudo contribui para o aumento do impacto ambiental gerado pela indústria da construção.

A resistência potencial, bem como a durabilidade do concreto, segundo Bauer et al (1999), somente serão desenvolvidas satisfatoriamente se a cura for realizada adequadamente e por um período de tempo apropriado, sendo requisito essencial para a obtenção de um concreto de boa qualidade. De acordo com AITCIN (2003), os construtores encaram a cura como uma atividade não-lucrativa e não a fazem pelo simples fato de não serem pagos para isto.

A cura, segundo Helene (1997), é um dos procedimentos fundamentais para a obtenção de uma estrutura de concreto de boa qualidade, juntamente com a composição do concreto (dosagem), a compactação e o cobrimento da armadura.

No início dos anos 90, portanto, antes da vigência da NBR 6118/2003 revisada em 2007, a resistência característica à compressão comumente adotada era de 15 MPa, o que permitia a adoção de relações água/cimento (a/c) muito altas, e desta forma os requisitos de durabilidade não eram atendidos. E, mesmo com a nova resistência mínima fixada pela NBR 6118/2007, de 20 MPa, este valor pode ser alcançado, a depender do tipo de cimento empregado, com valores elevados de relação a/c . Sabe-se que a permeabilidade do concreto é fortemente influenciada por esta relação, de forma que quanto maior a relação a/c , maior será a permeabilidade e menor a durabilidade do concreto, (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008). Soma-se a isto a cura deficiente ou mesmo a inexistência desta.

Assim, ainda hoje, é possível encontrar diversos casos de obras dimensionadas para alcançarem determinada resistência, que apresentam inúmeras patologias em pouco tempo de serviço, pois não foram projetadas para atingirem os requisitos especificados na NBR 6118/2007. Desta forma, mesmo apresentando níveis elevados de resistência à compressão, as peças de concreto se apresentam permeáveis e fissuradas, permitindo, assim, a livre penetração de agentes

agressivos tais como íons cloreto, água, oxigênio, dióxido de carbono, etc, responsáveis pela despassivação e posterior corrosão das armaduras.

A ação dos íons cloreto tem sido apontada, segundo Aitcin (2003), como o principal mecanismo de deterioração das estruturas de concreto armado. A entrada de tais íons na estrutura pode acarretar a corrosão das armaduras de forma pontual e bastante agressiva, pois os íons não são consumidos no processo e seguem despassivando a camada protetora das barras da armadura.

A camada de cobrimento de concreto, quando de boa qualidade e espessura satisfatória, pode proteger a armadura contra a ação dos cloretos. Entretanto, conforme afirma Medeiros (2008), sendo o concreto um meio poroso e suscetível a fissuras superficiais, a camada de cobrimento pode não satisfazer as condições de barreira contra a entrada de íons cloreto. Assim, sendo inevitável o contato e possível contaminação do concreto por este íon agressivo, a utilização de produtos de reparo e proteção, aplicados como tratamento superficial, pode ser uma possível alternativa quanto a proteção do concreto contra a penetração de cloretos.

Dentre os diversos produtos, dois recebem destaque neste estudo. O primeiro deles é um obturador de poros que consiste em cimento portland, sílica e substâncias químicas que penetram no concreto e reagem com os produtos de hidratação do cimento. Esta reação gera uma cristalização insolúvel nos poros e capilares do concreto, dificultando a passagem de agentes agressivos. Outro produto estudado foi uma argamassa polimérica monocomponente, reforçada com fibras, que possui boa aderência ao concreto e que atua como uma camada de proteção contra a passagem de água e outros agentes. Para a avaliação dos diferentes produtos em concretos compostos com diferentes tipos de cimento, (CPIIF, CP IV, CP V), quanto à entrada de íons cloreto, foi realizado o ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC), seguindo as determinações da ASTM C1202 e a determinação da profundidade de penetração avaliada por aspersão de nitrato de prata.

O presente estudo tem como objetivo específico uma avaliação da eficiência da aplicação dos produtos de tratamento superficial quanto a penetração de cloretos, em concretos compostos com diferentes tipos de cimento

O método proposto pela ASTM tem sido alvo de críticas. No entanto, é um método de ensaio amplamente aceito. Isaia (1995) relata que este método apresenta como vantagens a fácil execução do ensaio, a rapidez na obtenção de resultados e

a aplicação a quase todos os tipos de concretos, em especial quando se deseja comparar os resultados de misturas alternativas com uma de referência.

Optou-se por estudar substratos com diferentes tipos de cimento pois é um fator próximo a realidade das estruturas. Embora o cimento CPIV seja o mais comumente usado na região, o cimento do tipo CPIIF tem sido adotado nas concreteiras, e até mesmo o cimento CPV-ARI, este último trazendo alguma preocupação quanto as propriedades de durabilidade, visto que um concreto feito com este cimento, especificado para determinada resistência, alcança valores de relação a/c bem mais altas do que os concretos feitos com os outros dois tipos de cimento. A adoção de três níveis de resistência também se justifica pela proximidade com a realidade. Durante muitos anos foi usual a utilização de concretos com resistência características de 15MPa, passou para 20MPa por exigência de norma e atualmente grande número de estruturas tem sido executadas com concretos com nível de resistência de 25MPa. Essas estruturas tem sido alvo de reparos, com a indicação de produtos como os estudados na presente pesquisa.

As idades em que os ensaios deste estudo foram realizados são bastante baixas (182 dias) levando em conta que o produto obturador de poros reage com o CH remanescente da hidratação do cimento, e que este CH pode ser consumido totalmente tanto pela hidratação da pozolana quanto pelo processo de carbonatação. Se o obturador de poros for aplicado em concretos de idades mais avançadas existe a possibilidade de não haver CH suficiente para que o produto mostre eficiência no tamponamento dos poros. Entretanto, várias estruturas executadas na década de noventa vêm apresentando problemas de corrosão das armaduras e algumas empresas que trabalham com recuperação de estruturas vêm especificando estes produtos utilizados no presente estudo sem se preocupar com o cimento utilizado na confecção na estruturas e o fato de estar carbonatada.

Essa dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo I trata dos processos e fatores que influenciam na corrosão das armaduras do concreto, dando maior atenção à ação dos íons cloreto, que é objeto do presente estudo. Traz também uma breve revisão sobre a delimitação do teor de cloretos aceitável em estruturas de concreto, bem como a classificação e propriedades desejáveis do concreto de acordo com a agressividade do ambiente em que a estrutura será inserida, conforme a normalização vigente.

No capítulo II são discutidos os principais mecanismos de transporte de massa para e através do concreto. São abordados os processos de permeabilidade, absorção, difusão e migração, a forma como ocorrem e os fatores que influenciam e regem tais movimentos de substâncias.

O capítulo III trata dos produtos de tratamento superficial que têm sido utilizados para a proteção do concreto. Além dos obturadores de poros e argamassas poliméricas que fazem parte desta pesquisa, são revisados os formadores de película (tintas e vernizes) e os produtos hidrófugos (hidrorrepelentes).

No capítulo IV são mostradas a caracterização e propriedades dos materiais empregados, além dos procedimentos de dosagem, moldagem e cura dos concretos de substrato. Trata também dos processos de aplicação e cura dos tratamentos superficiais estudados e a metodologia de cada ensaio realizado.

Enfim, o capítulo V traz os resultados dos ensaios de penetração de cloretos pelo método ASTM C1202 e pelo método colorimétrico após imersão em solução salina. Tais resultados são discutidos e confrontados entre si. Consta ainda uma análise de viabilidade da utilização dos produtos de reparo e uma estimativa do tempo necessário até que os cloretos atravessem uma determinada camada de cobertura com base nos resultados de coeficiente de difusão de cloretos.

1 CORROSÃO DAS ARMADURAS

1.1 Introdução

A corrosão das armaduras é apontada como o principal processo de deterioração das estruturas de concreto armado (Aitcin, 2000), e os custos com reparos e recuperação de estruturas com patologias ligadas a este processo são alvo de grande preocupação. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cerca de 40% dos custos da indústria da construção civil dos países desenvolvidos são destinados a recuperação de estruturas prontas. No Brasil a etapa de execução e a manutenção inadequada são os principais fatores que levam à corrosão (Isaia, 1995).

A ação de proteção que o concreto oferece às armaduras nele embutidas se dá pelos processos físico e químico. A proteção física é promovida pela camada de concreto que envolve o aço contra a exposição ao ambiente, chamada camada de cobrimento. Quando esta camada de concreto possui espessura e qualidade satisfatórias, pode impedir a corrosão das barras de aço. O efeito químico é denominado de camada de passivação e se trata, segundo Neville (1997), de uma película de óxido que é formada no momento em que o aço é envolvido pela pasta de cimento e que é fortemente aderida à armadura. Ainda de acordo com o autor, esta passivação só é possível devido ao alto pH da solução dos poros que envolve as barras e que tem valores que variam entre 12,3 e 13,5.

1.2 Mecanismo de corrosão

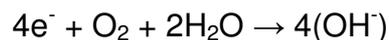
A corrosão das armaduras do concreto é um exemplo de corrosão eletroquímica, um processo de natureza expansiva que, segundo Mehta e Monteiro (2008), causam tensões de tração no concreto levando à fissuração e ao lascamento da camada de cobrimento. Tais fatores provocam a perda de aderência entre o concreto e a armadura, a diminuição da seção transversal das barras e pode chegar a levar a estrutura ao colapso. Ainda segundo os mesmos autores, o aumento de volume causado pela formação de ferrugem pode chegar a 600% do volume da barra original.

O processo eletroquímico se caracteriza pela formação de células de concentração, onde parte da barra se torna anódica e outra parte catódica. As reações que ocorrem entre essas fases podem ser descritas simplificadaamente como segue (Neville, 1997):

Reações anódicas:



Reações catódicas:



Estas reações são desencadeadas quando ocorre a despassivação do aço, e na presença de um eletrólito e de oxigênio, além da diferença de potencial. Os cátions ferrosos formados pela dissolução do metal na fase anódica são transferidos para a solução dos poros, enquanto os elétrons livres migram para a fase catódica, e, na presença de água (eletrólito), ocorre a formação de íons hidroxila (OH^{-}). Como existe a contínua migração de íons através do eletrólito ocorre formação da ferrugem (produto da corrosão) pela combinação entre os íons hidroxila e os íons ferrosos. A figura 1.1 demonstra a pilha eletroquímica, de maneira simplificada, que se forma dentro do concreto no processo de corrosão.

Helene (1993) afirma que sempre existirá água suficiente no concreto para que esta sirva de eletrólito no processo de corrosão. Afirma ainda que as heterogeneidades de qualquer dos componentes, ou da própria estrutura que

envolve as armaduras, são capazes de produzir a diferença de potencial necessária ao desencadeamento da corrosão. Desta forma, o autor entende que a ocorrência da corrosão depende da disponibilidade de oxigênio e da magnitude da corrente que percorre as barras.

As condições de umidade do concreto também determinam a ocorrência da corrosão. Em concretos completamente secos a não existência do eletrólito impede o processo e, da mesma forma, em concretos totalmente saturados não haverá oxigênio suficiente. Neville (1997) afirma que a umidade mais favorável ao desenvolvimento da corrosão está entre 70% e 80%.

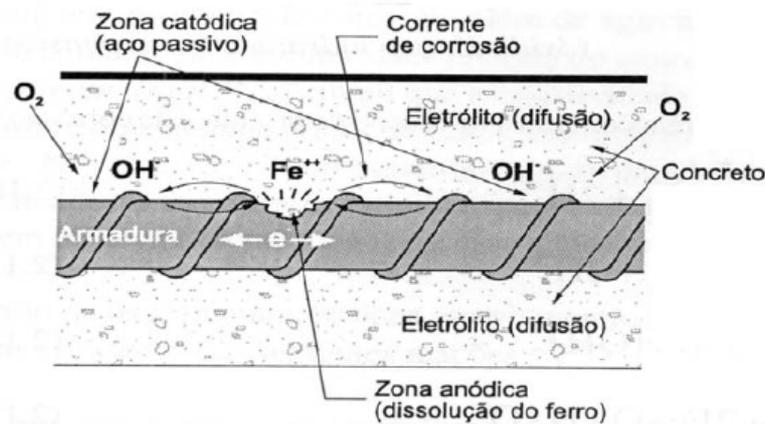


Figura 1.1 – Elementos do mecanismo de corrosão (CUNHA e HELENE, 2001)

O processo de corrosão pode ser desencadeado por agentes agressivos tais como íons cloreto, sulfetos, dióxido de carbono, nitritos, amônio, óxidos de enxofre, gás sulfídrico, fuligem, entre outros. Tais agentes são componentes ou absorvidos pelo concreto. Além de dar início ao processo, eles também podem acelerar a corrosão.

O modelo de vida útil das estruturas proposto por Tuutti (1982), que se baseia na ação corrosiva das armaduras é dividida em duas fases (Figura 1.2). A primeira fase compreende o acesso dos agentes deletérios através da camada de cobertura até o aço e a posterior despassivação deste. Já a segunda fase é caracterizada pelo desencadeamento e progresso da corrosão, definindo a degradação da estrutura (ANDRADE, 1992)

Para Andrade (1992) o fator que define o período de iniciação demonstrado na figura é a ação dos íons cloreto e a diminuição do pH no entorno da armadura,

causado por carbonatação. A agressividade do ambiente em que o concreto está inserido e a facilidade com que estes agentes penetram na camada de concreto irão determinar o tempo que irá durar o período de iniciação da corrosão.

Os tipos de ataque serão definidos conforme o tipo de agente que penetra no concreto. Se existir a entrada de íons cloreto, a corrosão ocorrerá em pontos específicos. Já a carbonatação irá despассивar a armadura de forma generalizada, degradando a barra em toda a extensão da camada de concreto carbonatada. A seguir serão discutidas cada uma dessas duas formas, dando maior destaque à ação dos íons cloreto, objeto deste estudo.

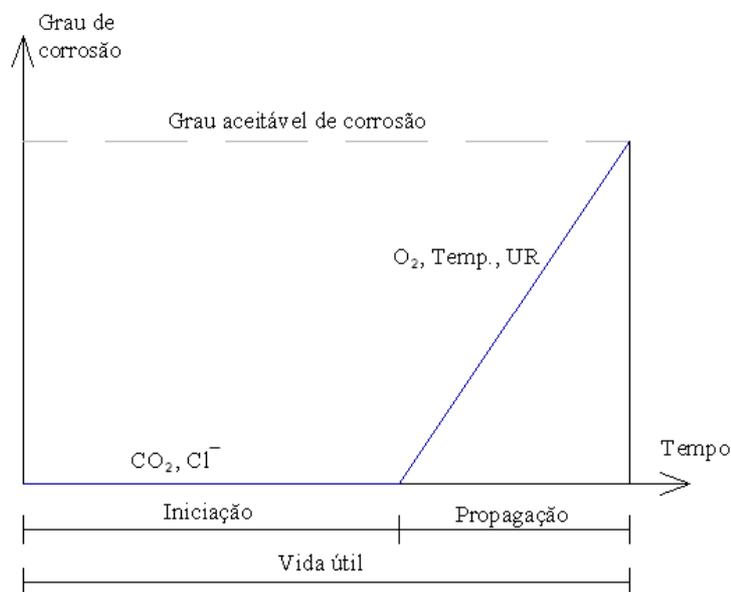
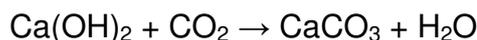


Figura 1.2 – Vida útil em relação a corrosão (TUUTTI, 1982, apud ANDRADE 1992)

1.3 Corrosão generalizada – Carbonatação

A corrosão chamada generalizada, que é causada pela carbonatação do concreto de cobrimento, é resultado da diminuição do pH da solução dos poros que envolvem a armadura. O processo de carbonatação ocorre quando o CO_2 da atmosfera penetra no concreto e reage, na presença de umidade, com o hidróxido de cálcio (CH) da solução ou outros compostos alcalinos (K-H e Na-H), consumindo o CH e formando carbonato de cálcio. As reações são mostradas de forma simplificada a seguir:



Estas reações promovem a distinção de duas regiões no concreto, chamada frente de carbonatação, onde a área atingida sofre uma redução de pH, enquanto que a área não carbonatada permanece com pH alto, mantendo a passivação da armadura. Desta forma, quando a frente alcança o entorno das armaduras reduz o pH da solução dos poros de valores entre 12,3 a 13,5 para cerca de 9, permitindo assim a despassivação das barras.

Esta é uma reação lenta e natural no concreto e que, conforme o progresso da frente de carbonatação, diminui com o tempo, pois os produtos das reações tendem a preencher os poros, dificultando a entrada do CO_2 . Porém, se a carbonatação atingir as armaduras, estas sofrerão corrosão generalizada, como se estivessem expostas ao ambiente sem a proteção da camada de cobrimento, com o agravante de estarem confinadas e em contato contínuo com a umidade no concreto (Andrade, 1992).

A velocidade com que a carbonatação se desenvolve no concreto depende da umidade e temperatura do ambiente, concentração de CO_2 no ar e de íons alcalinos disponíveis no concreto para as reações de carbonatação. Há outros fatores intrínsecos à composição e propriedades do concreto, tais como relação a/c (responsável pela porosidade e permeabilidade do concreto), presença de microfissuras, tipo de cimento e utilização de adições minerais, condições de cura, entre outros.

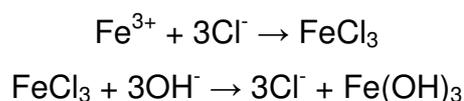
Segundo Helene (1997) a despassivação, e posterior corrosão das armaduras, ocorrem predominantemente em ambientes com umidade relativa entre 60% e 98% ou quando o concreto está sujeito a ciclos de molhagem e secagem.

1.4 Corrosão por pites – Íons cloreto

A contaminação por íons cloreto pode se dar na própria composição do concreto, quando estes estão presentes na água ou em componentes como agregados e aditivos aceleradores de pega que contenham CaCl_2 . Ou ainda, podem ser provenientes do ambiente, quando o concreto está em contato com água do mar, atmosfera marinha em geral, poluentes industriais e produtos agressivos como o ácido muriático. Os cloretos são encontrados no concreto em diferentes formas: combinados quimicamente ao C-S-H ou como cloroaluminatos (sal de Friedel),

adsorvidos fisicamente às paredes dos poros, ou livres na solução dos poros do concreto. Mesmo que apenas os cloretos livres sejam capazes de despassivar e corroer as armaduras, uma parte dos cloretos combinados pode se tornar disponível às reações de corrosão em condições favoráveis, como a elevação da temperatura ou ocorrência de carbonatação. Assim, é recomendada a determinação do teor de cloretos totais e não apenas o de cloretos livres.

A corrosão provocada pela ação dos íons cloreto é considerada como a principal causa de deterioração das estruturas (WEE et al., 2000). Estes íons são especialmente agressivos, pois, diferente do ataque por CO₂ ou soluções ácidas, os cloretos podem danificar as armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade da solução dos poros, visto que tais íons não são consumidos no processo de corrosão, permanecem disponíveis para novas reações. Desta forma, a presença de pequenas quantidades do íon pode provocar altas taxas de corrosão (HELENE, 1986). As reações que regem a corrosão por íons cloretos são demonstradas a seguir de forma simplificada:



Como já comentado, o íon cloreto participa da reação apenas como catalisador para a formação do óxido expansivo, sendo liberado para novas reações e permitindo o desenvolvimento da corrosão.

Segundo Aitcin (2000), a corrosão por ação dos íons cloreto tende a gerar microfissuras na camada de revestimento Isso se dá devido às forças expansivas da formação da ferrugem, que expõem ainda mais a estrutura à entrada deste agente corrosivo, a tal ponto de ocorrerem lascamentos e descolamentos do concreto que recobre as armaduras.

1.5 Delimitação de teores de cloretos

Sabendo-se que os íons cloreto que estão combinados podem apresentar risco de corrosão em certas situações, o teor limite de cloretos aceito por diversas normas e pesquisas tem sido determinado em porcentagem de cloretos totais em

relação à massa de cimento ou do concreto, ou ainda em concentração na solução dos poros. Apesar de existirem muitos estudos quanto ao montante necessário de cloretos para o desencadeamento da corrosão, ainda não existe um consenso quanto aos valores. A delimitação segundo ACI 201 é mostrada na tabela 1.1. Alguns autores (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997) consideram um valor médio comumente aceito como teor limite para a despassivação das armaduras de 0,4% em relação à massa de cimento. Já Mehta (2003) afirma que concentrações entre 0,6 e 0,9kg/m³ de cloretos no concreto, ou de 200 a 1200g/l de cloretos na solução dos poros, são o suficiente para o início do processo corrosivo.

Uma outra forma de expressar o teor de cloretos é analisando a relação Cl^-/OH^- da solução dos poros do concreto. Conforme é dito por Neville (1997), para uma determinada quantidade de cloretos, quanto maior o teor de íons hidroxila (OH^-), maior será a quantidade de cloretos livres na solução dos poros. Os valores desta relação para delimitar o teor de cloretos também não são consenso entre os diversos autores. Além disso, a determinação do quociente Cl^-/OH^- é muito difícil, tendo em vista a grande quantidade de parâmetros que definem a quantidade de ambos os íons presentes no concreto.

Tabela 1.1 – Teores limite de cloretos totais segundo ACI 201.

| País | Norma | Limite máximo de cloretos | | |
|------|---------|---------------------------|---------------------|-------------------|
| | | Concreto Armado | Concreto Protendido | Limite referido a |
| | | 0,20% | | |
| EUA | ACI 201 | 0,30 ambiente normal | 0,08% | Cimento |
| | | 0,15% ambiente cloreto | | |
| | | 1% ambiente seco | | |

A Figura 1.3 apresenta o teor crítico de íons cloreto e assim o risco de corrosão, em relação a alguns dos fatores que regem a penetração e o alcance de tais íons até as armaduras. Dentre os fatores, destacam-se o tipo e consumo de cimento, a relação a/c (determinante quanto à permeabilidade do concreto), a presença de adições minerais, a existência de carbonatação, a umidade ambiente, etc.

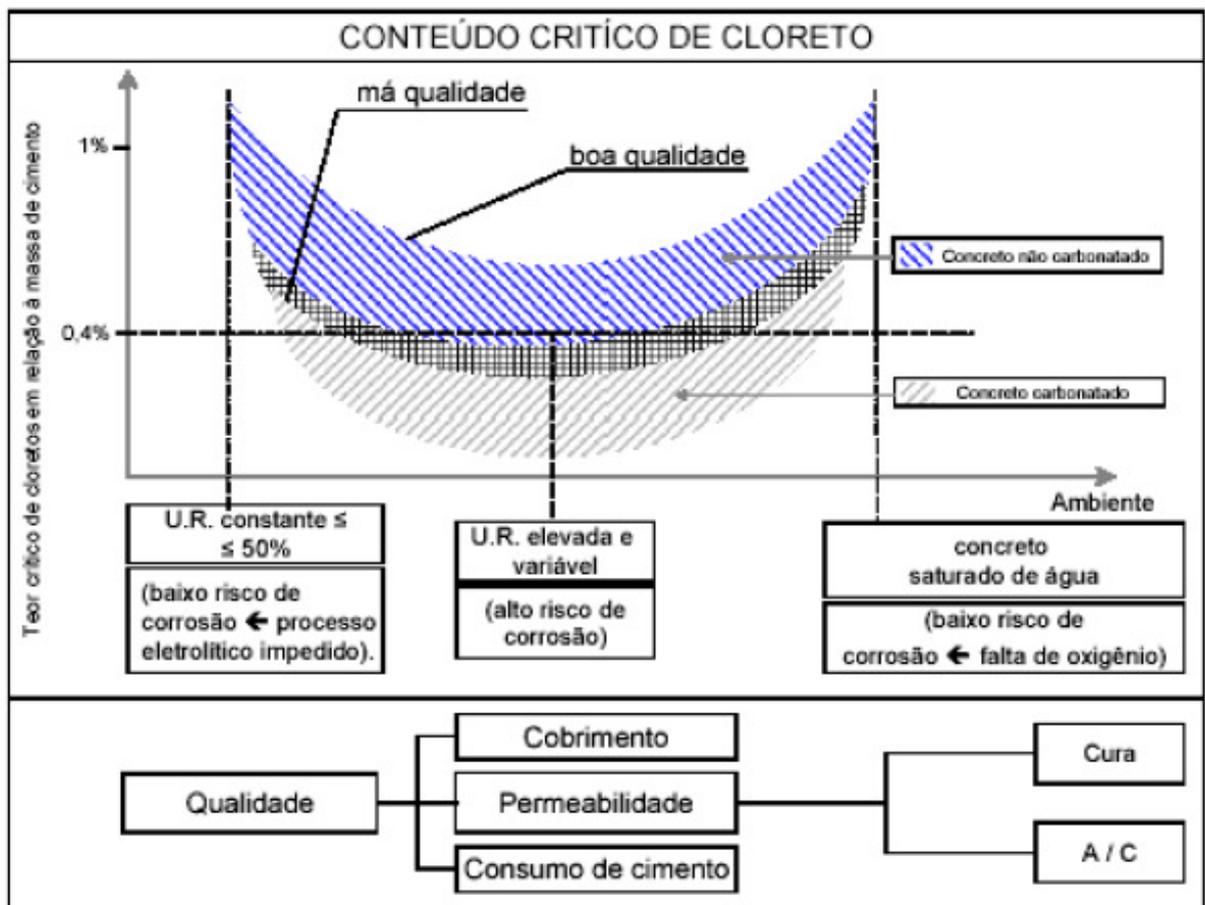


Figura 1.3 – Variação do teor crítico em função da UR e da qualidade do concreto. (Fonte: FIGUEIREDO, 2005 apud PEDROSO, 2008).

1.6 Propriedades normalizadas para o concreto quanto à agressividade do ambiente

As normas da ABNT - NBR 6118/2007 e NBR 12655/2006 – estipulam algumas diretrizes quanto ao risco de deterioração das estruturas de concreto em função da agressividade do ambiente em que serão inseridas. Estes parâmetros são relacionados à qualidade do concreto, visando a durabilidade do mesmo para os fins a que foi projetado e delimitando, conforme as condições do ambiente, os valores mínimos de consumo de cimento e relação a/c. Fatores estes que influenciam diretamente nas propriedades do concreto quanto a sua permeabilidade e porosidade. Estas normas classificam os ambientes, para efeito de projeto, em quatro tipos:

- Tipo I – Agressividade fraca: risco de deterioração insignificante, fazem parte atmosferas de ambiente rural e submerso;
- Tipo II – Agressividade moderada: risco de deterioração pequeno, representado por ambiente urbano;
- Tipo III – Agressividade forte: risco de deterioração grande, atmosfera marinha e ambientes industriais;
- Tipo IV – Agressividade muito forte: risco de deterioração elevado, compreende locais com respingos de maré e ambientes industriais quimicamente agressivos.

Sabendo-se da forte relação entre a resistência à compressão, a relação a/c e a durabilidade do concreto e a partir das classes de agressividade dos ambientes, a qualidade do concreto de cobrimento é delimitada em requisitos a serem atendidos, tal como mostra a Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR 12655/2006)

| Concreto | Tipo | Classe de agressividade | | | |
|---|------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água/cimento em massa | CA | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
| | CP | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |
| Classe de concreto (NBR 8953) | CA | ≥ C20 | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C40 |
| | CP | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C35 | ≥ C40 |
| Consumo de cimento por metro cúbico de concreto kg/m ³ | CA | | | | |
| | CP | ≥ 260 | ≥ 280 | ≥ 320 | ≥ 360 |

CA – Concreto Armado CP – Concreto Protendido

2 MECANISMOS DE TRANSPORTE

2.1 Introdução

As características de qualidade do concreto, principalmente o de cobrimento das armaduras, são diretamente ligadas à facilidade com que os fluidos ingressarão na estrutura. Desta forma, é importante a análise, em fase de projeto, das características que este concreto deve possuir, sabendo-se em qual ambiente estará inserido, quais os agentes agressivos estão presentes neste ambiente e qual o comportamento desejável de tal concreto durante sua vida útil planejada.

Para Neville (1997), à parte a degradação mecânica, os fluidos estão presentes em todos os processos de deterioração das estruturas. E ainda segundo o autor, a porosidade não é o único fator determinante da permeabilidade, mas também da forma, distribuição, dimensões, tortuosidade e continuidade dos poros.

Os principais fluidos que podem penetrar no concreto são o oxigênio, dióxido de carbono e água pura ou contaminada. Todos os três são responsáveis e/ou necessários ao processo de corrosão das armaduras.

O termo permeabilidade é comumente utilizado no meio científico como sinônimo do movimento global de fluidos para ou através do concreto e não apenas para distinguir o escoamento, que caracteriza um dos diferentes processos de transporte de fluidos. (NEVILLE, 1997).

A água está presente no concreto desde a sua produção, quando adicionada para hidratar o cimento e conceder trabalhabilidade. Esta água de amassamento, que é adicionada e que não irá reagir na formação de produtos de cimento hidratado, migra para o meio externo. Durante esta migração, o caminho percorrido pela água formará a rede de poros que caracteriza o concreto como um meio que, apesar de visualmente compacto, se apresenta como material poroso. Desta forma, fica claro que o volume de vazios no concreto depende da quantidade de água adicionada à mistura e do grau de hidratação do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

É na solução dos poros que ocorrem a maioria das reações químicas entre os componentes do cimento e os agentes agressivos. Assim, o conhecimento dos processos de transporte e deterioração requer o entendimento das características da rede de poros presente no concreto.

A permeabilidade é uma característica fundamental quanto à durabilidade do concreto e, apesar de ser modificada com o tempo por processos de lixiviação, por exemplo, tem destaque como mecanismo de transporte de água, pura ou contaminada, para o interior do concreto.

Durante a produção do concreto, na interface entre o agregado graúdo e a matriz da pasta de cimento, pode existir um acúmulo de água, o que gera um efeito que depende da forma, dimensão e textura do agregado, tornando a relação a/c maior nesta região que é chamada zona de transição. Devido ao maior volume ocupado pela água nesta zona, ocorre a formação de cristais relativamente grandes de etringita e hidróxido de cálcio que tornam esta região mais porosa do que a matriz de pasta de cimento. Com o tempo de hidratação, existe a formação de C-S-H que acaba por preencher os espaços deixados pelos cristais maiores, de forma a conceder resistência e densidade à zona de transição. Sabe-se que esta região é a mais fraca dentre as fases do concreto endurecido (matriz da pasta de cimento hidratada, agregados e zona de transição) e a qualidade da zona de transição pode ser controlada a tal ponto e com medidas relativamente simples, que suas propriedades se assemelham às da matriz da pasta. Neville (1997) afirma que, apesar de a porosidade da zona de transição ser maior que a da matriz da pasta, a permeabilidade do concreto é função da pasta de cimento hidratada, que se constitui na única fase contínua presente no concreto.

Para Neville (1997), a diferença entre as propriedades mecânicas dos agregados e da pasta de cimento, as variações de temperatura e a retração são os principais fatores responsáveis pelo aparecimento de fissuras na zona de transição.

Quando o concreto é empregado em um ambiente com risco de ataque por agentes químicos, a única forma de diminuir a velocidade de ingresso de tais agentes é a redução da porosidade e da permeabilidade do concreto (AITCIN, 2000).

O termo porosidade é normalmente empregado para distinguir o volume total de concreto que é ocupado pelos poros. Este valor não o fator único que determina a permeabilidade, pois esta não depende somente do volume, mas também da distribuição, dimensões e conectividade dos poros, além das condições de umidade

do concreto. Dessa maneira é possível que dois concretos com mesma porosidade tenham características de permeabilidade distintas.

Os mecanismos de transporte são influenciados tanto pelas condições ambientais, quanto pelas condições de produção do concreto que condicionam a porosidade do concreto. Na Figura 2.1 são apresentados os mecanismos de transporte de massa no concreto (CEB apud ISAIA, 1995).

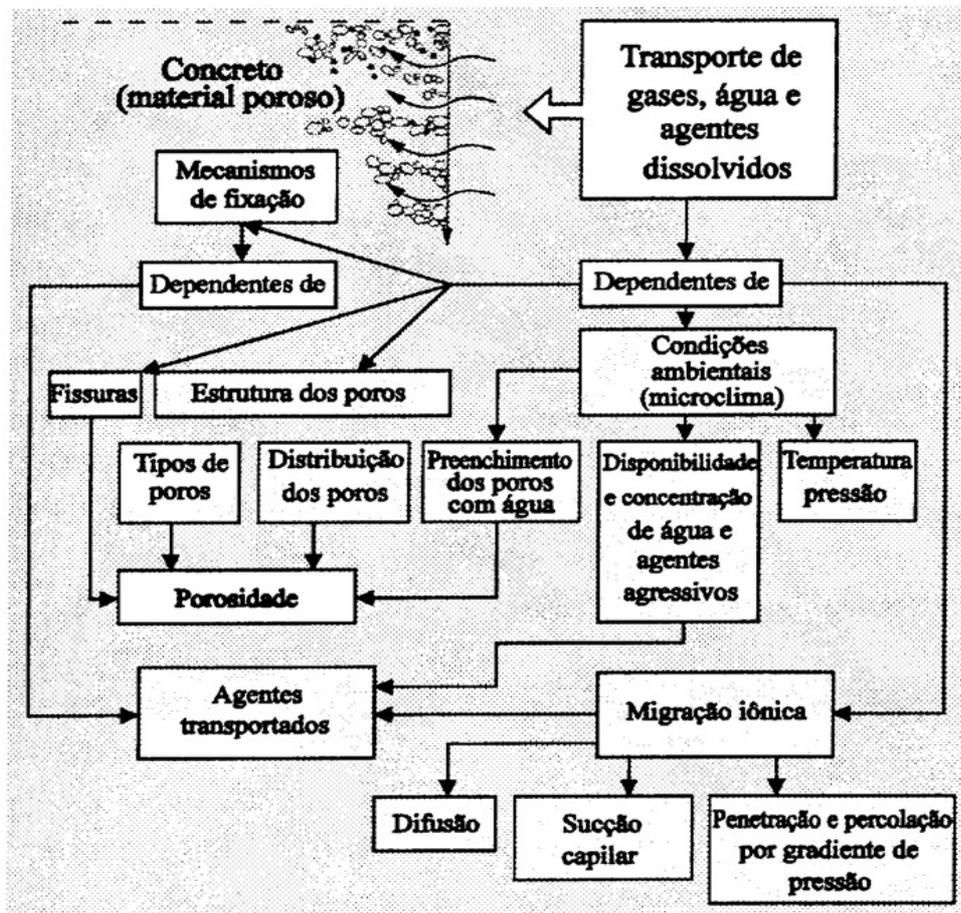


Figura 2.1 – Processos de transporte de massa no concreto (ISAIA, 1995)

Mehta (1986) afirma que a permeabilidade, a resistência e as variações de volume de uma pasta de cimento hidratado é muito mais controlada pela distribuição do tamanho dos poros do que pela porosidade total.

O incremento das propriedades de resistência e durabilidade do concreto é conseguido, em primeira instância, reduzindo a quantidade de água adicionada à mistura (relação a/c) e no decorrer do grau de hidratação (SERRA, 1997 *apud*

COSTA,2001). Quando das primeiras tentativas, na intenção de diminuir a água incorporada ao concreto, existia uma grande perda de trabalhabilidade e consumo excessivo de cimento. No entanto, com a utilização de aditivos químicos, como plastificantes e redutores de água, a trabalhabilidade do concreto está garantida sem que, para isso, ocorra uma perda de resistência e durabilidade.

Estando os cloretos entre os agentes mais agressivos às estruturas de concreto armado, o conhecimento dos mecanismos de movimentação destes para o interior do concreto é de extrema importância. Quando em forma cristalina, o cloreto não apresenta risco, pois os cristais têm dimensões maiores que os poros do concreto. Entretanto, estes cristais podem ficar depositados sobre a superfície da estrutura até que sejam dissolvidos pela água e por, um diferencial de pressão causado pela ação da gravidade, do vento ou da chuva, a água contaminada é empurrada para o interior do concreto.

A água, que possui moléculas muito pequenas, penetra facilmente na rede de poros. Devido a sua alta temperatura de evaporação, a água permanece dentro dos poros no estado líquido por longos períodos. Além disso, ela tem alta capacidade de dissociar substâncias ionizáveis e de dissolver sais, ácidos e bases inorgânicas, mostrando-se, assim, como um dos, senão o mais importante, agente de deterioração das estruturas. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os cloretos podem penetrar no concreto por absorção capilar de líquidos, por difusão, caracterizada por um gradiente de concentração, por permeabilidade, onde existe um gradiente de pressão, ou ainda por migração causada pela ação de um campo elétrico.

2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é a facilidade de escoamento de um fluido através de um material (MEHTA e MONTEIRO, 2008) e é impulsionada por um gradiente de pressão hidráulica. Desta maneira, esta é uma propriedade dos materiais saturados. O ingresso de cloretos, quando dissolvidos na água, pode se dar por este processo. Sendo a permeabilidade diretamente relacionada à estrutura de poros, os fatores que determinam a compacidade e qualidade do concreto influenciam nesta duas

propriedades. Segundo Helene (1993), existe uma faixa de dimensões dos poros que facilitam a permeabilidade, entre $0,1\mu\text{m}$ e $1000\mu\text{m}$.

A medição é usualmente representada por um coeficiente de permeabilidade que, segundo Kropp et al. (1995 apud MEDEIROS, 2008), é uma propriedade do material, independente das características do líquido.

Em estruturas submersas em água marinha a permeabilidade é o mecanismo de transporte de cloretos predominante.

2.3 Absorção capilar

Este mecanismo de transporte de líquidos se dá através dos poros capilares devido à tensão superficial do líquido. A entrada depende de características do líquido, como viscosidade, densidade e tensão superficial. Também depende de fatores relacionados ao concreto quanto à estrutura da rede de poros e às condições de umidade. Segundo Helene (1993), a absorção não acontece em concretos saturados e para que ocorra é necessário que os poros estejam total ou parcialmente secos.

A entrada de íons cloreto pelo mecanismo de absorção capilar acontece quando estes estão dissolvidos em água. Conforme afirma Santos (2000) é bastante comum quando o concreto é exposto a ciclos de molhagem e secagem, condição esta mais próxima à realidade das estruturas expostas ao ambiente externo.

Enquanto a permeabilidade trata de fluxo do líquido em um material saturado sob pressão, a absorção caracteriza o fluxo em materiais secos, mecanismo este mais próximo à realidade das estruturas (CAMARINI, 1999 apud MISSAU, 2004). Para Cascudo (1997), a absorção depende da interconexão e principalmente do diâmetro dos poros. O autor afirma que, quanto menor for o diâmetro, maior será a força de sucção capilar. Helene (1993) afirma que os fatores que controlam o diâmetro dos poros do concreto são a relação a/c, grau de hidratação e a composição do cimento (modificada com o uso de adições minerais).

Uma das formas de controle da absorção capilar é o uso de aditivo incorporador de ar. Este permite a formação de pequenas bolhas de ar no interior do concreto que têm a função de interromper a rede de poros diminuindo assim a

capilaridade do conjunto. Dias (2000, apud SPERB, 2003) afirma que a ocorrência da carbonatação provoca um decréscimo considerável na capacidade de absorção do concreto.

Mesmo que a absorção não seja usada como uma forma de medir a qualidade do concreto, afirma-se que, dentre os concretos de boa qualidade, a absorção sempre esteja abaixo de 10% em massa (NEVILLE, 1997).

2.4 Difusão

A difusão é definida por Tang (1999) como o movimento de massa de uma área de alta concentração para uma área de baixa concentração, causado por gradiente de concentração ou diferença de potencial químico.

A penetração de cloretos por difusão se dá na rede de poros preenchidos com água. Não é necessária a movimentação da água para este processo, mas sim um gradiente de concentração de íons entre o interior e a superfície do concreto.

O coeficiente de difusão no estado estacionário pode ser medido através da 1ª lei de Fick, mostrada na equação 2.1.

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.1)$$

A equação representa o fluxo em função do gradiente de concentração, na direção x , onde D é o coeficiente de difusão em m^2/s e o sinal negativo demonstra que o fluxo se dá da concentração mais alta para a mais baixa.

No estado estacionário pode-se afirmar que o perfil de concentração é linear, como mostrado na Figura 2.2.

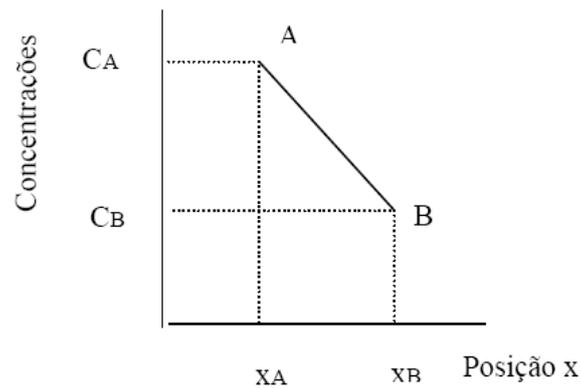


Figura 2.2 – Perfil de concentrações para o estado estacionário

No entanto, nas estruturas reais existem variações tanto do gradiente de concentração quanto do fluxo com o tempo, caracterizando o processo de difusão no estado não estacionário. Assim, a segunda lei de Fick (equação 2.2) passa a governar este mecanismo e o perfil de concentração passa a ser não linear (Figura 2.3). Existem casos em que a difusão é uma propriedade independente da composição do material em que ocorre. Nestes casos, que devem ser delimitados para cada situação, pode-se considerar a redução da equação 2.2 para a forma apresentada na equação 2.3.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

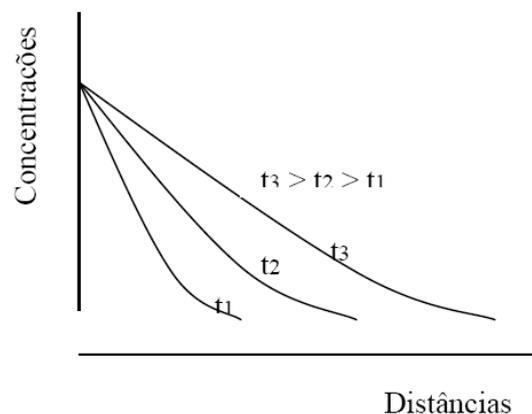


Figura 2.3 – Perfil de concentrações no estado não estacionário para três tempos diversos

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

Zhang e Gjorv (1996) afirmam que tanto a composição da solução salina quanto as características do concreto influenciam o processo de difusão. Dentre estes fatores, destacam-se o volume e a dimensão dos poros, a interação iônica, a menor velocidade de deslocamento dos cátions em relação aos ânions e a camada elétrica formada na parede dos poros.

Na maioria dos testes, o coeficiente de difusão não é constante. Para Zhang e Gjorv (1996) a interação iônica diminui a impulsão dos íons cloreto e esta é tanto menor quanto maior a concentração do eletrólito, mesmo para baixas concentrações. Desta forma os resultados de coeficiente de difusão aparente se afastam das leis de Fick.

Os cátions da solução salina, aos quais é exposto o concreto, têm sua velocidade e mobilidade menores que os ânions e, como a medida de difusão de um íon resume a movimentação de ambos, a mobilidade menor do cátion delimita a velocidade de difusão da substância (ZHANG e GJORV, 1996). “Se a solução externa for de cloreto de cálcio, a difusividade dos cloretos será de duas a três vezes superior a de uma outra solução de cloreto de sódio uma vez que os íons sódio exercem uma força de retenção maior.” (GJORV e VENNESLAND, apud ZHANG e GJORV, 1996).

Existe também o efeito da dupla camada elétrica que se forma na parede dos poros do concreto, onde os íons ficam adsorvidos e imóveis. A movimentação de íons e fluidos se dá somente a certa distância desta camada, e desta forma a velocidade de fluxo e a difusão são afetadas por tal fator. A dupla camada também se apresenta como uma barreira de repulsão, de forma que as forças de impulsão de cloretos devem superar as de repulsão, para que exista movimentação de íons para o interior do concreto (ZHANG e GJORV, 1996).

2.5 Migração

A migração é caracterizada pela movimentação de substâncias com carga elétrica, provocada pela aplicação de uma diferença de potencial elétrico. Segundo Hisada et. al (1999), o mecanismo de migração se tornou de importante conhecimento devido a aplicação de técnicas de dessalinização e re-alcalinização, que passaram a ser aplicadas em estruturas danificadas, permitindo a exposição do concreto a um campo elétrico. Porém, afirmam os autores que existem ainda poucas informações sobre o mecanismo de migração de íons através do concreto. Tal fenômeno também pode ocorrer em bases suporte de veículos elétricos.

Segundo Regatieri (1999, *apud* Missau, 2004) a migração de íons cloreto é impulsionada pelo campo elétrico formado a partir da pilha de corrosão eletroquímica. A presença desses íons no concreto reduz a resistividade elétrica e aumenta a condutividade do eletrólito, favorecendo o aumento da corrosão.

O mecanismo de migração iônica dos cloretos, um processo eletrolítico, é governado pela condutividade da solução dos poros, o que depende da concentração dos diversos íons presentes nesta solução. Os íons mais atuantes no processo condutivo são Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e OH^- . A condutividade dos íons Na^+ e K^+ é menor q a condutividade dos íons cloreto, e a participação do íon Ca^{2+} é bastante reduzida, visto que a concentração deste na solução dos poros é muito pequena. Porém a condutividade do íon OH^- é bastante alta quando comparada aos outros íons. Assim, como afirma Prince & Gagné (2001, *apud* Dal Ri, 2002) a taxa de concentração de OH^- define a condutividade e o pH da solução dos poros, de forma que o aumento da concentração de OH^- aumenta a intensidade da corrente elétrica.

3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUPERFICIAL

3.1 Formadores de película

Nesta categoria, enquadram-se as tintas e vernizes. As tintas são formadas por: resina, que é a parte líquida da tinta que se solidifica para formar uma película; solvente, responsável pela viscosidade necessária à aplicação; pigmento, que dá a cor, brilho e cobertura e também auxilia na resistência da película e aditivos, que desempenham diversas funções, dentre elas o auxílio na secagem da tinta e a resistência a fungos.

Os vernizes são semelhantes às tintas em sua composição, com a diferença de que não possuem pigmento e, por este motivo, a sua durabilidade é inferior a das tintas.

Os produtos que apresentam maior resistência química e mecânica e ainda a maior aderência ao concreto são os constituídos de base epóxi. Porém, tais produtos não possuem boa resistência à radiação UV e por isso são aplicados em ambientes internos ou de agressividade industrial (Helene, 2000).

Segundo Helene (2000), as principais características do sistema formador de película são os seguintes:

- Redução da permeabilidade e difusividade a sais solúveis;
- Redução da lixiviação;
- Redução da carbonatação;
- Redução do aparecimento de mofo ou alastramento de fungos e bactérias;
- Manutenção da umidade do concreto não permitindo a secagem;
- Modificação da aparência da superfície do concreto conferindo cor e brilho;
- Exigência de uma superfície uniforme e homogênea, não apresentando boa aderência em superfícies rugosas, com desmoldante ou de baixa permeabilidade.

Na Figura 3.1 um esquema do sistema formador de película.

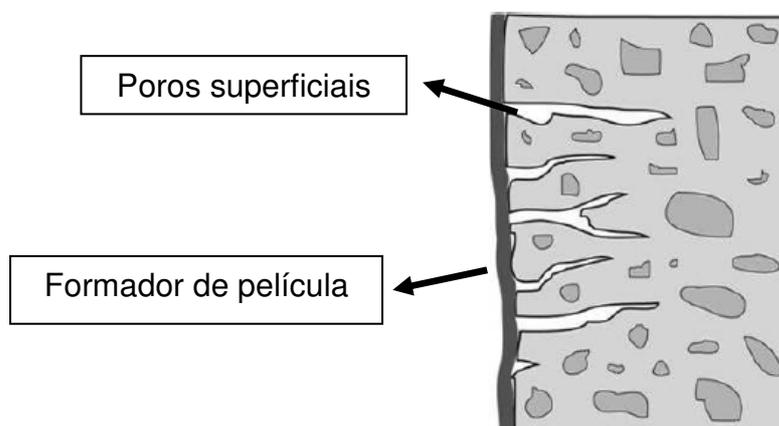


Figura 3.1 – Tratamento formador de película (MEDEIROS, 2008)

3.2 Hidrófobos

Os revestimentos hidrófobos ou hidrorepelentes têm sua composição à base de silicone. Aplicados na superfície do concreto, estes produtos podem alcançar uma profundidade de até 10 mm, dependendo do tipo de substrato. Atuam revestindo a superfície dos poros transformando a capilaridade dos poros da superfície de positiva para negativa, ou seja, tais poros passam a repelir os líquidos.

Ao contrário dos formadores de película, os agentes hidrofugantes não tamponam os poros (Figura 3.2), permitindo que haja troca de vapor d'água entre o concreto e o ambiente. Todavia, este tratamento se mostra menos eficaz que os formadores de película como barreira à entrada de agentes agressivos.

O principal objetivo da aplicação de impregnações hidrófugas é o de dificultar ou impedir a absorção de água pelo concreto. Estes são os produtos que menos interferem nas características visuais da superfície da estrutura. Um exemplo da aplicação deste tipo de sistema de proteção é no prédio do Masp em São Paulo, onde a estrutura em concreto aparente recebeu o tratamento de hidrofugantes para manter as características originais do projeto arquitetônico (LIMA, 1994).

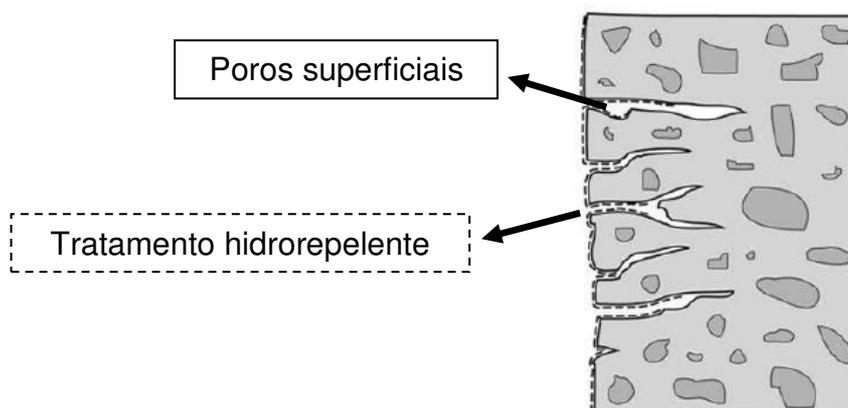


Figura 3.2 – Tratamento hidrófobo (MEDEIROS, 2008)

Algumas características dos hidrofugantes, segundo Helene (2000):

- Redução da capacidade de absorção de água;
- Redução da permeabilidade;
- Permissão da secagem do concreto, através da troca de vapor de água com o ambiente;
- Não interfere na aparência da superfície do concreto;
- Boa capacidade de penetração nos poros capilares do concreto;
- Pode ser aplicado em superfícies rugosas;
- Reduz a lixiviação;
- Não impede a carbonatação;
- Não impede a permeabilidade a fluidos sob pressão.

3.3 Bloqueadores de poros

São produtos à base de silicato de sódio que penetram nos poros do concreto e reagem com o hidróxido de cálcio formando C-S-H. O silicato de sódio é utilizado na indústria do cimento como ativador na presença de escória. Existem poucas publicações sobre o silicato de sódio, como tratamento superficial, mas apesar disso muitos produtos deste tipo tem sido indicados e comercializados.

Na equação 3.1 (THOMPSON et al., 1997) são mostradas as reações que ocorrem quando existe a penetração de silicato de sódio nos poros do concreto:



Estas reações criam uma camada menos porosa na superfície do concreto, porém, quando este se encontra carbonatado as reações não ocorrem, pois a portlandita já reagiu com o CO_2 para a formação do carbonato de cálcio. Desta forma, nas estruturas carbonatadas é necessário que, antes da aplicação de um obturador de poros, seja feita na superfície uma impregnação com hidróxido de cálcio. Tal procedimento não foi necessário durante a presente pesquisa, visto que o produto obturador de poros foi aplicado sobre concreto com 28 dias de moldagem, e assim, não apresentando carbonatação.

O produto obturador de poros se torna parte integrante da massa de concreto para criar novas formações cristalinas (Figura 3.3). Por meio de difusão, os produtos químicos reativos do produto, através da água presente nos poros, penetram no concreto. Este processo catalisa reações entre a água e os subprodutos da hidratação do cimento (hidróxido de cálcio, sais minerais, óxidos minerais e partículas de cimento não hidratadas e sub-hidratadas). O resultado é uma formação cristalina não solúvel que sela os poros e capilares do concreto. Assim, os poros tendem a se tornar descontínuos e menos vulneráveis à penetração de água e outros líquidos. Por ser catalítico, o processo pode se reativar sempre que houver a presença de água.

Analogamente aos efeitos da reação pozolânica, o catalisador obturador de poros acelera a reação de cristalização de novos produtos através de reações químicas entre os constituintes da pasta do cimento e o agregado, formando silicatos de cálcio e magnésio hidratado (agregados silicosos), ou carboaluminatos hidratados (calcário e cristais de fluoreto de cálcio).

Além da proteção física, tal tratamento pode oferecer uma realcalinização do ambiente em que se encontram as armaduras. As reações do produto a base de silicatos promove uma alcalinidade com pH variando entre 10,5 e 13, que é similar

ao ambiente proporcionado pelo concreto. Dessa maneira, contribui para a estabilidade da camada passivadora das armaduras.

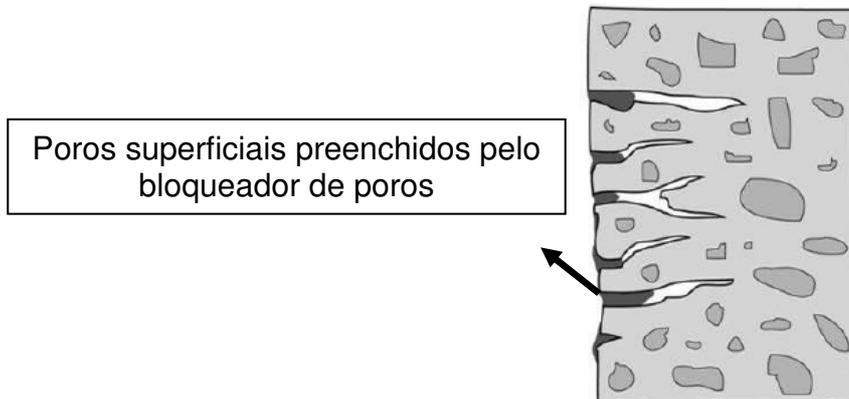


Figura 3.3 – tratamento obturador de poros (MEDEIROS, 2008).

O fabricante do produto obturador de poros destaca algumas diferenças entre este e um tratamento formador de película:

1. Criação de uma estrutura cristalina profunda nos poros e capilaridades do concreto, tornando-se parte integrante do mesmo e prevenindo a penetração de água e produtos químicos agressivos.
2. Não depende de adesão e por isso resistente à pressões de água.
3. Sela fissuras até 0,4 mm.
4. Não está sujeito a problemas de deterioração como as membranas.
5. Por ser um processo catalítico, o produto irá reagir sempre que houver a presença de água.

Ainda segundo o fabricante, algumas vantagens na aplicação do produto a base de silicatos:

1. Pode ser aplicado em qualquer lado da superfície – no lado negativo ou positivo (lado da água);
2. Não necessita de uma superfície seca para aplicação;
3. Pode ser aplicado em clima úmido;

4. Não necessita de "priming" ou regularização da superfície antes da aplicação;
5. Permite a respiração do concreto (movimentação de vapor de água);
6. Possui versatilidade, adaptando-se as condições de cada projeto.
7. Não provoca espessura adicional à superfície;
8. Eventual defeito na aplicação do produto é rapidamente localizado e corrigido.

Um exemplo da aplicação de tal produto é encontrado no estádio do Pacaembu em São Paulo (Figura 3.4), onde as arquibancadas foram impermeabilizadas com duas camadas do obturador de poros, de forma análoga à aplicação estudada nesta pesquisa.



Figura 3.4 – Aplicação do tratamento obturador de poros aplicado nas arquibancadas do estádio do Pacaembu (Site do fabricante, 12/07/2010)

3.4 Argamassas poliméricas

A argamassa polimérica é produto da associação de um composto inorgânico cimento, e um composto orgânico, látex polímero, e tem uma estrutura que consiste no gel do cimento e as microfibras do polímero. Assim, as propriedades do cimento associado ao polímero são notadamente incrementadas, quando comparadas com as características da argamassa convencional composta de cimento, cal e areia.

A argamassa polimérica utilizada neste estudo possui um agente adesivo incorporado para o reparo de áreas danificadas, o que garante a aderência deste produto ao concreto do substrato, sem a necessidade da aplicação de uma camada de fixação entre as duas fases. A alcalinidade da argamassa em combinação com a sua resistência à carbonatação faz com que não seja necessária a aplicação de um protetor contra corrosão sobre a camada aplicada.

O fabricante ressalta algumas características e vantagens da escolha deste tipo de produto para a proteção da estrutura:

- Não requer ponte de aderência e protetor contra corrosão;
- Modificada com polímeros;
- Reforçada com fibras;
- Monocomponente, entregue em forma de pó que é misturado com água;
- Pode ser aplicada manualmente ou projetada;
- Boa resistência à carbonatação;
- Boas propriedades adesivas;
- Estável; para aplicação em paredes e tetos.

A seguir é apresentada na Figura 3.5 um esquema da aplicação da argamassa em um caso de reparo de uma estrutura.

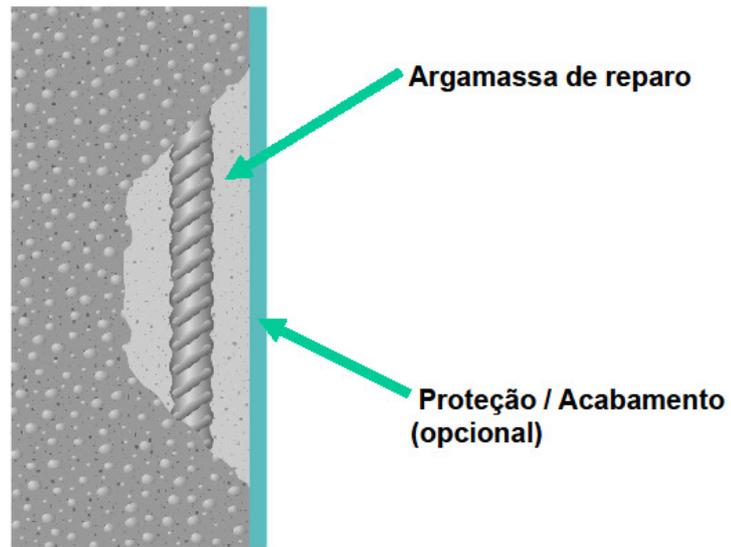


Figura 3.5 – Figura esquemática de reparo utilizando argamassa polimérica
(Site do fabricante 12/07/2010)

4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

A presente dissertação tem por objetivo avaliar a eficiência de três diferentes sistemas de proteção frente à ação de íons cloreto. Para tanto, foi realizado o ensaio acelerado de penetração de cloretos, normalizado pela ASTM C1202/05, que relaciona a carga passante pela amostra com a penetração de íons cloreto; e também foi realizado o ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI), no qual as amostras permaneceram, por diferentes períodos, submersas em solução salina para posterior análise da profundidade de penetração.

As misturas dos concretos de substrato foram feitas com três tipos de cimento: CP IV - 32, CPII-F - 32 e CP V-ARI ; para três níveis de resistência à compressão (f_{ck}) 15,0 MPa; 20,0 MPa e 25,0 MPa, correspondendo a uma resistência de dosagem aos 28 dias de 21,6 MPa, 26,6 MPa e 31,6 MPa. Cada um dos nove traços mencionados foram produzidos quatro vezes, sendo que três receberam algum sistema de tratamento superficial e um foi utilizado como base de referência para comparação dos resultados de eficiência dos produtos estudados.

A escolha de um f_{ck} de 15 MPa, inferior ao mínimo especificado pela NBR 12655, deve-se ao fato de no passado muitas estruturas terem sido construídas com esse nível de resistência e os produtos estudados no presente estudo tem sido indicados para a proteção e reparo de tais estruturas. Assim, com o objetivo de avaliar a eficiência do produto aplicado sobre um substrato de baixa resistência, optou-se por reproduzir uma resistência de 15 MPa.

Os sistemas de proteção consistem em um do tipo obturador de poros, aplicado em uma e duas camadas, resultando em dois dos tratamentos estudados. E ainda a aplicação de uma argamassa polimérica, aplicada com espessura de aproximadamente 4 mm.

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 Cimento

Os cimentos selecionados para a presente pesquisa foram dos tipos CPIV - 32, CPIIF - 32 e CPV-ARI. As características físicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 4.1 e a composição química na Tabela 4.2. Para cada um destes foram realizados os ensaios de acordo com as seguintes normas:

- NBR NM 23/01 – Cimento Portland – Determinação da massa específica;
- NBR 11579/91 – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)
- NBR NM 76/98 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).
- Análise química - NBR NM 10/04, 11-1/04, 11-2/04, 12/04, 13/04, 14/04, 15/04, 16/04, 17/04, 18/04, 19/04, 21/04.
- NBR NM 65/03 - Cimento Portland - determinação do tempo de pega.

4.2.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi de origem quartzosa e proveniente da cidade de Santa Maria, RS. Este foi previamente lavado e seco em estufa a uma temperatura aproximada de 105° C, peneirado na peneira #6,3 mm, e estocado em cubas de alvenaria antes dos ensaios e moldagens.

Tabela 4.1 – Caracterização física e mecânica dos cimentos

| <i>Resistência à compressão</i> | <i>CPIV</i> | <i>CPII-F</i> | <i>CPV-ARI</i> |
|---|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 dia (MPa) | - | - | 14,34 |
| 3 dias (MPa) | 19,53 | 16,09 | 30,36 |
| 7 dias (MPa) | 26,14 | 26,22 | 35,99 |
| 28 dias (MPa) | 35,72 | 35,81 | 42,0 |
| <i>Massa específica (g/cm³)</i> | 2,73 | 2,99 | 2,92 |
| <i>Finura # 0,075mm (%)</i> | 0,2 | 3,7 | 0,44 |

O agregado graúdo foi pedra britada de origem de rocha diabásica, procedente do município de Itaara, RS. A brita também foi lavada, seca e peneirada utilizando-se a fração passante na peneira #19mm e retida na peneira #6,3mm, sendo após estocada em cubas semelhantes às de areia.

Os ensaios foram realizados conforme estabelecem as seguintes normalizações:

- NBR NM 52/03 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 53/03 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- NBR NM 248/03 – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- NM 45:2002 Determinação da massa unitária e dos espaços vazios.

As características físicas dos agregados são apresentadas na tabela 4.3 e as distribuições granulométricas da areia e brita nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.2 - Análise química dos cimentos utilizados

| Composição Química | | Teor (% em massa) | | |
|--------------------|--------------------------------|-------------------|-------|--------------|
| | | CP II-F | CP IV | CP V – ARI - |
| Óxido de cálcio | CaO | 60,73 | 35,27 | 51,57 |
| Dióxido de silício | SiO ₂ | 18,17 | 34,58 | 23,54 |
| Óxido de alumínio | Al ₂ O ₃ | 4,45 | 10,26 | 6,20 |
| Óxido de ferro | Fe ₂ O ₃ | 2,71 | 3,90 | 3,60 |
| Anidro sulfúrico | SO ₃ | 3,12 | 1,57 | 2,67 |
| Óxido de | MgO | 2,81 | 4,41 | 6,81 |
| Óxido de potássio | K ₂ O | 0,74 | 1,67 | 1,55 |
| Óxido de titânio | TiO ₂ | 0,22 | 0,45 | 0,30 |
| Óxido de sódio | Na ₂ O | 0,12 | 0,15 | 0,09 |
| Óxido de estrôncio | SrO | 0,25 | 0,06 | 0,06 |
| Anidro fosfórico | P ₂ O ₅ | 0,13 | 0,07 | 0,10 |
| Perda ao fogo | PF | 6,17 | 5,76 | 2,67 |
| Total | - | 99,71 | 98,33 | 99,31 |

Tabela 4.3 – Características físicas dos agregados

| COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA | Porcentagem retida acumulada | | |
|---|-----------------------------------|--------------|--------------|
| | <i>Abertura das peneiras (mm)</i> | <i>BRITA</i> | <i>AREIA</i> |
| | 19,0 | 1 | |
| | 12,5 | 53 | |
| | 9,5 | 83 | |
| | 6,3 | 99 | |
| | 4,75 | 100 | 1 |
| | 2,36 | | 3 |
| | 1,18 | | 7 |
| | 0,6 | | 18 |
| | 0,3 | | 69 |
| | 0,15 | | 94 |
| Módulo de Finura | | 6,84 | 1,92 |
| Dimensão máxima característica (mm) | | 19 | 2,36 |
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,49 | 2,62 |
| Massa unitária solta (g/cm ³) | | 1,36 | 1,58 |
| Absorção de água (%) | | 2,85 | - |

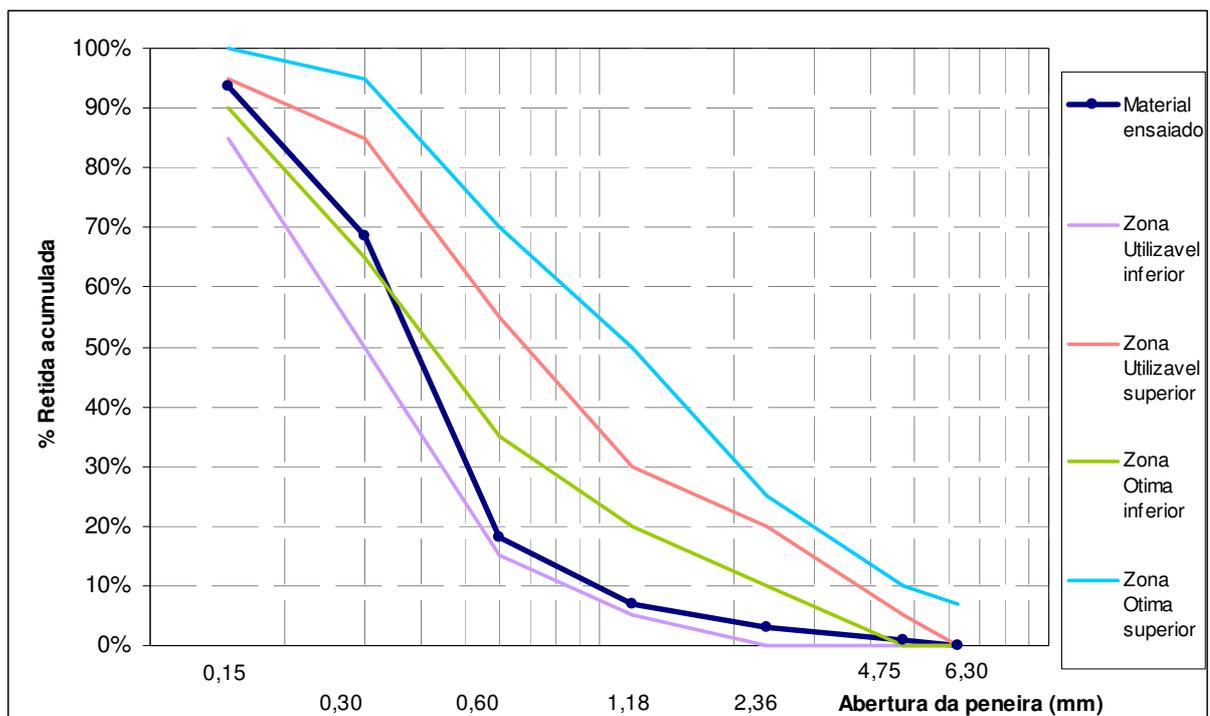


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da areia

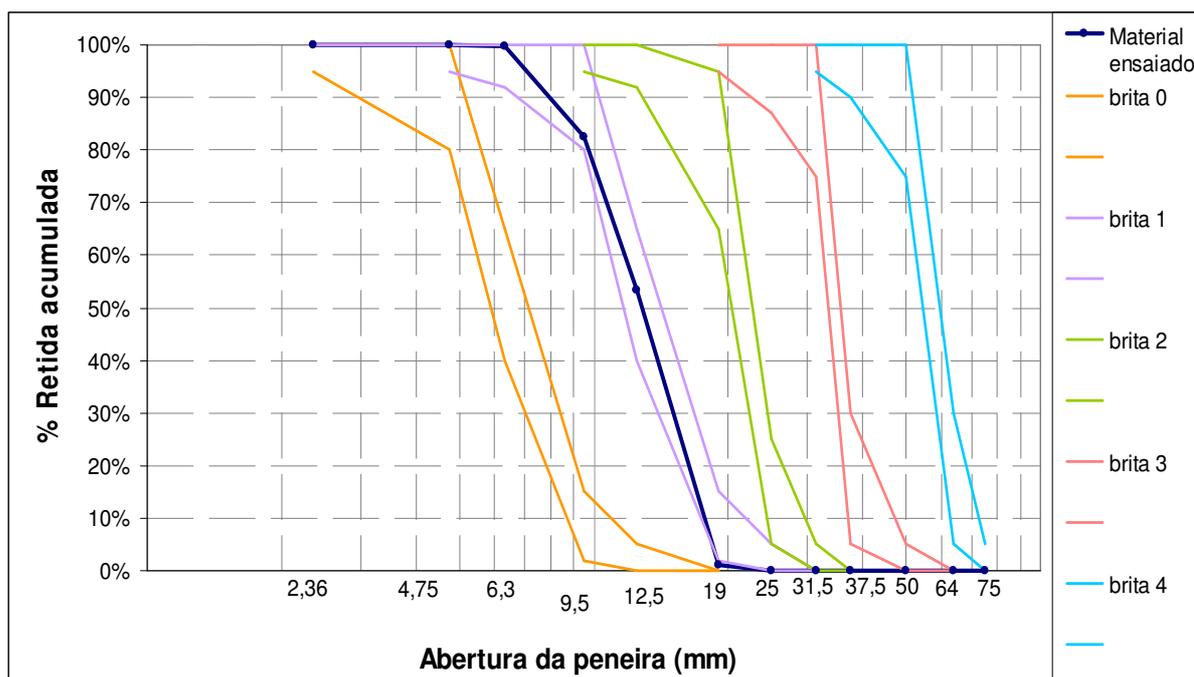


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica da brita

4.3 Métodos de dosagem, moldagem e cura

Inicialmente foi realizado um estudo de dosagem para cada um dos três tipos de cimento utilizado, adotando-se a metodologia proposta por Helene & Terzian (1992), para uma consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, de 80 ± 10 mm. A partir das curvas de Abrams obtidas para cada tipo de cimento, foi calculada a relação água/cimento para obtenção de três níveis de resistência à compressão aos 28 dias: 21,6, 26,6 e 31,6 MPa (valores correspondentes a resistência característica, f_{ck} aos 28 dias, de 15, 20 e 25 MPa, respectivamente, considerando um desvio padrão de dosagem de 4,0 MPa). Assim, para os concretos executados com o cimento CP IV foram utilizadas as relações a/c 0,46, 0,51 e 0,58. Para os concretos executados com o cimento CP II F foram utilizadas as relações a/c 0,48, 0,54 e 0,61 e para os concretos executados com cimento CP V as relações a/c 0,63, 0,69 e 0,76. Os resultados de resistência à compressão, coeficientes de Abrams, e obtenção das novas relações a/c se encontram no anexo 1. A relação a/c de 0,76 adotada para o cimento CPV-ARI para o menos nível de resistência (15MPa), mesmo estando fora dos padrões exigidos

pela norma NBR 12655/2006, foi estudada como já mencionado, para reproduzir um comportamento de estruturas reais.

A Tabela 4.4 apresenta os traços unitários correspondentes a cada mistura.

Tabela 4.4 – Traços unitários de cada mistura

| Cimento | a/c | Traço unitário | m | α |
|----------------|------------|-----------------------|----------|----------------------------|
| CPIV | 0,46 | 1:1,475:2,475 | 3,95 | 50% |
| | 0,51 | 1:1,875:2,875 | 4,75 | 50% |
| | 0,58 | 1:2,25:3,25 | 5,5 | 50% |
| CPII-F | 0,48 | 1:1,898:2,737 | 4,635 | 51% |
| | 0,54 | 1:2,221:3,062 | 5,283 | 51% |
| | 0,61 | 1:2,592:3,429 | 6,021 | 51% |
| CPV ARI | 0,63 | 1:2,60:3,60 | 6,2 | 50% |
| | 0,69 | 1:2,90:3,90 | 6,8 | 50% |
| | 0,76 | 1:3,121:4,121 | 7,242 | 50% |

O estudo de dosagem dos três tipos de cimento, em três níveis de resistência, resultou em 9 traços de concreto de substrato e a moldagem foi reproduzida por quatro vezes tendo em vista a posterior aplicação dos produtos de proteção. Assim, após o tratamento, foi considerada a análise de 36 diferentes misturas. A moldagem se deu conforme a NBR 5738/2003, sendo moldados, para cada um dos 36 traços, um corpo de prova de dimensões 10x20cm para a realização do ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202 – e três corpos de prova prismáticos de 10x40cm para o ensaio de penetração de cloretos por imersão.

Devido à ausência de climatização nos espaços de moldagem, a temperatura da mistura durante o processo foi controlada com a utilização da equação 4.1 proposta por Mehta e Monteiro (2008) com a qual é possível corrigir a temperatura final do concreto fresco com base na temperatura e pesos dos materiais constituintes. Desta forma, a temperatura da água foi controlada objetivando uma temperatura do concreto, durante a moldagem, de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (4.1)$$

Onde:

T = Temperatura da massa de concreto (°F)

T_m = Temperatura dos agregados (°F)

T_c = Temperatura do aglomerante (°F)

T_a = Temperatura da água (°F)

M_m = Massa dos agregados (Kg)

M_c = Massa do aglomerante (Kg)

M_a = Massa de água (Kg)

Após a mistura, os moldes foram preenchidos em 2 camadas sucessivas de concreto e adensadas em mesa vibratória. Estes permaneceram no molde por 24h. Após esse período, foram desmoldados e colocados em câmara climatizada, com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 95% durante 7 dias. Completado este período, as amostras foram armazenadas em ambiente de laboratório até a idade de 28 dias após a moldagem, quando foram aplicados os tratamentos superficiais.

4.4 Produtos de proteção – processos de aplicação e cura

Foram estudados 3 tipos de tratamento superficial. O primeiro consiste em um obturador de poros aplicado em uma única camada e o segundo, do mesmo tipo, em duas camadas. Estes dois tratamentos foram chamados XC e XCM, respectivamente. O terceiro tratamento consistiu em uma argamassa polimérica aplicada com espessura de aproximadamente 4mm, sendo chamado Z4. A quarta reprodução dos concretos de substrato não recebeu nenhum tipo de proteção, servindo de referência para a análise dos resultados, esta foi então nomeada REF.

Os corpos de prova de 10x20cm destinadas ao ensaio acelerado foram serradas em fatias com as dimensões especificadas pela ASTM C1202 para

receberem os produtos de proteção. Os corpos de prova prismáticos (10x10x40), por sua vez, receberam o tratamento antes e foram serrados apenas no período próximo ao condicionamento para o ensaio de imersão, procedimento este adotado para todos os tratamentos.

A aplicação foi realizada no 28º dia contado a partir da moldagem. Conforme recomendação do fabricante, antes da aplicação o corpo de prova teve a superfície escarificada para remoção da pasta de cimento e limpa. As amostras preparadas para os tratamentos XC e XCM, ao completarem 26 dias a partir da moldagem foram submersos em água para garantir sua saturação. O concreto que recebeu o tratamento Z4 foi também escarificado e limpo e pouco antes da aplicação teve sua superfície umedecida com spray de água. A primeira camada dos tratamentos XC e XCM foram feitas da mesma forma, com o mesmo produto. Os procedimentos de aplicação e cura são descritos a seguir:

- Tratamento XC: o produto é entregue em pó de coloração cinza que foi misturado com água numa proporção de 5:2 (pó:água) em massa e aplicado com pincel de 63mm de forma semelhante a uma pintura. Após a cura inicial procedeu-se a aplicação de spray de água 3 vezes ao dia, durante 2 dias consecutivos. Cumprida a cura recomendada, os corpos de prova ficaram sobre estrados de madeira estocados ao ar dentro do laboratório até a idade de pré-condicionamento para os ensaios.
- Tratamento XCM: a primeira fase da aplicação foi igual a do primeiro tratamento exceto pela cura, pois a primeira camada recebeu spray de água 3 vezes ao dia por 36h, quando da aplicação da segunda camada. Esta segunda demão foi feita com um produto semelhante ao primeiro, porém modificado. A proporção da mistura pó:água foi também de 5:2 e aplicação com pincel de 63 mm. A cura se seguiu por 2 dias com spray de água e então sobre estrados de madeira estocados ao ar dentro do laboratório semelhante ao primeiro tratamento.
- Tratamento Z4: trata-se de uma argamassa polimérica, entregue em pó e misturada com água na proporção de 100 partes de pó para 15 partes de água em massa. A mistura foi feita em misturador mecânico em baixa rotação durante 5 min. Resultou em uma argamassa que foi aplicada com 4 mm de espessura sobre uma das faces do corpo de prova com o auxílio de espátula metálica. Após a aplicação, os corpos de prova ficaram por

aproximadamente 12h ao ar e depois em câmara climatizada com $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e UR de 95% por 7 dias. Ato contínuo, foram armazenados em ambiente de laboratório até a idade de condicionamento para os ensaios.

Após aplicação dos produtos todas as amostras, incluindo as REF, ficaram ao ar, dentro do laboratório, sob condições de temperatura e umidade em ambiente coberto.

Os corpos de prova prismáticos, destinados ao ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI), foram cortados em serra circular diamantada em dimensões de 10x10x5,2 cm quando completaram 88 dias de moldagem e foram ainda lavados e secos. No 89º dia receberam 2 camadas sucessivas de verniz poliuretânico em 5 de suas faces, deixando livre para o contato com a solução salina apenas a face tratada. No 90º dia foi aplicada uma terceira camada de verniz que ficou secando até o 91º dia após a moldagem, quando os corpos de prova foram submersos em um tanque contendo solução de NaCl.

4.5 Ensaio realizados

4.5.1 Ensaio de penetração a cloretos por imersão (EPCI)

Para cada mistura, os 3 corpos de prova prismáticos de 10x10x40cm foram cortados resultando, cada um, em 7 fatias de 10x10x5,2cm. Essas fatias foram distribuídas de forma que, para cada idade de imersão, fossem analisadas no mínimo 3 amostras (cada uma de um dos prismas de origem). Após a aplicação das 3 camadas de verniz e a secagem deste material, as amostras foram imersas em solução salina com concentração semelhante à da água do mar - 19,380 ppm Cl⁻. O número de corpos de prova por idade foi distribuído da seguinte forma:

| Período de imersão | 7 dias | 14 dias | 28 dias | 56 dias | 91 dias |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Nº de cps | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 |

Nos prazos de submersão (7, 14, 28, 56, 91 e 182 dias) retiravam-se do tanque as amostras, que eram rompidas e submetidas à aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada). De acordo com a variação de coloração, determinaram-se as profundidades médias de penetração de cloretos. A aplicação de nitrato de prata resulta na precipitação de uma coloração esbranquiçada nos locais onde existem cloretos livres com concentração superior a 0,15%. No restante do corpo de prova, onde não há cloretos, a coloração se torna marrom. A análise foi feita através de fotografias digitais que foram tratadas com o auxílio do programa AutoCad2006 de forma a serem feitas leituras de profundidade de penetração espaçadas de 1mm. Logo, os dados sofreram tratamento estatístico de maneira que o coeficiente de variação foi estipulado em 10%.

Com a profundidade média estabelecida para cada prazo de submersão, os valores separados por tipo de mistura foram analisados em função de regressões, resultando equações do tipo 4.2 e delas retirado o coeficiente de penetração “k”.

$$X = a + k (t)^{1/2} \quad (4.2)$$

Onde:

X – profundidade de penetração (mm);

k – coeficiente de penetração;

t – tempo (semanas)

O ensaio recomendado pela ASTM C1202 é uma das formas utilizadas para avaliar a resistência de concreto à penetração de cloretos. Através da manutenção de uma diferença de potencial de 60 V dc, os íons cloreto são induzidos a atravessar uma fatia de concreto. O mecanismo preponderante de penetração é a migração iônica, porque a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão (Hisada et al.,1999) e, estando o concreto saturado, a absorção inexistente. Apesar das críticas com relação a esse método de ensaio, uma vez que pesquisadores afirmam que os resultados fornecidos pelo teste rápido de penetração de cloretos – TRPC - não

representam a resistência à penetração de cloretos e, sim, uma medida de condutividade elétrica do concreto, (ANDRADE, 1993;ISAIA, 1996; SHI et al,1998; WEE et al, 2000; CALÇADA, 2002), especificações baseadas na ASTM C 1202 são comuns na indústria da construção nos EUA (BRYANT, 2009). O autor afirma que o Departamento de Transporte da Virgínia está realizando um programa piloto usando a norma ASTM C 1202 como especificação de desempenho, assim como a autoridade portuária de New York e New Jersey também usa esta norma como especificação de desempenho para o concreto. Segundo Neville (1997), o ensaio pode ser útil para comparação e escolha do concreto mais adequando.

4.5.2 Ensaio acelerado de penetração de cloretos - ASTM C 1202/05

O ensaio descrito pela norma ASTM C1202/05 tem objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto (\varnothing 10,0 x 5,1 cm), submetida a uma tensão de $60,0 \pm 0,1$ V, durante um período de 6 horas. As faces do cilindro são expostas uma à solução de cloreto de sódio (3% em água destilada) e a outra à solução de hidróxido de sódio (0,3N em água destilada), nas quais são submersos eletrodos de cobre conectados em uma fonte de corrente contínua, permitindo a diferença de potencial no concreto.

Foi realizada a moldagem de um corpo-de-prova (\varnothing 10 x 20 cm) por mistura, para cada um dos cimentos e produtos de proteção aplicados e dele retirado duas amostras, em serra de disco diamantado, de concreto de forma que após a aplicação do tratamento resultasse nas dimensões normalizadas (\varnothing 10,0 x 5,1 cm). Ao completarem 89 dias da moldagem foram submetidos ao pré condicionamento prescrito por esta norma que consiste em:

- Aplicação e secagem de uma camada selante na face curva do corpo de prova;
- Aplicação de vácuo por um período de 3 horas;
- Colocação de água deionizada na cuba e aplicação de vácuo submerso por um período de 1h;
- Imersão em água deionizada por um período de 18 +ou- 2h.

Após o condicionamento, os corpos de prova foram secos superficialmente e fixados nas células de acrílico com auxílio de cola a base de silicone.

Com a finalização do ensaio (6h), foi então calculada a carga total passante (equação 4.3), verificando-se a classificação do concreto, quanto ao risco de penetração dos íons cloreto, de acordo com norma ASTM C1202/05 (Tabela 4.5).

$$Q = 900.(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{330} + I_{360}) \quad (4.3)$$

Onde:

Q – carga total passante (Coulombs);

I_t – corrente medida nos tempos t (t em minutos) (Ámperes).

Além do ensaio realizado aos 91 dias, também foi feito um ensaio com 182 dias da data de moldagem, onde os corpos de prova receberam o mesmo condicionamento citado anteriormente.

Tabela 4.5 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloreto de acordo com a carga passante (ASTM C1202/05)

| <i>Carga passante</i> | <i>Risco de penetração de íons cloreto</i> |
|------------------------------|---|
| > 4000 | Alto |
| 2000 a 4000 | Moderado |
| 1000 a 2000 | Baixo |
| 100 a 1000 | Muito baixo |
| < 100 | Desprezível |

No final de cada ensaio a amostra foi rompida ao meio para aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada) e verificada a profundidade de penetração dos íons cloreto (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Corpo-de-prova após aspensão de solução de nitrato de prata após ensaio ASTM C1202/05.

O ensaio recomendado pela ASTM C1202 é uma das formas utilizadas para avaliar a resistência de concreto à penetração de cloretos. Através da manutenção de uma diferença de potencial de 60 V dc, os íons cloreto são induzidos a atravessar uma fatia de concreto. O mecanismo preponderante de penetração é a migração iônica, porque a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão (Hisada et al.,1999) e, estando o concreto saturado, a absorção inexistente. Apesar das críticas com relação a esse método de ensaio, uma vez que pesquisadores afirmam que os resultados fornecidos pelo teste rápido de penetração de cloretos – TRPC - não representam a resistência à penetração de cloretos e, sim, uma medida de condutividade elétrica do concreto, (ANDRADE, 1993;ISAIA, 1996; SHI et al,1998; WEE et al, 2000; CALÇADA, 2002), especificações baseadas na ASTM C 1202 são comuns na indústria da construção nos EUA (BRYANT, 2009). O autor afirma que o Departamento de Transporte da Virgínia está realizando um programa piloto usando a norma ASTM C 1202 como especificação de desempenho, assim como a autoridade portuária de New York e New Jersey também usa esta norma como especificação de desempenho para o concreto. Segundo Neville (1997), o ensaio pode ser útil para comparação e escolha do concreto mais adequado.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Método ASTM C1202

As Figuras de 5.1 a 5.6. apresentam a carga total passante para cada tratamento superficial realizado para os diferentes níveis de resistência e tipos de cimento utilizados.

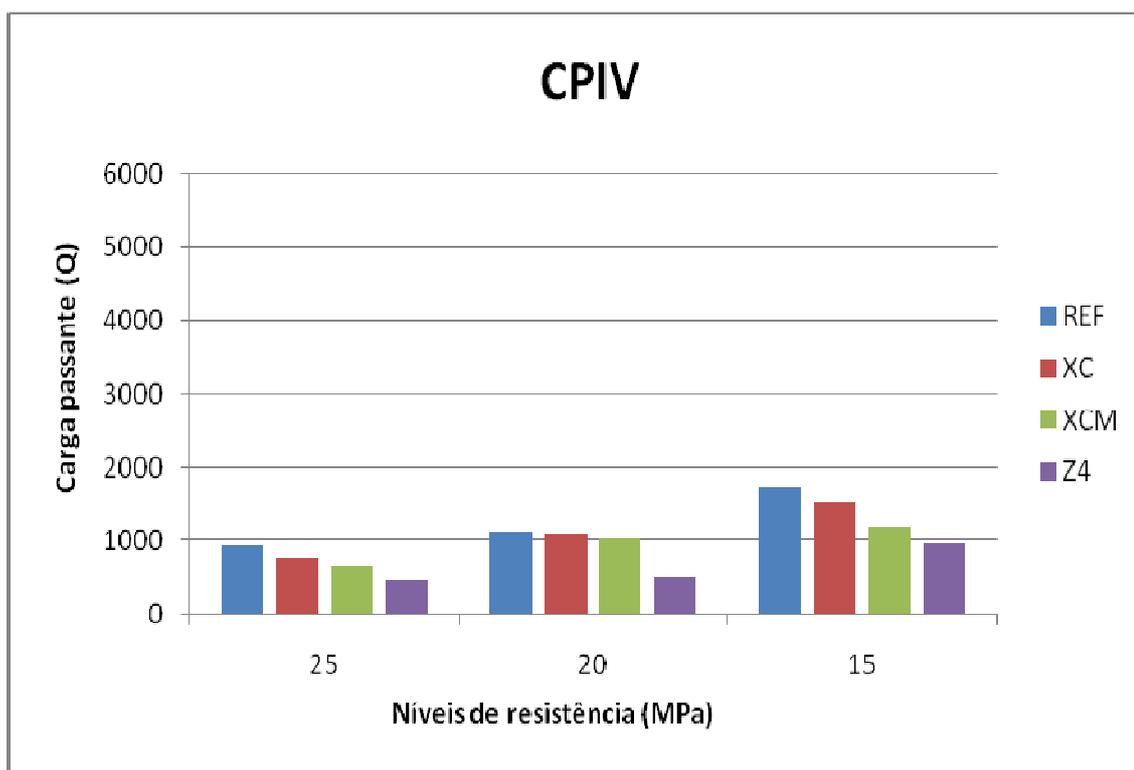


Figura 5.1 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPIV aos 91 dias

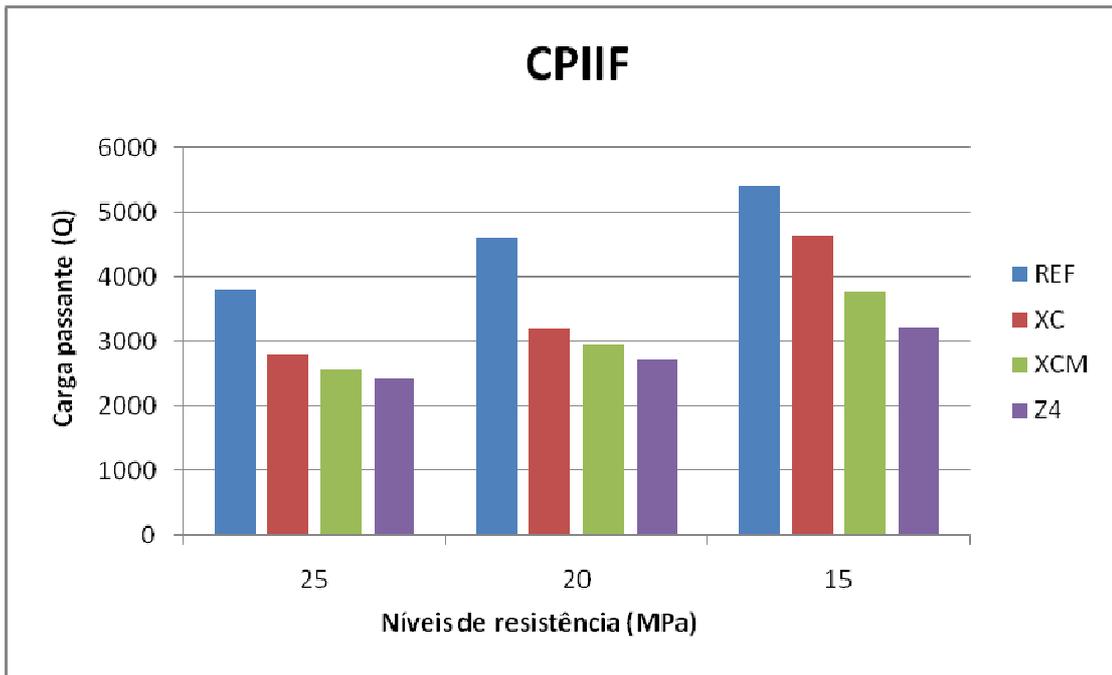


Figura 5.2 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPII-F aos 91 dias

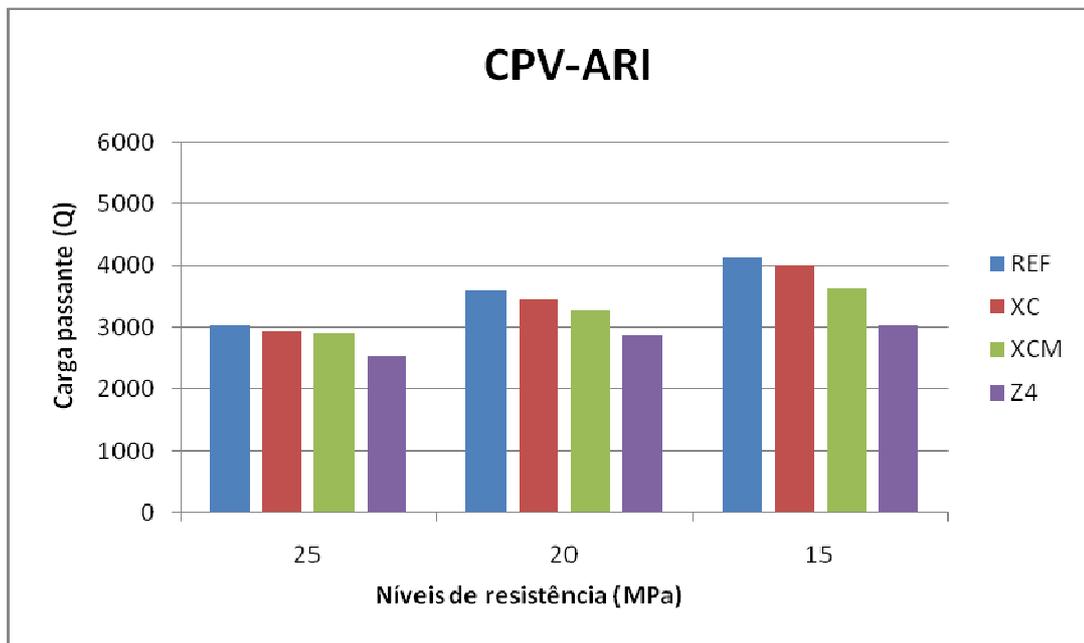


Figura 5.3 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPV-ARI aos 91 dias

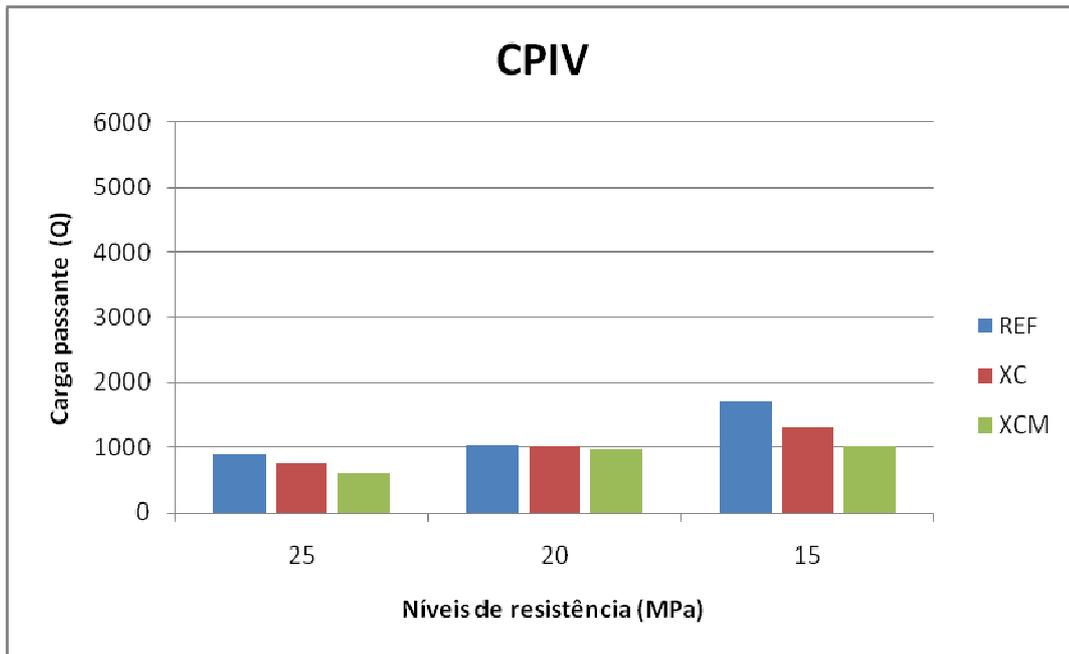


Figura 5.4 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPIV aos 182 dias

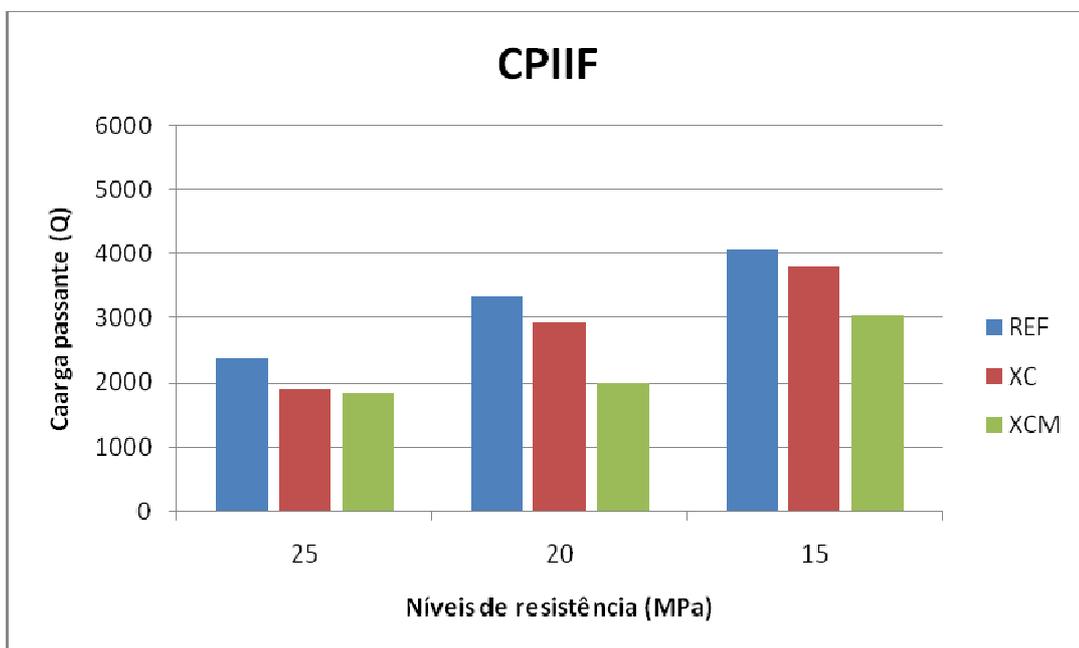


Figura 5.5 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência - CPIIF aos 182 dias

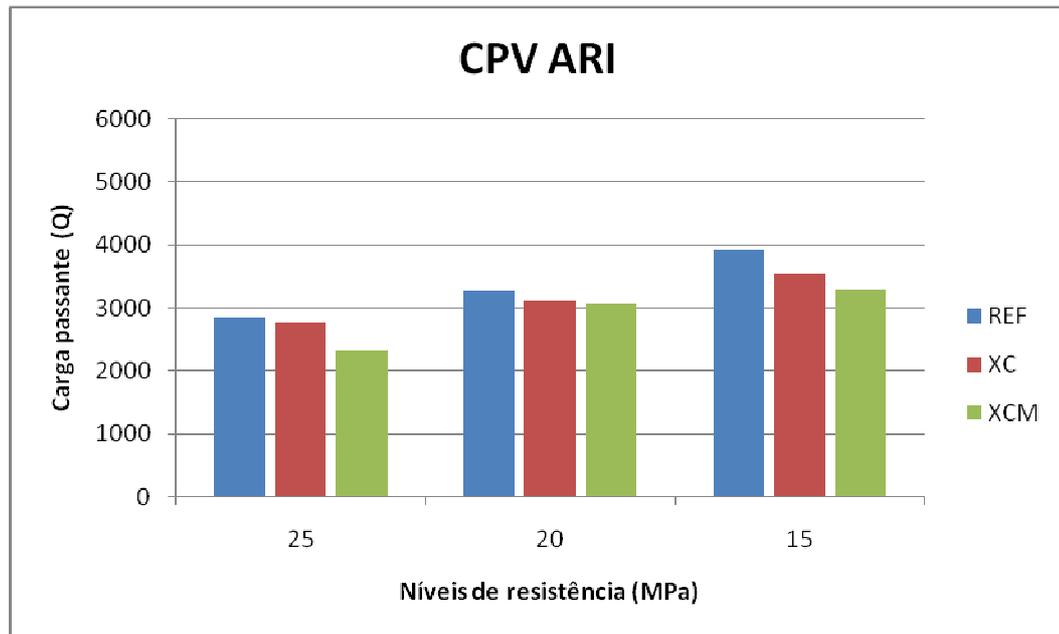


Figura 5.6 – Carga total passante para cada tratamento em função dos níveis de resistência – CPV-ARI aos 182 dias

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os valores de carga passante obtidos de acordo com o método de ensaio ASTM C 1202, assim como os valores dos coeficientes a, b e (r^2), das equações $Q=a/b^x$ que correlacionam os valores de carga passante e a relação a/c dos concretos ensaiados.

Da análise destas tabelas, verifica-se, como esperado, uma diminuição na carga total passante com o aumento da resistência do concreto e consequente redução da relação água/cimento para todos os tipos de cimento, tanto para os concretos sem tratamento superficial, quanto para os submetidos a tratamento superficial. Para Ngala et al (1995), a relação a/ag é o parâmetro principal que influencia a penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém com baixas relações a/ag . Nestes concretos, os íons cloreto são obrigados a se difundir por caminhos mais tortuosos e desconectos, o que dificulta seu ingresso para o interior do concreto.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 91 dias (ASTM C1202)

| Mistura | Cimento | Carga Total Passante (Coulombs) 91 dias | | | | | |
|---------|---------|---|--------|--------|--------------|--------|----------------|
| | | Nível de resistência | | | Coeficientes | | |
| | | 25 MPa | 20 MPa | 15 MPa | A | B | R ² |
| REF | CPIV | 951 | 1134 | 1750 | 86,33 | 0,0058 | 0,9786 |
| | CPIIF | 3804 | 4602 | 5405 | - | 0,0678 | 0,9991 |
| | CPVARI | 3036 | 3593 | 4114 | 708,61 | 0,0977 | 0,9979 |
| XC | CPIV | 783 | 1107 | 1526 | 64,185 | 0,0041 | 0,9998 |
| | CPIIF | 2799 | 3203 | 4635 | 411,59 | 0,0198 | 0,9643 |
| | CPVARI | 2921 | 3436 | 4004 | 639,94 | 0,0889 | 0,9998 |
| XCM | CPIV | 662 | 1027 | 1203 | 77,97 | 0,0082 | 0,9567 |
| | CPIIF | 2545 | 2941 | 3759 | 591,22 | 0,0491 | 0,9883 |
| | CPVARI | 2912 | 3284 | 3632 | - | 0,1845 | 0,9979 |
| Z4 | CPIV | 461 | 528 | 959 | 24,265 | 0,0019 | 0,9541 |
| | CPIIF | 2417 | 2727 | 3219 | 833,75 | 0,1098 | 0,9963 |
| | CPVARI | 2537 | 2861 | 3023 | - | 0,2641 | 0,9727 |

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos aos 182 dias (ASTM C1202)

| Mistura | Cimento | Carga Total Passante (Coulombs) 182 dias | | | | | |
|---------|---------|--|--------|--------|--------------|--------|----------------|
| | | Nível de resistência | | | Coeficientes | | |
| | | 25 MPa | 20 MPa | 15 MPa | A | B | R ² |
| REF | CPIV | 899 | 1036 | 1696 | 0,3753 | 0,9997 | 0,9648 |
| | CPIIF | 2372 | 3362 | 4071 | 0,3426 | 0,9998 | 0,9903 |
| | CPVARI | 2848 | 3274 | 3925 | 0,3885 | 0,9998 | 0,9971 |
| XC | CPIV | 749 | 1013 | 1328 | 0,3404 | 0,9995 | 0,9989 |
| | CPIIF | 1902 | 2931 | 3822 | 0,3775 | 0,9998 | 0,9963 |
| | CPVARI | 2771 | 3115 | 3533 | 0,3196 | 0,9997 | 0,9999 |
| XCM | CPIV | 615 | 972 | 1019 | 0,3431 | 0,9995 | 0,8713 |
| | CPIIF | 1855 | 2017 | 3047 | 0,364 | 0,9998 | 0,9381 |
| | CPVARI | 2314 | 3075 | 3298 | 0,4196 | 0,9998 | 0,9393 |

Constata-se a partir da observação das Tabelas 5.1 e 5.2 melhor desempenho para os concretos executados com cimento portland pozolânico. Isto é devido às características deste cimento que modificam a estrutura da pasta reduzindo significativamente a penetrabilidade e aumenta a resistividade do concreto (ARYA e XU, 1995).

Da análise dos resultados aos 91 dias, para todos os tipos de cimento e níveis de resistência à compressão investigados, os concretos tratados com produto obturador dos poros em dupla demão apresentaram melhor desempenho do que com uma única demão. Os concretos executados com o cimento pozolânico apresentaram maior redução da carga passante, quando com os outros dois tipos de cimento. Entretanto, para os três tipos de cimentos utilizados, a redução na carga passante foi mais pronunciada no menor nível de resistência investigado, $f_{ck} = 15\text{MPa}$. Assim, o CP V apresentou redução na carga passante de 10%, o CP II F de 23% e o CP IV de 27%.

Quando comparado aos concretos sem tratamento, aqueles em que foram aplicados uma única demão de produto obturador apresentaram, para os três níveis de resistência à compressão, redução na carga passante média de 11% para o CP IV, 23% para o CP II F e 3,5% para o CP V. Ao se aplicar a segunda demão do produto obturador, as reduções da carga passante foram, em média, para os três níveis de resistência de 24% para CP IV, 33% para CPII F e 8,2% para o CP V.

Em comparação com o concreto de referência, o tratamento que apresentou maior resistência à penetração de cloretos, avaliada de acordo com ASTM C 1202, foi o realizado com a argamassa polimérica. A redução na carga passante para os três níveis de resistência à compressão foi de 50% para o CP IV, de 39% para o CP II F e 21% para CP V. Nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentados os valores percentuais de carga passante de cada tipo de tratamento em comparação com o concreto de referência, para cada um dos tipos de cimento CPIV, CPIIF e CPV-ARI, respectivamente, aos 91 dias.

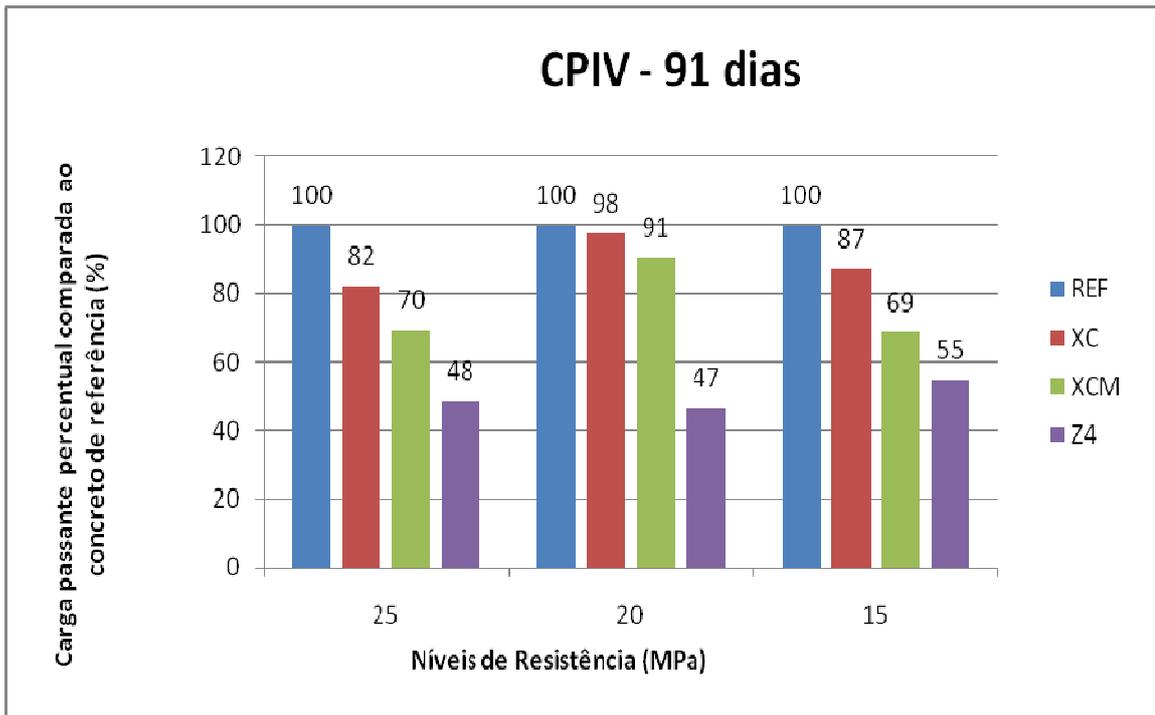


Figura 5.7 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIV aos 91 dias

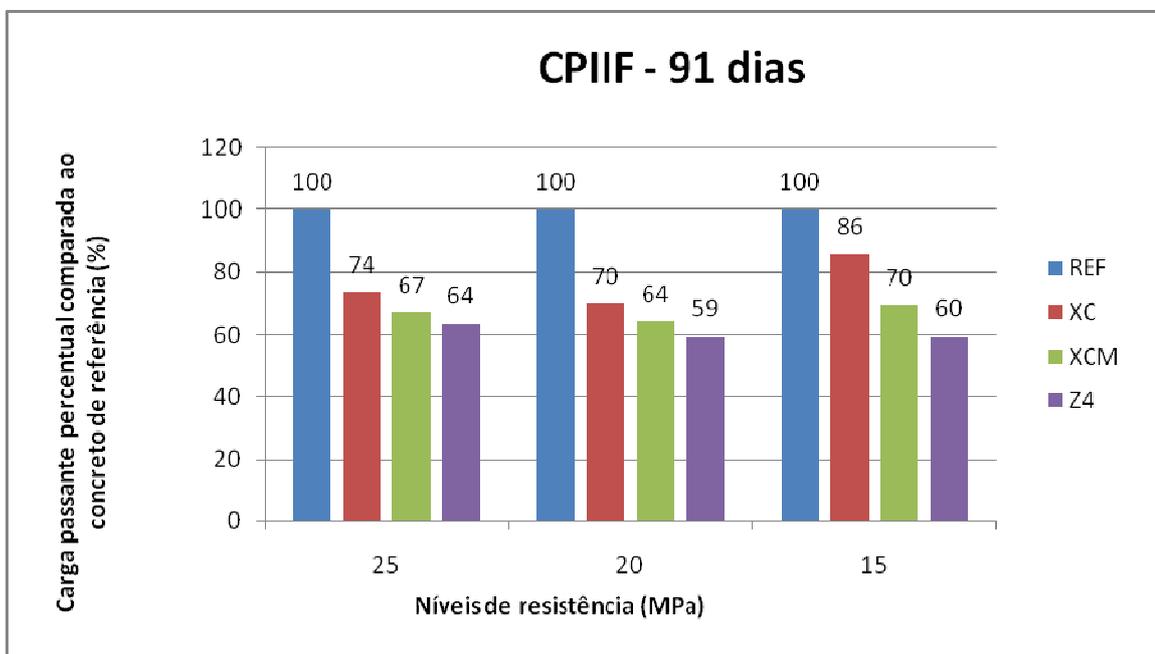


Figura 5.8 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIIF aos 91 dias

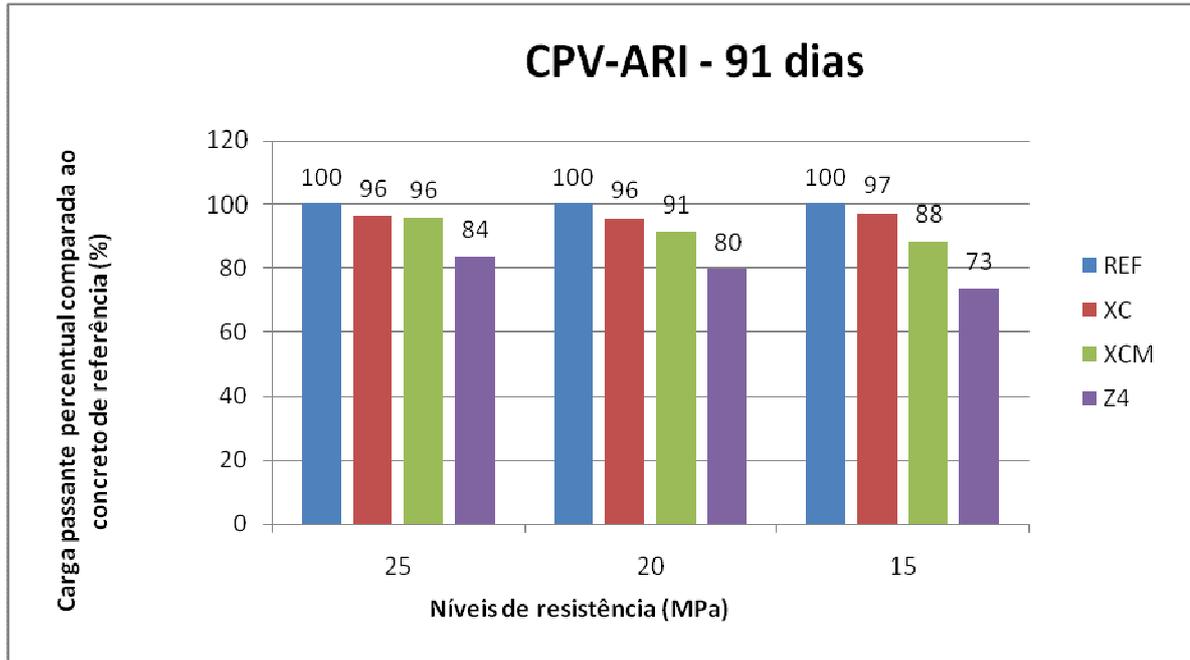


Figura 5.9 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV-ARI aos 91 dias

Na análise do ensaio aos 182 dias, que não incluiu o estudo do produto Z4, houve um comportamento similar com relação à eficiência da aplicação dos produtos XC e XCM em comparação com as misturas de referência. No entanto, percebe-se que, com uma idade mais avançada de cura tanto do concreto de substrato, quanto dos tratamentos, algumas misturas sofreram diminuição da carga passante suficiente para que fossem enquadradas em classes de agressividade mais baixa, conforme a tabela de classificação da ASTM C1202, Tabela 5.3. Esta modificação de carga foi mais pronunciada nos concretos feitos com cimento CPIIF.

Os resultados do ensaio aos 182 dias resultou em cargas passantes mais baixas, mantendo um comportamento semelhante quando comparado ao ensaio aos 91 dias. Da mesma forma, o tratamento com duas demãos do produto obturador de poros apresentou melhor eficiência do que com apenas uma demão. Em comparação ao concreto de referência, a aplicação de uma demão do obturador de poros reduziu a carga passante, em média para os três níveis de resistência, em 14% nos concretos com CPIV, 13% para o CPIIF e em 6% para o CPV –ARI. Já quando os concretos recebem a segunda aplicação do produto, a redução dos valores de carga passante passa a ser de 26% para o CPIV, 29% para o CPIIF e de 14% para o CPV. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os comparativos percentuais de carga passante dos concretos tratados em relação aos concretos de referência para cada tipo de cimento estudado.

Tabela 5.3 – Classificação quanto ao risco de penetração de cloretos segundo ASTM C1202 aos 91 e aos 182 dias

| Mistura | Cimento | Carga Passante (Q) | | | | | |
|---------|---------|-----------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | | Nível de Resistência (f_{ck}) | | | | | |
| | | 25MPa | | 20MPa | | 15MPa | |
| | | 91 dias | 182 dias | 91 dias | 182 dias | 91 dias | 182 dias |
| REF | CPIV | MB | MB | B | B | B | B |
| | CPIIF | M | M | A | M | A | A |
| | CPVARI | M | M | M | M | A | M |
| XC | CPIV | MB | MB | B | B | B | B |
| | CPIIF | M | B | M | M | A | M |
| | CPVARI | M | M | M | M | A | M |
| XCM | CPIV | MB | MB | B | MB | B | B |
| | CPIIF | M | B | M | M | M | M |
| | CPVARI | M | M | M | M | M | M |
| Z4 | CPIV | MB | - | MB | - | MB | - |
| | CPIIF | M | - | M | - | M | - |
| | CPVARI | M | - | M | - | M | - |

MB – Muito baixo B – Baixo M – Moderado A – Alto

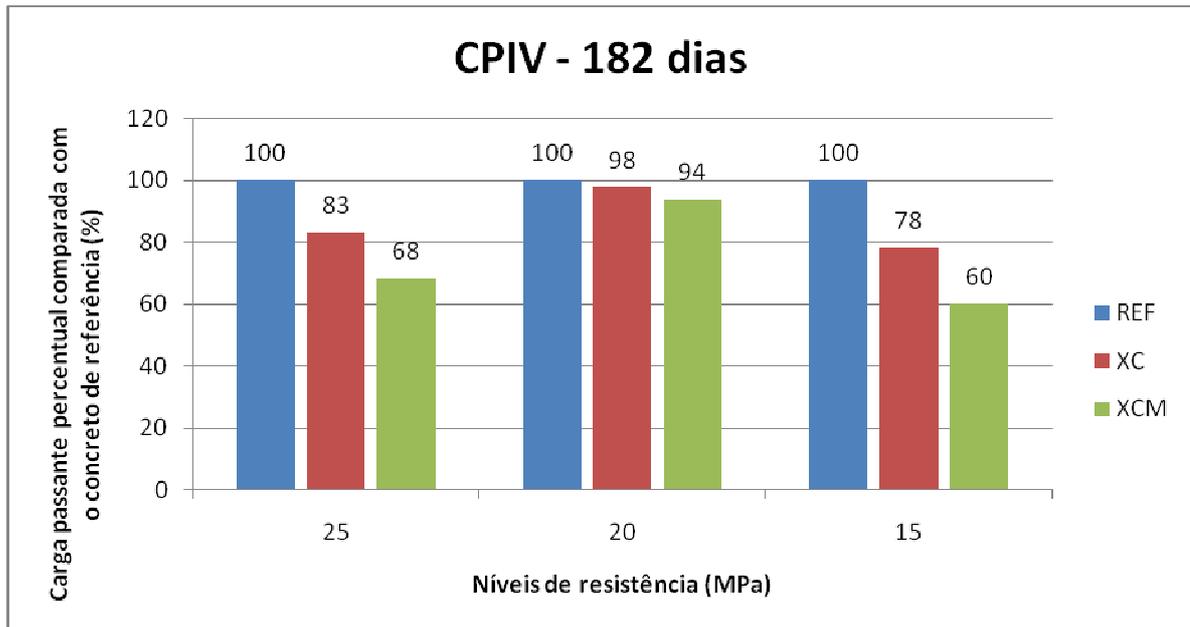


Figura 5.10 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIV aos 182 dias

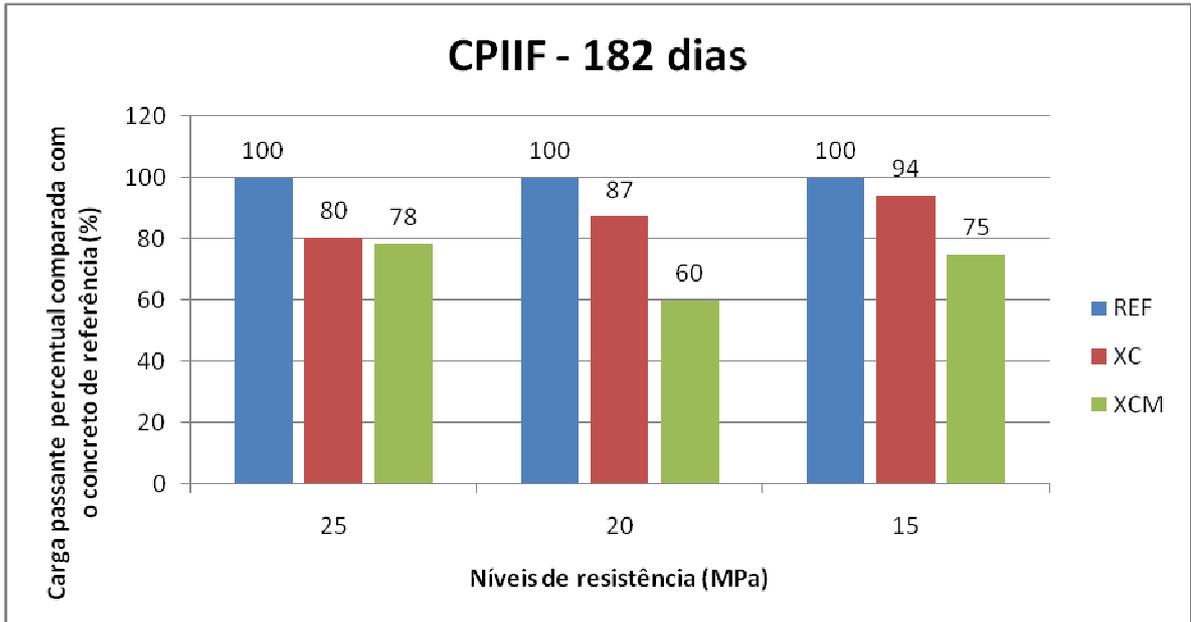


Figura 5.11 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPIIF aos 182 dias

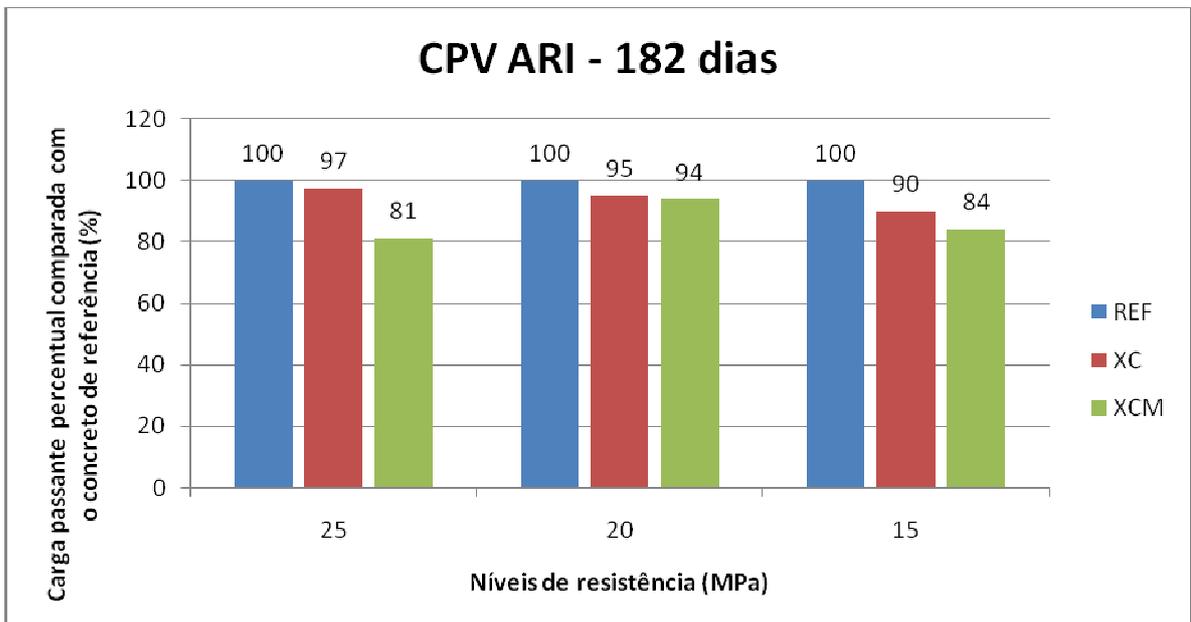


Figura 5.12 – Carga passante em relação ao traço de referência para o cimento CPV-ARI aos 182 dias

Após a realização do ensaio rápido para avaliação da resistência à penetração de cloretos, os corpos de prova foram rompidos ao meio por compressão diametral e receberam, nas faces rompidas, um spray de solução de nitrato de prata (0,1 M) com o objetivo de medir a profundidade de penetração de cloretos pelo

método colorimétrico. Os resultados deste teste são compatíveis com os resultados de carga passante obtidos pelo método descrito pela ASTM C1202. Nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15 são apresentados as correlações entre carga passante e profundidade de penetração para cada um dos cimentos, CPIV, CPII-F e CPV-ARI – RS, respectivamente, aos 91 dias, e nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 a correlação dos ensaios de 182 dias. De acordo com tais gráficos e seus coeficientes de correlação (R^2), vê-se a forte dependência mútua entre estas duas grandezas, também verificada por Andrade et al. (1999). Assim, apesar de outros íons presentes no concreto influenciarem no ensaio (Wee et al., 2000), a carga passante é fortemente correlacionada ao que ocorre aos cloretos no interior do concreto.

Em um estudo sobre produtos de reparo Medeiros, (2008) analisou, entre outros, um obturador comercial à base de silicatos semelhante ao utilizado na presente pesquisa. Analisando a penetração de cloretos nos concretos tratados com o produto a base de silicatos, Medeiros (2008) concluiu que este realmente se mostra eficaz diminuindo os valores de carga passante avaliados pela norma ASTM C1202. Os valores apresentados pelo teste colorimétrico, realizado após a aplicação da tensão especificada, mostraram tendência semelhante aos da carga, demonstrando alta correlação entre as duas grandezas.

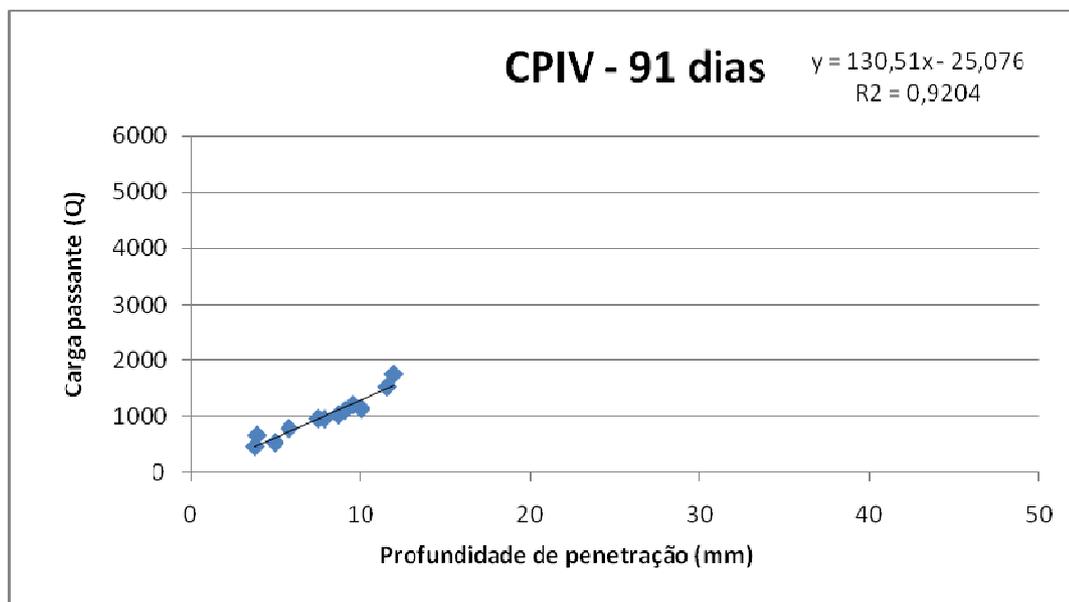


Figura 5.13 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CP IV aos 91 dias

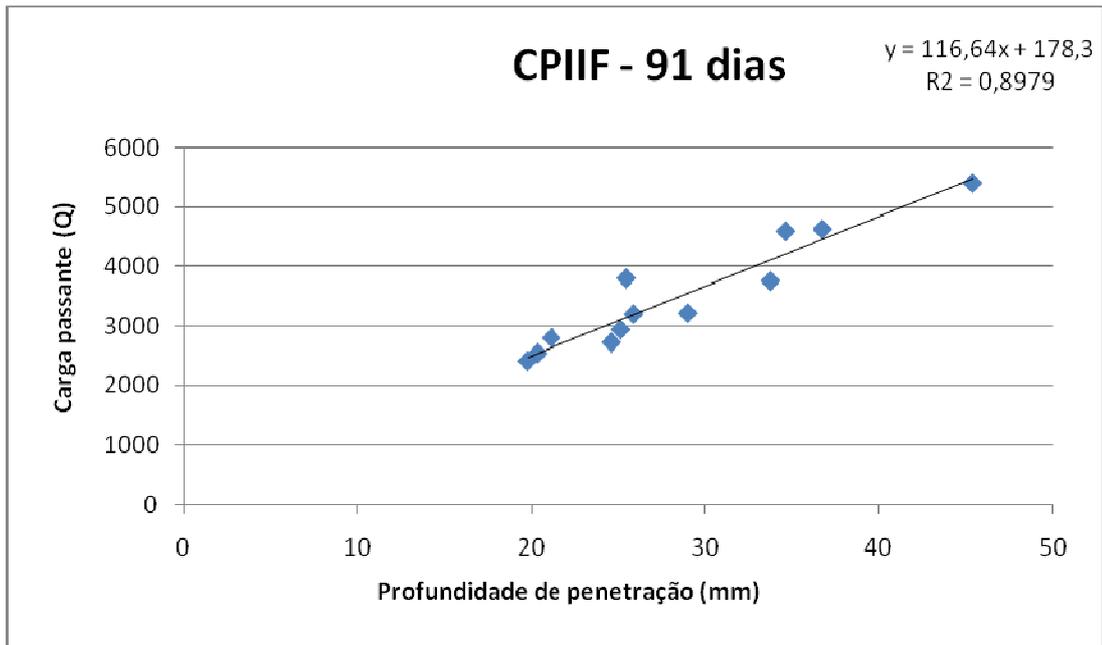


Figura 5.14 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPII-F aos 91 dias

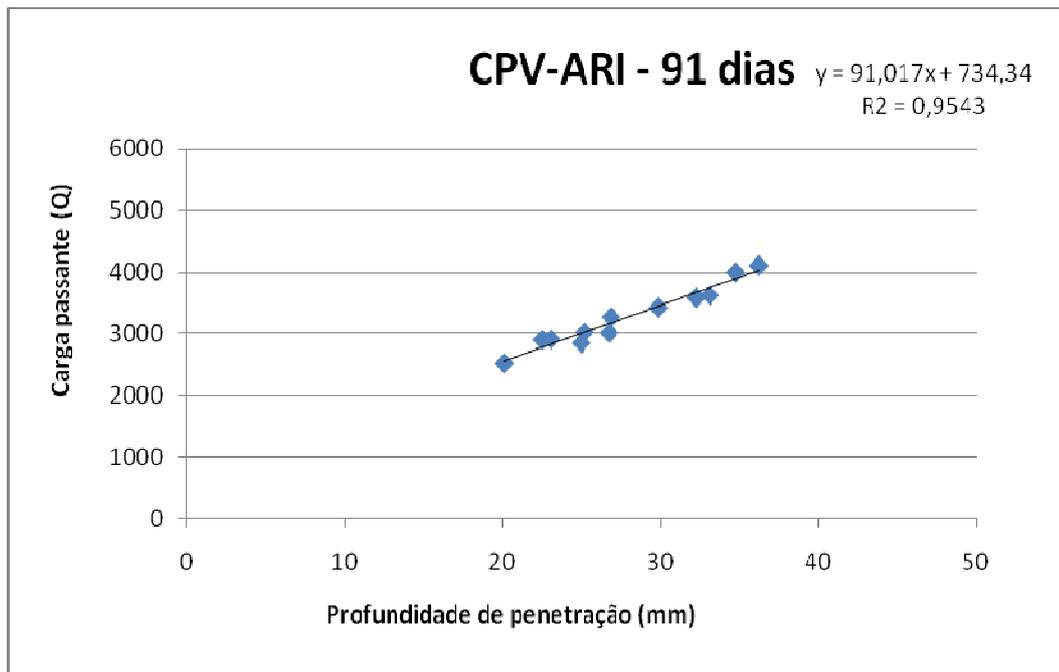


Figura 5.15 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPV-ARI-RS aos 91 dias

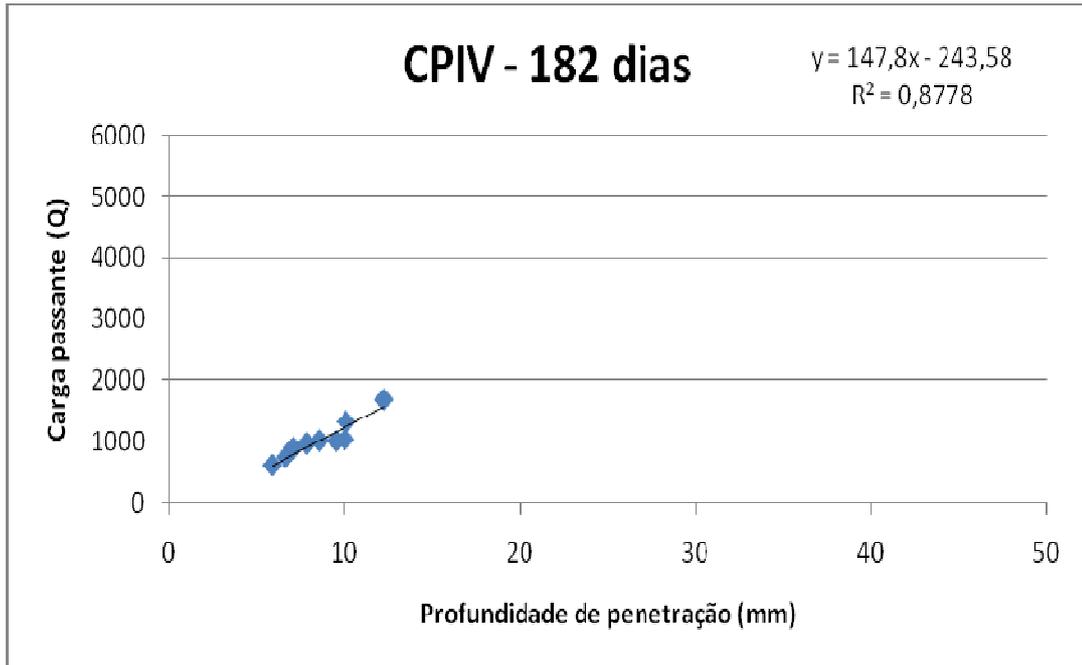


Figura 5.16 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CP IV aos 182 dias

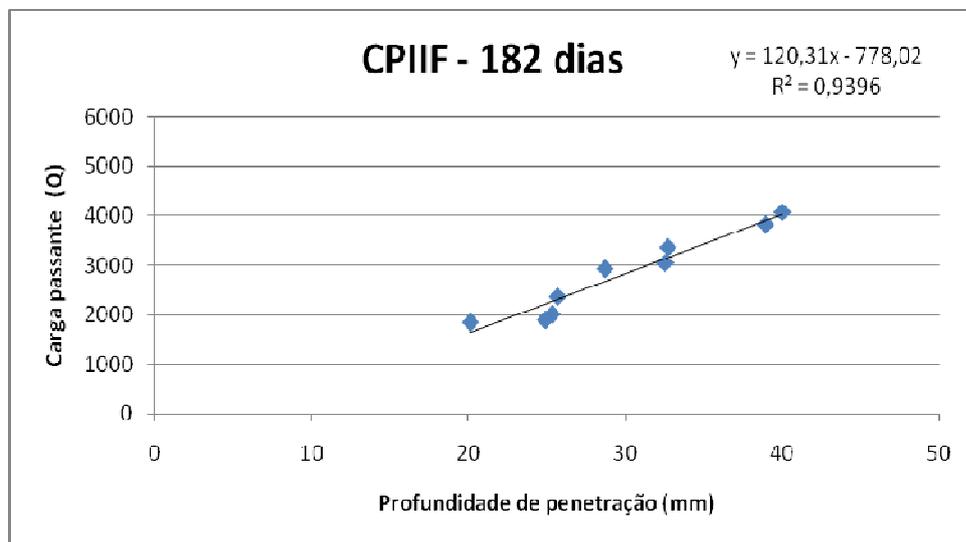


Figura 5.17 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPII-F aos 182 dias

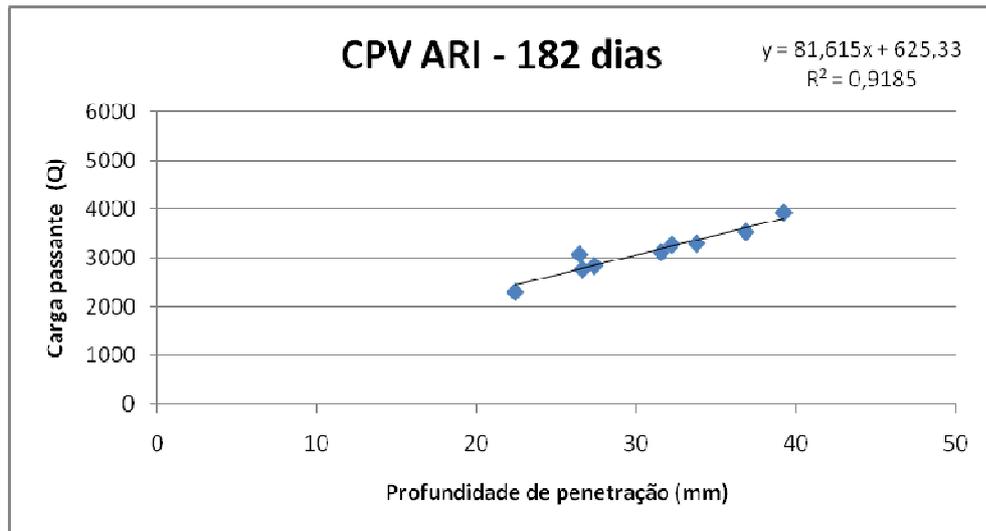


Figura 5.18 – Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 do Cimento CPV-ARI-RS aos 182 dias

Fazendo-se um comparativo entre os resultados de 91 dias e 182 dias, é possível observar que a idade de ensaio mais prolongada dos concretos de substrato e dos produtos de proteção promoveu diminuição da carga passante e das profundidades de penetração pelo método ASTM C1202. Estes comparativos são melhor ilustrados na figura 5.19 que representa os valores de carga passante dos dois ensaios e de onde é possível concluir que a diminuição da carga Q com o aumento da idade foi mais pronunciada nos concretos feitos com cimento CPIIF. Tal comportamento fica ainda mais evidente quando da análise da Figura 5.20, que mostra os resultados na idade de 182 dias em forma percentual em função da idade de 91 dias.

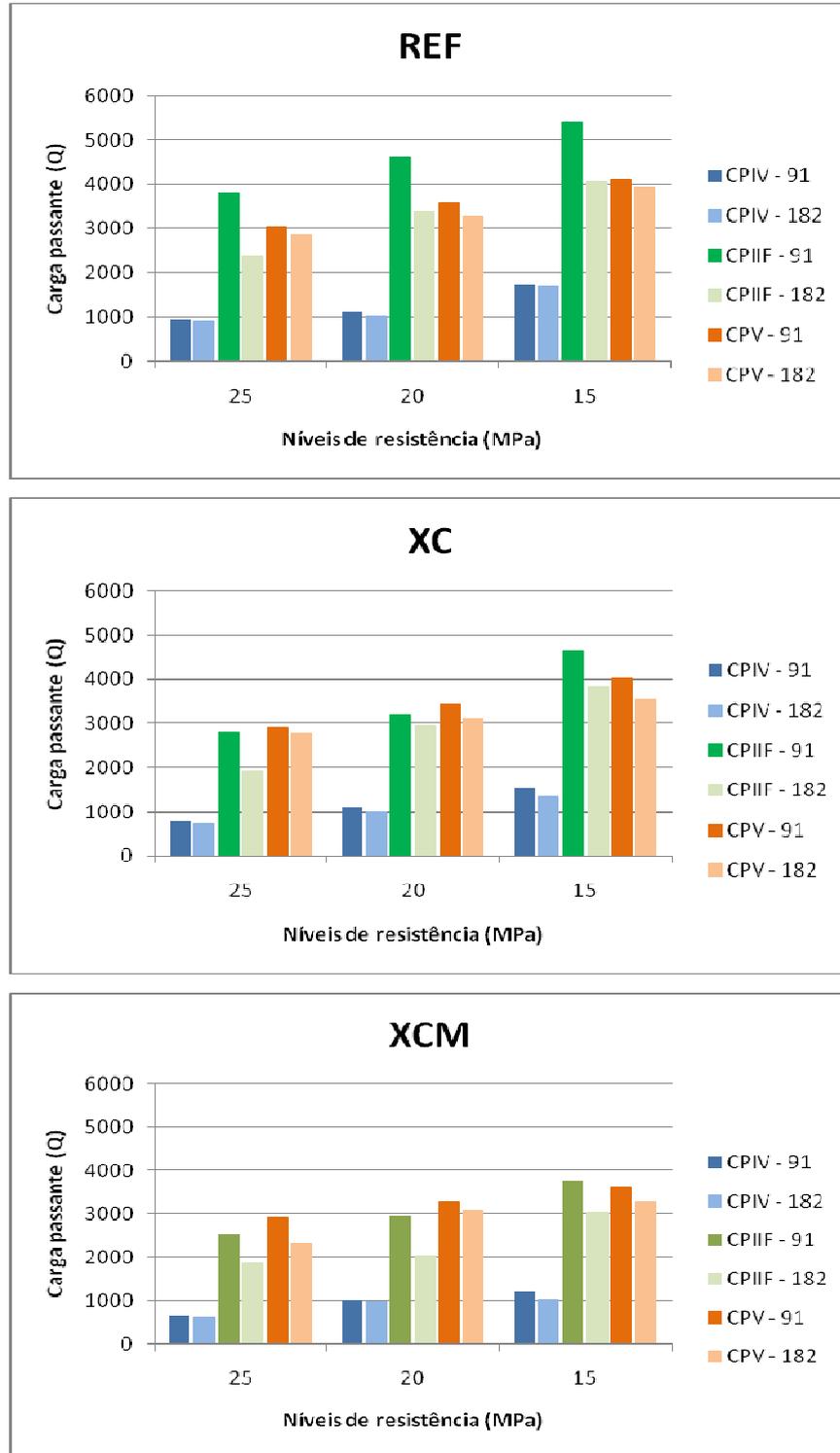


Figura 5.19 – Resultados de carga passante nas idades de 91 e 182 dias para os três níveis de resistência e tipos de cimento investigados

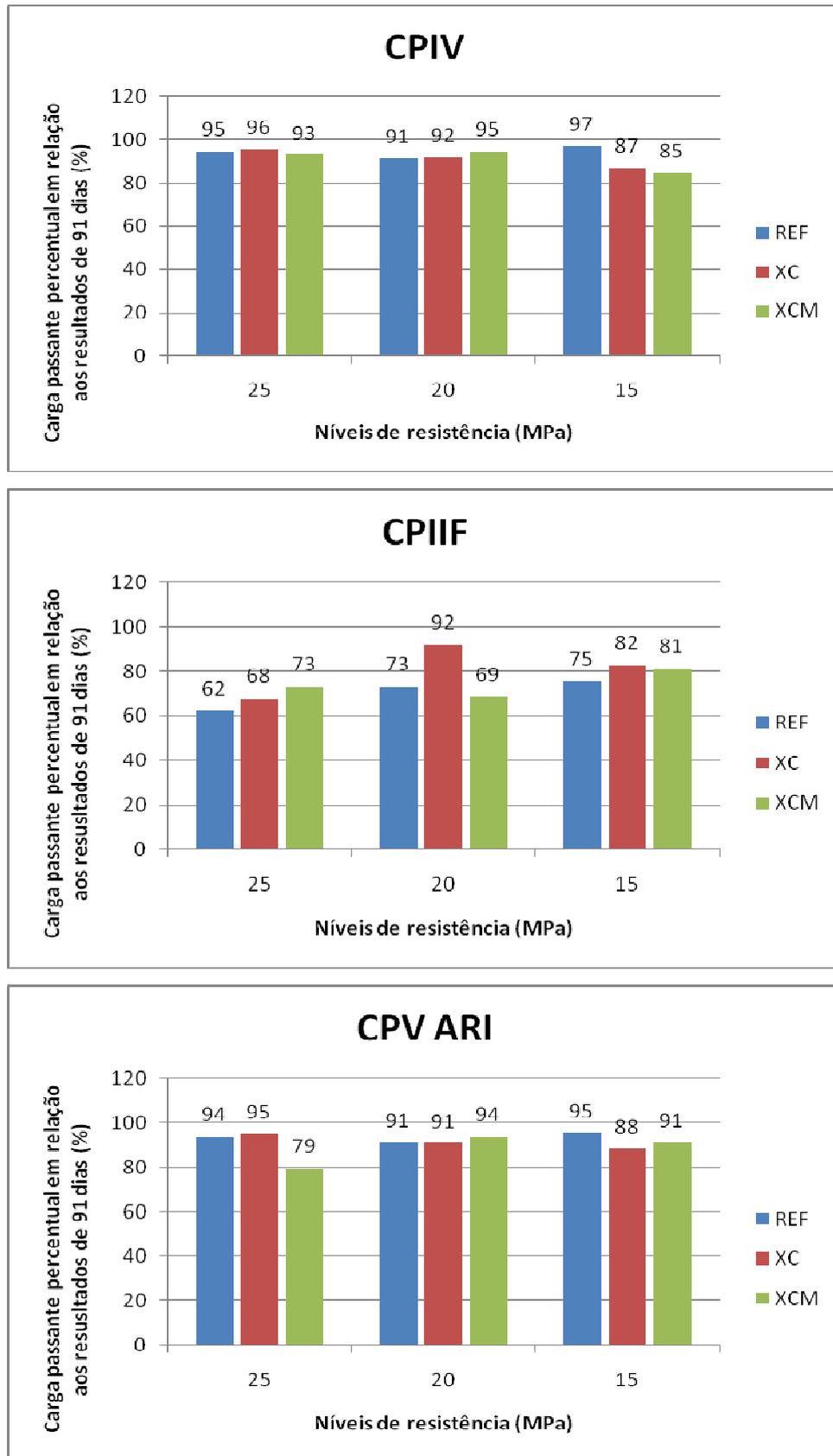


Figura 5.20 – Valor percentual dos resultados de carga passante aos 182 dias em relação aos resultados de 91 dias (100%)

5.2 Penetração de cloretos por imersão

A análise dos resultados obtidos no ensaio de imersão foram avaliados utilizando a equação 5.1 proposta por Bakker et al.(1988), que permite a obtenção de um coeficiente de penetração através das equações de regressão linear. Neste estudo, optou-se por considerar a constante “a” da equação 5.1 como diferente de zero, como é proposto por Wee et al. (2000). Tal consideração não afeta os resultados quanto às propriedades das misturas, mas serve como um meio de melhor ajustar a curva dos dados. Segundo Siqueira (2008), a equação proposta por Wee et al. (2000) resulta em dados com maior coeficiente de determinação, o que indica um melhor ajuste dos resultados de penetração de cloretos por imersão.

$$y = a + k.(\sqrt{\text{semana}}) \quad (5.1)$$

As Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 ilustram os gráficos para a obtenção dos coeficientes de penetração (k) das misturas estudadas e os coeficientes de correlação de cada reta (R^2), e a Tabela 5.4 apresenta os valores dos coeficientes citados. Os valores R^2 demonstram uma correlação muito forte entre os resultados de penetração de cloretos com as relações a/c de cada mistura.

Tabela 5.4 – Coeficientes de penetração k

| Mistura | Cimento | k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$) | | | R^2 |
|---------|---------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| | | Nível De Resistência (f_{ck}) | | | |
| | | 25MPa | 20MPa | 15MPa | |
| REF | CPIV | 2,5489 | 3,0953 | 4,0122 | 0,9988 |
| | CPIIF | 6,5765 | 7,1915 | 8,5285 | 0,9862 |
| | CPVARI | 7,2522 | 8,1941 | 9,7648 | 0,9951 |
| XC | CPIV | 1,7502 | 2,1324 | 2,6732 | 0,9999 |
| | CPIIF | 3,5800 | 5,0959 | 6,4297 | 0,9969 |
| | CPVARI | 4,8257 | 6,1385 | 7,0661 | 0,9897 |
| XCM | CPIV | 1,5452 | 1,7374 | 2,2045 | 0,9902 |
| | CPIIF | 2,5697 | 3,1584 | 4,1545 | 0,9947 |
| | CPVARI | 4,5717 | 5,0613 | 6,0669 | 0,9884 |
| Z4 | CPIV | 1,2921 | 1,4407 | 1,7228 | 0,9967 |
| | CPIIF | 1,4405 | 1,7546 | 2,1664 | 0,9994 |
| | CPVARI | 1,5090 | 1,9706 | 2,8486 | 0,9911 |

Da análise dos resultados obtidos (K) constata-se a capacidade dos tratamentos de barrar parcialmente a penetração de cloretos. Para uma melhor visualização dos efeitos da utilização dos tratamentos superficiais, a Figura 5.25 apresenta para cada tipo de cimento e nível de resistência a variação do coeficiente k.

Observa-se, na Figura 5.23, que o tratamento com obturador de poros aplicado em uma única camada tem menor capacidade de barrar a entrada de cloretos do que quando aplicado em duas camadas. Este comportamento é semelhante ao observado nos resultados do ensaio de carga passante ASTM C1202, porém a magnitude da diferença entre os dois tratamentos é menor. Quando o concreto de referência recebe uma camada do tratamento obturador (XC), o coeficiente k sofre uma diminuição de 32% para o cimento CPIV, 33% para o CPIIF e de 29% para o cimento CPV, em média entre os três níveis de resistência. Com a aplicação da segunda camada (XCM), os valores sofrem uma redução mais acentuada: 43% para o cimento CPIV, 56% para CPIIF e 38% para CPV.

Os concretos compostos com CP IV 32, com e sem aplicação de tratamento superficial, apresentaram os menores valores de coeficiente de penetração de cloretos, devido, segundo DHIR et al (1997) ao alto teor de alumina presente na cinza volante, resultando em aumento na formação de sal de Friedel. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 5.26, na qual o coeficiente k é mostrado em função do tipo de cimento e níveis de resistência para cada tratamento aplicado.

O tratamento que apresentou melhor eficiência, na diminuição da entrada de cloretos avaliados pelo ensaio de imersão, foi a argamassa polimérica Z4, mostrando percentuais de redução do coeficiente k de 53% para o cimento CPIV, 76% para CPIIF e 75% para CPV. Esse mesmo comportamento foi observado nos ensaios realizados segundo a ASTM C 1202. Os valores percentuais do coeficiente k dos concretos tratados em relação ao concreto de referência são mostrados na Figura 5.27.

No ensaio de imersão, a redução dos valores de coeficiente de penetração se mostrou mais pronunciada nos concretos feitos com cimento CPIIF.

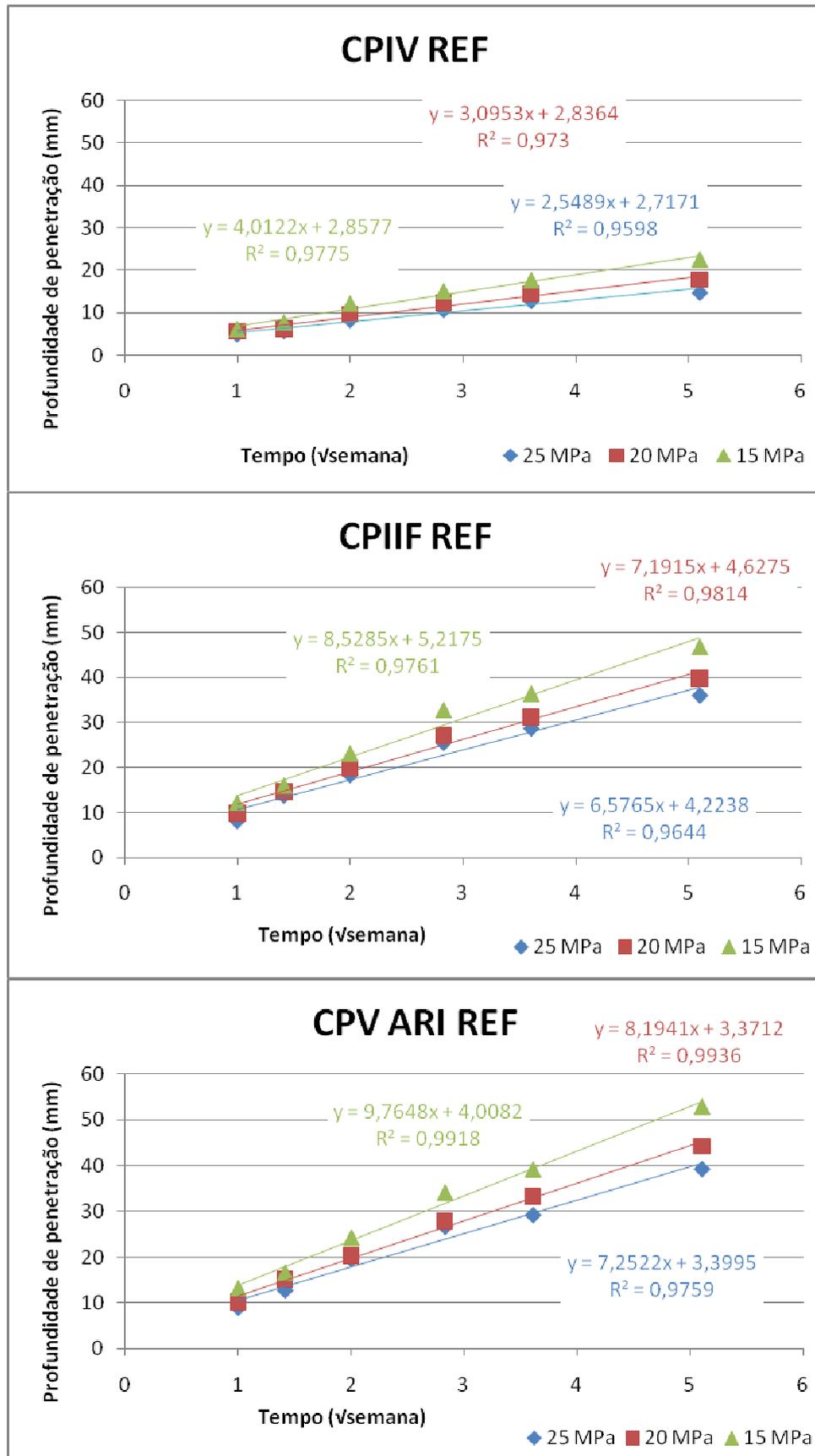


Figura 5.21 – Gráficos para obtenção do coeficiente k dos concretos de referência

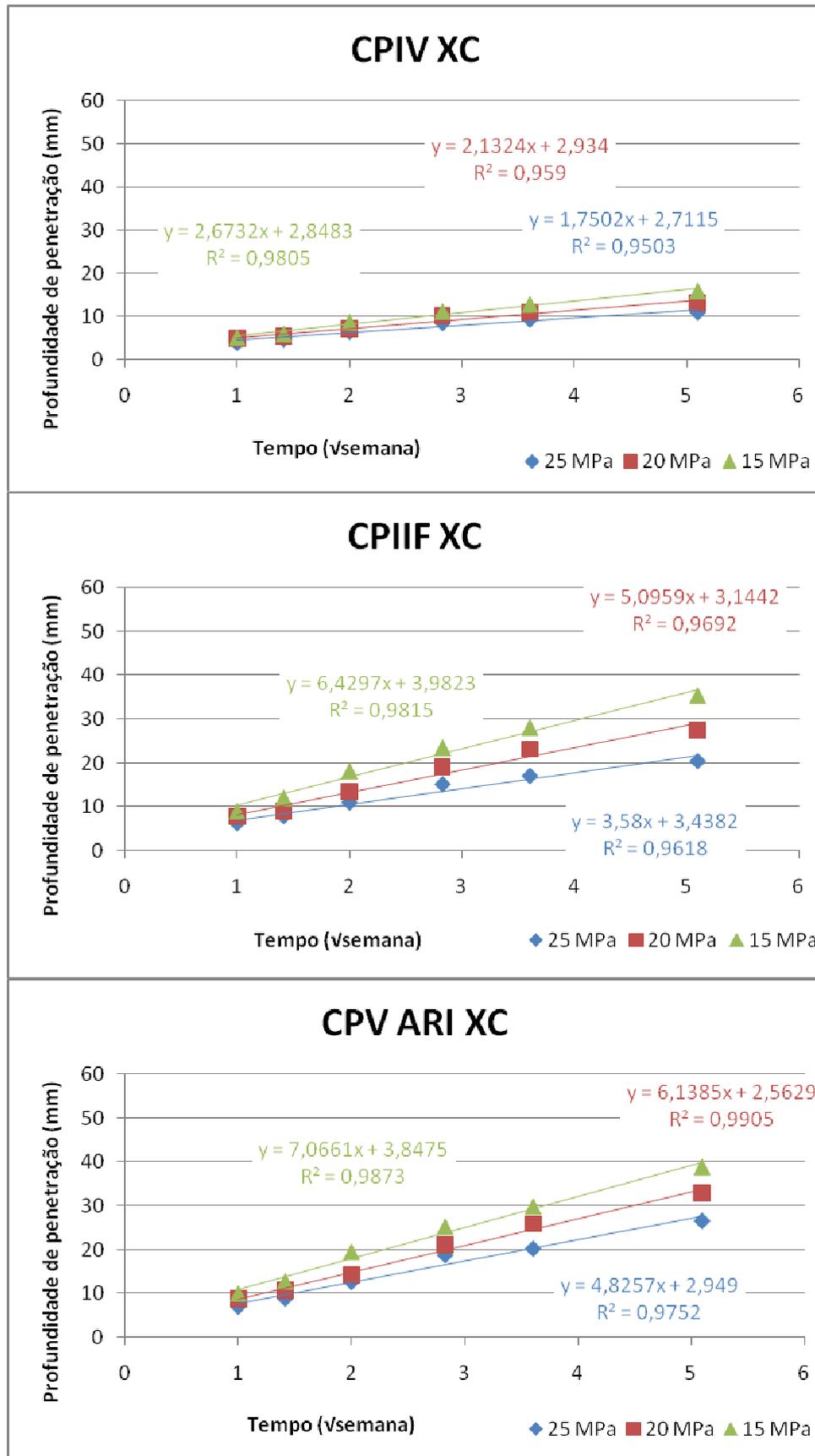


Figura 5.22 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com obturador dos poros em camada única - XC

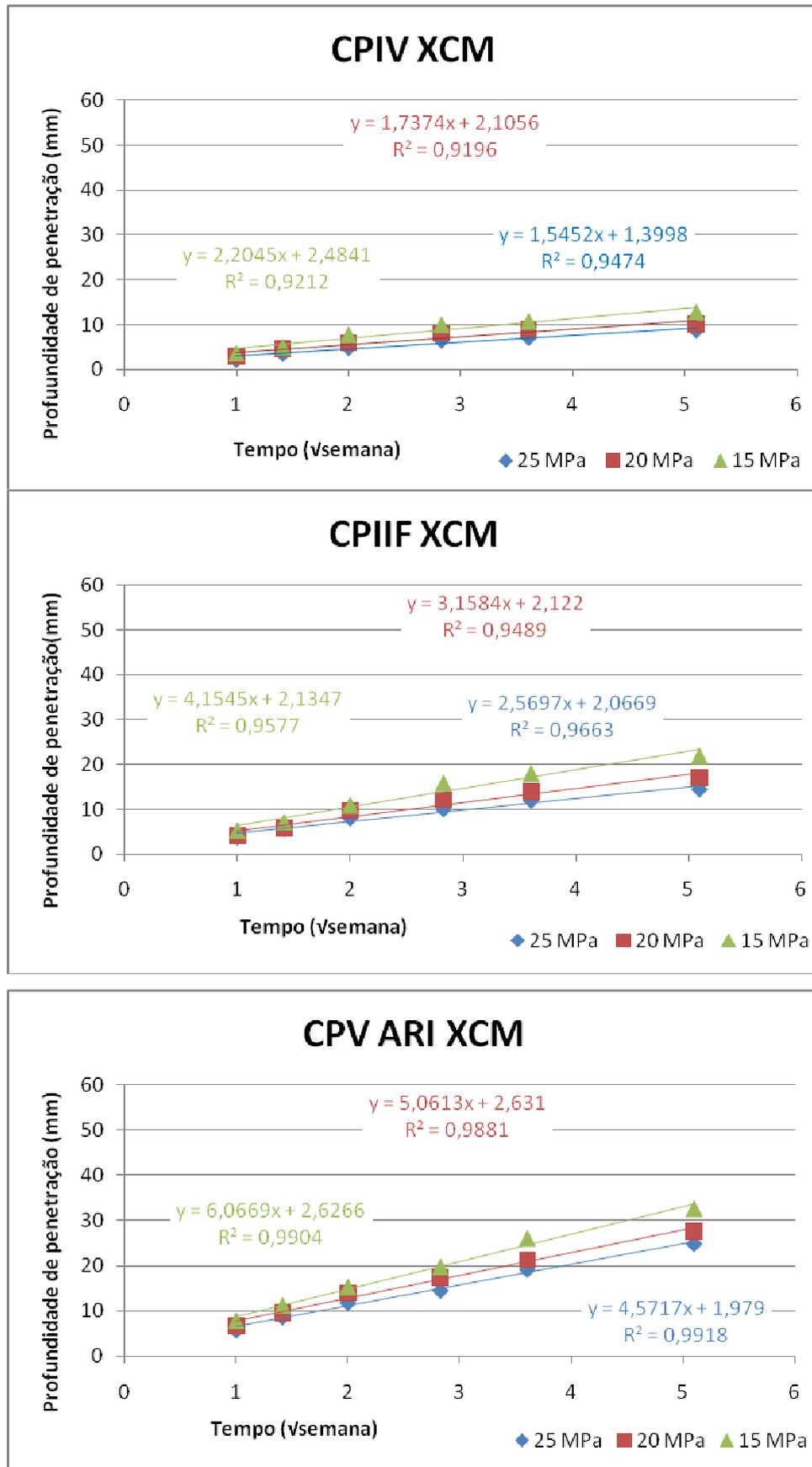


Figura 5.23 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com tratamento obturador dos poros em dupla camada - XCM

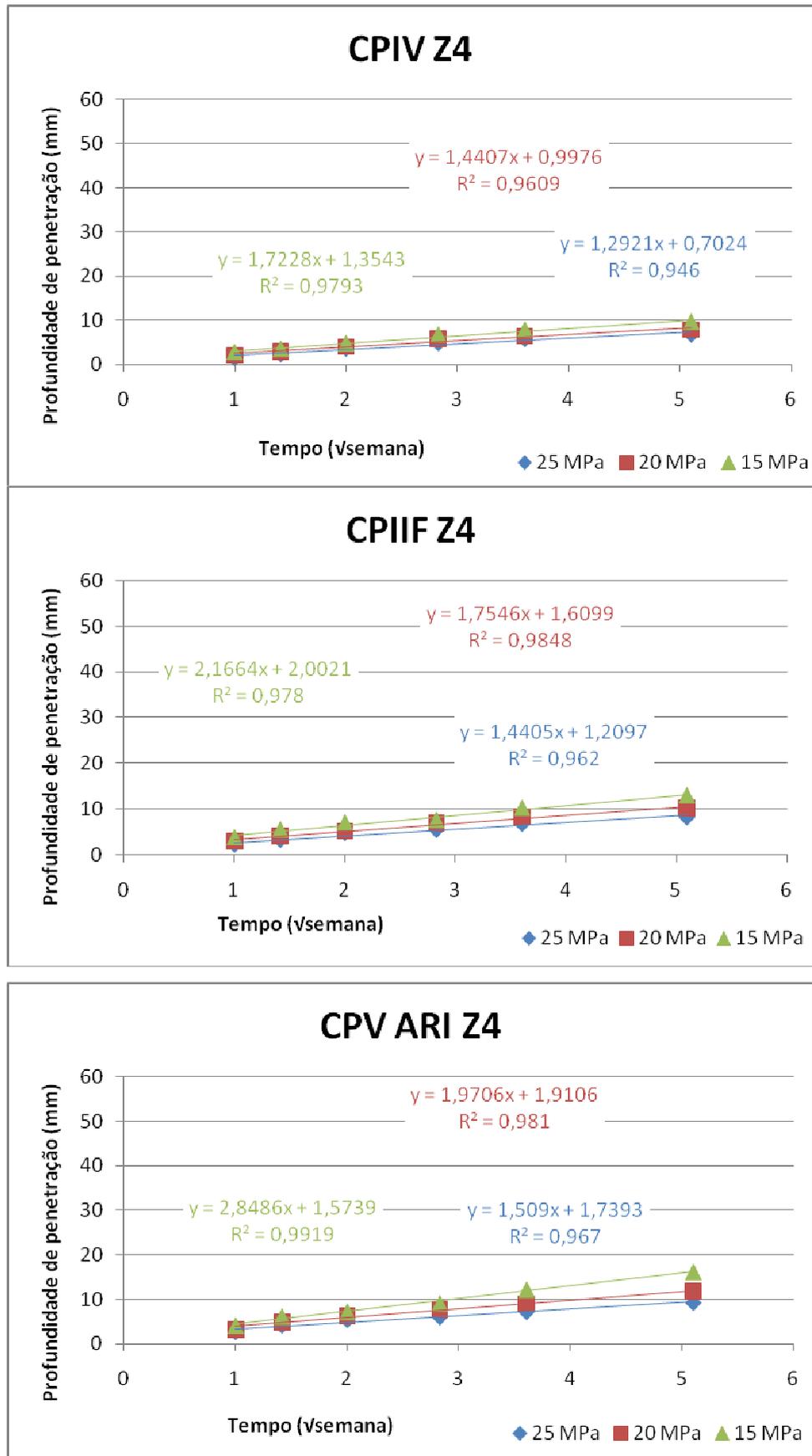


Figura 5.24 – Gráficos para obtenção do coeficiente k, concretos com tratamento com argamassa polimérica - Z4

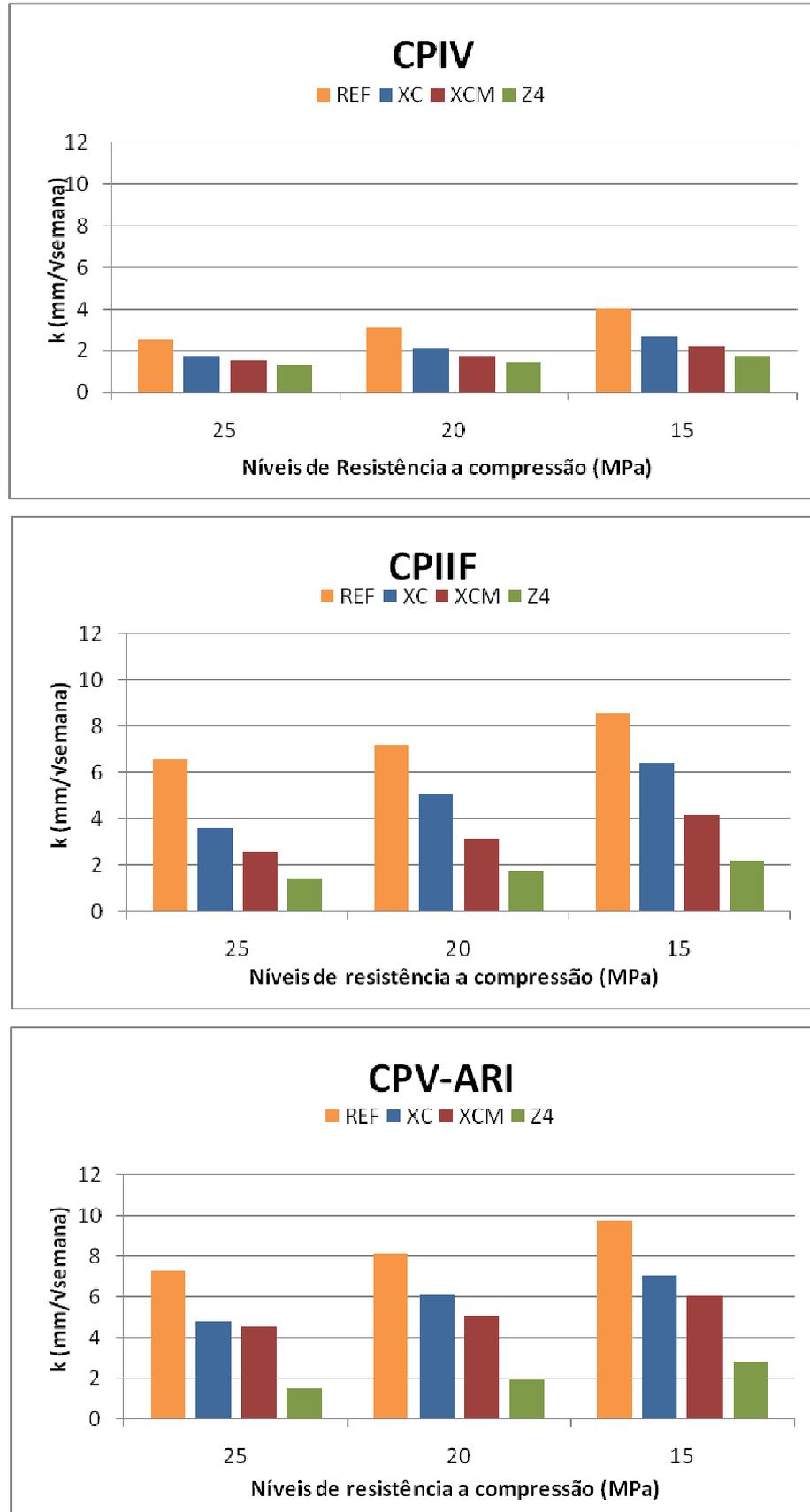


Figura 5.25 – Coeficientes k em função dos tratamentos superficiais e níveis de resistência para cada um dos tipos de cimento

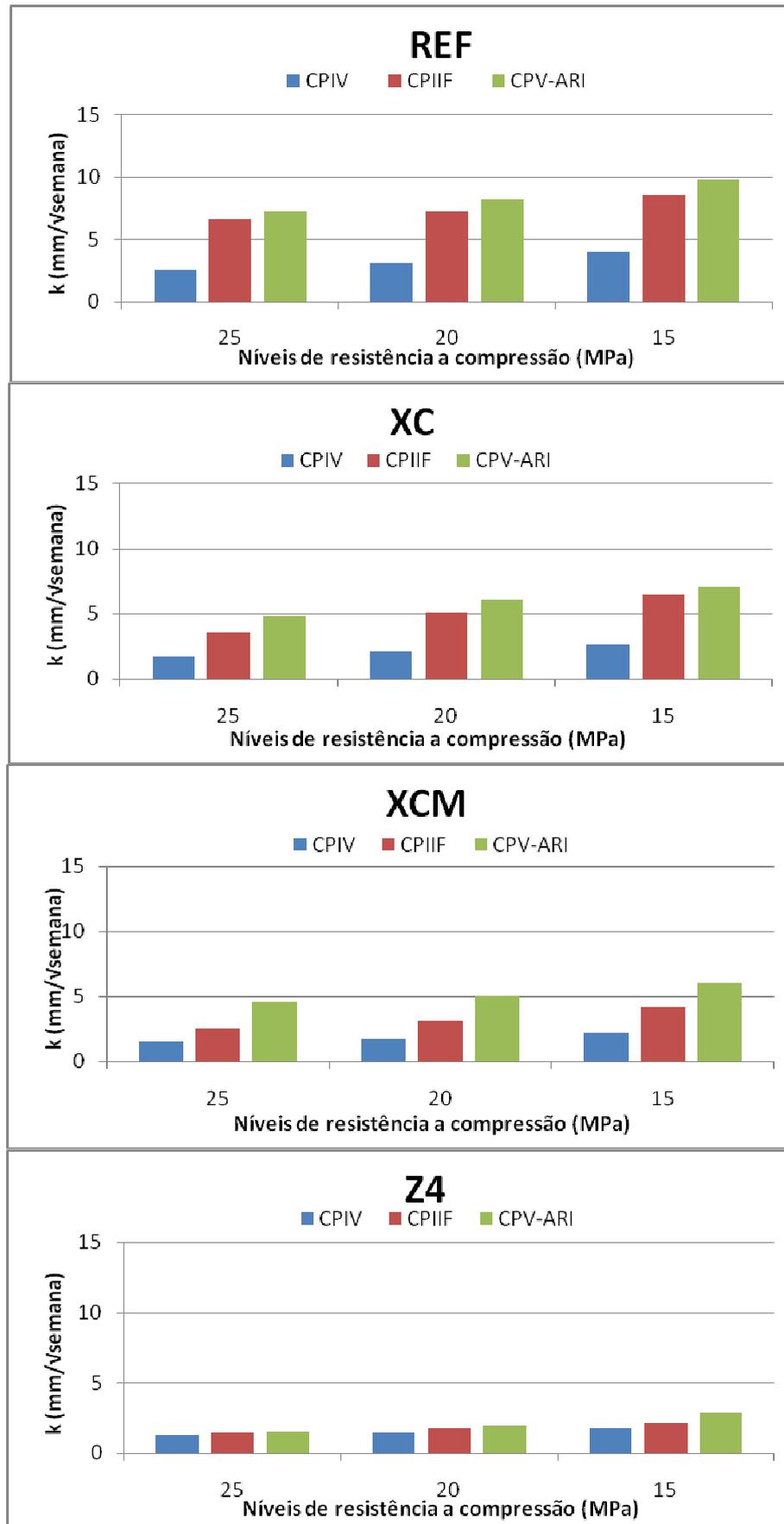


Figura 5.26 – Variação do coeficiente k em função do tipo de cimento e tratamento superficial

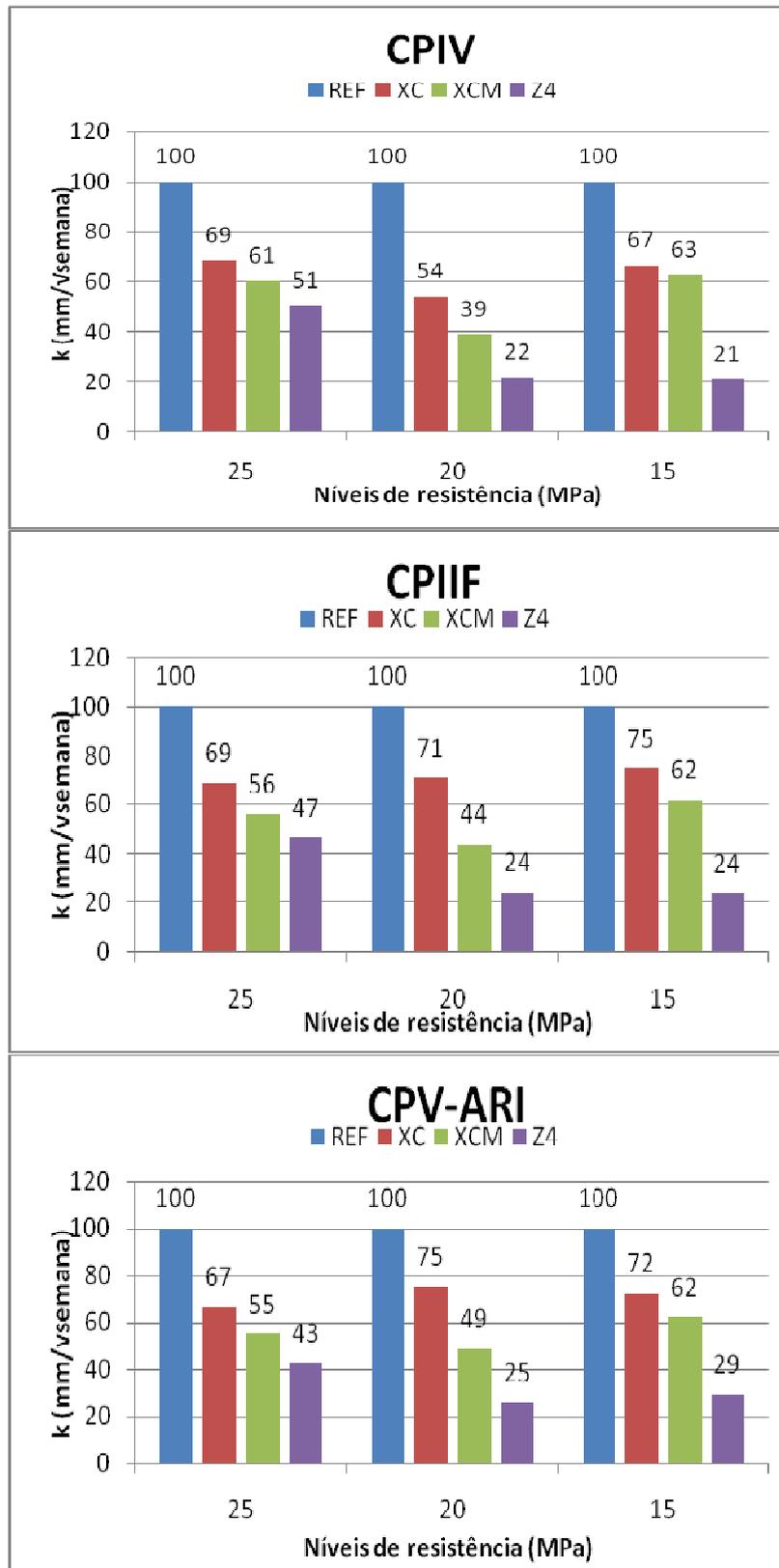


Figura 5.27 – Variação percentual do coeficiente k de cada tratamento em relação ao concreto de referência

5.3 Integração dos resultados dos dois métodos

O ensaio descrito pela ASTM C1202 resulta em uma análise qualitativa do concreto estudado. Os valores de carga passante obtidos podem ser interpretados como a capacidade de condutividade global do concreto, muito mais do que como uma medida de resistência à penetração de cloretos (ANDRADE, 1993; WEE et al., 2000; ISAIA, 1996). Tanto que a difusão dos íons cloreto depende da restrição da mobilidade destes íons, como a capacidade de fixação do concreto, enquanto que a carga total passante depende da condutividade da solução dos poros e da microestrutura do concreto. Segundo Wee et al. (2000), o coeficiente de difusão e a carga total passante são regidos por diferentes fatores e por isso não é possível fazer uma correlação entre esses dois parâmetros. Tal afirmação é confirmada quando são confrontados os valores de carga passante resultados do ensaio ASTM C1202 e os de coeficiente de penetração k provenientes do ensaio de imersão. Os pontos que geram o gráfico da Figura 5.28 mostram-se dispersos e com baixo coeficiente de determinação. Este gráfico foi gerado com os valores de carga passante para a idade de 91 dias e, da mesma forma, o coeficiente k do ensaio de imersão correspondente usado foi o obtido com os valores de profundidade de penetração até os 91 dias, de maneira a analisar os dois tipos de ensaios dentro de uma mesma idade. A Figura 5.29 traz um gráfico semelhante, porém com os valores referentes aos ensaios de 182 dias. As linhas apresentadas nos gráficos representam o limite inferior da classificação quanto à possibilidade de penetração de cloretos de acordo com a carga passante do ensaio acelerado.

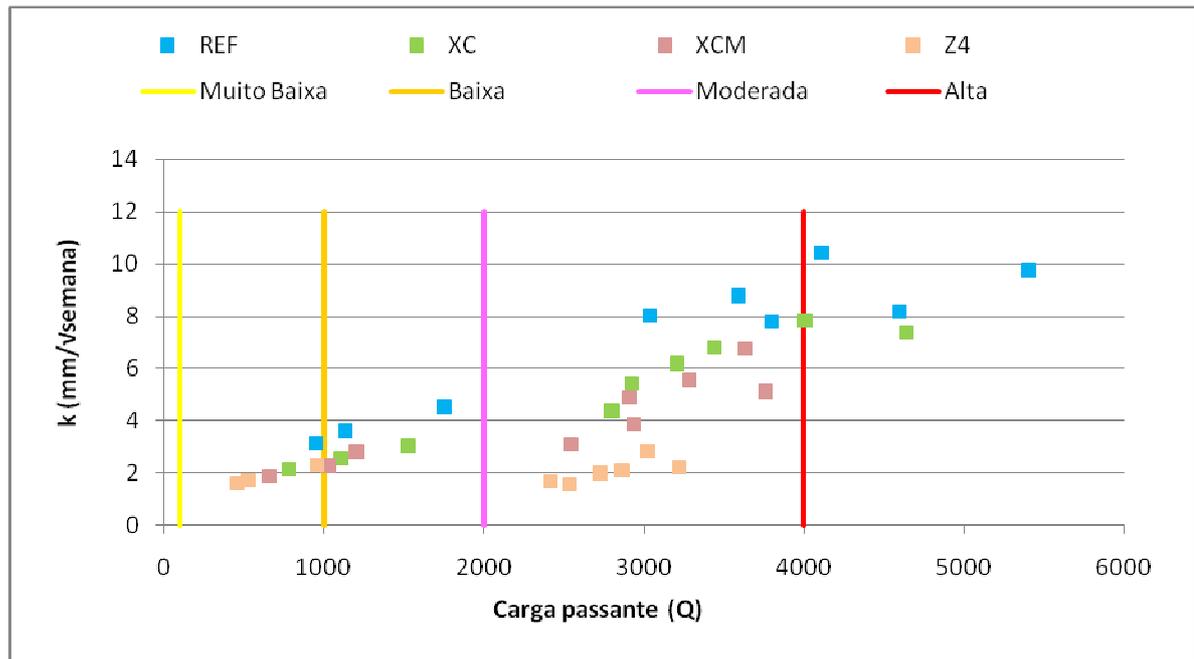


Figura 5.28 – Confronto entre os resultados de coeficiente de penetração k e carga passante Q , de todas as misturas com os resultados de 91 dias

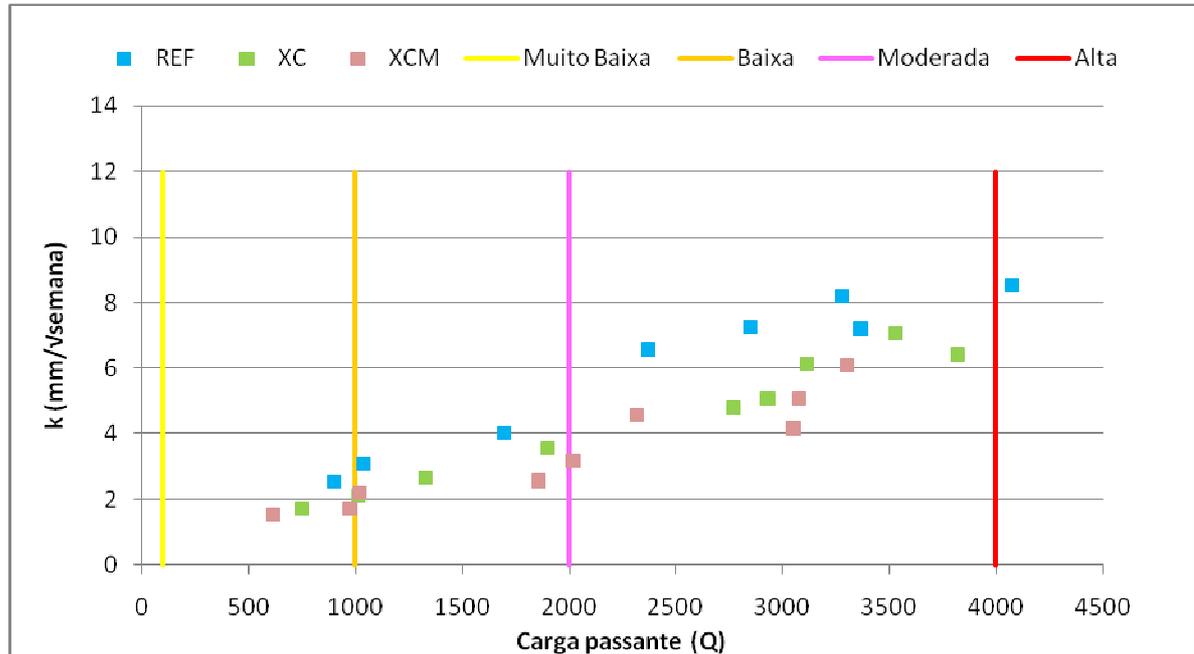


Figura 5.29 – Confronto entre os resultados de coeficiente de penetração k e carga passante Q , de todas as misturas com os resultados de 182 dias

Nota-se das figuras acima, principalmente no trecho referente à classificação Moderada de possibilidade de penetração, que misturas com valores de carga passante semelhantes possuem resultados de coeficiente de penetração bastante diversos. Apenas como informação, a maior variação de resultados mostra que para duas misturas com carga passante próxima a diferença entre seus coeficientes chega a 280%.

É possível ver, no mesmo gráfico, que, se as misturas forem agrupadas de forma que o confronto dos dados seja feito para cada tipo de tratamento separadamente, existe uma coerência maior entre os resultados, fornecendo, na análise da dispersão dos valores, coeficientes de determinação maiores que os encontrados na plotagem conjunta dos dados.

Desta forma, o ensaio da ASTM C1202 resulta em um bom indicativo qualitativo de cada tratamento superficial, sendo de fácil e rápida execução e obtenção de resultados.

5.4 Viabilidade da produção das misturas estudadas e da aplicação dos produtos de proteção

5.4.1 Viabilidade econômica

Com o objetivo de demonstrar uma análise econômica, este item apresenta um comparativo entre as misturas estudadas, utilizando cada tipo de cimento e os tratamentos comerciais com a eficiência que cada mistura apresentou. Isso traz para a realidade da construção civil a relação custo/benefício da presente pesquisa.

Primeiramente é feita a análise do consumo de materiais, e respectivos preços, por metro cúbico de produção das três misturas de referência para cada tipo de cimento empregado, como mostrado na Tabela 5.5.

Os preços utilizados nesta análise foram os oferecidos pelos distribuidores locais e aqui não estão incluídos os preços de deslocamento dos materiais.

Tabela 5.5 – Consumo de materiais e preços por m³ das três misturas de referência

| Cimento | f_{ck} (MPa) | Consumo de materiais (Kg/m ³) | | | Preços m ³ (R\$) | | | |
|----------------|-------------------|--|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|
| | | <i>Cimento</i> | <i>Areia</i> | <i>Brita</i> | <i>Cimento</i> | <i>Areia</i> | <i>Brita</i> | <i>TOTAL</i> |
| CPIV | 25 | 417,41 | 615,68 | 1033,08 | 150,27 | 13,25 | 27,35 | 190,86 |
| | 20 | 362,44 | 679,58 | 1042,02 | 130,48 | 14,62 | 27,58 | 172,69 |
| | 15 | 320,23 | 720,51 | 1040,74 | 115,28 | 15,50 | 27,55 | 158,34 |
| CPII-F | 25 | 379,86 | 720,97 | 1039,67 | 189,93 | 15,51 | 27,52 | 232,96 |
| | 20 | 339,40 | 753,81 | 1039,24 | 169,70 | 16,22 | 27,51 | 213,43 |
| | 15 | 302,54 | 784,18 | 1037,40 | 151,27 | 16,87 | 27,46 | 195,60 |
| CPV ARI | 25 | 293,60 | 763,36 | 1056,96 | 146,80 | 16,43 | 27,98 | 191,21 |
| | 20 | 270,20 | 783,58 | 1053,78 | 135,10 | 16,86 | 27,89 | 179,86 |
| | 15 | 253,54 | 791,31 | 1044,86 | 126,77 | 17,03 | 27,66 | 171,46 |

Os valores referentes às misturas com os cimentos CPIV e CPV-ARI mostraram bastante semelhança, pois mesmo que o preço do CPV seja maior que o do CPIV o consumo necessário para o alcance das resistências propostas é consideravelmente menor. O cimento pozolânico é o mais utilizado na região de Santa Maria e também o que apresenta o menor custo. Já o preço do CPIIF é praticamente o mesmo do CPV, porém, como o consumo é maior, este se apresenta como a mais cara dentre as misturas estudadas. Nos três níveis de resistência o preço do concreto de CPIIF é entre 19% e 22% maior que as misturas com os outros dois tipos de cimento.

A seguir são mostrados, na Tabela 5.6, os consumos e preços dos produtos de proteção estudados. Da análise dos valores por m² dos produtos, nota-se a semelhança entre a argamassa polimérica e o obturador de poros aplicado em duas camadas, considerando um mesmo tipo de estrutura, ou seja, mesma relação área/volume. Já o obturador aplicado em camada única apresenta um preço cerca de 40% menor.

Tabela 5.6 – Consumos e preços dos tratamentos utilizados

| | <i>XC</i> | <i>XCM</i> | <i>Z4</i> |
|---|------------------|-------------------|------------------|
| <i>Consumo (kg/m²)</i> | 1,00 | 1,8 | 6,08 |
| <i>Preço por m² (R\$)</i> | 13,65 | 22,89 | 21,71 |

5.4.2 Viabilidade técnica

Com o intuito de avaliar os resultados obtidos para o coeficiente de difusão, foram calculados, a partir da equação de Bakker, os tempos necessários para que os íons cloreto penetrem através da camada de cobrimento até a superfície do aço.

É importante ressaltar que, transcorrido o tempo de penetração (tp), calculado através da equação de Bakker, a concentração de cloretos livres na profundidade considerada será maior que 0,15%, sobre a massa de cimento, pois é a concentração mínima que permite a visualização da profundidade de penetração de cloretos através da aspersão de nitrato de prata. Assim, não se pode adotar o tempo de penetração (tp) como sendo aquele a partir do qual o processo de despassivação da armadura tem início (período de indução).

A Tabela 5.7 tem por objetivo dar uma idéia da dinâmica do fenômeno de difusão através dos concretos investigados, com e sem tratamento superficial, nos três níveis de resistência, 15 MPa, 20MPa e 25 MPa. A estimativa do tempo de penetração dos cloretos da superfície do concreto até a armadura serve, então, como termo de comparação entre os diferentes tratamentos e tipo de cimento empregados.

Foi considerada uma espessura de cobrimento de 25 mm por ser esse o valor especificado na tabela 7.2 da NBR 6118/2007 para laje de concreto exposta a um ambiente classificado como de grau de agressividade moderado (nível II). Para esta classe de agressividade, a Tabela 7.1 da referida norma recomenda relação $a/c \leq 0,60$ e nível de resistência ≥ 25 MPa..

Da análise da Tabela 5.7, constata-se que a elevação do nível de resistência dos concretos, de 15 MPa para 25 MPa, resultou, como esperado, no aumento do tempo necessário para que os íons cloretos atinjam a profundidade especificada. O

tratamento com argamassa polimérica resultou, para todos os cimentos e níveis de resistência investigados, maior valor do tempo de penetração.

Para os três tipos de cimento utilizados houve um aumento no tempo de penetração com a aplicação dos tratamentos superficiais na seguinte ordem: Z4>XCM>XC>REF. Há um aumento no tempo de penetração e diminuição no valor de carga passante. Contudo, verifica-se que a classificação proposta pela ASTM C 1202 deve ser encarada de forma qualitativa e é válida para um mesmo tipo de cimento. Assim, confrontando-se a Tabela 5.7 e a Tabela 5.3 verifica-se tempos de penetração bastante distintos para misturas pertencentes a uma mesma classificação segundo a ASTM C 1202. As misturas executadas com CP V, para o nível de resistência de 25 MPa, submetidas a tratamento superficial com argamassa polimérica, apresentaram carga passante de 2537C aos 91 dias e tempo de penetração de cloretos de 7,2 anos. Para esse mesmo nível de resistência, a mistura CP II F submetida a tratamento superficial com produto obturador de poros em duas camadas apresentou carga total passante de 2545 C aos 91 dias, semelhante a anterior, e tempo de penetração de cloretos de 1,8 anos.

Da mesma forma, observam-se tempos de penetração bastante semelhantes para misturas pertencentes a diferentes níveis de resistência à penetração de cloretos segundo a ASTM C 1202. A mistura composta com CP II F, para o nível de resistência de 15 MPa, submetida a tratamento superficial com argamassa polimérica, apresentou tempo de penetração de cloretos de 2,6 anos e carga total passante de 3219 C aos 91 dias. Para esse mesmo nível de resistência e tratamento superficial obturador de poros em duas camadas, o concreto executado com cimento CP IV apresentou semelhante tempo de penetração de cloreto, 2,5 anos, porém carga total passante de 1203C aos 91 dias.

A mistura executada com CP IV, para o nível de resistência de 25 MPa, tratada superficialmente com produto obturador de poros em uma demão, apresentou tempo de penetração de cloretos de 3,9 anos e carga total passante de 783C, sendo classificada como pertencente à classe muito baixa de risco de penetração, segundo a ASTM C1202. Para o nível de resistência mecânica de 20 MPa, o concreto executado com CP IIF, tratado superficialmente com argamassa polimérica, apresentou igual tempo de penetração de cloretos, porém com carga total passante de 2727C, enquadrando a mistura na classe de risco de penetração moderada.

Tabela 5.7 – Tempo necessário para os que os íons cloreto penetrem através do cobrimento até atingirem a camada de passivação do aço (t_p em anos), calculados a partir dos coeficientes de difusão obtidos no ensaio de penetração de cloretos por aspersão de AgNO_3 para os diferentes níveis de resistência investigados

| Mistura | Cimento | Espessura de cobrimento 25 mm | | |
|----------|---------|-----------------------------------|-------|-----------------------|
| | | Nível de resistência (f_{ck}) | | |
| | | 25MPa | 20MPa | 15MPa |
| | | Tempo de penetração em anos | | |
| CPIV | REF | 1,8 | 1,3 | 0,7 |
| | XC | 3,9 | 2,6 | 1,7 |
| | XCM | 5,0 | 4,0 | 2,5 (1203 C) |
| | Z4 | 7,2 | 5,8 | 4,0 |
| CP II F | REF | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| | XC | 0,9 | 0,5 | 0,3 |
| | XCM | 1,8 (2545 C) | 1,2 | 0,7 |
| | Z4 | 5,8 | 3,9 | 2,6 (3219 C) |
| CP V ARI | REF | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| | XC | 0,5 | 0,3 | 0,2 |
| | XCM | 0,6 | 0,5 | 0,3 |
| | Z4 | 5,3 (2537 C) | 3,1 | 1,5 |

CONCLUSÃO

A presente dissertação teve por objetivo avaliar a eficiência de dois diferentes sistemas de proteção frente à ação de íons cloreto. As misturas dos concretos de substrato foram feitas com três tipos de cimento: CP IV, CII-F e CP V-ARI ; para três níveis de resistência característica a compressão (f_{ck}) 15,0 MPa; 20,0 MPa e 25,0 MPa, correspondendo a uma resistência de dosagem aos 28 dias de 21,6 MPa, 26,6 MPa e 31,6 MPa. Os sistemas de proteção consistem em um obturador de poros, aplicado em uma e duas camadas, resultando em dois dos tratamentos estudados; e uma argamassa polimérica, aplicada com espessura de aproximadamente 4 mm. Para tanto foram realizados o ensaio acelerado de penetração de cloretos normalizado pela ASTM C1202 e o ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI).

A análise dos resultados de tais ensaios permitiu um melhor conhecimento do efeito da aplicação de produtos de reparo frente à ação dos cloretos.

Pode-se concluir, através do presente estudo, quanto ao ensaio de penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202 que:

- O melhor desempenho foi alcançado pelos concretos executados com cimento Portland pozolânico, devido às menores relações a/c adotadas para obtenção dos níveis de resistência especificados e, principalmente, devido ao refinamento dos poros promovido pela cinza volante de sua composição;
- Os valores de carga total passante diminuem com a aplicação dos produtos de proteção na seguinte sequência: REF>XC>XCM>Z4;
- O tratamento duplo com o bloqueador de poros (XCM) mostrou-se mais efetivo em relação ao tratamento simples com uma camada, promovendo uma maior redução na carga total passante. Essa redução foi maior para os cimentos pozolânicos e no menor nível de resistência investigada, $f_{ck} = 15$ MPa;

- Apesar da diminuição da carga, em alguns casos, como CPIIF e CPV aos 91 dias, o uso dos produtos não promovem alteração de classe de risco de penetração proposta pela ASTM C1202;
- A utilização da argamassa polimérica (Z4) com espessura de 4mm foi a melhor alternativa dentre as investigadas, promovendo uma maior redução da carga total passante, apresentando boa aderência com o concreto de substrato e compacidade;
- Os tratamentos superficiais do tipo bloqueadores de poros mostraram certa capacidade de diminuir o fluxo de entrada de cloretos, o que indica que realmente este produto tampona os poros da camada superficial do concreto, através das reações com os produtos de hidratação do cimento;
- A análise pelo método colorimétrico apresenta resultados compatíveis com os resultados de carga passante e pelo alto valor do coeficiente de correlações(R^2) entre carga passante e profundidade de penetração. Para cada um dos cimentos vê-se a forte dependência mútua entre estas duas grandezas;
- Os resultados do ensaio aos 182 dias resultou em cargas passantes mais baixas, mantendo um comportamento semelhante quando comparado ao ensaio aos 91 dias;
- A cura mais prolongada de 182 dias dos concretos de substrato e dos produtos de proteção promoveu diminuição da carga passante e das profundidades de penetração pelo método ASTM C1202, quando comparados aos valores com cura de 91 dias.

Pode-se concluir, através do presente estudo, quanto ao ensaio de penetração de cloretos por imersão que:

- O tratamento obturador de poros, quando aplicado em uma única camada, tem menor capacidade de barrar a entrada de cloretos do que quando aplicado em duas camadas. Porém, a magnitude da diferença entre os dois tratamentos é menor que a observada no ensaio da ASTM C 1202/05;
- Os concretos compostos com cimento CPIV, com ou sem aplicação de tratamento superficial, apresentaram os menores valores de coeficiente de penetração de cloretos, assim como no ensaio ASTM C1202;

- O tratamento que apresentou melhor eficiência na diminuição da penetração de cloretos avaliados pelo ensaio de imersão foi a argamassa polimérica;
- A redução dos valores de coeficiente de penetração se mostrou mais pronunciada nos concretos feitos com cimento CPIIF.

Da comparação entre os tipos de cimento utilizados é possível concluir que para os dois tipos de ensaios o cimento que apresentou melhor comportamento quanto a penetração de cloretos foi o CPIV. Isto é devido às menores relações a/c usadas para alcançar as resistências estipuladas. Porém, visto que as relações a/c do cimento CPIV são próximas as do cimento CPIIF, e que o comportamento quanto aos resultados dos ensaios entre estes dois tipos de cimento são bastante diferentes, conclui-se que as características intrínsecas promovidas pela presença de cinza volante no cimento CPIV tem maior influência nos resultados, promovendo o refinamento da rede de poros, e diminuindo assim a penetração de cloretos. Os resultados dos ensaios para os cimentos CPIIF e CPV-ARI mostraram valores significativamente maiores tanto de carga passante quanto de coeficiente de difusão.

Entre os três níveis de resistência concluiu-se, como esperado, que quanto maior a resistência a compressão maior será a dificuldade de penetração dos íons cloreto. Os resultados apresentam valores de carga passante e coeficiente de difusão maiores para a menor resistência de 15MPa. Se deve ao fato de que resistências maiores requerem uma menor relação a/c, e desta forma apresentam uma estrutura de poros menos vulnerável a penetração destes íons.

Integrando os resultados dos dois testes de penetração de cloretos através do confronto entre os valores de carga passante, resultados do ensaio ASTM C1202 e os de coeficiente de penetração k, provenientes do ensaio de imersão, os pontos gerados se mostram dispersos e com baixo coeficiente de determinação. Porém se as misturas forem agrupadas de forma que o confronto dos dados sejam feitos para cada tipo de tratamento separadamente, existe uma coerência maior entre os resultados, fornecendo coeficientes de determinação maiores.

O aumento no nível de resistência mecânica aumenta o tempo necessário para que os íons cloretos atinjam a profundidade especificada. O tratamento com argamassa polimérica resultou, para todos os cimentos e níveis de resistência investigados, maior valor do tempo de penetração. Para qualquer dos tipos de

cimento utilizados houve um aumento no tempo de penetração com a aplicação dos tratamentos superficiais na seguinte ordem: Z4>XCM>XC>REF.

A classificação proposta pela ASTM C 1202 deve ser encarada de forma qualitativa e é válida para um mesmo tipo de cimento. Assim, confrontando-se os tempos estimados de penetração e a classificação quanto ao risco de penetração, verificam-se tempos de penetração bastante distintos para misturas pertencentes a uma mesma classificação segundo a ASTM C 1202.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro desta mesma linha de pesquisa esta sendo realizado um estudo, com as mesmas misturas, pelo GEPECON da UFSM quanto à resistividade elétrica e absorção capilar. Os ensaios de resistividade elétrica ainda serão feitos para idades mais avançadas, de no mínimo um ano da data da moldagem. Este tempo maior de cura, tanto do substrato quanto dos tratamentos superficiais, permitirão uma melhor compreensão da eficiência dos produtos estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 23, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, P.M. Del C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ARYA, C., XU, Y. Effect of type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 4, p. 893-902. 1995

AİTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.

_____. The durability characteristics of High-Performance Concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, Elsevier Science, v.25, p.409-420, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 10**. Cimento Portland – Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 11-1**. Cimento Portland – Análise química – Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria – Parte 1: Método ISO. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 11-2**. Cimento Portland – Análise química – Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria – Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 12**. Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 13.** Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 14.** Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 15.** Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduos insolúveis. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 16.** Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 17.** Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 18.** Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 19.** Cimento Portland – Análise química – Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 21.** Cimento Portland – Análise química – Método optativo para determinação de dióxidos de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 23.** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 52.** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 53.** Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 65.** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 67.** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

____. **NBR NM 76.** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

____. **NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, R.J.F. *et al.* Estudo da característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41., 1999. Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

BAKKER, R.F. Initiation period. In: SHIELS, P. (ed.) **Corrosion so steel in concrete**. London: Chapman and Hall, 1988, p.22-25. (RILEM Report TC 60-CSC). Bryant Jr., J. W., Meyers, R. E., Garza, J. M. In-Place Resistivity of Bridge Deck Concrete Mixtures **ACI Materials Journal**, v.106, n.2, March-April 2009.

CALÇADA, L.M.L.; *et al.* Evaluation of the effectiveness of ASTM C1202 in measuring the concrete's ability to resist chloride ion penetration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 3., 2002. Recife-PE. **Proceedings...** Recife: UPE, 2002. 1 CD-ROM.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997, 237p.

COSTA, P.E.F. **Influência da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto**. 2001. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CUNHA DA, A.C.Q., HELENE, P.R.L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 13p. +anexos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DHIR, R.K., EL-MOHR, M.A.K., DYER, T.D. Developing chloride resistivity concrete using PFA. **Cement Concrete Research**, vol.27, N.11,p.1663-1639,1997.

GOMES, P.C.C *et al.* Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON,45.; 2003. Vitória-ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993.

_____. **Corrosão em armaduras para concreto armado**, São Paulo: Pini, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

_____. Durabilidade das estruturas de concreto armado. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 3., 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1993. P.37-48.

_____. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo: ANTAC, v.1,n.2, p.45-57, jul/dez. 1997

HELENE, P. Protección y Mantenimiento de las Superfícies de Hormigón. In: CASANOVAS, X. **Manual de Diagnósis e Intervención em Estruturas de Hormigón Armado**. Espanha: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 2000. Capítulo 12, p.115-126.

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation os mineral admixture on the viewpoint of chloride íon migration through mortar. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v.21, p. 443-448, 1999.

ISAIA, G.C. **Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: um estudo de Surabilidade com Vista à Corrosão da Armadura**. 1995. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1995.

_____. Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996. Florianópolis-RS. **Proceedings...** Florianópolis, 1996, p. 554-565.

LIMA, E. Tratamento de estruturas em concreto aparente. **Revista Tèchne**, n.11, jul/ago, p. 22-24, 1994.

MEDEIROS, M.H.F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

MEHTA, P.K. Role of pozzolanic and cementicius material is sustainable development os concrete industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND ATURAL POZZOLANS, 6., 1998. Farmington Hills. **Proceedings...** Farmington Hills:Amrican Concrete Institute, p.1-20, 1998.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NGALA, V.T. *et. al.* Diffusion in cementitious materials: II. Further investigations os chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v.25, p.819-826, 1995.

PEDROSO, E.C. **Estudo da cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

Revista Técnica, edição n. 152 novembro de 2009.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SINDUSCON – SP, Endereço eletrônico, <http://www.sindusconsp.com.br/> acesso em 25/07/10.

SIQUEIRA, H.C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. 2008. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SPERB, J.E.K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

TANG, L. Concentration dependence of diffusion and migration os chloride íons. Part 2. Experimental evaluation. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v.29, p. 1469-1474, 1999.

THOMPSON, J.L.; SILSBEE, M.R.; GILL, P.M.; SCHEETZ, B.E. Characterization of silicate sealers on concrete. **Cement and Concrete Research**, v.27, n. 10 p. 1561-1567, 1997.

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

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, A.K.; TIN, S.S. Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) results for concrete containing Mineral Admixtures. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 97, p. 221-232, 2000.

ZHANG, T.; GJÖRV, O.E. Diffusion behavior os chloride íons in concrete. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v.26, p. 907-977, 1996.

ANEXOS

ANEXO 1 – Resistências à compressão e coeficientes de Abrams dos concretos de estudo de dosagem; e relações a/c para os níveis de resistência estipulados para a a moldagem da pesquisa.

| | | Coefficientes | | | |
|-------------------|------|-----------------------|-----------|----------|----------------------|
| | | f_{ci} | A | B | R² |
| CP IV | 0,45 | 32,21 | 135,0653 | 23,9915 | 0,997416 |
| | 0,55 | 23,68 | | | |
| | 0,65 | 17,06 | | | |
| CP II - F | 0,45 | 34,57 | 120,4806 | 16,7252 | 0,981792 |
| | 0,55 | 24,63 | | | |
| | 0,65 | 19,68 | | | |
| CP V - ARI | 0,45 | 50,85 | 189,06741 | 17,44271 | 0,9934 |
| | 0,55 | 41,39 | | | |
| | 0,65 | 28,71 | | | |
| | 0,75 | 22,15 | | | |

| | F_c | F_{cδ} | a/c |
|-------------------|----------------------|-----------------------|------------|
| CP IV | 15 | 21,6 | 0,58 |
| | 20 | 26,6 | 0,51 |
| | 25 | 31,6 | 0,46 |
| CP II - F | 15 | 21,6 | 0,61 |
| | 20 | 26,6 | 0,54 |
| | 25 | 31,6 | 0,48 |
| CP V - ARI | 15 | 21,6 | 0,76 |
| | 20 | 26,6 | 0,69 |
| | 25 | 31,6 | 0,63 |