



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
-MESTRADO-

INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NO TRANSPORTE DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO INSERIDAS NO MEIO URBANO

por

Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre.



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
-MESTRADO-

INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NO TRANSPORTE DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO INSERIDAS NO MEIO URBANO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre.

Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro

ORIENTADOR: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira

M249i

Malheiro, Raphaelle de Lira Meireles de Castro
Influência do revestimento de argamassa no transporte de
cloreto em estruturas de concreto armado inseridas no meio
urbano. Raphaelle de Lira Meireles de Castro Malheiro. João
Pessoa, 2008.

144 f il.:

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – PPGEU /
Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da
Paraíba - UFPB.

1. Argamassa. 2. Concreto. 3. Efeito resistência.
4. Transporte de cloreto I Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 691.53 (043)

**INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NO TRANSPORTE
DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO
INSERIDAS NO MEIO URBANO**

Por

RAPHAELE DE LIRA MEIRELES DE CASTRO MALHEIRO

**Dissertação aprovada em ____/____/____
Período letivo 2008.1**

**Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa - UFPB
Orientador**

**Prof. Dr. Gibson Rocha Meira - CEFETPB
Co-orientador**

**Prof. Dr. Sandro Marden Torres - UFPB
Examinador interno**

**Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro - UFPE
Examinador externo**

**Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo - UFPB
Examinador externo**

**Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama - UFES
Examinador externo**

João Pessoa - PB, 2008

*A Deus e a minha família, em especial
a minha mãe, Maria Bernadete, e ao
meu esposo, José Miguel, pelo amor a
mim dedicado e demonstrado em sua
forma mais plena.*

AGRADECIMENTOS

A **Deus** pela luz que nunca me deixou faltar e que permitiu que eu concluísse mais esta importante etapa em minha vida.

À toda minha **família** em especial ao meu pai **Osias**, pela compreensão na hora mais difícil, aos meus irmãos **Ygo** e **Ingryd**, por me apoiarem e torcerem pela minha vitória, e a minha tia **Margô**, por estar sempre rezando pela minha saúde e pelo meu sucesso.

Ao professor Dr. **Normando Perazzo** pelo incentivo, confiança, ensinamentos (profissionais e pessoais) e compreensão a mim dedicados desde a graduação em Engenharia Civil até a conclusão desta etapa.

Ao professor Dr. **Gibson Rocha Meira** pelos grandes ensinamentos a mim confiados durante a realização deste trabalho, pela oportunidade de me fazer crescer como profissional e, principalmente, por ter contribuído ativamente com a redação desta dissertação mesmo que a distância ... desafio cumprido.

À **Munique** pela extrema dedicação e competência que gerou uma forte parceria e uma nova amizade durante todos os momentos, técnicos e psicológicos, deste trabalho.

À equipe do **GESMAT (Heliana, Marcos e Rubens)** pelo apoio técnico, parceria e amizade prestados durante o desenvolvimento deste trabalho.

À **Kelly** e ao professor Dr. **Silvio** pelo valioso auxílio nos ensaios realizados nos laboratórios do curso de Engenharia Mecânica.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (**LABEME**) por dar suporte a grande parte do trabalho técnico necessários a realização deste trabalho, nas pessoas de **Delby Fernandes, Cláudio Mathias, Sebastião, Zito, João, Serginho** e em especial a **Ricardo** que esteve presente em grande parte das etapas deste trabalho mesmo que elas tivessem que ser realizadas aos fins de semana.

Ao **CEFET-PB** e em especial ao seu **Laboratório de Recursos Naturais** por permitir a realização das análises químicas em seu recinto e a utilização dos seus equipamentos.

Ao professor Dr. **Arnaldo Carneiro** pela atenção e consultoria prestadas no início deste trabalho.

Aos professores Dr. **Givanildo Azerêdo** e Dr. **Sandro Marden** pela atenção e esclarecimento de todas as dúvidas quando a eles recorri.

Aos **professores e funcionários** do curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana na pessoa do professor Dr. **Celso Augusto**.

As amigas que dividiram comigo não apenas uma sala de estudos, mas também dúvidas, decepções, alegrias e conhecimento, a vocês **Aline, Chris, Marília e Sandra**.

*As amigas de sempre, que se fizeram presente na construção da maioria dos momentos especiais da minha vida, a vocês **Anna Aline, Lila e Siomara**.*

*À **CAPES** pelo apoio financeiro da bolsa de estudos para o desenvolvimento desta pesquisa.*

*À **Polimix** pela concessão do cimento utilizado durante a pesquisa.*

*À **Votorantin** por ceder a argamassa industrializada utilizada na pesquisa.*

RESUMO

De acordo com pesquisa de campo realizada na cidade de João Pessoa - Paraíba - Brasil, grande parte das estruturas de concreto armado inseridas em ambiente urbano e sujeitas a influência marinha possuem revestimento externo, desta forma, optou-se por estudar a relação entre o transporte de cloretos em argamassas de revestimento e a sua influência na proteção da estrutura revestida. Para tanto foram moldados corpos-de-prova (CP) prismáticos em concreto nas dimensões de 8x8x8cm e relação água/cimento 0,55. Nestes CP, aplicou-se uma fina camada de chapisco e, vencido o seu período de cura, revestiu-se com quatro diferentes dosagens de argamassa, sendo que para cada dosagem foram utilizadas duas espessuras de revestimento. Além destes CP, também foram moldados CP de referência, ou seja, só em concreto. Passados 28 dias de cura ao ar em ambiente de laboratório, os CP tiveram cinco de suas seis faces isoladas com resina epóxi para que, quando submetidos aos ensaios acelerados, simulasse um fluxo unidirecional dos cloretos. Em seguida, os CP foram submetidos aos ensaios acelerados de difusão natural e ciclos semanais de imersão/secagem, ambos em solução de cloreto de sódio 1,0M e durante um período de 49 dias. Ao final dos ensaios, foram obtidos perfis de cloretos, com amostras extraídas a cada cinco milímetros, na direção superfície-interior. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que existe um acúmulo de cloretos na interface argamassa-concreto seguida de uma redução no teor de cloretos no concreto, o chamado efeito resistência. Além disso, a dosagem e a espessura utilizadas nestas argamassas influenciam de forma significativa o transporte de Cl^- no concreto. De uma maneira geral, os resultados indicam que a argamassa de revestimento externo pode exercer um papel de proteção complementar sobre as estruturas de concreto. Contudo, estes resultados devem ser tomados com cautela uma vez que estão relacionados a um ambiente particular promovido pelos ensaios acelerados.

Palavras-Chave: Argamassa, concreto, efeito resistência, transporte de cloretos.

ABSTRACT

Taking into account the research carried out in João Pessoa City, Paraíba State, Brazil, a significant number of concrete structures in urban environments and subjected to marine influence are covered by mortar. This way, it was studied the relationship between chloride transport in mortar covering and its influence on protection of covered structures. Prismatic concrete specimens were cast with 8x8x8cm and water to cement ratio of 0,55. A thin spatterdash layer was applied in these specimens and, after the curing period, a mortar covering layer done using four different mixtures and two thicknesses. Reference concrete specimens were also cast. After 28 days of curing in laboratory environment, the specimens were painted with epoxy resin in five of their six faces, with the purpose to simulate unidirectional chloride flux. Afterwards, the specimens were put under natural diffusion and wetting and drying cycles in sodium chloride solutions (1M) for 49 days. At the end of this period, chloride profiles were obtained with powdered samples extracted each five millimetres from surface to bulk specimen. Results show that there is a chloride accumulation in the interface between mortar and concrete, followed by a chloride content decrease in concrete. This effect is called “resistance effect”. The mixture and the thickness of covering mortars significantly influence chloride transport in concrete. In a general way, covering mortars can play a complementary protection role in concrete structures. However, as these results were taken under accelerated conditions, they may be taken with caution.

Keywords: Mortar, concrete, resistance effect, chloride transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982).....	25
Figura 2.2 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico (Fe – H ₂ O; 25°C).	27
Figura 2.3 - Representação esquemática do processo de carbonatação.....	28
Figura 2.4 - Representação esquemática da difusão do CO ₂ com poro seco (A), saturado (B) e parcialmente preenchido por água (C).....	29
Figura 2.5 - Possíveis formas de ocorrência de íons cloreto nas estruturas de concreto	30
Figura 2.6 - Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos.....	30
Figura 2.7 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico para o sistema Fe – H ₂ O, 25°C, na presença de íons cloreto	32
Figura 2.8 - Arranjo experimental utilizado no ensaio de migração por Castellote <i>et al.</i> (2001)	36
Figura 2.9 - Diferentes propriedades para as diferentes camadas segundo Andrade <i>et al.</i> (1997).....	44
Figura 2.10 - Penetração de cloretos através do mecanismo de molhagem (esquerda) e secagem (direita).....	46
Figura 2.11 - Simulação da penetração de cloretos em ambiente com UR constante e ambiente sujeito a molhagem e secagem	47
Figura 2.12 - Artefato utilizado em princípio experimental baseado na migração de íons utilizado por Negue <i>et al.</i> (2003).....	49
Figura 3.1 - Localização dos bairros em estudo dentro da faixa litorânea da cidade de João Pessoa.....	53
Figura 3.2 - Processo de preparação do substrato: (A) Retirada das arestas (B) Corpo-de-prova sem aresta (C) Escovação manual (D) corpos-de-prova preparados	61
Figura 3.3 - Preparação da argamassa para chapisco.....	62
Figura 3.4 - Chapisco rolado (esquerda) e chapisco aplicado com colher de pedreiro (direita)	62
Figura 3.5 - Aspecto uniforme do chapisco aplicado manualmente com o auxílio da colher de pedreiro e da peneira de malha fina	63
Figura 3.6 - Variáveis e combinações adotadas para o revestimento dos corpos-de-prova em estudo	64

Figura 3.7 - Corpos-de-prova revestidos em argamassa na dosagem 1:3 (direita) e 1:2:9 (esquerda) para verificação da existência de fissuras visíveis a olho nú durante o período de cura.....	64
Figura 3.8 - Resumo do processo de preparação e aplicação do revestimento de argamassa: (A) Argamassadeira utilizada na preparação da argamassa (B) Fôrmas utilizadas para aplicação da argamassa (C) Corpos-de-prova enfileirados para corte (D) Corpo-de-prova com argamassa	65
Figura 3.9 - Pintura epóxi aplicada nos corpos-de-prova	66
Figura 3.10 - Etapas e intervalos de tempo envolvidos no processo de preparação dos corpos-de-prova.....	66
Figura 3.11 - Combinações entre as variáveis envolvidas na pesquisa	68
Figura 3.12 - Funcionamento dos ciclos de imersão e secagem.....	69
Figura 3.13 - Acondicionamento dos recipientes destinados à imersão (esquerda) e corpos-de-prova em secagem em ambiente de laboratório (direita)	69
Figura 3.14 - Corpos-de-prova durante o ensaio acelerado de difusão (esquerda) e condições de realização deste ensaio (direita)	70
Figura 3.15 - Esquema da distribuição dos cortes: (A) Sistema duplo com 4,0cm de revestimento (B) Sistema duplo com 2,5cm de revestimento (C) Referência em concreto (D) Referência em argamassa	71
Figura 4.1 - Tipos de argamassa colante utilizadas nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	74
Figura 4.2 - Tratamentos aplicados ao substrato (concreto armado) antes do início do revestimento externo nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	75
Figura 4.3 - Técnicas utilizadas para aplicação do chapisco nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	75
Figura 4.4 - Dosagens utilizadas no chapisco das obras estudadas na cidade de João Pessoa.	76
Figura 4.5 - Preparação das argamassas de emboço nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	77
Figura 4.6 - Espessuras médias utilizadas no emboço dos revestimentos externos nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	78
Figura 4.7 - Períodos de espera entre as etapas do revestimento externo nas obras estudadas na cidade de João Pessoa	78

Figura 4.8 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:3 (volume) e com 2,5cm de espessura	85
Figura 4.9 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:1:6 (volume) e com 2,5cm de espessura.....	86
Figura 4.10 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:2:9 (volume) e com 2,5cm de espessura.....	86
Figura 4.11 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 2,5cm de espessura.....	87
Figura 4.12 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:3 (volume) e com 4,0cm de espessura	88
Figura 4.13 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:1:6 (volume) e com 4,0cm de espessura.....	88
Figura 4.14 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:2:9 (volume) e com 4,0cm de espessura.....	89
Figura 4.15 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 4,0cm de espessura.....	89
Figura 4.16 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:3 (volume) e com 2,5cm de espessura.....	90
Figura 4.17 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:1:6 (volume) e com 2,5cm de espessura.....	91
Figura 4.18 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:2:9 (volume) e com 2,5cm de espessura.....	91
Figura 4.19 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 2,5cm de espessura	92

Figura 4.20 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:3 (volume) e com 4,0cm de espessura.....	93
Figura 4.21 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:1:6 (volume) e com 4,0cm de espessura.....	94
Figura 4.22 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento argamassado na dosagem 1:2:9 (volume) e com 4,0cm de espessura.....	94
Figura 4.23 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados em argamassa industrializada e com 4,0cm de espessura.....	95
Figura 4.24 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova de referência moldados em concreto	96
Figura 4.25 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova de referência moldados em concreto	96
Figura 5.1 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento argamassado	98
Figura 5.2 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com 4,0cm de revestimento argamassado	98
Figura 5.3 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento argamassado	99
Figura 5.4 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com 4,0cm de revestimento argamassado	99
Figura 5.5 - Comportamento da concentração superficial de cloretos para as distintas argamassas estudadas.....	101
Figura 5.6 - Relação entre índice de vazios e coeficiente de difusão aparente das argamassas utilizadas.....	101
Figura 5.7 - Reescalamento empregado nas regressões com base na segunda Lei de Fick	104
Figura 5.8 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada	104
Figura 5.9 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:2:9	105

Figura 5.10 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:1:6	105
Figura 5.11 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:3	106
Figura 5.12 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.....	109
Figura 5.13 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:2:9.	109
Figura 5.14 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:1:6.	110
Figura 5.15 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:3....	110
Figura 5.16 - Área delimitada pelos pontos referentes as profundidades nas quais o teor crítico de cloretos é atingido na argamassa 1:1:6, tanto para o ensaio de difusão quanto para o de imersão e secagem	113
Figura 5.17 - Microscopia eletrônica de varredura realizada na região de interface da argamassa 1:1:6	113
Figura 5.18 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 2,5cm de revestimento	114
Figura 5.19 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 4,0cm de revestimento	115
Figura 5.20 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem e moldados com 2,5cm de revestimento.....	116
Figura 5.21 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem e moldados com 4,0cm de revestimento	116
Figura 5.22 - Variação do acúmulo de cloretos na interface em função do tempo de ensaio, para a argamassa na dosagem 1:1:6 submetida ao ensaio de difusão	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Teor crítico de cloretos adotados por normas e organismos internacionais	33
Tabela 2.2 - Coeficiente de difusão em função da relação água/cimento e da temperatura	38
Tabela 2.3 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C_3A	39
Tabela 2.4 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos em argamassas em função da variação da umidade relativa (RH) e da exposição ao NaCl.....	41
Tabela 3.1 - Ensaio de caracterização para a cal.....	55
Tabela 3.2 - Ensaio de caracterização para o cimento utilizado	56
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização para agregado miúdo	57
Tabela 3.4 - Ensaio de caracterização para agregado graúdo	57
Tabela 3.5 - Ensaio de caracterização para o concreto.....	58
Tabela 3.6 - Ensaio de caracterização das argamassas utilizadas	59
Tabela 3.7 - Diferentes condições de exposição envolvendo argamassa e concreto.....	67
Tabela 4.1 - Dosagens utilizadas nas argamassas de revestimento externo das obras estudadas na cidade de João Pessoa.....	77
Tabela 4.2 - Características físicas e químicas da cal.....	80
Tabela 4.3 - Características físico-químicas do cimento	81
Tabela 4.4 - Parâmetros de dosagem das argamassas dosadas em laboratório	82
Tabela 4.5 - Caracterização das argamassas no estado fresco	82
Tabela 4.6 - Caracterização física das argamassas endurecidas.....	83
Tabela 4.7 - Resultados relativos ao ensaio de absorção total das argamassas.....	83
Tabela 4.8 - Dosagem e características do concreto no estado fresco e endurecido	84
Tabela 4.9 - Resultados relativos à absorção total e capilar do concreto.....	84
Tabela 5.1 - Influência do incremento na espessura de revestimento argamassado na concentração de cloretos no interior do concreto (corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão).....	107
Tabela 5.2 - Profundidade na qual o teor crítico de 0,05% (em relação a massa da amostra) é atingido para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão.....	107
Tabela 5.3 - Influência do incremento na espessura de revestimento argamassado na concentração de cloretos no interior do concreto (corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem).....	111

Tabela 5.4 - Profundidade na qual o teor crítico de 0,05% (em relação a massa da amostra) é atingido para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem.....	112
Tabela 5.5 - Dados relativos as concentrações superficiais e ao acúmulo de íons cloreto na região imediatamente anterior a interface para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento	117
Tabela 5.6 - Dados relativos as concentrações superficiais e ao acúmulo de íons cloreto na região imediatamente anterior a interface para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento	117

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 IMPORTÂNCIA	20
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	22
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	22
1.3 LIMITES DA PESQUISA	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO.....	25
2.1.1 <i>Modelo de Vida Útil de Tuutti</i>	25
2.1.2 <i>Mecanismos de Despassivação da Armadura</i>	26
2.1.2.1 Despassivação do aço por ação da carbonatação.....	27
2.1.2.2 Despassivação do aço por ação dos íons cloreto	29
2.2 TRANSPORTE DE CLORETOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA	33
2.2.1 <i>Principais Mecanismos</i>	33
2.2.1.1 Absorção capilar	34
2.2.1.2 Difusão	35
2.2.1.3 Migração	35
2.2.1.4 Permeabilidade	36
2.2.2 <i>Fatores que Influenciam no Transporte dos Íons Cloreto</i>	36
2.2.2.1 Presença de adições	37
2.2.2.2 Relação água/cimento	38
2.2.2.3 Tempo de cura	39
2.2.2.4 Quantidade de C ₃ A no cimento	39
2.2.2.5 Temperatura.....	40

2.2.2.6 Umidade relativa.....	41
2.2.3 Modelagem do Transporte de Cloretos	42
2.2.4 Efeito Combinado de Materiais Diferentes no Transporte do Cl ⁻	43
2.3 MÉTODOS PARA ESTUDAR A AÇÃO DOS CLORETOS.....	45
2.3.1 Câmara de Névoa Salina	45
2.3.2 Ciclos de Imersão e Secagem.....	46
2.3.3 Difusão Natural.....	48
2.3.4 Migração.....	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 PESQUISA DE CAMPO	52
3.1.1 Delimitação da Amostra	52
3.1.2 Estratégia de Ação	53
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.2.1 Caracterização dos Materiais.....	54
3.2.1.1 Insumos para concreto e argamassa.....	54
3.2.1.2 Concreto	57
3.2.1.3 Argamassas.....	58
3.2.2 Moldagem dos Corpo-de-prova	59
3.2.3 Ensaaios Acelerados.....	66
3.2.3.1 Ensaio em ciclos de imersão e secagem.....	69
3.2.3.2 Ensaio de difusão	70
3.2.4 Retirada das Amostras.....	70
3.2.5 Determinação do Teor de Cloretos Totais.....	72
4 RESULTADOS	73
4.1 PESQUISA DE CAMPO	73
4.1.1 Material Empregado na Aplicação do Revestimento Externo.....	73
4.1.2 Preparação do Substrato	74
4.1.3 Chapisco	75
4.1.4 Emboço	76
4.1.5 Período de Espera entre Etapas do Revestimento	78
4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS LABORATORIAIS.....	79
4.2.1 Caracterização dos Materiais.....	79
4.2.1.1 Insumos para Argamassa e Concreto.....	79

4.2.1.2 Argamassas.....	81
4.2.1.3 Concreto	84
4.2.2 <i>Ensaio de Difusão</i>	85
4.2.2.1 Corpos-de-prova com 2,5cm de espessura de revestimento submetidos ao ensaio de difusão	85
4.2.2.2 Corpos-de-prova com 4,0cm de espessura de revestimento submetidos ao ensaio de difusão	87
4.2.3 <i>Ensaio em Ciclos de Imersão e Secagem</i>	90
4.2.3.1 Corpos-de-prova com 2,5cm de espessura de revestimento submetidos aos ciclos de imersão e secagem	90
4.2.3.2 Corpos-de-prova com 4,0cm de espessura de revestimento submetidos aos ciclos de imersão e secagem	93
4.2.4 <i>Corpos-de-prova de referência em concreto</i>	95
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	97
5.1 INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO EXTERNO NO TRANSPORTE DE CLORETOS	97
5.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO EXTERNO NO TRANSPORTE DE CLORETOS NO CONCRETO	103
5.2.1 <i>Análise com Base nos Ensaio de Difusão</i>	103
5.2.2 <i>Análise com Base nos Ensaio de Imersão e Secagem</i>	108
5.3 PRESENÇA DO EFEITO RESISTÊNCIA NA INTERFACE ENTRE ARGAMASSA E CONCRETO.....	113
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
6.1 CONCLUSÕES.....	119
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
7 REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APPLICADO EM PESQUISA DE CAMPO	132
APÊNDICE B – COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO	135
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, CURVAS GRANULOMÉTRICAS E ENSAIOS RELATIVOS A IMPUREZAS E CONTAMINAÇÕES DOS AGREGADOS UTILIZADOS	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

O grande número de estruturas de concreto armado prematuramente degradadas em todo o mundo tem deixado em alerta os engenheiros civis e a comunidade científica como um todo, uma vez que o concreto armado era considerado um material de construção de altíssima durabilidade, residindo neste fato uma de suas grandes vantagens. Além da quantidade de estruturas degradadas e da precocidade com que esses casos ocorrem, outro fator relevante é a quantidade de recursos envolvidos na reabilitação destas estruturas.

Gu *et al.* (1996) citam que estudos realizados nos Estados Unidos, pelo *Strategic Highway Research Program*, mostram que até 1996 foram gastos aproximadamente US\$ 20 bilhões na recuperação de pontes que apresentavam corrosão de armadura, sendo este valor crescente a uma taxa de US\$ 500 milhões por ano. Chandra *et al.* (1994) apresentam valores anuais de 55 milhões de dólares para a manutenção de 9.500 pontes na Suécia. Essa realidade se espalha por todo o mundo e pelas estruturas de concreto armado destinadas às mais variadas funções. Ainda com relação ao impacto econômico causado pelos custos envolvidos, Andrade e González (1981) destacam que as perdas, devido ao fenômeno da corrosão, podem ser da ordem de 1,25 a 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) dos países em desenvolvimento. Já Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, em países industrialmente desenvolvidos, acima de 40% do total de recursos da indústria da construção civil são aplicados no reparo e manutenção de estruturas já existentes, e menos de 60% em novas instalações.

Vários são os fatores que podem conduzir a tal panorama de deterioração. Estes fatores vão desde a má execução das estruturas até a agressividade do ambiente no qual estas encontram-se inseridas. Estes aspectos podem atingir diretamente o concreto ou o aço causando, porém, danos à estrutura de uma forma generalizada (CASCUDO, 1994). Dentre eles, é importante destacar a ação da carbonatação, mais evidente nos grandes centros urbanos devido à crescente emissão de CO₂, e a ação deletéria dos íons cloreto, que atinge de forma mais violenta as estruturas inseridas no mar ou próximas a ele. A ação dos íons cloreto é, provavelmente, o fenômeno mais devastador das estruturas construídas com concreto usual (AITCIN, 2000). Nenhum outro contaminante comum está tão extensivamente documentado na literatura como causador de corrosão dos metais no concreto como estão os cloretos (CASCUDO, 1994).

Os íons contidos na névoa salina são de grande relevância para as estruturas de concreto armado, principalmente aquelas construídas em ambientes litorâneos. Muitas capitais brasileiras encontram-se localizadas em área de costa e, tendo em vista sua proximidade com o mar, as estruturas localizadas nesse ambiente são fortemente atingidas pelo fenômeno da corrosão. Os íons cloreto são, em grande parte, captados pelo concreto através do contato com a névoa salina nestas regiões, transportados para o interior do material e desencadeiam a corrosão das armaduras no interior do concreto (MEIRA *et al.*, 2007).

A forma como ocorre o transporte destes íons, bem como as variáveis envolvidas neste mecanismo, têm sido investigadas, haja vista sua importância para compreensão do fenômeno e posterior terapia das manifestações patológicas dele proveniente. Trabalhos como os de Cerný *et al.* (2004) e de Wang *et al.* (2005) tratam do transporte de cloretos em argamassas e em concreto, respectivamente. No tocante as variáveis envolvidas no transporte de cloretos, podem ser citados trabalhos como o de Pereira (2001) que aborda aspectos relacionados à relação água/cimento e ao tipo de cimento, Tuutti (1993) que mostra a influência tipo de cimento, Bakker (1988) que mostra a influência da presença de fissuras e tantos outros importantes trabalhos relacionados às variáveis envolvidas neste transporte (PAGE *et al.*, 1981; JAEGERMANN, 1990; THOMAS *et al.*, 1990).

Pode-se observar que as estruturas tem sido analisadas através de diversas formas de exposição do concreto e/ou argamassa, como ambientes criados por ensaios acelerados (JENSEN, 1999; MONTEIRO *et al.*, 2003; PEREIRA *et al.*, 2005; SILVA, 2006; TONG e

GJØRV, 2001), condições naturais de exposição (CASTRO *et al.*, 2001; MEIRA, 2004) e, até mesmo, comparações entre ambiente natural e de laboratório como é o caso de Oh e Jang (2007) e Lindvall (2007). Na grande maioria das obras inseridas no perímetro urbano existe a utilização do concreto armado aliada a vários tipos de revestimento que podem funcionar como barreira física para penetração dos íons cloreto, mesmo não tendo esta função como foco principal. Porém, não se tem observado estudos focados nessa proteção física adicional que pode ser desempenhada pelo revestimento

Estudar o transporte dos íons cloreto no concreto, aliado a uma possível barreira protetora de argamassa, permitirá análises cada vez mais próximas da realidade e, conseqüentemente, soluções cada vez mais eficazes para os casos de manifestações patológicas em concreto que envolvam a ação deletéria desses íons. Ainda é importante ressaltar que o estudo proposto deverá abrir portas para novas pesquisas nesta direção uma vez que não se encontraram registros de pesquisas que levam em consideração a argamassa de revestimento como provável fator de proteção contra penetração dos cloretos.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar o papel complementar do revestimento externo de argamassa como camada protetora das estruturas de concreto armado, em relação ao transporte de cloretos, através de ensaios acelerados.

1.2.2 Objetivos Específicos

De forma mais específica, esta pesquisa propôs-se a:

- Caracterizar o emprego de argamassas na execução de revestimentos externos na região costeira da cidade de João Pessoa - Paraíba;
- Avaliar a influência da dosagem da argamassa de revestimento externo no transporte de cloretos no concreto;

- Avaliar a influência da espessura da argamassa de revestimento externo no transporte de cloretos no concreto;
- Analisar a presença do efeito resistência na interface entre argamassa e concreto.

1.3 LIMITES DA PESQUISA

O presente estudo está focado no transporte de cloretos em sistemas duplos contendo argamassas de revestimento externo e concreto. Tal afirmação deixa claro que não se trata de um trabalho sobre tecnologia das argamassas, mas sobre transporte de cloretos envolvendo esse material. Desta forma, são aqui descritas algumas características básicas relacionadas a esse material e discutidas apenas aquelas que tenham relação mais importante com o fenômeno estudado.

Com relação as variáveis relacionadas às argamassas utilizadas neste estudo, a maioria foi definida através de uma pesquisa de campo realizada na cidade de João Pessoa – Paraíba, que integra o presente trabalho. Tal fato provavelmente conduzirá a diferenças entre características das argamassas utilizadas nessa cidade e em outras regiões do país. Porém, a pesquisa de campo teve por objetivo imprimir características reais e atuais ao trabalho laboratorial, conduzindo, desta forma, a resultados mais próximos da realidade local.

Por fim, é importante lembrar que as condições aceleradas assumidas nos ensaios, apesar de buscar assemelham-se à realidade, criam um ambiente próprio, onde a dinâmica dos fenômenos envolvidos pode ser bastante diferente. Dessa forma, comparações entre os resultados aqui apresentados e aqueles obtidos em exposições reais ou em outras condições de ensaio acelerado devem ser feitas com cautela.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta de sete capítulos, cuja divisão e conteúdo principal são relatadas nos parágrafos seguintes.

No capítulo 1, justifica-se a importância de pesquisar o tema em pauta, apresentam-se os objetivos propostos e os limites da pesquisa.

No capítulo 2, delimita-se a revisão bibliográfica, onde é introduzido o tema corrosão das armaduras no concreto, mostrando o modelo de vida útil de Tuutti e os mecanismos associados a este tipo de corrosão. Em seguida, são apresentados os mecanismos de transporte dos íons cloreto em matriz cimentícia, bem como alguns fatores que influenciam nesse transporte e modelos matemáticos representativos do fenômeno estudado. Para finalizar, alguns métodos capazes de avaliar esse transporte também são comentados.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada na pesquisa, compreendendo a descrição das variáveis envolvidas e uma descrição mais detalhada das ações adotadas.

No capítulo 4, são apresentados os resultados da pesquisa de campo e os resultados obtidos em laboratório, sendo os primeiros já brevemente comentados, devido ao caráter direto e simples dos dados obtidos.

No capítulo 5, são feitas as análises dos resultados obtidos em laboratório, à luz dos objetivos específicos e das características dos materiais envolvidos na confecção dos corpos-de-prova.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho como um todo e sugeridos temas para estudos futuros que venham a fortalecer o conhecimento sobre o transporte de cloretos em estruturas revestidas.

No capítulo 7, por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas ao longo de todo o trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO

2.1.1 Modelo de Vida Útil de Tuutti

A abordagem sobre o fenômeno da corrosão em estruturas de concreto armado tem sido feita, na maioria dos casos, sob o foco do modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982). Este autor propõe um modelo simplificado de abordagem da vida útil para as estruturas de concreto armado, considerando a degradação devido ao fenômeno da corrosão das armaduras. Tal fenômeno pode ser exposto, segundo o modelo de Tuutti, através de uma fase de iniciação e outra fase de propagação da corrosão (Figura 2.1). Este modelo apesar de qualitativo e conceitual, tem sido muito citado devido à sua simplicidade descritiva e utilidade na análise do fenômeno de corrosão (PEREIRA, 2001).

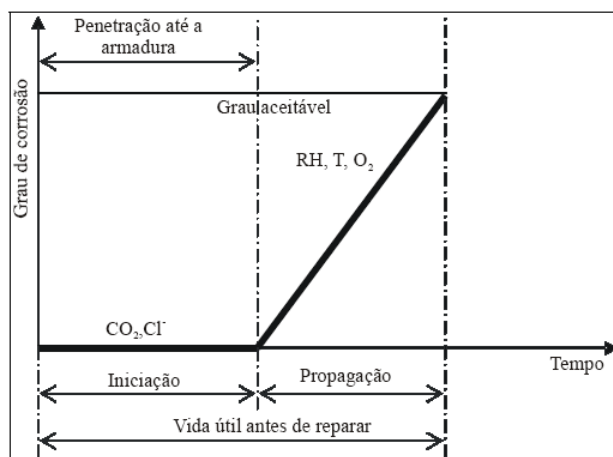


Figura 2.1 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982).

O período de iniciação da corrosão corresponde ao período no qual os agentes agressivos são transportados através do cobrimento, atingem a armadura e provocam a sua despassivação (TUUTTI, 1993). A despassivação pode ocorrer frente a duas condições básicas: presença de uma quantidade suficiente de íons cloreto e diminuição da alcalinidade do concreto (CASCUDO, 1997). Este período depende das características de agressividade do meio em que a estrutura encontra-se exposta e das características dos materiais como, por exemplo, o tipo de cimento e a permeabilidade do concreto de cobrimento.

Após a despassivação, o processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se com o início do período de propagação (ANDRADE, 2001). A fase de propagação se caracteriza pelo desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas em função das variáveis que controlam a cinética das reações, ou seja, em função da disponibilidade de oxigênio, da resistividade do meio, da temperatura, etc (TUUTTI, 1982). No período de propagação, a corrosão da armadura começa a se desenvolver com a formação da pilha eletroquímica e se estende até que a estrutura chegue a um grau de deterioração inaceitável, seja do ponto de vista da segurança, da funcionalidade ou, ainda, da estética (ANDRADE, 2000). Entretanto, deve-se salientar que a corrosão das armaduras não é um processo contínuo, podendo ser interrompido a qualquer momento, pela ausência de qualquer fator necessário para que o mesmo continue ocorrendo (PEREIRA, 2001).

2.1.2 Mecanismos de Despassivação da Armadura

A armadura no interior do concreto possui uma proteção física, que corresponde ao concreto de cobrimento, e uma proteção química, que corresponde a uma camada passivante formada por uma fina capa de óxidos, compacta e aderente à superfície do aço, estável em meio alcalino (ANDRADE, 1992).

A armadura dentro do concreto normalmente encontra-se protegida da corrosão devido a alta alcalinidade deste material, pH entre 12.7 e 13.8 (HELENE, 1993). Essa alcalinidade provém da fase líquida constituinte dos poros do concreto, a qual, nas primeiras idades, basicamente é uma solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e em idades mais avançadas é composta principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) (MCKENZIE, 1987 *apud* CASCUDO, 1997). Essa camada protege a armadura de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial e pH mantenham-se estáveis

conforme expõe o diagrama de Pourbaix, através da identificação da zona de passivação (Figura 2.2). No entanto, essa passividade pode ser destruída pela ação de agentes agressivos (CO_2 , Cl^- , entre outros) que podem alterar as condições acima referidas, levando ao rompimento da camada, ou seja, a despassivação da armadura.

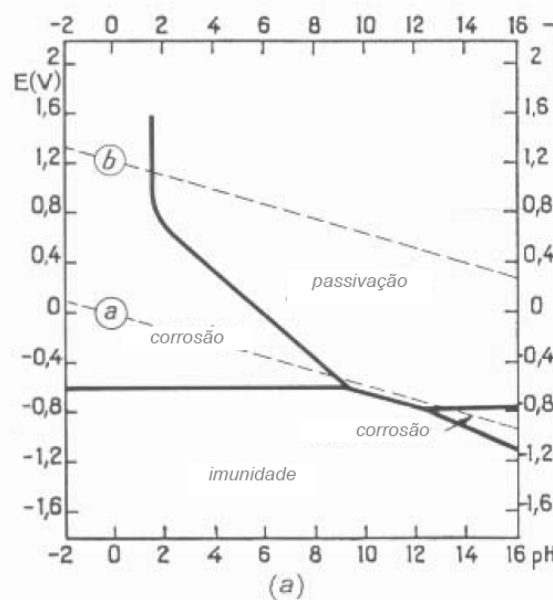


Figura 2.2 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico (Fe – H₂O; 25°C).
Fonte: Meira (2004) *apud* Pourbaix (1972).

2.1.2.1 Despassivação do aço por ação da carbonatação

De acordo com Cascudo (1997), a alta alcalinidade do concreto, obtida durante as reações de hidratação do cimento, pode ser reduzida com o tempo. Esta redução ocorre devido, essencialmente, a penetração do CO_2 e reação com compostos alcalinos. A este processo dá-se o nome de carbonatação.

Acredita-se que a penetração do CO_2 no concreto e sua reação com compostos alcalinos faz com que o valor do pH da solução aquosa ali contida seja reduzido, para um pH menor que 11,5, ocorrendo a destruição da camada passiva e, portanto, aumentando a tendência de manifestação do fenômeno da corrosão (METHA e MONTEIRO, 1994). Cabe ainda lembrar que a carbonatação pode influenciar na liberação de cloretos fixados na pasta de cimento, aumentando a probabilidade de iniciação do processo corrosivo (ANDRADE, 2001).

A reação simplificada do processo de carbonatação envolvendo a reação do gás carbônico com o hidróxido de cálcio na presença de água, pode ser representada pela Equação 2.1. Reações do gás carbônico com hidróxido de sódio e com hidróxido de potássio também podem ocorrer (Equação 2.2).



O processo de carbonatação acontece de fora para dentro, criando uma zona carbonatada, chamada frente de carbonatação, e uma zona onde ainda não houve carbonatação e os níveis de pH se mantêm elevados (BAKKER, 1988), conforme representa na Figura 2.3. Quando essa frente atinge a armadura, assume-se o fim do período de iniciação da corrosão e o início do período de propagação (TUUTTI, 1982).

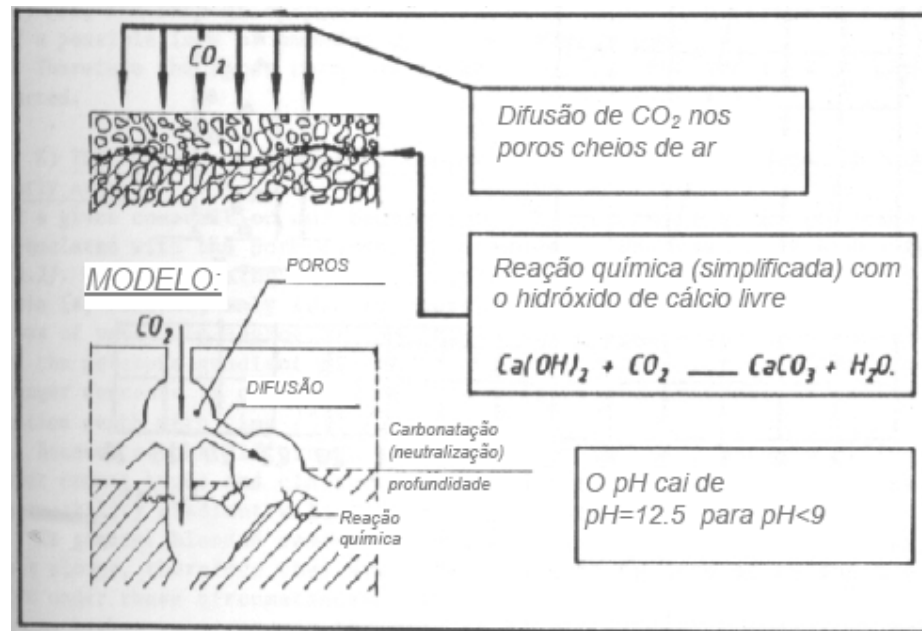


Figura 2.3 - Representação esquemática do processo de carbonatação.
Fonte: Bakker (1988).

Partindo da condição de que o concreto é um material poroso e as reações de carbonatação dependem da presença de água, a velocidade com que a frente de carbonatação avança depende da estrutura da rede de poros bem como da sua condição de umidade (BAKKER, 1988). Com relação à condição de umidade do material podem ser avaliados três

casos distintos. O primeiro corresponde à condição de poros secos, assim existe a penetração do CO_2 , mas não ocorrem as reações de carbonatação por falta de água. O segundo caso corresponde à condição de poros saturados, desta forma há penetração do CO_2 , porém com uma baixa difusibilidade e, então, a carbonatação fica comprometida. Segundo Cascudo (1997), a difusão do CO_2 na água é cerca de 10^4 vezes mais baixa do que no ar. O terceiro caso corresponde a poros parcialmente preenchidos por água, situação mais habitual nos concretos de cobrimento, nesse caso a frente de carbonatação avança até onde os poros mantêm essa condição favorável. Nesse sentido, a faixa 50 – 80% de umidade relativa é a faixa na qual as condições para a carbonatação são as mais favoráveis (ANDRADE, 1988; PARROTT, 1987). A Figura 2.4. representa essas distintas condições.

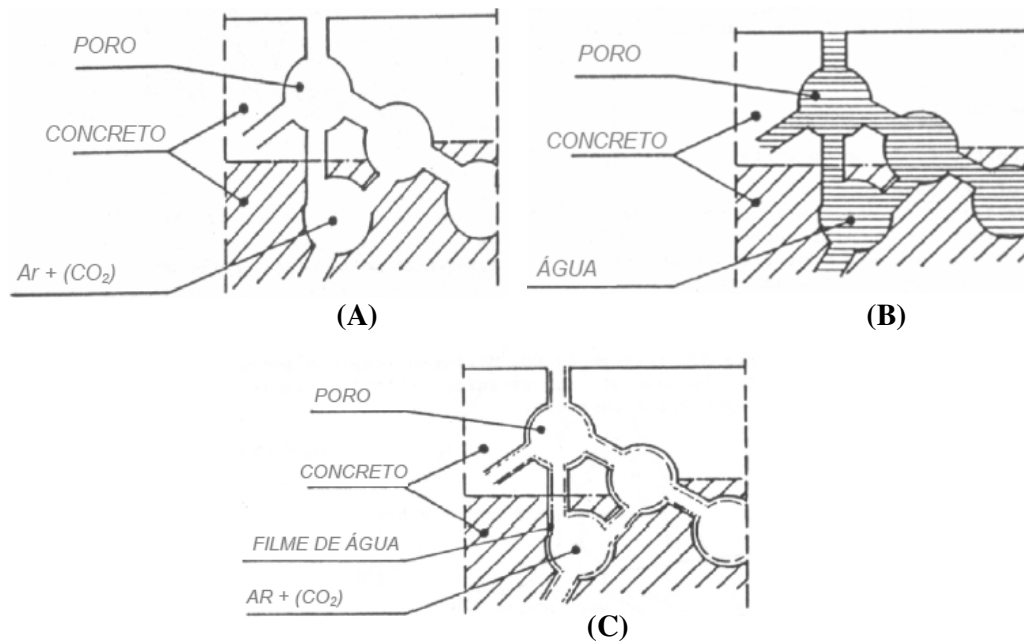


Figura 2.4 - Representação esquemática da difusão do CO_2 com poro seco (A), saturado (B) e parcialmente preenchido por água (C).
Fonte: Bakker (1988).

2.1.2.2 Despassivação do aço por ação dos íons cloreto

Uma vez no interior do concreto, os cloretos podem se apresentar sob três formas distintas (Figura 2.5):

- Quimicamente ligado ao aluminato tricálcio (C_3A), formando cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$);
- Adsorvido na superfície dos poros do concreto; e
- Sob a forma de íons livres na solução dos poros.

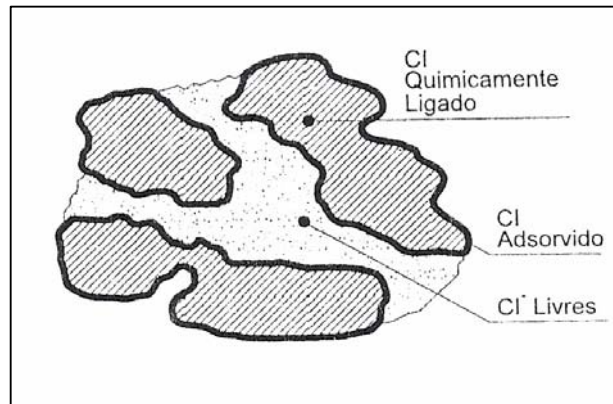


Figura 2.5 - Possíveis formas de ocorrência de íons cloreto nas estruturas de concreto.
Fonte: Cascudo (1997).

Segundo Treadaway (1988) *apud* Meira (2004), os cloretos livres penetram nos poros do concreto, juntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, provocam acidificações localizadas que conduzem a desestabilizações pontuais da película de óxidos passivos (Figura 2.6). Essa é uma característica que faz com que a corrosão desencadeada por cloretos seja tipicamente por pites, ou seja, de forma pontual e profunda, residindo neste fato a alta periculosidade da ação destes íons.

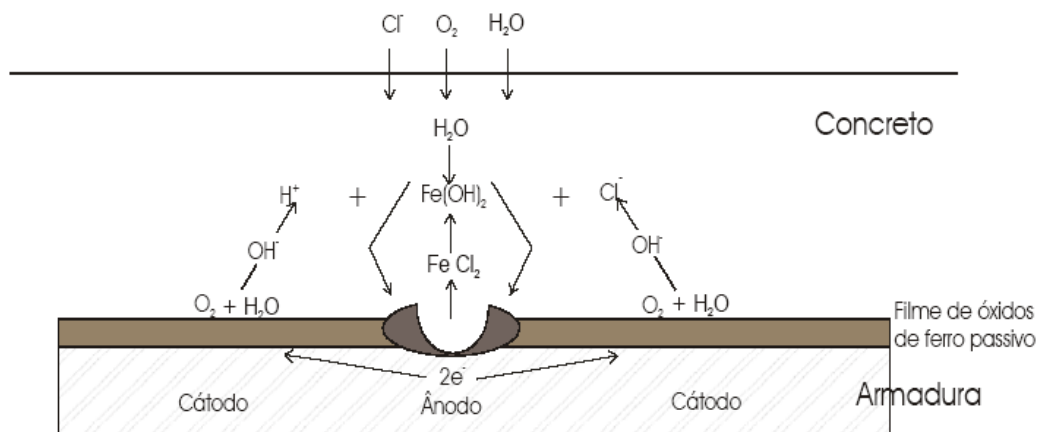


Figura 2.6 - Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos.
Fonte: Meira (2004).

Como se pode observar na Figura 2.6, de uma forma resumida, ocorre que as zonas de ruptura da película atuam como ânodos e as zonas adjacentes a esta ruptura atuam como cátodos. Dada a grande desproporção entre as áreas anódicas e catódicas, o ataque processa-se em profundidade. De forma pouco mais detalhada, pode-se dizer que a propagação da corrosão por íons cloreto envolve a dissolução do metal pela região anódica no fundo do pite e o balanceamento pela região catódica na superfície adjacente. Para manter a neutralidade dentro do pite ocasionada pelo aumento de cátions metálicos, ocorre a migração de ânions (neste caso o Cl^-) para dentro do pite formando cloreto metálico (FeCl_2). Este cloreto é hidrolisado, formando hidróxido metálico (Fe(OH)_2) e ácido livre responsável pela diminuição do pH no interior do pite (SILVA, 2006).

Thangavel e Rengaswamy (1998) *apud* Silva (2006) afirmam que a ação dos cloretos sobre a armadura de aço ocorre através das Equações de 2.3 a 2.5:



Apesar de serem os cloretos livres aqueles capazes de provocar a corrosão, é conveniente determinar o teor de cloretos totais, uma vez que parte dos cloretos combinados pode ficar disponível devido a efeitos como a carbonatação e a elevação da temperatura (MOHAMMED e HAMADA, 2003). Vale ainda lembrar, que apesar de serem os causadores diretos deste tipo de corrosão, apenas a presença dos cloretos livres não é suficiente para iniciar o processo corrosivo, para que este processo tenha início se faz necessário também a presença do oxigênio e do eletrólito.

Visualizando-se a ação dos cloretos através do diagrama de Pourbaix em sistemas contendo esse íon (Figura 2.7), observa-se uma redução significativa da área de passivação da armadura e a incorporação de uma extensa área onde se formam os pites decorrentes da ação inicial dos cloretos.

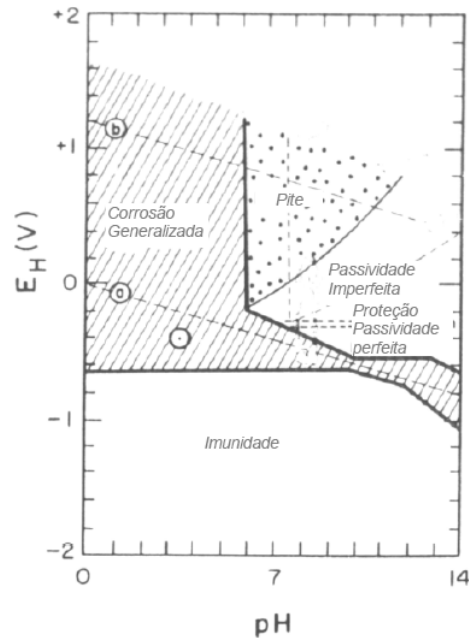


Figura 2.7 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico para o sistema Fe – H₂O, 25°C, na presença de íons cloreto.

Fonte: Pourbaix (1972) *apud* Meira (2004).

Helene (1993) afirma que existem várias teorias a respeito do rompimento da película passivadora, como por exemplo a teoria do filme de óxido, teoria da adsorção e a teoria do complexo transitório, porém acredita-se que o estabelecimento preciso do mecanismo de despassivação pela ação dos íons cloreto ainda está por vir.

A concentração de cloretos, abaixo da qual o risco de corrosão é mínimo (teor crítico de cloretos), é outro ponto ainda sem consenso e bastante estudado dentro da comunidade científica mundial (ANDRADE, 1992; HELENE, 1993; THOMAS, 1996). A Tabela 2.1 mostra alguns teores críticos de cloretos adotados por normas/organismos internacionais e considera a concentração de 0,4%, em relação à massa de cimento, como a mais consensual.

Tabela 2.1 – Teor crítico de cloretos adotados por normas e organismos internacionais.

Normas/Organismos internacionais	Teor máximo de cloretos
Em relação à massa de cimento	
ACI Committee 222	0,20% para concreto armado 0,08% para concreto protendido
ACI Committee 318	0,15% para concreto armado em ambiente com cloreto 0,06% para concreto protendido
BS 8110: Part 1 - BSI	0,4% para concreto armado 0,1% para concreto protendido
CEB - FIP	0,4% para concreto armado 0,20% para concreto protendido
EH - 88	0,4% para concreto armado
NBR 6118	Não há especificação
Em relação à massa de concreto	
CEB	0,05% para concreto armado 0,025% para concreto protendido
JSCE SP - 2	0,60 kg/m ³ para concreto armado 0,30 kg/m ³ para concreto protendido
NBR 6118	Não há especificação

Fontes: Helene (1993) *apud* Andrade (2001) e Silva (2006).

É válido lembrar que a NBR 6118, antes de ser revisada em 2003, fixava uma quantidade máxima de cloretos de 500 mg/l em relação a água de amassamento, para um consumo de cimento de 340 kg/m³ e uma relação a/c de 0,55.

2.2 TRANSPORTE DE CLORETOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA

2.2.1 Principais Mecanismos

Os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto através de diversas fontes. Dentre elas é importante destacar (HELENE, 1993):

- Emprego de aceleradores de pega que contêm cloreto de cálcio (CaCl₂);

- Contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados);
- Contaminação através da névoa salina (maresia);
- Contato direto com a água do mar (estruturas marinhas); e
- Através de determinados processos industriais.

Uma vez inseridos no concreto, os cloretos livres podem ser transportados através de mecanismos que têm a eficácia de transporte diretamente ligada ao tamanho e distribuição dos poros, e a existência e proporção de fissuras e microfissuras. Estes mecanismos de transporte são: absorção capilar, difusão, migração e permeabilidade. Sobre esses, pode-se afirmar que, na grande maioria dos casos, a absorção capilar e a difusão são os mecanismos mais presentes quando se trata de transporte de cloreto em concreto (CASCUDO, 1997; NIELSEN e GEIKER, 2003).

2.2.1.1 Absorção capilar

A absorção capilar é um mecanismo em que os cloretos presentes em um meio líquido penetram no concreto a partir do fluxo deste líquido, pelo efeito da tensão superficial atuante nos poros capilares. De acordo com Cascudo (1997), tal fenômeno ocorre imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato, e pode provocar a penetração de vários milímetros de solução salina em poucas horas.

Ho e Lewis (1987) *apud* Pereira (2001) comentam que uma absorção lenta indica a existência de capilares de pequenos diâmetros, com maior profundidade alcançada, o contrário de uma absorção rápida que indica a existência de capilares maiores com menor profundidade atingida e maior quantidade de água absorvida. Entretanto, segundo HELENE (1993), o mais importante é a intercomunicabilidade dos capilares, sendo menos relevante o diâmetro desses, pois de acordo com suas constatações, concretos de baixa relação água/cimento têm capilares de menor diâmetro e, ao mesmo tempo, muito menos intercomunicáveis, resultando em menor absorção de água e menor profundidade de penetração dessa água.

2.2.1.2 Difusão

A difusão é o transporte de íons causado pela diferença de concentração (NIELSEN e GEIKER, 2003). Esta transferência de matéria ocorre de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração (CRANK *et al.*, 1981). As diferenças de concentrações, no caso em estudo, podem acontecer entre o ambiente externo e o concreto ou ainda entre regiões internas do próprio concreto.

Segundo Nugue *et al.* (2004), muitos modelos para previsão do ingresso de cloretos são baseados no mecanismo de difusão. A maioria desses modelos baseia-se nas Leis de Fick. A primeira Lei de Fick relaciona o fluxo difusivo, e unidimensional, e o gradiente de concentração da espécie em estudo (NUGUE *et al.*, 2004). A mesma pode ser representada através da Equação 2.6, onde o J é o fluxo de massa, o D é o coeficiente de difusão e $\delta c / \delta x$ é o gradiente de concentração. O sinal negativo indica que o fluxo ocorre do sentido da maior concentração para a menor concentração.

$$J = -D \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right) \quad (2.6)$$

No caso do fluxo não estacionário, ou seja, aquele em que a concentração varia com o tempo (KRÖPP *et al.*, 1995 *apud* MEIRA, 2004), aplica-se a segunda Lei de Fick (Equação 2.7), também conhecida como lei da difusão em regime não estacionário.

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \left(\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \right) \quad (2.7)$$

2.2.1.3 Migração

A migração é o movimento de substâncias sob a ação de um campo elétrico (TANG, 1999). Esse campo elétrico pode ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (HELENE, 1993).

Esse mecanismo é geralmente utilizado em ensaios acelerados de transporte de cloretos no concreto (TONG e GJØRV, 2001). Castellote *et al.* (2001) fazem uso do ensaio de migração através do dispositivo encontrado na Figura 2.8. O dispositivo tradicional desenvolvido pela AASHTO considera uma diferença de potencial de 60V, embora críticas sejam feitas em relação ao mesmo (CALÇADA, 2004).

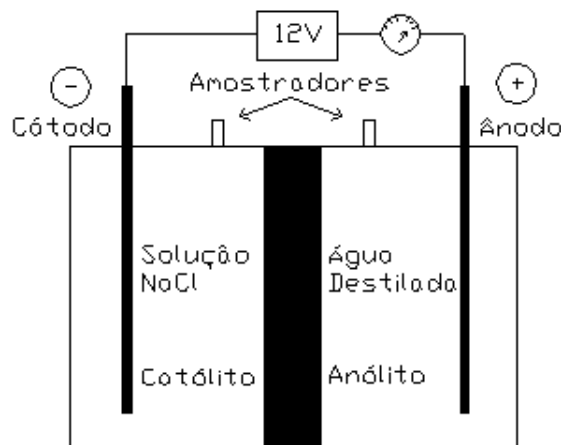


Figura 2.8 - Arranjo experimental utilizado no ensaio de migração por Castellote *et al.* (2001).

2.2.1.4 Permeabilidade

A permeabilidade é a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido poroso, sob um gradiente de pressão externa, sendo influenciada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O transporte de íons cloreto no concreto através do mecanismo de permeabilidade tem pouca incidência na prática e, geralmente, ocorre em casos bastante específicos. Apenas em situações onde existe o acúmulo de água, contenção de solos, contato direto com a ação de águas correntes e o caso de estruturas semi-enterradas com a presença do lençol freático (CASCUDO, 1997).

2.2.2 Fatores que Influenciam no Transporte dos Íons Cloreto

Conhecer os fatores que influenciam no transporte de cloretos é de grande importância para que se possa controlar este transporte de acordo com os materiais escolhidos e com as condições de exposição a que as estruturas serão provavelmente submetidas.

Vários são os fatores que exercem influência sobre este tema, dentre eles pode-se citar as condições de cura, presença de adições, presença de fissuras, relação água/cimento, tempo de cura, tipo de cimento, carbonatação, concentração superficial de cloretos, condições de exposição, influência do tipo de sal, temperatura e umidade relativa. Alguns desses fatores são discutidos nesta seção.

2.2.2.1 Presença de adições

Além de beneficiar o meio ambiente devido à reutilização de alguns materiais antes considerados agressivos e sem nenhum valor agregado, como é o caso da escória granulada de alto-forno, a inserção de adições minerais proporcionadas de forma adequada (ANDRADE, 2001; PEREIRA, 2001), pode reduzir significativamente a penetração de agentes agressivos no concreto.

Através do estudo de pastas em células de difusão, Page *et al.* (1981) mostram uma significativa redução no coeficiente de difusão de cloretos obtida com a inclusão de cinzas volantes e de escória granulada de alto-forno nos materiais estudados. Esses materiais foram confeccionados com cimento portland comum, tendo uma relação água/cimento igual 0,50 e temperatura de ensaio de 25°C, gerando resultados de coeficiente de difusão da ordem de $44,7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, para as amostras sem adição, $14,7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, para as amostras com 30% de cinzas volantes e $4,1 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, para as amostras com 65% de escória granulada de alto-forno. Autores como Oh e Jang (2007) também demonstram em seus estudos a eficácia da cinza volante neste sentido.

A adição da sílica ativa também é benéfica no que diz respeito a redução da difusão de íons cloreto em pastas de cimento. Jensen *et al.* (1999) mostram que para corpos-de-prova moldados com relação água/cimento igual a 0,50 e expostos a uma solução com 3% de NaCl no período de um mês, o coeficiente de difusão varia de $22 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, em amostras sem adição, para $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, em amostras com 10% de sílica ativa, e ainda para $0,30 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para uma adição de 20% de sílica ativa. Segundo mesmo autor, tal redução pode ser atribuída à redução da conectividade capilar no sistema de poros.

Os efeitos benéficos das adições se devem, principalmente, a microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, sendo mais espaços dos poros preenchidos com C-S-H do que nos materiais sem adições.

2.2.2.2 Relação água/cimento

A influência da relação água/cimento no transporte de cloretos tem sido abordada por vários autores (JENSEN *et al.*, 1999; MOHAMMED e HAMADA, 2003; OH e JANG, 2007; TONG e GJØRV, 2001). Tal relação está intimamente ligada a porosidade do concreto e, por isso, alterar esta relação significa facilitar, se houver um aumento da relação, ou dificultar, se ocorrer a diminuição da relação, o transporte de cloretos na estrutura porosa do concreto.

Castro *et al.* (2001) mostram que amostras de concreto expostas a condições naturais, a 100 m de distância do mar em Yucatán – México, são totalmente influenciadas pela relação água/cimento no que diz respeito a penetração de cloretos. Estas amostras foram moldadas com relações água/cimento variando entre 0,46 e 0,76, estiveram em cura por 7 dias e em seguida foram expostas em ambiente natural com ocorrência de névoa salina.

Este fato também pode ser comprovado em ambiente de laboratório. Page *et al.* (1981) mostram valores de coeficientes de difusão bastante elevados quando se possui uma alta relação água/cimento em pastas de cimento empregando cimento portland comum (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Coeficiente de difusão em função da relação água/cimento e da temperatura.

Temperatura °C	Relação água/cimento		
	0,40	0,50	0,60
Coeficiente de difusão ($\times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)			
7	11,03	20,70	51,90
14,5	12,70	23,60	84,60
25	26,00	44,70	123,50
35	44,70	94,80	165,20
44	84,00	183,6	318,20

Fonte: Page *et al.* (1981).

2.2.2.3 Tempo de cura

Durante o período de cura do concreto várias reações químicas relativas a sua hidratação vão acontecendo, estas reações são mais importantes nas primeiras idades e estão relacionadas a formação da estrutura porosa do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Com o avanço da hidratação do cimento, a estrutura porosa da pasta vai ficando mais refinada, ou seja, os poros vão diminuindo e essa diminuição desfavorece à penetração de cloretos a partir do seu mecanismo mais importante, a difusão (NEVILLE, 1997). Assim, o transporte de cloretos é inversamente proporcional ao tempo de cura.

2.2.2.4 Quantidade de C_3A no cimento

Com relação à influência do tipo de cimento no transporte de cloretos, pode-se dizer que um dos principais aspectos é a fixação de cloretos na matriz cimentícia. Tal fixação (combinação) de cloretos está relacionada a quantidade de C_3A existente no cimento, uma vez que, esse composto, possui importante papel favorecedor na fixação dos íons cloreto.

Nesse sentido, Rasheeduzzafar *et al.* (1990) *apud* Meira (2004), estudaram vários teores de C_3A chegando a conclusão que cimentos com maiores teores de C_3A podem ter um desempenho muito superior aqueles com baixos teores de C_3A (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C_3A .

<i>Teor de C_3A (%)</i>	<i>% de cloretos livres</i>	<i>Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão</i>
2	86	Referência
9	58	1,75 vezes
11	51	1,93 vezes
14	33	2,45 vezes

Fonte: Rasheeduzzafar *et al.* (1990) *apud* Meira (2004).

Oh e Jang (2007) estudaram a difusividade de cloretos em dois tipos de cimento e chegaram a mesma conclusão. Os cimentos estudados foram o cimento portland comum (não há imposição sobre o limite do C_3A) e o cimento portland resistente a sulfatos (limite máximo

de 5% de C_3A). Foram moldados corpos-de-prova com relação água/cimento de 0,38 que estiveram imersos por 15 semanas em solução com 3,5% de NaCl. Os resultados mostram que o coeficiente de difusão das amostras moldadas com cimento comum, maior teor de C_3A , são inferiores aos obtidos para as amostras moldadas com o cimento resistente a sulfatos, menor teor de C_3A .

Além da quantidade de C_3A , outro fator relacionado ao tipo de cimento que influencia no transporte de cloretos é a existência de adições em sua composição. Este item é discutido detalhadamente na seção 2.2.2.1.

2.2.2.5 Temperatura

Na grande maioria dos processos de natureza química, a temperatura age elevando a cinética das reações (ANDRADE, 2001). Este fato, segundo Neville (1997), pode explicar a maior quantidade de estruturas deterioradas em regiões quentes em detrimento daquelas localizadas em regiões mais frias.

Com relação a regiões de climas quentes e frios, Lindvall (2007) estudou a influência da variação de temperatura no transporte de cloretos em amostras expostas a condições naturais e a ensaios laboratoriais. Tal estudo mostra que a temperatura tem mais influência quando as amostras são expostas a condições naturais do que quando são trabalhadas em laboratório. As razões para esta diferença não são totalmente conhecidas, mas o pesquisador assume que as diferenças nas condições de exposição, por exemplo, diferenças no pH da água de exposição, pode ser uma das causas. Afirma também que, em regiões mais frias, o cloreto contido na superfície da amostra é elevado, mas a medida que se avança em profundidade, a concentração é considerada baixa quando comparada com a concentração obtida nas regiões de clima quente.

Jensen *et al.* (1999) estudou a influência da temperatura em amostras de pasta de cimento e argamassas expostas a diferentes temperaturas concluindo que o aumento da temperatura acelera o ingresso de cloretos. Segundo o mesmo autor, tal fenômeno ocorre devido a ativação térmica do processo de difusão e ainda pelo efeito dos cloretos combinados, uma vez que a quantidade desses cloretos é reduzida quando a temperatura é aumentada. Page

et al. (1981) corrobora esta idéia quando mostra o aumento do coeficiente de difusão, para distintas relações água/cimento, a medida que a temperatura é elevada (ver Tabela 2.2).

2.2.2.6 Umidade relativa

A umidade relativa mostra-se um fator importante no estudo da penetração dos íons cloreto no concreto, uma vez que o transporte destes íons depende da presença de água, e o aumento da quantidade de água no concreto facilita o transporte dos íons cloreto, por difusão, em seu interior. De acordo com Zhang e GJØRV (1996), o transporte dos íons cloreto em concretos úmidos é comumente assumido como governado pelo mecanismo de difusão.

Estudos a respeito da influência da umidade relativa mostram que quanto maior o grau de saturação maior também será a difusibilidade destes íons no concreto, devido ao aumento de água em seu interior. Como a presença da água na rede de poros do concreto está relacionada com a umidade relativa, quando esta decresce do valor crítico de 75%, a difusividade de íons apresenta uma queda acentuada (SAETTA *et al.*, 1993 *apud* MEIRA, 2004).

Nielsen e Geiker (2003) avaliaram o coeficiente de difusão em argamassas, em meios não saturados, e observaram um aumento do coeficiente de difusão de aproximadamente quatro vezes quando houve uma variação na umidade relativa de 65% para uma condição saturada (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Variação do coeficiente de difusão de cloretos em argamassas em função da variação da umidade relativa (RH) e da exposição ao NaCl.

<i>Condição</i>	<i>Exposição</i>	<i>D ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)</i>
65% RH	Solução com 26,4% NaCl por 2h	2,70
85% RH	Solução com 26,4% NaCl por 2h	3,80
Saturação a vácuo	Imersão em solução com 3% de NaCl por 30 dias	12,90

Fonte: Nielsen e Geiker (2003).

2.2.3 Modelagem do Transporte de Cloretos

Vários estudos sobre transporte de cloretos buscam o desenvolvimento de modelos que possam ser utilizados para simular o ingresso de cloretos e prever seu perfil de concentração ajudando, conseqüentemente, a estimar as condições de serviço das estruturas de concreto ao longo do tempo (WANG *et al.*, 2005).

Nesse sentido, a segunda Lei de Fick tem sido empregada há muito tempo. A primeira utilização da segunda Lei de Fick para modelar a penetração de íons cloreto no concreto veio com Collepardi *et al.* em 1970 (ANDRADE, 2001) e, desde então, tornou-se a forma mais tradicional de fazê-lo. Porém, devido à complexidade do fenômeno, a segunda Lei de Fick tem sido usada com imposições facilitadoras no que diz respeito a aspectos matemáticos. O fato de se considerar o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos como condições constantes, pode ser citado com exemplo destas imposições (SANDBERG *et al.*, 1998). Considerando estas imposições como condições de contorno, o problema possui solução matemática simples (Equação 2.8) onde C é a concentração de cloretos a profundidade e tempo determinado, C_s é a concentração superficial de cloretos, D é o coeficiente de difusão, x é a profundidade em estudo e t é o tempo em estudo.

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.8)$$

De acordo com Oh e Jang (2007), a penetração de cloretos no concreto é um fenômeno de alta complexidade por várias razões: primeiro, o coeficiente de difusão não é um parâmetro constante, varia, por exemplo, com a idade, temperatura e umidade relativa. Segundo, os cloretos combinados têm uma influência significativa sobre a penetração de cloretos. Terceiro, não somente a difusão dos cloretos, mas também seu transporte convectivo têm um importante papel no movimento destes íons dentro do concreto, principalmente quando expostos a condições de molhagem e secagem. Isso faz com que o coeficiente de difusão adotado na Equação 2.8 seja um coeficiente de difusão aparente, pois sofre o efeito de todos esses aspectos em conjunto. Análise semelhante pode ser feita em relação à concentração superficial de cloretos (C_s), que também varia com o tempo e sofre forte influência da interação com o ambiente externo.

Em meio a estas discussões muitos modelos sofisticados têm sido desenvolvidos atualmente. Estes modelos ainda têm como partida as teorias de difusão de Fick, porém com correções que levam em consideração fenômenos naturais não considerados pela segunda lei de Fick como, por exemplo, a umidade, o sal, a temperatura e a densidade da amostra (SANDBERG *et al.*, 1998). Esse cenário remete a uma situação onde os modelos numéricos têm maior aplicação e podem conduzir a resultados mais precisos. Contudo, a aplicação da Equação 2.8 pode conduzir a resultados bastante úteis.

2.2.4 Efeito Combinado de Materiais Diferentes no Transporte do Cl⁻

O transporte de íons cloreto em matriz cimentícia tem sido bastante estudado através de amostras formadas por camada única, por exemplo, apenas argamassa ou apenas concreto. Porém, quando este transporte ocorre em um sistema formado pela junção destas ou de outras camadas, poucos foram os estudos realizados.

A existência do transporte de massa em sistemas combinados é uma realidade, basta que se olhe ao redor nos centros urbanos para observar que a maioria das estruturas de concreto encontram-se revestidas. A existência de uma ou de algumas camadas de revestimento faz com que os íons precisem atravessar estas camadas até chegarem ao concreto, gerando, desta forma, características de transporte diferenciadas.

Mesmo em um mesmo material, o transporte dos íons cloreto pode ocorrer de forma diferenciada entre dois pontos desse mesmo material, em função do efeito pele, decorrente das diferenças nas características do material na superfície e interior, bem como da sua interação com o meio (ANDRADE *et al.*, 1997; CASTRO *et al.*, 2001).

Andrade *et al.* (1997) estudaram este efeito através da modelagem e simulação do fenômeno de difusão no concreto. Nesse modelo, o efeito pele aparece em função da diferença nas características de transporte do concreto superficial em relação ao interior. A Figura 2.9 e as Equações de 2.9 a 2.13, resumem o modelo proposto por Andrade *et al.* (1997), onde C_1 é a concentração de cloretos na camada mais externa, C_2 é a concentração de cloretos na camada interior, D_1 é o coeficiente de difusão na camada mais externa, D_2 é o coeficiente de difusão na camada interior, C_s é a concentração superficial, e é a espessura da

camada, R é a resistência entre as duas camadas, x é a profundidade em estudo e t é o tempo em estudo.

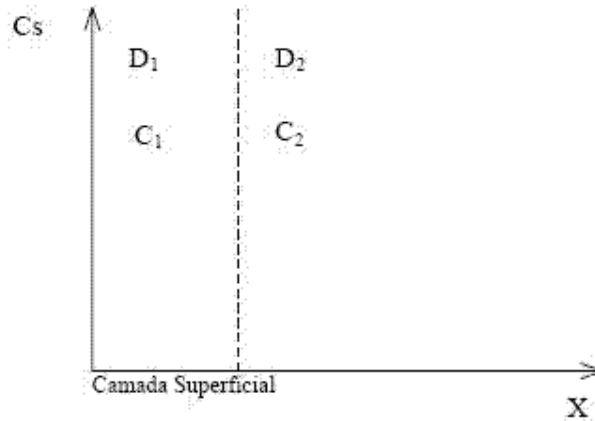


Figura 2.9 - Diferentes propriedades para as diferentes camadas segundo Andrade *et al.* (1997).

$$C_1 = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{2ne + x}{2\sqrt{D_1 t}} \right] - \alpha \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+2)e - x}{2\sqrt{D_1 t}} \right] \right) \quad (2.9)$$

$$C_2 = \frac{2kC_s R}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)e + k(x-e)}{2\sqrt{D_1 t}} \right] \quad (2.10)$$

$$k = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (2.11)$$

$$\alpha = \frac{1-k}{1+k} \quad (2.12)$$

$$C_1 = RC_2 \quad (2.13)$$

O efeito pele como consequência da interação do concreto com o meio foi observado por Castro *et al.* (2001), através de exposições naturais do concreto. Segundo a pesquisa, em clima tropical marinho observa-se a existência de duas zonas no concreto: uma zona interna que está sempre molhada e uma zona externa que está em permanente ciclo de molhagem e secagem. Isso define características de transporte distintas, com reflexos na forma dos perfis. A modelagem dessa situação envolve fenômenos de transporte distintos que se sobrepõem, sendo mais adequado o emprego de métodos numéricos.

2.3 MÉTODOS PARA ESTUDAR A AÇÃO DOS CLORETOS

2.3.1 Câmara de Névoa Salina

O ensaio em câmara de névoa salina, ou salt spray test, é um ensaio comparativo muito importante na área de corrosão por conseguir simular um ambiente marinho severo. Para execução deste ensaio é necessário uma câmara na qual se pode controlar a concentração de sal e a temperatura. Este ensaio é padronizado, por exemplo, pela ASTM B117-1990 (MONTEIRO e HELENE, 2003).

A adoção da câmara de névoa salina como parte integrante da metodologia de ensaio tem uso mais freqüente em pesquisas que envolvem apenas a corrosão metálica, sem combinação com outros materiais, por exemplo, o concreto. Pinho *et al.* (2003), por exemplo, estudaram a resistência à corrosão de compósitos ferromagnéticos com policloropreno através de ensaios acelerados em câmara de névoa salina por 744 horas.

Bellei e Lima (2005) num estudo relativo ao desempenho de perfis estruturais metálicos soldados por alta freqüência usados na construção civil, fizeram uso da câmara de névoa salina por 1728 horas. Conforme comenta Wolynech (1992) *apud* Bellei e Lima (2005), os resultados gerados no ensaio de corrosão em câmara de névoa salina nem sempre correspondem àqueles obtidos em condições atmosféricas reais. Porém, a escolha deste mecanismo parece estar muitas vezes associada a capacidade de evidenciar as possíveis diferenças de comportamento das amostras frente a corrosão em um prazo muito inferior ao dos ensaios em ambientes naturais.

Apesar de serem encontradas em menor escala, pesquisas relativas à corrosão em estruturas de concreto armado são observadas. Monteiro e Helene (2003) estudaram o método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras através de ensaios acelerados em câmara de névoa salina, por 91 dias, e em semiciclos de imersão e secagem, na fase inicial de contaminação das amostras.

2.3.2 Ciclos de Imersão e Secagem

Com relação à penetração de íons cloreto durante ciclos de molhagem e secagem, o que acontece são as seguintes etapas. No início da molhagem os cloretos dissolvidos penetram no concreto por absorção capilar. Alguns deles, são transportados para o interior por difusão. Durante a secagem, estes íons permanecem no interior dos poros, fixos por adsorção, juntamente com moléculas de água que formam a película que reveste o interior do poro (Figura 2.10). Embora a uma velocidade diferente, o processo de difusão dos íons cloreto continua mesmo no período de secagem (COUTINHO, 1998).

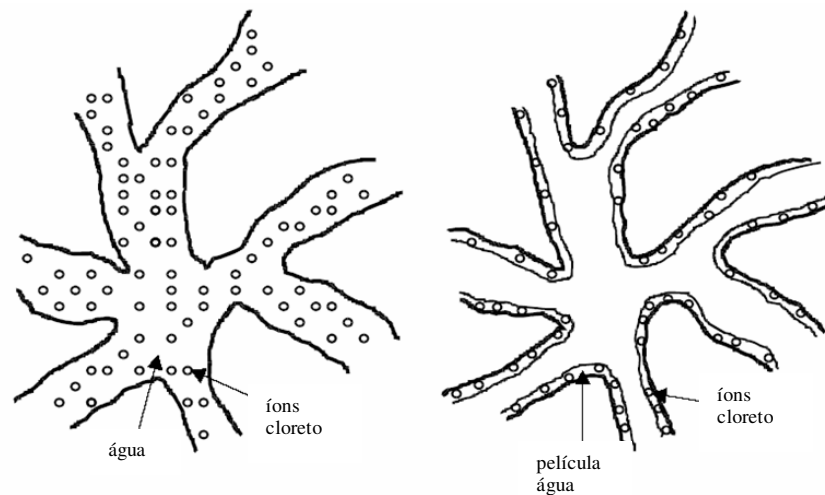


Figura 2.10 - Penetração de cloretos através do mecanismo de molhagem (esquerda) e secagem (direita).
Fonte: Coutinho, 1998.

No período seguinte de molhagem, com a penetração de mais água com cloretos, os íons adsorvidos e ainda não difundidos para o interior da pasta, fazem aumentar a concentração de cloretos na superfície dos poros e o processo de difusão para o interior é mais intenso. Assim, o perfil de cloretos é, em geral, diferente para condições de alternância de molhagem/secagem e condições em que a umidade relativa é aproximadamente constante como mostra a Figura 2.11.

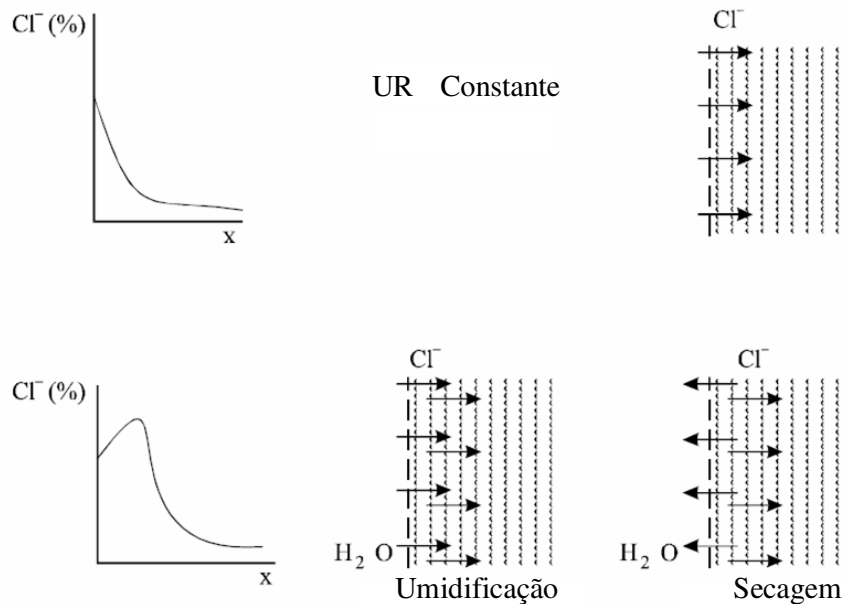


Figura 2.11 - Simulação da penetração de cloretos em ambiente com UR constante e ambiente sujeito a molhagem e secagem.
Fonte: Coutinho, 1998.

Os ensaios através de ciclos de imersão e secagem, apesar de não serem ainda normalizados, são cada vez mais utilizados quando se deseja acelerar o processo de despassivação de armaduras em concreto. Este ensaio, muitas vezes, está associado a medidas eletroquímicas que permitem identificar o período de iniciação e monitorar o período de propagação da corrosão. Por não ser um ensaio normalizado, encontram-se, na literatura, diversas condições de exposição, variando a concentração das soluções e os períodos de imersão e secagem.

Pereira *et al.* (2005) utilizaram ciclos de imersão e secagem, associados a medidas eletroquímicas executadas ao final de cada ciclo, para avaliar a influência da adição de fibras sintéticas ao concreto armado quanto ao ingresso de cloretos. Cada ciclo teve duração de uma semana, iniciando com imersão parcial dos corpos-de-prova, por dois dias, em um recipiente com solução de NaCl a 1%, e depois permanecendo em secagem durante cinco dias.

Outro ponto importante a ser levantado a respeito deste tipo de ensaio é a busca da aproximação com a realidade, uma vez que, em algumas condições ambientais, o concreto em exposição natural encontra-se sujeito a ciclos de molhagem e secagem ou ciclos de ganho e

perda de umidade em virtude, principalmente, da variação da umidade e da temperatura ambiente (CASTRO *et al.*, 2001).

A fim de comparar dados de exposição natural com dados laboratoriais, Meira (2004) trabalhou com ciclos semanais de imersão e secagem, associado a medidas eletroquímicas semanais, em solução de NaCl (1,0M) e, também, com ciclos diários de imersão e secagem, porém em solução de NaCl (0,5M).

2.3.3 Difusão Natural

A avaliação da penetração de cloretos através da difusão natural dos íons consiste em aplicar o conceito de difusão sem utilizar nem um mecanismo adicional para que ocorra a transferência de massa entre regiões de forte e de fraca concentração, ou seja, sem aplicação de campo elétrico. O elevado consumo de tempo é uma das características desta técnica (NUGUE *et al.*, 2004).

A difusão natural é um método classicamente utilizado no estudo da previsão do ingresso de cloretos, podendo ser aplicado em estados estacionário e não estacionário através, por exemplo, de um arranjo experimental que posicione a amostra estudada entre dois compartimentos (células), o anterior com adição de NaCl e o posterior sem esta adição, permitindo a movimentação destes íons devido apenas a diferença de concentração, como mostrado na Figura 2.12. Estudos desta natureza foram desenvolvidos por Castellote *et al.* (2001) e por Nugue *et al.* (2004) com a finalidade de comparar estes resultados com aqueles obtidos através de outros métodos.

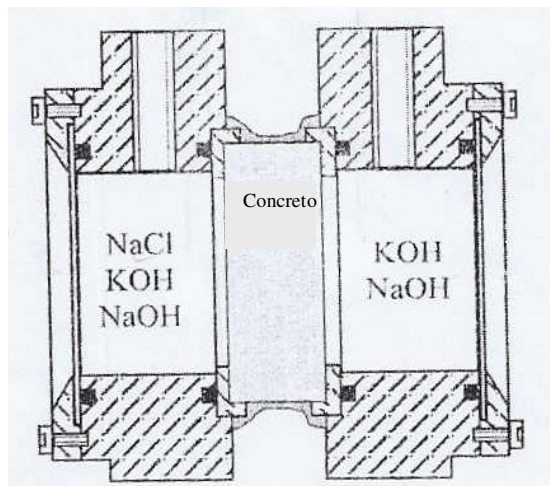


Figura 2.12 - Artefato utilizado em princípio experimental baseado na migração de íons utilizado por Nogueira *et al.* (2003).

Outra forma de aplicação do conceito de difusão natural ocorre através da imersão de amostras em solução contendo NaCl na proporção desejada. Uma das vantagens desta aplicação é o baixo custo envolvido. Vários são os artigos que abordam este tipo de aplicação, dentre esses verifica-se uma grande semelhança no que diz respeito a proteção das faces da amostra em estudo, com o objetivo de simular o fluxo unidirecional (JENSEN *et al.*, 1999; CERNÝ *et al.*, 2004). Para tanto, uma única face é deixada livre e todas as outras são protegidas, geralmente com pinturas com resinas de base epóxi.

Oh e Jang (2007) estudaram os efeitos do material e do clima na penetração de cloretos em estruturas de concreto e, para isso, além do ensaio de exposição natural, utilizaram a difusão natural através da imersão. As amostras foram imersas durante 15 semanas em solução contendo 3,5% de cloretos e seus resultados foram posteriormente comparados com aqueles obtidos em exposição natural.

Lindvall (2007) também usou a imersão das amostras de concreto para posterior comparação entre difusão natural e exposição real. As soluções utilizadas para imersão possuíam duas diferentes concentrações de NaCl: 8,3g de NaCl/l, representando as condições do mar Báltico, e 33,0g de NaCl/l, representando as condições do oceano Atlântico. Ao final desta pesquisa também foram observadas diferenças entre os resultados obtidos em exposição natural e em laboratório.

Os testes de difusão natural em condição de imersão também são aplicados para argamassas e pastas de cimento. Jensen *et al.* (1999) utilizaram a imersão de corpos-de-prova de argamassa e de pasta de cimento previamente saturados, a fim de evitar a influência da absorção capilar, em solução contendo 3% de NaCl, durante um período aproximado de 100 dias. Já Cerný *et al.* (2004) realizaram experiências empregando a difusão natural por imersão de amostras de argamassas, porém sem eliminar a influência da absorção capilar inicial, ou seja, sem uso da saturação da amostra antes de sua total imersão.

2.3.4 Migração

A obtenção de parâmetros de transporte através de ensaios sob condições normais demanda um tempo prolongado, que pode durar meses ou até anos. Por isso, foram desenvolvidos ensaios utilizando-se campos elétricos, com o intuito de acelerar o transporte de cloretos. Com o uso desse campo elétrico o teste de migração pode ser reduzido para alguns dias.

O teste de migração é padronizado por normas como ASTM C1202/97 e AASHTO T277 (TONG e GJØRV, 2001; NUGUE *et al.*, 2004). De forma resumida, este ensaio consiste em colocar uma amostra de concreto entre duas células e aplicar uma diferença de potencial durante certo período de tempo a fim de acelerar o transporte dos íons entre as células. Neste tempo, são registradas as intensidades de corrente que se desenvolvem através da amostra e, conseqüentemente, a carga passante, indicando o risco de penetração dos íons cloreto. O arranjo experimental usado para o ensaio de migração pode ser visto na Figura 2.8.

Nos últimos anos, o ensaio de migração tem sido amplamente usado para avaliar a capacidade de transporte dos concretos (TONG e GJØRV, 2001). A fim de verificar o comportamento de concretos com adições minerais quanto à eficiência na proteção do aço contra a corrosão induzida por íons cloreto, em relação ao concreto sem adição, Silva (2006) fez uso, dentre outros, do ensaio de migração de cloretos nas idades de 7 e 28 dias. Seguindo a ASTM C1202/97, aplicou uma diferença de potencial de 60V durante 6 horas.

Apesar deste ensaio ser bastante utilizado para verificação da resistência à penetração de cloretos, muitos pesquisadores o questionam quanto à sua habilidade de medida da durabilidade de concretos frente a ação dos íons cloreto. A elevação da temperatura causada

pela elevada diferença de potencial, conduz a uma maior difusividade dos íons e não só dos íons cloreto, como de todos os íons envolvidos no processo.

Trabalhos como os de Tong e Gjørsv (2001) e de Castellote *et al.* (2001), por exemplo, já adotam diferenças de potencial menores, 12V, a fim de conter a elevação da temperatura. Nogue *et al.* (2004) discutem métodos de migração concluindo que ainda existe muito o que estudar a esse respeito, uma vez que cada método estudado chega a um coeficiente de difusão distinto.

3 METODOLOGIA

O programa experimental foi dividido em duas partes. A primeira diz respeito a uma pesquisa de campo que serviu de referência na escolha de algumas características das argamassas estudadas. Já a segunda fase está relacionada aos experimentos laboratoriais, que conduziram aos resultados sobre transporte de cloretos em sistemas duplos argamassa-concreto.

3.1 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo, realizada em Dezembro de 2006, teve por objetivo chegar a um diagnóstico sobre as características dos revestimentos externos empregados nos edifícios residenciais multifamiliares localizados próximos à orla marítima da cidade de João Pessoa, Paraíba - Brasil. Dessa forma, a etapa seguinte do estudo pode ser embasada em dados atuais e reais.

3.1.1 Delimitação da Amostra

Os edifícios estudados representam edificações residenciais multifamiliares de todos os portes que estão inseridas na faixa que vai desde o começo do bairro do Cabo Branco até o final do bairro de Manaíra, pois é nesta faixa que se concentra a maior densidade de prédios em construção na orla marítima da cidade de João Pessoa. Considerando a distância em relação ao mar, foram trabalhadas as edificações localizadas numa faixa de até aproximadamente 500 m do mar, já que esta faixa representa, com boa aproximação, aquela de maior presença do agente agressivo estudado (MEIRA, 2004). A delimitação da área em estudo encontra-se indicada na Figura 3.1.

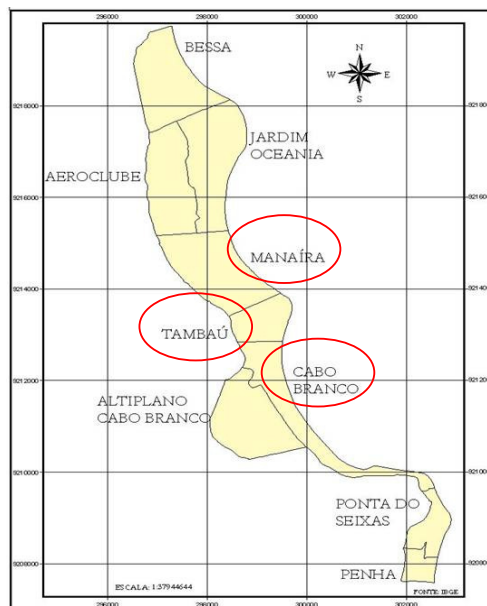


Figura 3.1 - Localização dos bairros em estudo dentro da faixa litorânea da cidade de João Pessoa.

Uma vez que a pesquisa realizou um diagnóstico sobre os revestimentos externos, apenas os prédios em fase de acabamento foram estudados. Considerando que o número de edificações que se encaixava nessas restrições de local e fase de obra era relativamente pequeno, esperava-se trabalhar com toda a amostra. Contudo, tal objetivo não pode ser alcançado, por dificuldade de acesso a algumas obras. Portanto, foram avaliadas 25 obras de um total de 30 possíveis obras.

3.1.2 Estratégia de Ação

Delimitada a amostra, a estratégia de ação, nesta fase, correspondeu à elaboração de um questionário (ver apêndice A) e a sua aplicação nas obras selecionadas.

O questionário empregado apresenta questões relativas a todo o processo produtivo envolvido na execução de revestimento externo em edificações residenciais multifamiliares. Os principais tópicos abordados no questionário foram os seguintes: preparação do substrato; dosagem empregada; técnica de aplicação; utilização de aditivos; espessura; e período de espera entre as etapas do serviço.

Para a aplicação do questionário, percorreu-se rua por rua de cada um dos três bairros delimitados pela pesquisa, respeitando-se a faixa indicada de 500m em relação ao mar. Dessa

forma, pôde-se garantir que todas as construções em fase de acabamento, dentro daquela região, seriam visualizadas e, conseqüentemente, incluídas na amostra, em um primeiro momento. Apenas aquelas obras que se recusaram a participar do diagnóstico não foram incluídas nesse estudo.

Apesar do questionário ser composto de perguntas rápidas e simples, análises visuais foram feitas durante a sua aplicação, a fim de confirmar a solidez das respostas dadas para as perguntas.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Caracterização dos Materiais

A fim de caracterizar os materiais utilizados durante a pesquisa, foram realizados ensaios normalizados segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Estes ensaios englobaram o concreto, a argamassa e todos os seus componentes, ou seja, água, cal, argamassa industrializada, cimento, agregado miúdo e agregado graúdo.

3.2.1.1 Insumos para concreto e argamassa

a) Água

A água utilizada durante a pesquisa, tanto para a moldagem dos corpos-de-prova quanto para execução dos demais serviços, foi proveniente da rede pública de abastecimento de água. Segundo dados de qualidade da água presentes nas contas de água da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), a quantidade média de cloro detectado na água é de 0,2 mg/l, valor este que é irrelevante para este estudo. Porém, como a pesquisa trata da penetração dos íons cloreto, considerou-se prudente realizar uma análise química na água a fim de determinar o teor de cloretos existente.

b) Cal

A cal selecionada para uso em duas das dosagens de argamassa da pesquisa é do tipo CH I. Esta cal foi escolhida por ser a disponível no mercado local e, por isso, de uso corrente nas obras da cidade de João Pessoa. Os ensaios utilizados em sua caracterização encontram-se indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Ensaios de caracterização para a cal.

NBR NM 23	Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica
NBR 7251	Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária*

*Adaptado

Além destes ensaios, sua caracterização química foi requerida a um laboratório especializado.

c) Argamassa industrializada

Utilizou-se uma argamassa industrializada para fins de revestimento externo. Esta argamassa, segundo o fabricante, foi caracterizada de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) e possui as seguintes características técnicas: P5 (resistência à compressão entre 5,5 e 9,0 MPa), M4 (densidade de massa aparente no estado endurecido entre 1400 e 1800 kg/m³), R3 (resistência à tração na flexão entre 1,5 e 2,7 MPa), C4 (coeficiente de capilaridade entre 3,0 e 7,0 g/dm².min^{1/2}), D4 (densidade de massa no estado fresco entre 1600 e 2000 kg/m³), U3 (retenção de água entre 80 e 90%) e A3 (resistência potencial de aderência à tração $\geq 0,30$ MPa). A nível complementar, determinou-se ainda sua massa específica, em laboratório, através da NBR NM 23 (ABNT, 2000).

d) Cimento

O cimento utilizado em todas as etapas da pesquisa foi o CPV ARI, em função do seu baixo nível de adições. As suas características estudadas estão relacionadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ensaios de caracterização para o cimento utilizado.

<i>Propriedades físicas</i>	<i>NBR NM 23</i>	<i>Determinação da massa específica</i>
	NBR NM 43	Determinação da pasta de consistência normal
	NBR NM 65	Determinação do tempo de pega
	NBR NM 76	Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)
	NBR 11579	Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200)
Propriedade mecânica	NBR 7215	Determinação da resistência à compressão

Além destes ensaios, sua caracterização química foi requerida a um laboratório especializado.

e) Agregado miúdo

A areia utilizada como agregado miúdo nesta pesquisa foi areia natural quartzosa, proveniente da região chamada de Caxitú, Município do Conde - Paraíba. Para este tipo de material foram realizados ensaios envolvendo as propriedades físicas e aquelas relacionadas às impurezas orgânicas e a contaminações. A Tabela 3.3 identifica estes ensaios segundo as normas pertinentes.

Tabela 3.3 - Ensaios de caracterização para agregado miúdo.

Propriedades físicas	NBR NM 52	Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente
	NBR NM 248	Agregados - Determinação da composição granulométrica
	NBR 7251	Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária
Impurezas e contaminações	NBR 7218	Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
	NBR NM 49	Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas

f) Agregado graúdo

Como agregado graúdo, utilizou-se pedra britada granítica. Os ensaios realizados para sua caracterização são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Ensaios de caracterização para agregado graúdo.

Propriedades físicas	NBR NM 52	Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente
	NBR NM 248	Agregados - Determinação da composição granulométrica
	NBR 7251	Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária
Impurezas e contaminações	NBR 7218	Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis

3.2.1.2 Concreto

O concreto utilizado como substrato para o revestimento de argamassa foi caracterizado em seu estado fresco e endurecido, segundo as normas indicadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Ensaios de caracterização para o concreto.

Estado fresco	NBR NM 67	Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone
	NBR 5739	Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
Estado endurecido	NBR 7222	Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos
	NBR 9778	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
	NBR 9779	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade

3.2.1.3 Argamassas

As argamassas geradas pelas quatro diferentes dosagens utilizadas nesta pesquisa foram caracterizadas segundo as normas citadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Ensaios de caracterização das argamassas utilizadas.

Estado fresco	NBR NM 23	Cimento portland e outros materiais em pó Determinação da massa específica*
	NBR 13276	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência
	NBR 13278	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado
Estado endurecido	NBR 9778	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
	NBR 9779	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade
	NBR 13279	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão
	NBR 13280	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido

* Realizado apenas para a argamassa industrializada

3.2.2 Moldagem dos Corpo-de-prova

Os corpos-de-prova utilizados na pesquisa foram desenvolvidos com o objetivo de simular, em laboratório, o uso do revestimento de argamassa externo das edificações. Para tanto, a confecção desses elementos se deu em três etapas: moldagem do substrato (concreto), execução da ponte de aderência (chapisco) e aplicação do revestimento ao substrato (argamassa).

a) Concreto

A dosagem do concreto utilizado foi obtida com base no método do American Concrete Institute – ACI (BAUER, 1994). Para a confecção desse concreto foram utilizados:

- Cimento CP V ARI, em função da sua maior pureza (maior teor de clínquer); e
- Relação água/cimento 0,55, por esta relação ser considerada a mais utilizada atualmente nas obras da região.

Definida a dosagem, foram moldados corpos-de-prova em concreto, prismáticos, nas dimensões 8x8x8 cm. Estas dimensões foram escolhidas a fim de facilitar o manuseio das peças em laboratório.

Determinadas essas características, os corpos-de-prova foram moldados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2003), sofreram cura úmida de 7 dias e permaneceram em ambiente de laboratório até 120 dias, como forma de representar com mais proximidade as condições de obra.

b) Revestimento (chapisco e argamassa de revestimento)

Vencido esse período inicial de 120 dias, os corpos-de-prova em concreto foram escovados manualmente, com escova de aço, a fim de preparar o substrato para receber a primeira camada do revestimento, o chapisco. Apesar de não ser o mais utilizado nas obras estudadas, optou-se pelo método da escovação manual com o objetivo de reduzir a possibilidade de falhas na aderência do chapisco com o substrato. Para finalizar a preparação do substrato, as eventuais arestas, provenientes das fôrmas utilizadas para moldagem, também foram retiradas. A Figura 3.2 mostra esse processo de preparação e os corpos-de-prova prontos para receber o chapisco.



Figura 3.2 - Processo de preparação do substrato: (A) Retirada das arestas (B) Corpo-de-prova sem aresta (C) Escovação manual (D) Corpos-de-prova preparados.

Na preparação do chapisco, empregou-se a dosagem 1:3 (em volume), por ser a mais utilizada nas obras correntes da cidade de João Pessoa, com volume de água até atingir a consistência fluida e acréscimo de aditivo para aumentar a aderência do chapisco (BIANCO da marca VEDACIT, composição básica: copolímero compatível com cimento), como mostra a Figura 3.3. É válido salientar que a quantidade de água utilizada na preparação da argamassa de chapisco foi a mesma para todas as situações estudadas e que a quantidade de aditivo utilizada seguiu as instruções do fabricante.



Figura 3.3 - Preparação da argamassa para chapisco.

Para a aplicação do chapisco, foram testados dois métodos: aplicação manual com colher de pedreiro, de uso mais corrente nas obras da cidade de João Pessoa e aplicação com rolo, método considerado mais prático levando-se em conta o tamanho do corpo-de-prova em estudo. A partir dos resultados obtidos em testes preliminares (Figura 3.4), realizou-se uma análise visual e constatou-se que o chapisco rolado não apresentava uniformidade, com possibilidades de prejudicar a aderência. Em função disso, procedeu-se a aplicação com colher de pedreiro.



Figura 3.4 - Chapisco rolado (esquerda) e chapisco aplicado com colher de pedreiro (direita).

Todo o chapisco foi aplicado manualmente com o auxílio de uma peneira de malha fina, que teve por objetivo deixar o chapisco menos espesso e mais uniforme, como se pode observar na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Aspecto uniforme do chapisco aplicado manualmente com o auxílio da colher de pedreiro e da peneira de malha fina.

Segundo a NBR 7200 (ABNT,1998), deve-se esperar 2 dias após a aplicação do chapisco para aplicar a argamassa de regularização (emboço), que por sua vez precisa de 21 dias para encerrar seu período de cura. Esta fase da pesquisa valeu-se desses tempos mínimos de espera determinados.

A argamassa de revestimento foi aplicada em duas espessuras e em quatro composições diferentes, sendo, uma argamassa de cimento e areia (1:3, em volume), duas argamassas de cimento, cal e areia (1:1:6 e 1:2:9, em volume) e uma argamassa industrializada. Estas dosagens foram escolhidas com base na pesquisa de campo realizada durante a primeira fase da pesquisa e com base em trabalhos publicados anteriormente (CINCOTO e CARNEIRO, 1999; SILVA *et al.*, 2003; QUARCIONI e CINCOTO, 2005). A escolha destas dosagens também procurou manter a representatividade em relação às argamassas pobres e às argamassas ricas. Tal fato explica o uso da dosagem 1:3, uma vez que esta é pouco utilizada nas obras atuais. Pode-se observar que as composições das argamassas dosadas em obra mantêm a relação aglomerante-agregado em 1:3, o que facilita as análises comparativas.

As espessuras utilizadas para o revestimento dos corpos-de-prova foram de 2,5 e 4,0cm. Esta escolha foi baseada na pesquisa de campo e em testes preliminares de difusão, que mostram ser possível a obtenção de resultados significativos para os períodos de exposição praticados. A Figura 3.6 resume a utilização das dosagens e espessuras escolhidas e mostra as combinações realizadas com essas variáveis.

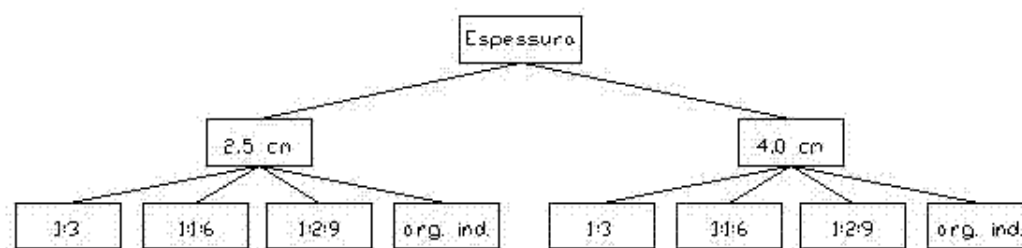


Figura 3.6 -Variáveis e combinações adotadas para o revestimento dos corpos-de-prova em estudo.

Antes da aplicação definitiva da argamassa, foram feitas aplicações testes para cada uma das dosagens. Estes testes tiveram como objetivo verificar, através de análise visual, a existência de fissuras de retração visíveis a olho nú durante o período de cura do material. Como pode ser observado na Figura 3.7, este tipo de fissura não foi detectado.



Figura 3.7 - Corpos-de-prova revestidos em argamassa na dosagem 1:3 (direita) e 1:2:9 (esquerda) para verificação da existência de fissuras visíveis a olho nú durante o período de cura.

A mistura das argamassas foi feita com o auxílio de uma argamassadeira elétrica. Quanto à sua aplicação, os corpos-de-prova foram enfileirados e rodeados por fôrmas de madeira que possuíam a altura final desejada para a amostra. Após a aplicação da argamassa, esperou-se que a mesma atingisse um nível de rigidez suficiente para não sofrer danos, nem

tivesse alteração na altura final durante a separação dos corpos-de-prova com auxílio do fio de nylon. A Figura 3.8 mostra o processo de preparação e aplicação da argamassa e, logo em seguida, o corpo-de-prova finalizado.

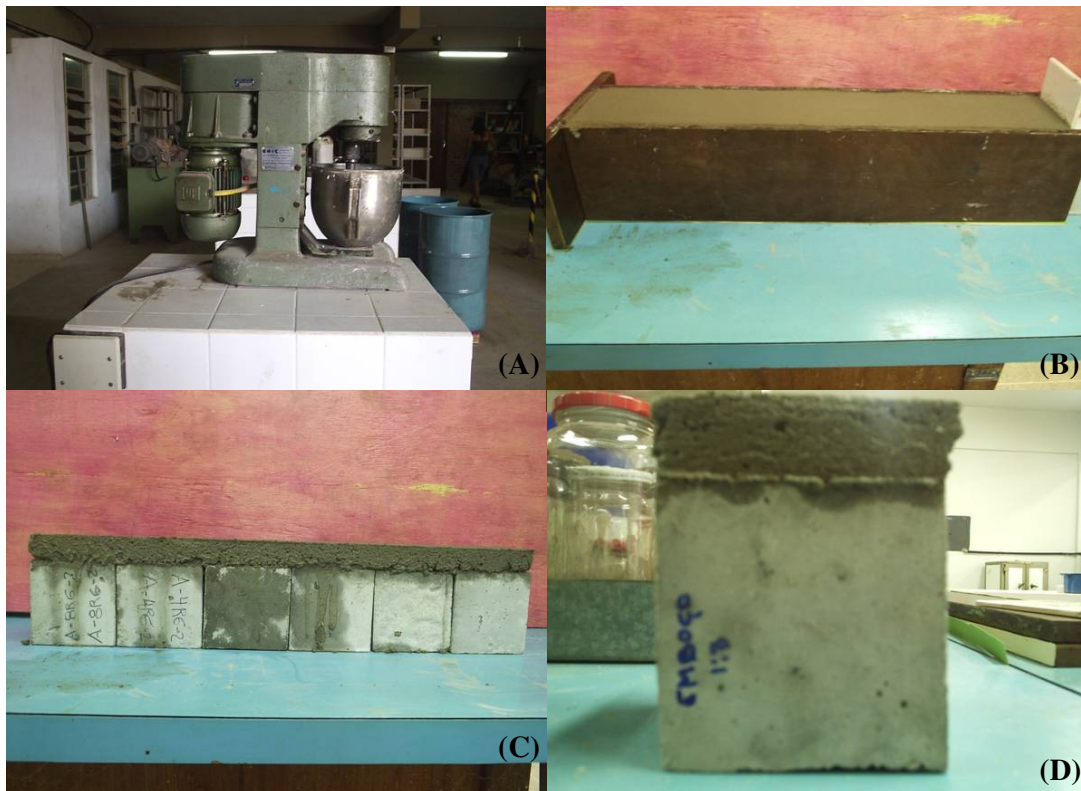


Figura 3.8 - Resumo do processo de preparação e aplicação do revestimento de argamassa:
(A) Argamassadeira utilizada na preparação da argamassa (B) Fôrmas utilizadas para aplicação da argamassa (C) Corpos-de-prova enfileirados para corte (D) Corpo-de-prova revestido com argamassa.

Vencido o período de cura da argamassa, todas as faces de cada corpo-de-prova foram isoladas com pintura bi-componente de base epóxi (Figura 3.9), exceto aquela através da qual pretendia-se que houvesse o ingresso de cloretos. Para que os corpos-de-prova estivessem prontos para o início dos ensaios acelerados, foi necessário esperar um período de 2 dias após a aplicação da pintura.



Figura 3.9 - Pintura epóxi aplicada nos corpos-de-prova.

Para que se tenha um melhor entendimento da preparação dos corpos-de-prova, a Figura 3.10 ilustra a ordem das etapas seguidas e os períodos de espera envolvidos.

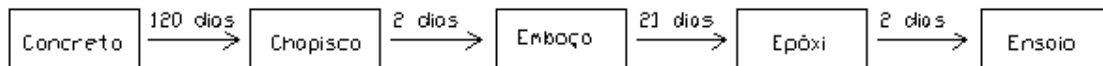


Figura 3.10 - Etapas e intervalos de tempo envolvidos no processo de preparação dos corpo-de-prova.

Além dos corpos-de-prova do tipo concreto-revestimento, foram moldados corpos-de-prova de referência em concreto. Estes corpos-de-prova tiveram como objetivo permitir comparações com o sistema duplo estudado. Eles foram submetidos aos mesmos ensaios acelerados que os corpos-de-prova revestidos e obedeceram aos mesmos tempos de espera.

Somando-se os corpos-de-prova revestidos, os de referência e os utilizados para ensaios de caracterização chegou-se a uma quantidade total de 114 corpos-de-prova moldados durante a pesquisa.

3.2.3 Ensaios Acelerados

Nessa pesquisa trabalhou-se com dois tipos de ensaios acelerados: difusão e imersão e secagem. O ensaio de difusão foi escolhido por ser considerado um ensaio clássico e por ser amplamente utilizado no estudo da previsão do ingresso de cloretos. Trabalhos como os de Castellote *et al.*, 2001, Nugue *et al.*, 2004 e Oh e Jang, 2007, consolidam esta afirmação. A

escolha do ensaio de imersão e secagem por sua vez, levou em conta a busca de uma maior aproximação com a realidade, a aceleração no ingresso dos íons cloreto e o uso regular deste ensaio em pesquisas envolvendo cloretos.

A fim de definir o tempo de exposição e a concentração da solução utilizada nesses ensaios foram realizados testes preliminares. Estes testes foram realizados em corpos-de-prova nas dimensões 4x4x16cm, para as quatro dosagens de argamassa. Esses corpos-de-prova foram submetidos, durante 20 dias, a ensaios de difusão em soluções de NaCl com concentrações, 0,5M e 1,0M. Passado um período de 20 dias, os corpos-de-prova foram retirados de ensaio e, em seguida, foram extraídas amostras a diversas profundidades para obtenção, e posterior análise, de perfis de cloretos.

Com base nos ensaios preliminares e em ensaios realizados por outros autores em argamassa e concreto (Tabela 3.7), considerando as variáveis tempo de exposição, concentração das soluções e materiais envolvidos, procurou-se chegar a uma opção que atendesse essas diferentes realidades, sem comprometer as análises propostas.

Tabela 3.7 - Diferentes condições de exposição envolvendo argamassa e concreto.

Autor	Concentração da solução	Período máximo de exposição a solução	Material ensaiado
Khatib e Mangat (2002)	175 g/l NaCl	365 dias	concreto
Nielsen e Geiker (2003)	3% NaCl	30 dias	argamassa
Cerný <i>et al.</i> (2004)	0,3M NaCl	7 dias	argamassa
Wang <i>et al.</i> (2005)	1 mole/l NaCl	100 dias	pasta de cimento

Com base nestes referenciais bibliográficos e nos resultados do ensaio preliminar descrito acima, optou-se por fixar um período de 49 dias, e solução de NaCl (1M), para os ensaios em questão.

A fim de sintetizar as variáveis envolvidas na pesquisa, a Figura 3.11 resume a utilização das dosagens, espessuras e ensaios escolhidos e mostra as combinações realizadas com essas variáveis.

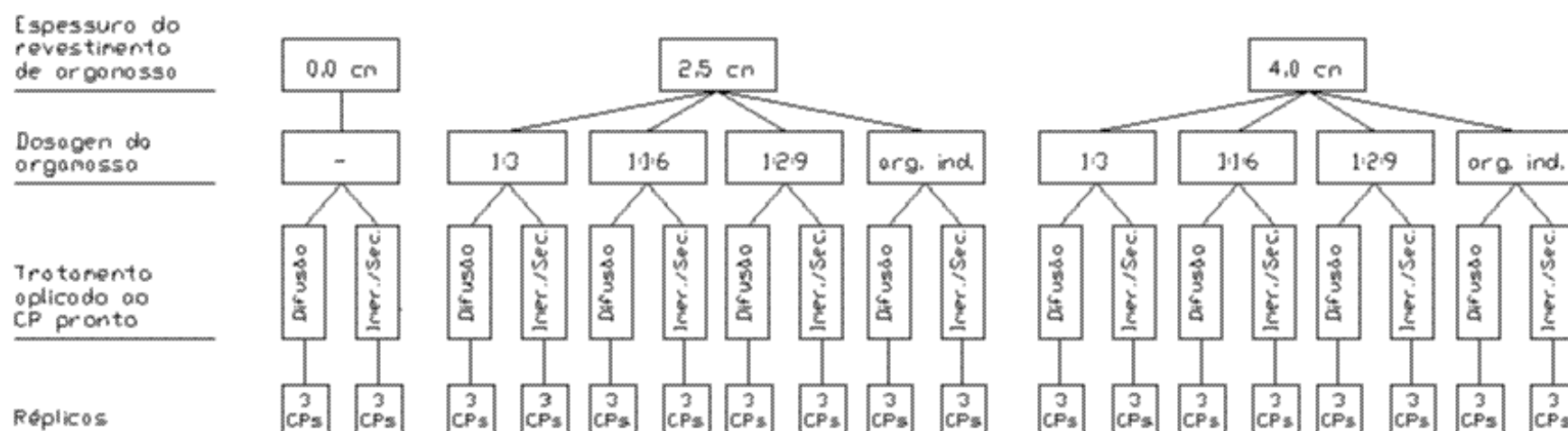


Figura 3.11 - Combinações entre as variáveis envolvidas na pesquisa.

3.2.3.1 Ensaio em ciclos de imersão e secagem

Os ensaios de imersão e secagem funcionaram através de ciclos semanais que aconteceram da seguinte maneira: nos primeiros três dias do ciclo, os corpos-de-prova estiveram em imersão e nos quatro dias seguintes, estiveram em secagem em ambiente de laboratório, temperatura média de aproximadamente 26°C e umidade relativa média de aproximadamente 68%. A Figura 3.12 ilustra esta idéia.

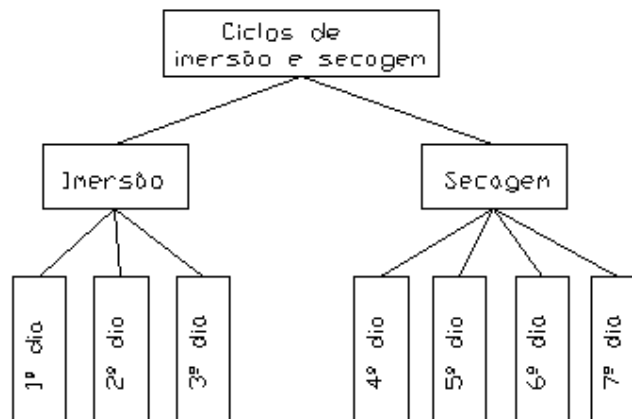


Figura 3.12 - Funcionamento dos ciclos de imersão e secagem.

Na Figura 3.13, verifica-se o acondicionamento dos recipientes e a secagem dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório.



Figura 3.13 - Acondicionamento dos recipientes destinados à imersão (esquerda) e corpos-de-prova em secagem em ambiente de laboratório (direita).

É válido ressaltar que, tanto para o ensaio de imersão e secagem quanto para o ensaio de difusão (seção 3.2.3.2), que foram realizados paralelamente, tomou-se o cuidado de manter

os recipientes sempre fechados a fim de evitar evaporação da água e o conseqüente aumento na concentração de cloretos nas soluções.

3.2.3.2 Ensaio de difusão

Os ensaios de difusão consistiram em imergir os corpos-de-prova em uma solução com determinada concentração de cloretos (1M), por um espaço de tempo pré-definido (49 dias), a fim de que, por diferença de concentração, houvesse um movimento de íons cloreto para o interior do corpo-de-prova. A Figura 3.14 mostra alguns corpos-de-prova em ensaio e as condições nas quais o ensaio foi realizado.



Figura 3.14 - Corpos-de-prova durante o ensaio acelerado de difusão (esquerda) e condições de realização deste ensaio (direita).

3.2.4 Retirada das Amostras

Terminado o período de exposição, os corpos-de-prova foram retirados de ensaio e, em seguida, as amostras puderam ser extraídas. A extração das amostras se deu de forma similar tanto para os corpos-de-prova em sistema duplo (revestidos) quanto para os de referência. A única diferença consistiu na profundidade alcançada na retirada das amostras.

Todas as amostras foram extraídas no sentido superfície-interior. Para os corpos-de-prova de referência em concreto, as amostras foram extraídas a cada 0,5 cm, atingindo-se a profundidade de 2,5 cm e resultando num total de 5 amostras.

A extração de amostras nos corpos-de-prova em sistema duplo sofreu um refinamento. Houve uma redução da espessura de corte próximo à interface argamassa-concreto. Seus cortes penetraram até 2,5 cm no interior do concreto e tiveram espessura inicial e final de 0,5 cm. No entanto, dois cortes antes e dois cortes depois da interface tiveram a espessura de 0,25 cm. Este refinamento teve por objetivo estudar mais detalhadamente o comportamento do transporte de cloretos na região de interface estudada. Desta forma, para os corpos-de-prova com revestimento de 2,5 cm, foram geradas 12 amostras e, para aqueles com revestimento de 4,0 cm foram geradas 15 amostras. A Figura 3.15 mostra a distribuição dos cortes em cada tipo de corpo-de-prova empregado.

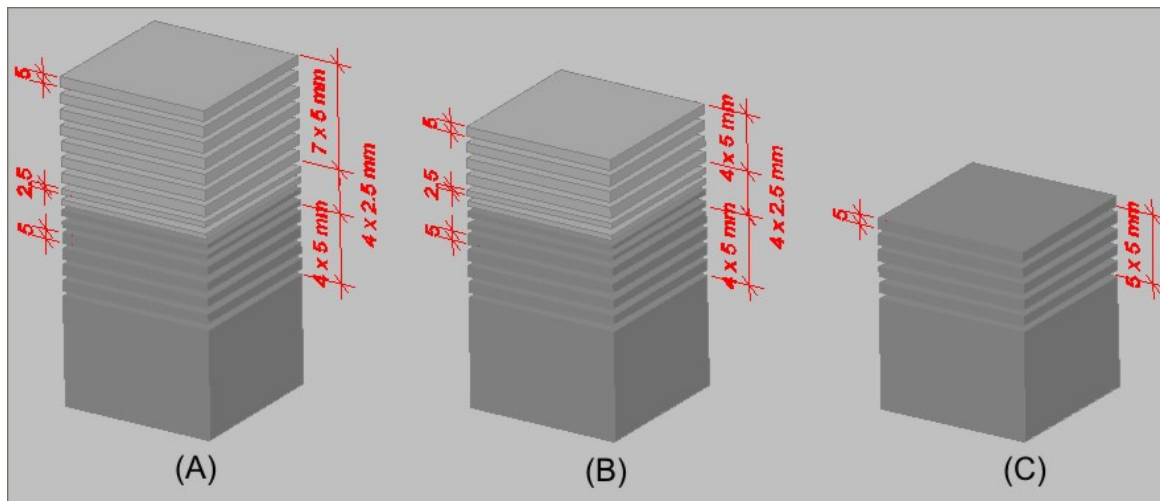


Figura 3.15 - Esquema da distribuição dos cortes: (A) Sistema duplo com 4,0cm de revestimento (B) Sistema duplo com 2,5cm de revestimento (C) Referência em concreto.

A extração das amostras se deu através de uma máquina de corte, onde as amostras foram pulverizadas. Em seguida, as amostras foram guardadas em recipientes identificados de acordo com a espessura do revestimento, a dosagem da argamassa, o tipo de ensaio acelerado a que foi submetido, o número do corpo-de-prova e a profundidade da amostra obtida. A Figura 3.16 resume este processo.

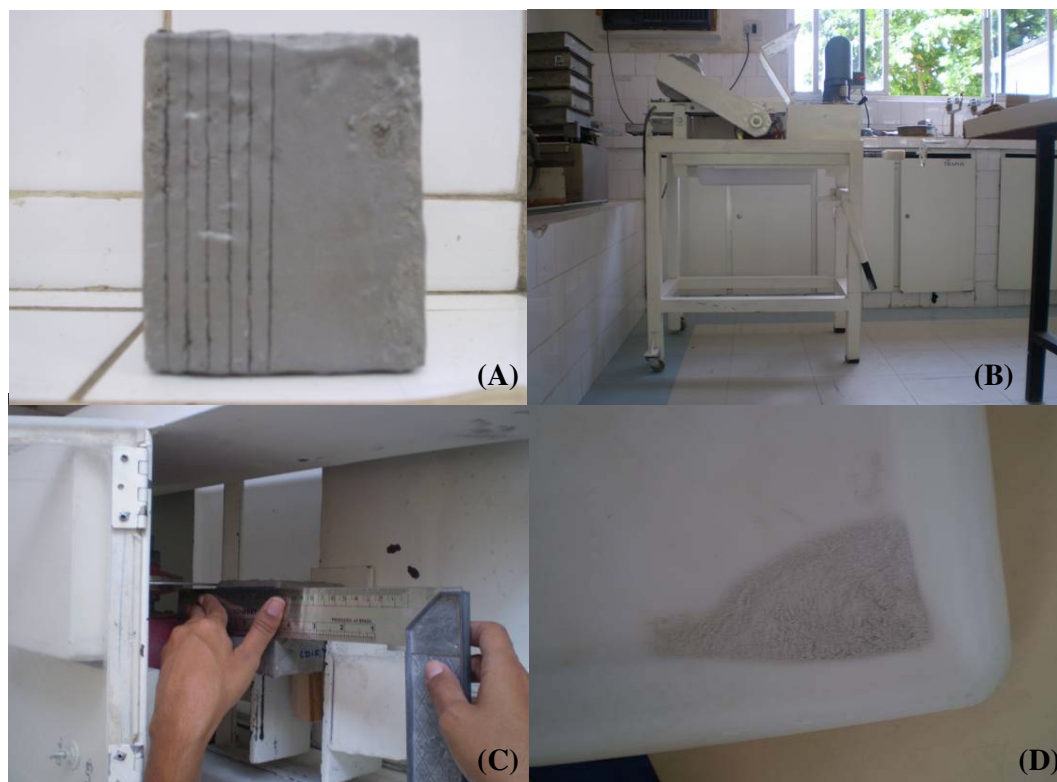


Figura 3.16 - Resumo do processo de extração da amostra: (A) Espessuras dos cortes marcadas em corpo-de-prova de referência (B) Máquina com policorte adaptada (C) Alinhamento do corpo-de-prova (D) Amostra destinada à análise química.

3.2.5 Determinação do Teor de Cloretos Totais

Uma vez que os cloretos combinados, por razões já discutidas, podem se tornar livres e, conseqüentemente, potencialmente agressivos para as estruturas de concreto armado, optou-se por determinar os cloretos totais em detrimento aos cloretos livres.

A técnica utilizada para determinação do teor de cloretos foi a titulação potenciométrica. Este tipo de titulação foi escolhido, principalmente, por ser adequada para baixos teores de cloreto e por não depender da acuidade visual do operador para determinar-se o ponto de equivalência (PEREIRA e CINCOTTO, 2001). Tendo em vista essas vantagens, utilizou-se o procedimento normalizado, ASTM C1152 (ASTM,1994), para determinação do teor de cloretos totais em cada uma das amostras preparadas. Cada resultado foi referenciado em relação à massa da amostra.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes à pesquisa de campo e ao programa experimental apresentado no capítulo anterior. Os dados obtidos com a pesquisa de campo, a caracterização dos materiais envolvidos na etapa laboratorial da pesquisa e, finalmente, os perfis de concentração de cloretos são aqui apresentados.

4.1 PESQUISA DE CAMPO

De posse dos questionários aplicados em obra, de acordo com o exposto no item 3.1, pode-se observar algumas tendências mostradas nos itens 4.1.1 ao 4.1.5.

4.1.1 Material Empregado na Aplicação do Revestimento Externo

Quanto ao material utilizado na aplicação do revestimento externo, 100% das obras empregavam a placa cerâmica com utilização de argamassa colante. A justificativa para a utilização dessa estrutura, segundo a maioria dos entrevistados, foi a praticidade proporcionada por este tipo de argamassa. Este resultado consolida a afirmação de Maranhão (2007) de que *“as argamassas colantes são bastante utilizadas em todo o Brasil para o assentamento de placas cerâmicas em área de fachadas”* e mostra que João Pessoa não foge à regra.

Tendo em vista o intenso uso dessa argamassa nas obras correntes, indagou-se sobre o tipo de argamassa colante utilizado e constatou-se que a grande maioria dos entrevistados utiliza, no revestimento externo de suas edificações, a argamassa colante tipo

ACII, recomendada para revestimentos de pisos, paredes internas e externas, segundo NBR 14081 (ABNT, 2005). Apenas 8% usam argamassa do tipo ACIII, argamassa que apresenta aderência superior em relação às argamassas do tipo I e II, segundo a mesma norma (Figura 4.1).

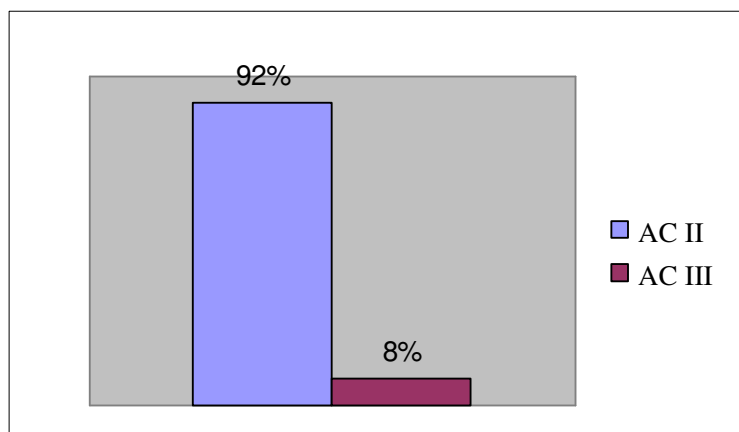


Figura 4.1 - Tipos de argamassa colante utilizadas nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

4.1.2 Preparação do Substrato

Quando se fala em revestimento externo, o substrato envolvido geralmente se trata de um substrato em alvenaria ou em concreto armado. Quando o substrato é a alvenaria, constatou-se que não há tratamento antes da aplicação do chapisco. Quando o substrato em questão é o concreto armado, observou-se que a lavagem é o tratamento mais utilizado antes da aplicação do chapisco (Figura 4.2), embora a escovação manual também tenha um bom percentual de aplicação.

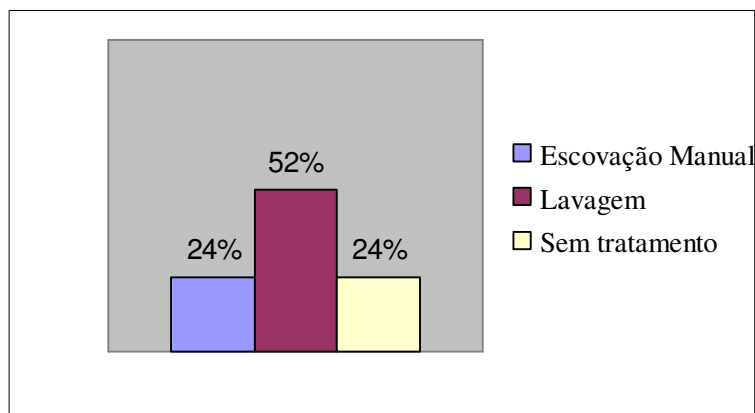


Figura 4.2 - Tratamentos aplicados ao substrato (concreto armado) antes do início do revestimento externo nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

4.1.3 Chapisco

O chapisco utilizado nas obras pesquisadas tem a aplicação manual (convencional) como a técnica de maior utilização (Figura 4.3), apesar do alto índice de desperdício embutido nessa técnica. A técnica de aplicação do chapisco com rolo foi observada em apenas uma empresa.

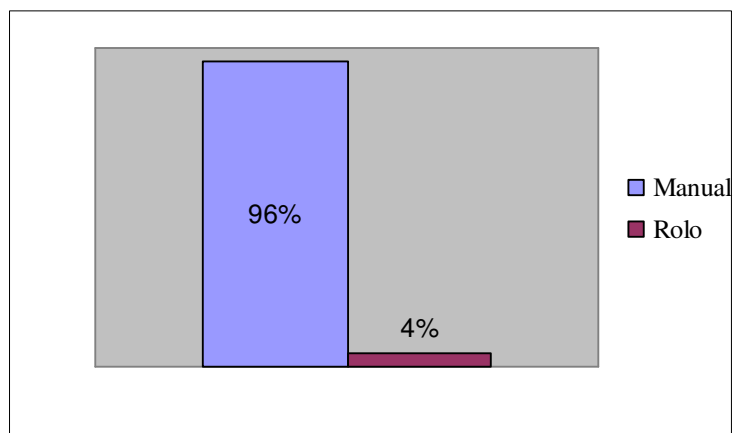


Figura 4.3 - Técnicas utilizadas para aplicação do chapisco nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

A dosagem utilizada no chapisco teve leve variação, podendo-se observar, na Figura 4.4, uma forte tendência para dosagens mais ricas, como é o caso da 1:3. Vale ressaltar que a quantidade de água utilizada não é quantificada e está diretamente relacionada à consistência ideal para sua aplicação, de acordo com o operário.

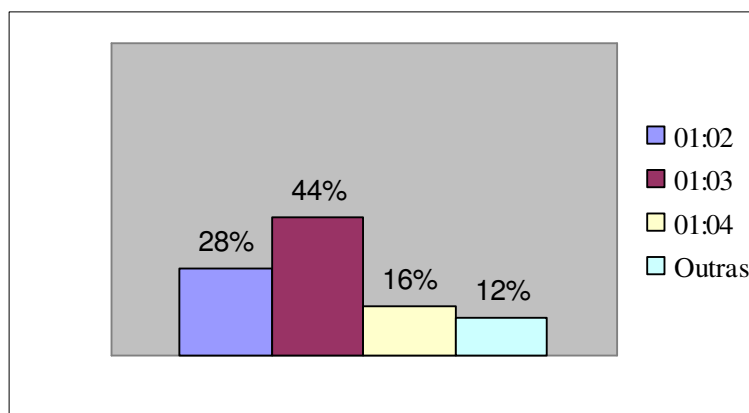


Figura 4.4 - Dosagens utilizadas no chapisco das obras estudadas na cidade de João Pessoa.

Observou-se, também, que a grande maioria das obras em estudo (84%) fez uso de aditivo adesivo, ou seja, aditivos cuja principal característica é aumentar a aderência do chapisco. Segundo os entrevistados, a quantidade de aditivo utilizada estava sempre de acordo com as especificações do fabricante. Dentre as obras que usavam aditivos, observou-se a utilização de cola branca em uma delas, sugerindo que este tipo de cola tenha a mesma função do aditivo industrializado.

4.1.4 Emboço

Neste item, identificou-se a aplicação 100% manual do emboço nas obras estudadas. Este dado mostra uma tendência bastante tradicionalista, que deixa de lado métodos mais avançados como, por exemplo, o método da “canequinha” (projeção mecânica da argamassa), já utilizado principalmente no sudeste do país. Segundo Crescencio *et al.* (2000) “*ainda existem dificuldades para implementação da projeção mecânica, principalmente devido à falta de tecnologia de produção nos canteiros de obra e visão sistêmica do processo*”. Também é importante enfatizar que Gonçalves e Bauer (2005) demonstraram que o lançamento manual de argamassa gera grandes variabilidades na resistência de aderência.

Com relação à dosagem utilizada no emboço, verificou-se uma imensa variedade, o que impossibilita definir uma tendência. Observa-se, mais uma vez, que o tradicionalismo pode ser uma das justificativas para o uso maciço de argamassa dosada em obra em detrimento da argamassa industrializada (Figura 4.5), a qual é utilizada em grande parte do mundo. A questão econômica é outro fator que pode ser levado em consideração neste caso.

Na região estudada, utilizam-se, em maior escala, argamassas com cimento, cal e areia, seguidas das argamassas com cimento, aditivo e areia e ainda a argamassa industrializada. Estas dosagens podem ser observadas na Tabela 4.1.

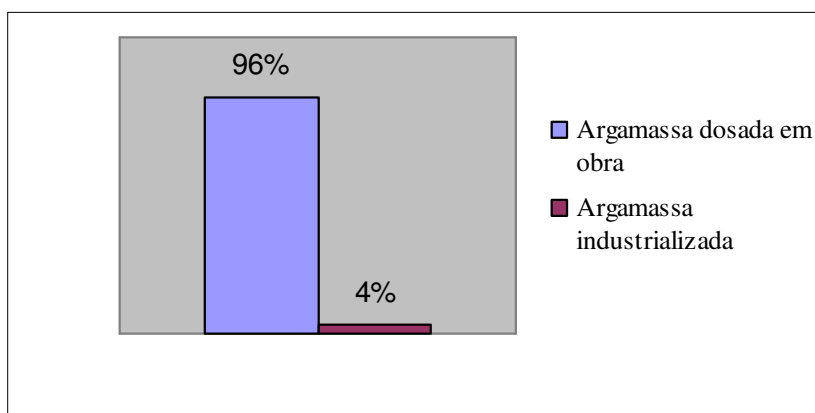


Figura 4.5 - Preparação das argamassas de emboço nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

Tabela 4.1 - Dosagens utilizadas nas argamassas de revestimento externo das obras estudadas na cidade de João Pessoa.

<i>Dosagem - sem aditivo</i> (em volume)	<i>Dosagem - com uso de algum tipo de aditivo</i> (em volume)
1:2:4	1:3
1:1:4	1:4 ½
1:1:7	1:6
1:1:6	1:7
1:1:9	1:7 ½
1:1:12	1:8
1:1/2: 3	1:9
1:2:3	-
1:2:8	-

A análise visual durante a aplicação do questionário permitiu constatar que a espessura do emboço pode ser bem variável. Esta variação pode estar ligada ao controle de qualidade da obra. De acordo com a pesquisa, foram atingidas espessuras mais elevadas, com uma forte tendência de espessuras entre 3 e 4 cm, como mostra a Figura 4.6.

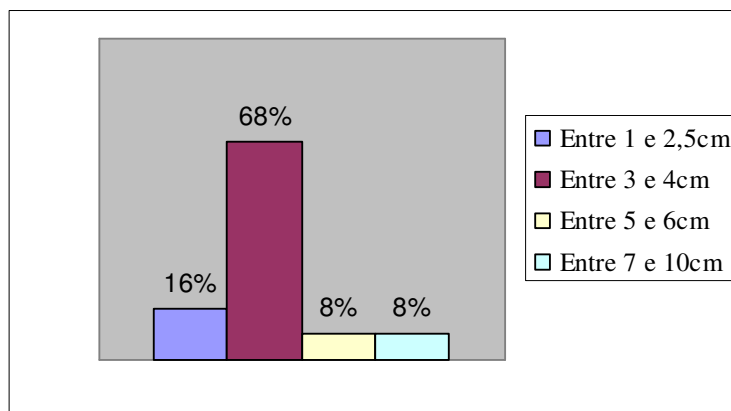


Figura 4.6 - Espessuras médias utilizadas no emboço dos revestimentos externos nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

4.1.5 Período de Espera entre Etapas do Revestimento

O período de espera entre as fases que compõem o revestimento externo das edificações em estudo mostrou-se, na maioria dos casos, superior aos exigidos pelas normas vigentes. Segundo a NBR 7200 (ABNT, 1998), os períodos mínimos de espera entre as etapas devem ser de 28 dias entre o concreto e o chapisco, 2 a 3 dias entre o chapisco e o emboço e 7 a 21 dias entre o emboço e o revestimento. A Figura 4.7 mostra de que forma isso acontece na região estudada.

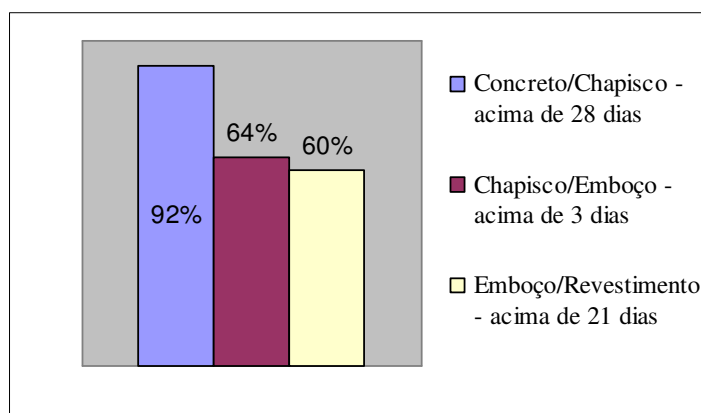


Figura 4.7 - Períodos de espera entre as etapas do revestimento externo nas obras estudadas na cidade de João Pessoa.

4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS LABORATORIAIS

4.2.1 Caracterização dos Materiais

As características mais relevantes dos materiais empregados na preparação da argamassa e do concreto, bem como da própria argamassa e do concreto, são relatadas nesta seção do trabalho.

4.2.1.1 Insumos para argamassa e concreto

a) Água

A titulação potenciométrica foi o método utilizado para determinar o teor de cloretos existente na água utilizada em laboratório. Tal análise mostrou que a água em estudo apresentou 1,075 mg/l de Cl^- em sua composição. Este valor pode ser elevado quando comparado ao valor de referência obtido através das contas mensais de água enviadas aos moradores da cidade de João Pessoa. Contudo, ainda é irrelevante dentro das questões tratadas no escopo desta pesquisa. Esta afirmação encontra base quando, segundo Cascudo (1997), sabe-se que a antiga NBR 6118 fixava o máximo de teor de Cl^- em 500 mg/l.

b) Agregados miúdo e graúdo

As características físicas dos agregados, bem como suas curvas granulométricas e os resultados dos ensaios relativos a impurezas e contaminações são apresentados no Anexo A.

c) Cal

A caracterização físico-química da cal utilizada durante a preparação das argamassas encontra-se disposta na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características físicas e químicas da cal.

<i>Características</i>	<i>Propriedade determinada</i>	<i>Resultado</i>
<i>físicas</i>	Massa unitária	0,416 kg/dm ³
	Massa Específica	2,417 g/cm ³
Características químicas	Perda ao Rubro (Pr)	27,49 %
	Óxido de Silício (SiO ₂)	0,44 %
	Resíduo Insolúvel (RI)	0,12 %
	Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,08 %
	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	traços
	Óxido de Cálcio (CaO)	67,76 %
	Óxido de Magnésio (MgO)	2,82 %
	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,18 %
	Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,05 %

d) Cimento

O cimento escolhido para pesquisa foi o CP V ARI. Esta escolha está relacionada, principalmente, ao baixo nível de adições encontrado neste produto, evitando-se o efeito complementar de adições pozonolânicas, nas análises realizadas. O cimento foi cedido pela fábrica MIZU, em Sergipe, e suas características físicas e químicas podem ser observadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características físico-químicas do cimento.

<i>Propriedade determinada</i>		<i>Resultado</i>
Características físicas	Massa Específica	3,09 g/cm ³
	Área Específica Blaine	4815 cm ² /g
	Finura – resíduo na peneira #200	1,84 %
	Tempo de Pega	Início 2h 14 min
		Fim 3h 44 min
	Resistência à Compressão	3 dias (MPa) 22,50
		7 dias (MPa) 34,94
		28 dias (MPa) 42,56
	Perda ao Rubro (Pr)	2,65 %
	Óxido de Silício (SiO ₂)	20,06 %
Características químicas	Resíduo Insolúvel (RI)	0,46 %
	Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,18 %
	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	5,99 %
	Óxido de Cálcio (CaO)	60,48 %
	Óxido de Magnésio (MgO)	3,82 %
	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,94 %
	Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,09 %
	Silicato dicálcio (C ₂ S)	19,49%
	Silicato tricálcio (C ₃ S)	50,40%
	Aluminato tricálcio (C ₃ A)	12,18%
	Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	6,63%

4.2.1.2 Argamassas

Os parâmetros de dosagem relacionados às argamassas dosadas em laboratório encontram-se definidos na Tabela 4.4. A partir deste ponto, estas argamassas serão referenciadas de acordo com seu traço unitário em volume.

Tabela 4.4 - Parâmetros de dosagem das argamassas dosadas em laboratório.

<i>Traço em volume</i> (cimento: cal: areia)	<i>Traço em massa</i> (cimento: cal: areia)
1:3	1: 0: 3,53
1:1:6	1: 0,30: 7,05
1:2:9	1: 0,59: 10,58

Todas as argamassas foram caracterizadas em seu estado fresco. As propriedades de maior relevância para este estudo podem ser visualizadas na Tabela 4.5. Com relação aos valores obtidos para essas características, vale a pena destacar o alto teor de ar incorporado presente na argamassa industrializada, quando comparado com as argamassas dosadas em laboratório, e o crescimento da relação água/aglomerante à medida que a argamassa reduz o teor de cimento. Ainda é válido lembrar que a quantidade de água empregada na argamassa industrializada está de acordo com as indicações do fabricante. Para essa argamassa determinou-se uma massa específica de 2,512 g/cm³.

Tabela 4.5 - Caracterização das argamassas no estado fresco.

<i>Argamassa</i>	<i>Relação</i> <i>água/aglomerante</i> (em massa)	<i>Índice de</i> <i>consistência</i> (mm)	<i>Densidade de</i> <i>massa (kg/cm³)</i>	<i>Ar incorporado</i> (%)
1:3	0,6	262	2,21	2
1:1:6	0,83	264	2,17	2
1:2:9	1,11	262	2,13	4
Argamassa industrializada	----	242	1,71	19

As características físicas das argamassas no estado endurecido podem ser observadas na Tabela 4.6. Os resultados obtidos para resistência à compressão mostram uma argamassa mais resistente a medida que existe uma maior quantidade de cimento em sua composição. O aumento na resistência também possui relação com a densidade de massa aparente. Observa-se que, quanto maior essa densidade, maior é a resistência à compressão.

Tabela 4.6 - Caracterização física das argamassas endurecidas.

<i>Argamassa</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	<i>Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)</i>
1:3	23,59	2053,48
1:1:6	11,82	1976,87
1:2:9	5,65	1913,58
Argamassa industrializada	3,41	1508,95

Os ensaios de absorção total e capilar das argamassas foram realizados seguindo as mesmas normas aplicadas para o concreto. No entanto, para as argamassas, devido a restrição de tempo, adotou-se um intervalo de 28 dias entre a moldagem do corpo-de-prova e a realização do ensaio. Os resultados relativos ao ensaio de absorção total podem ser vistos na Tabela 4.7, porém, por terem sido considerados inconclusivos, os resultados referentes ao ensaio de absorção capilar não são apresentadas no corpo do trabalho.

Tabela 4.7 - Resultados relativos ao ensaio de absorção total das argamassas.

<i>Absorção total</i>				
Dosagem	1:3	1:1:6	1:2:9	Argamassa industrializada
Absorção após saturação em água (%)	8,24	10,40	11,33	17,88
Índice de vazios após saturação em água (%)	18,19	22,13	23,72	33,59
Massa específica da amostra seca (g/cm³)	2,21	2,13	2,09	1,88
Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	2,39	2,35	2,33	2,22
Massa específica real (g/cm³)	2,70	2,73	2,74	2,83

Fazendo uma análise conjunta entre os dados obtidos nas Tabelas 4.6 e 4.7, observa-se que a argamassa 1:3, por ser a argamassa menos porosa, é a que apresenta melhor resistência à compressão. Situação que se inverte no sentido da argamassa 1:2:9 e da argamassa industrializada, por apresentarem elevada porosidade.

4.2.1.3 Concreto

O concreto empregado, com suas características de dosagem, propriedades no estado fresco e no estado endurecido são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dosagem e características do concreto no estado fresco e endurecido.

Tipo de cimento	CP V ARI
Relação água/cimento	0,55
Dosagem (cimento: areia: pedra)	1: 2,52: 2,41
Consumo de cimento (Kg/m^3)	370
Índice de consistência – Slump test (cm)	7
Resistência à compressão – f_c 28 (Mpa)	30,43
Resistência à tração – f_t 28 (Mpa) – Tração por compressão diametral (Ensaio Brasileiro)	1,97

Os ensaios de absorção se subdividem em absorção total e capilar. Em ambos os casos, os ensaios foram conduzidos com 90 dias de moldagem dos corpos-de-prova, uma vez que, após esse período, as mudanças microestruturais seriam menos influentes em relação ao transporte de massa. A Tabela 4.9 apresenta os resultados desses ensaios.

Tabela 4.9 - Resultados relativos à absorção total e capilar do concreto.

<i>Absorção total</i>	
Absorção após saturação em água (%)	4,86
Índice de vazios após saturação em água (%)	10,95
Massa específica da amostra seca (g/cm^3)	2,25
Massa específica da amostra saturada (g/cm^3)	2,36
Massa específica real (g/cm^3)	2,53
<i>Absorção capilar</i>	
Absorção de água por capilaridade (g/cm^2)	1,43

4.2.2 Ensaios de Difusão

O ensaio de difusão foi aplicado aos corpos-de-prova de referência e aos corpos-de-prova de sistema duplo (argamassa-concreto). Os perfis de cloretos obtidos com este ensaio são mostrados nos itens a seguir. Considerando-se as diferenças na composição dos materiais empregados, optou-se por expressar os resultados em percentuais relativos à massa das amostras.

4.2.2.1 Corpos-de-prova com 2,5cm de espessura de revestimento submetidos ao ensaio de difusão

Os perfis de cloretos obtidos através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova com revestimento de 2,5cm são mostrados nas Figuras de 4.8 a 4.11. Cabe ressaltar que os gráficos a seguir mostram a média e o desvio padrão de cada ponto analisado.

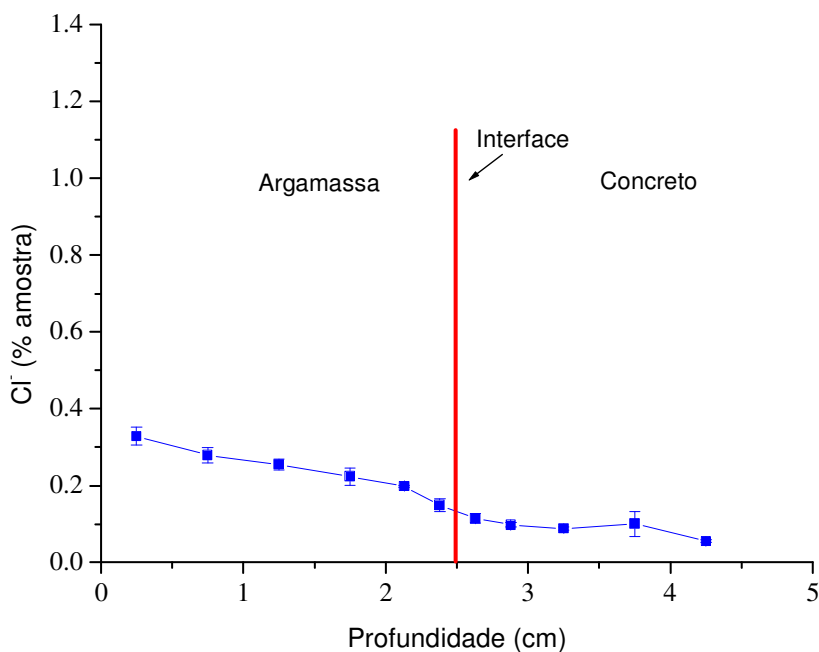


Figura 4.8 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:3 (volume) e com 2,5cm de espessura.

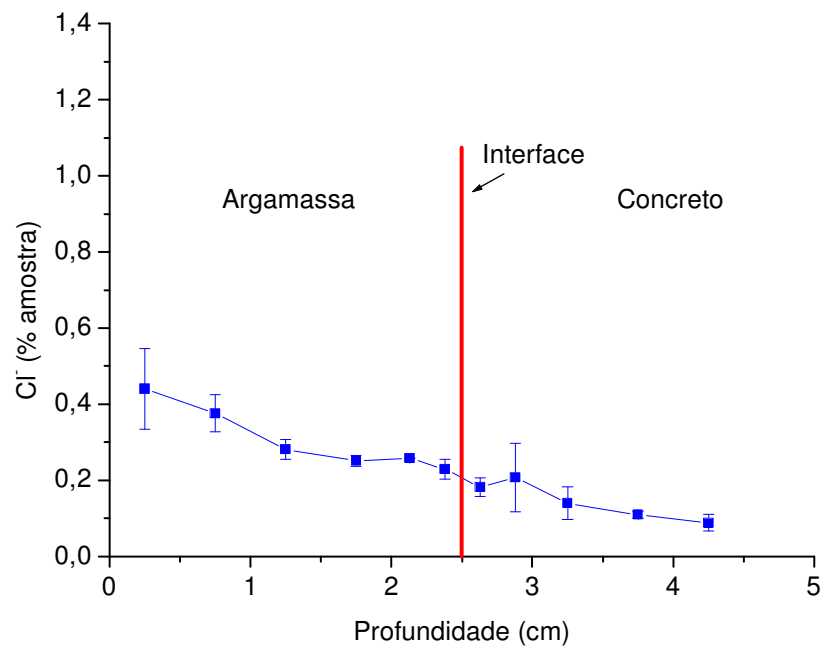


Figura 4.9 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:1:6 (volume) e com 2,5cm de espessura.

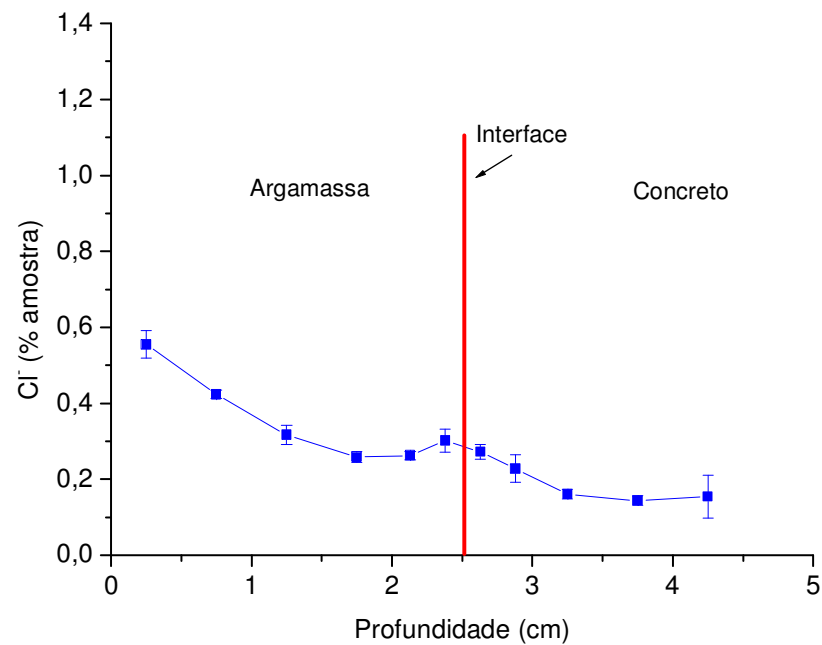


Figura 4.10 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:2:9 (volume) e com 2,5cm de espessura.

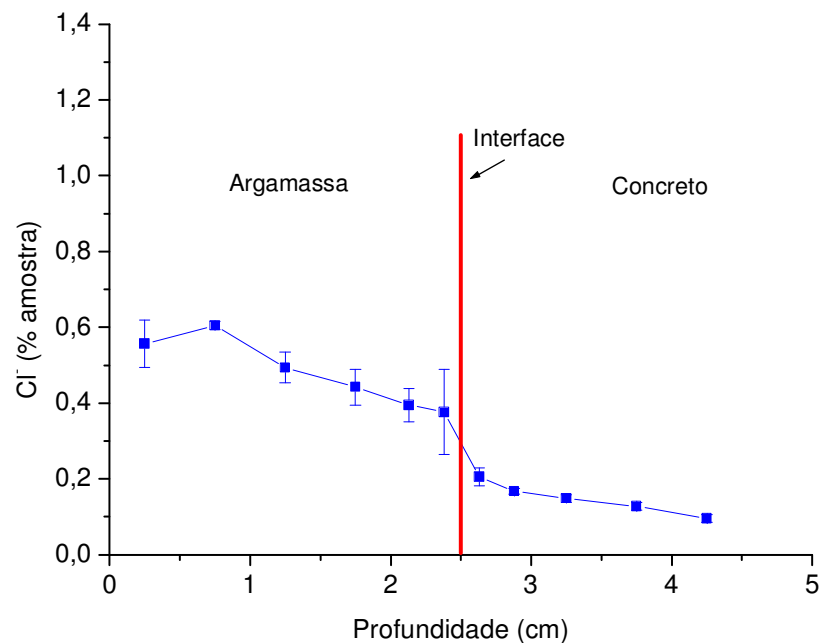


Figura 4.11 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 2,5cm de espessura.

Nos perfis mostrados nas Figuras 4.8-4.11, observa-se, além de um aumento das concentrações de Cl^- com o aumento de porosidade das argamassas, um acúmulo de Cl^- na região imediatamente anterior a interface. Essa tendência de acúmulo pode ser observada através de trechos dos perfis mais horizontais nas proximidades da interface, para as argamassas mais porosas. Observa-se, ainda, uma queda brusca no teor de cloretos imediatamente após a interface, ou seja, na região da superfície do concreto. Tais fatos associados evidenciam a existência de uma resistência à penetração dos íons cloreto no concreto em função das diferenças na capacidade de transporte entre argamassa e concreto. Esta afirmação será melhor discutida no capítulo 5.

4.2.2.2 Corpos-de-prova com 4,0cm de espessura de revestimento submetidos ao ensaio de difusão

Os perfis de cloretos obtidos através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova com revestimento de 4,0cm são mostrados nas Figuras de 4.12 a 4.15.

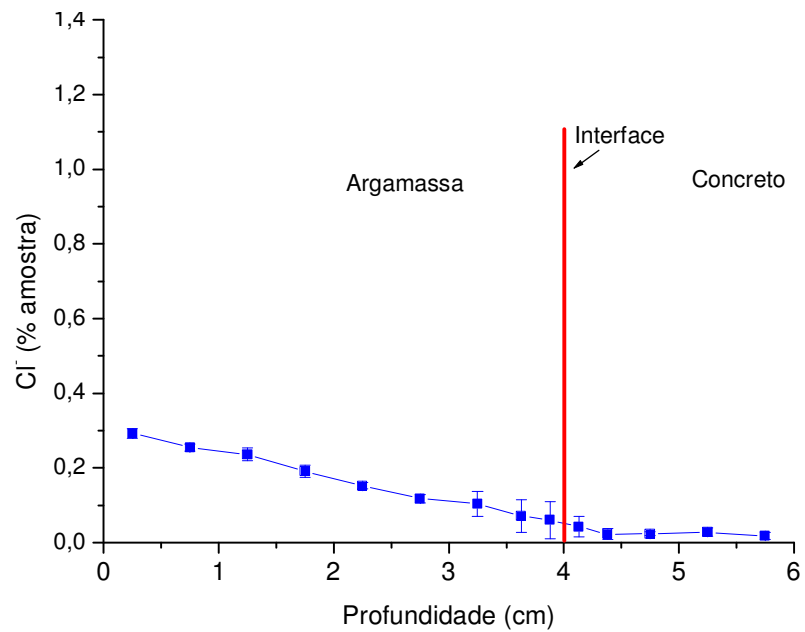


Figura 4.12 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:3 (volume) e com 4,0cm de espessura.

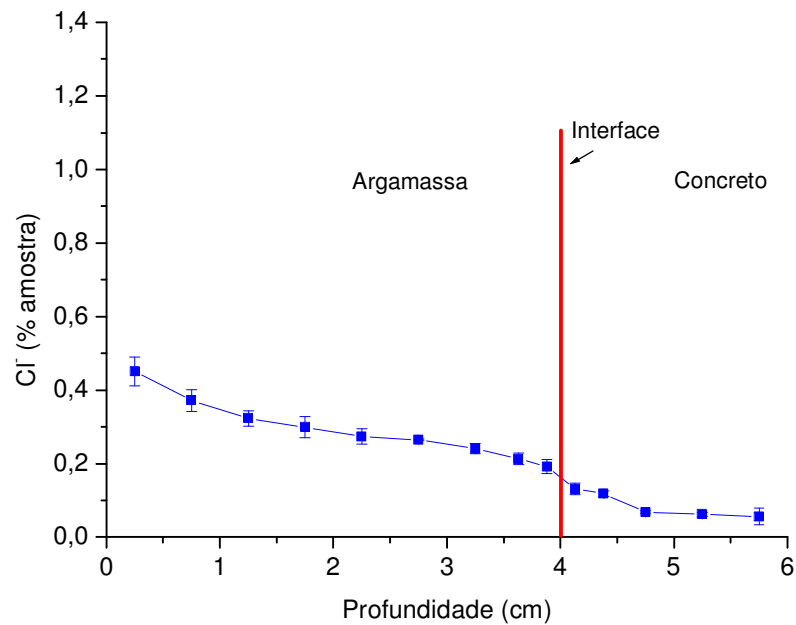


Figura 4.13 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:1:6 (volume) e com 4,0cm de espessura.

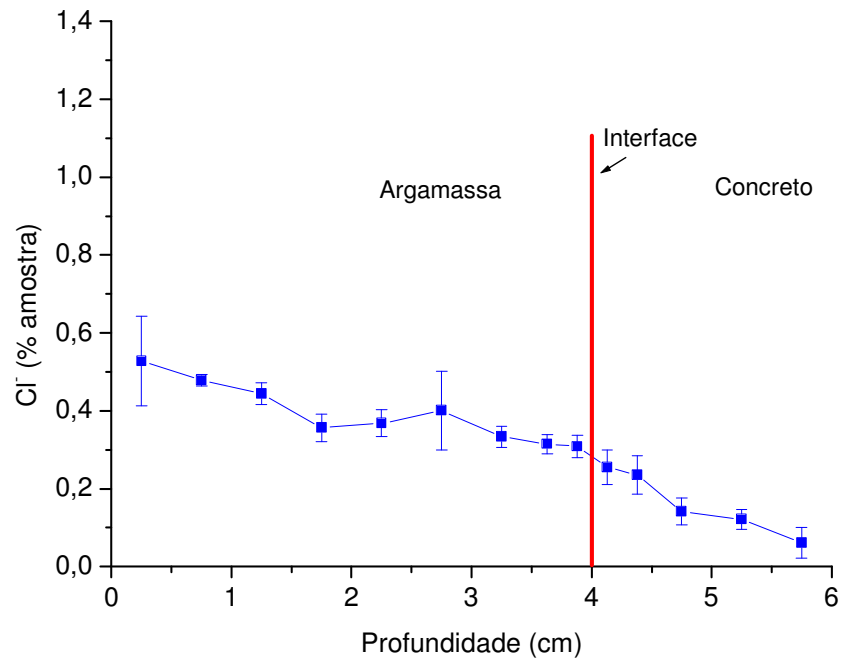


Figura 4.14 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:2:9 (volume) e com 4,0cm de espessura.

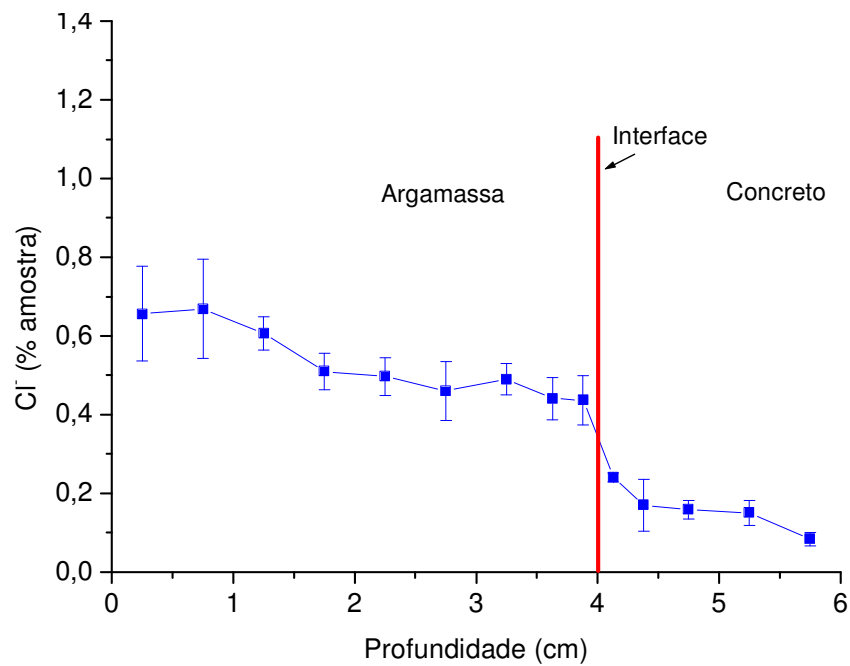


Figura 4.15 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 4,0cm de espessura.

Nos perfis mostrados nas Figuras 4.12-4.15 observa-se um acúmulo de Cl^- na região imediatamente anterior a interface. A queda brusca no teor de cloretos imediatamente após a interface também existe. No entanto, observa-se que, para os perfis com revestimento de 4,0cm, os teores de Cl^- no concreto são menos elevados. Isso é mais visível nos sistemas com argamassas menos porosas e tem a contribuição do maior trajeto de transporte dos íons antes de alcançar o concreto.

4.2.3 Ensaios em Ciclos de Imersão e Secagem

Assim como nos ensaios de difusão, os ensaios em ciclos de imersão e secagem empregaram corpos-de-prova de referência e corpos-de-prova em sistema duplo (argamassa-concreto). Os perfis de cloretos obtidos com este ensaio são mostrados nos itens a seguir.

4.2.3.1 Corpos-de-prova com 2,5cm de espessura de revestimento submetidos aos ciclos de imersão e secagem

Os perfis de cloretos obtidos através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova com revestimento de 2,5cm são mostrados nas Figuras de 4.16 a 4.19.

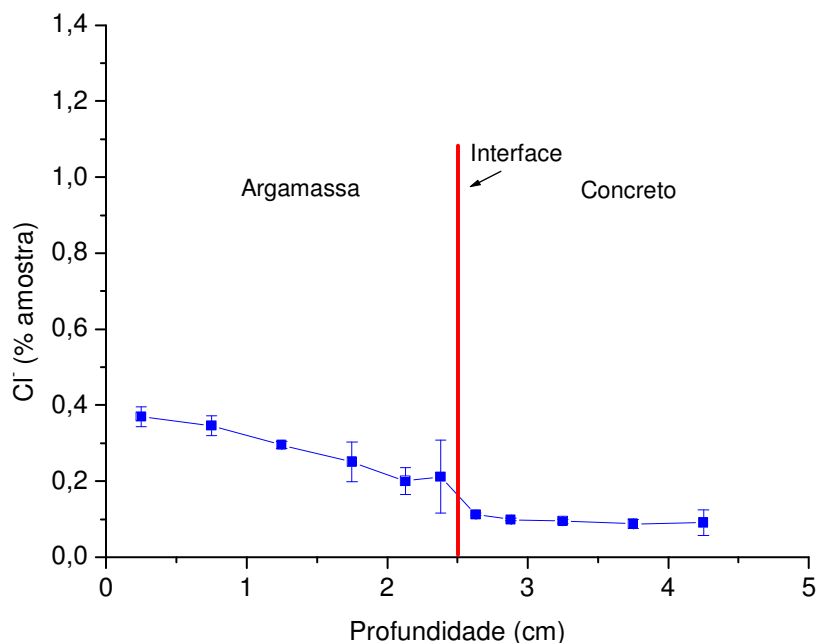


Figura 4.16 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:3 (volume) e com 2,5cm de espessura.

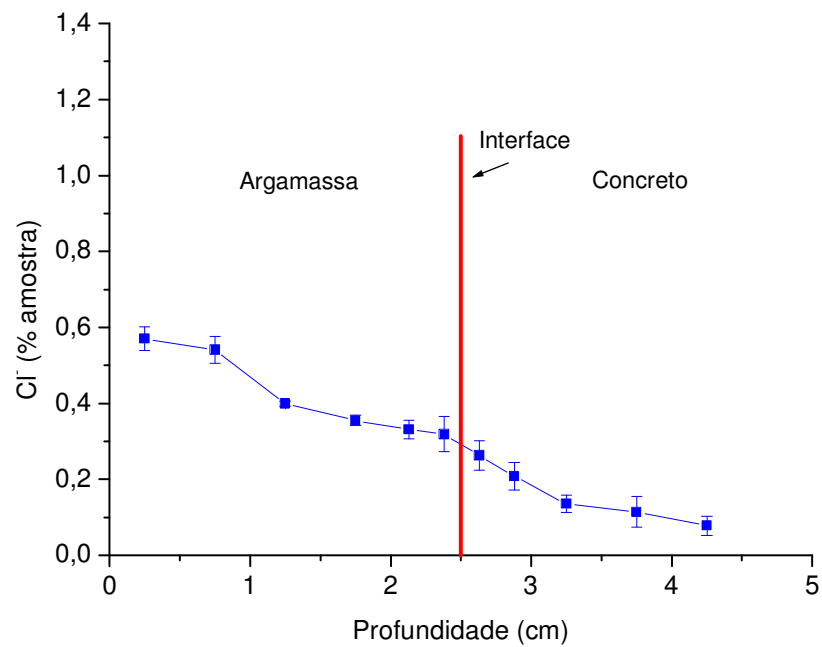


Figura 4.17 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:1:6 (volume) e com 2,5cm de espessura.

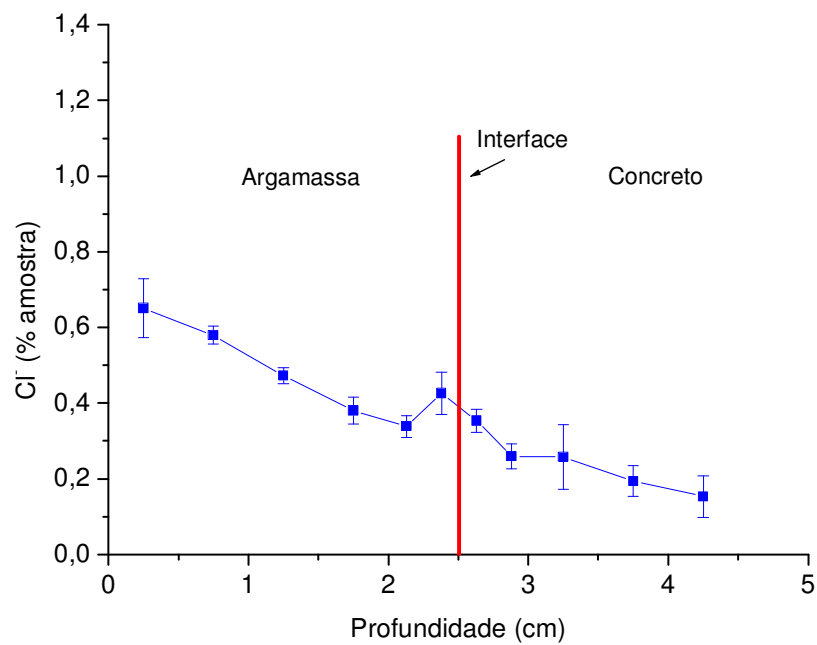


Figura 4.18 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:2:9 (volume) e com 2,5cm de espessura.

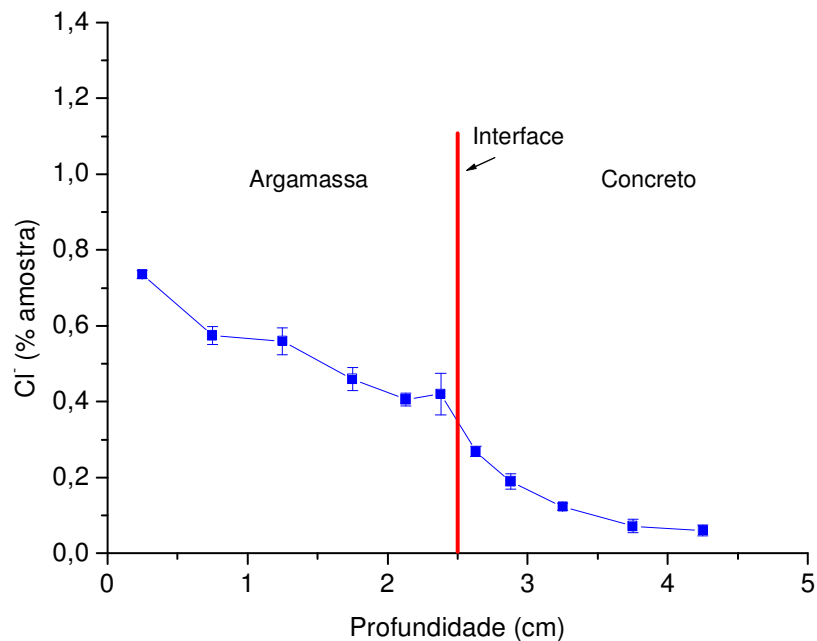


Figura 4.19 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento em argamassa industrializada e com 2,5cm de espessura.

Nos perfis mostrados nas Figuras 4.16-4.19 observa-se uma tendência de formação de picos tênues na região próxima a superfície das argamassas 1:3 e 1:1:6. Tais picos, quando bem definidos, são formações típicas dos ensaios de imersão e secagem. Considerando que tal formação corresponde apenas a uma tendência, que não se repete em todos os perfis, e que a forma interna dos perfis se assemelha aos perfis típicos de difusão, é provável que o transporte por difusão tenha prevalecido também nos ensaios em ciclos de imersão e secagem.

O curto espaço de tempo destinado ao período de secagem, associado a elevada umidade relativa, típica da região, a que os corpos-de-prova foram submetidos durante este período, pode ter conduzido a uma secagem apenas parcial e superficial do material, permanecendo o interior do concreto com umidade suficiente para alimentar o processo de difusão.

A existência de acúmulo de Cl^- na região imediatamente anterior a interface, verificadas nas situações anteriores e a redução no teor de cloretos na região imediatamente após a interface, também é visualizada nos perfis mostrados nesta seção. Um pequeno

aumento nas concentrações de cloreto em relação aos ensaios de difusão também pode ser observado.

4.2.3.2 Corpos-de-prova com 4,0cm de espessura de revestimento submetidos aos ciclos de imersão e secagem

Os perfis de cloretos obtidos através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova com revestimento de 4,0cm são mostrados nas Figuras de 4.20 a 4.23.

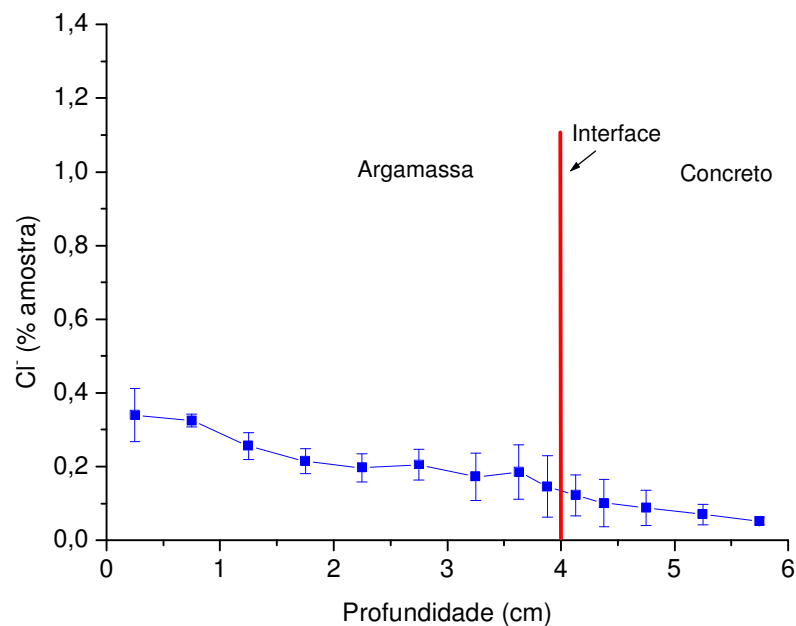


Figura 4.20 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:3 (volume) e com 4,0cm de espessura.

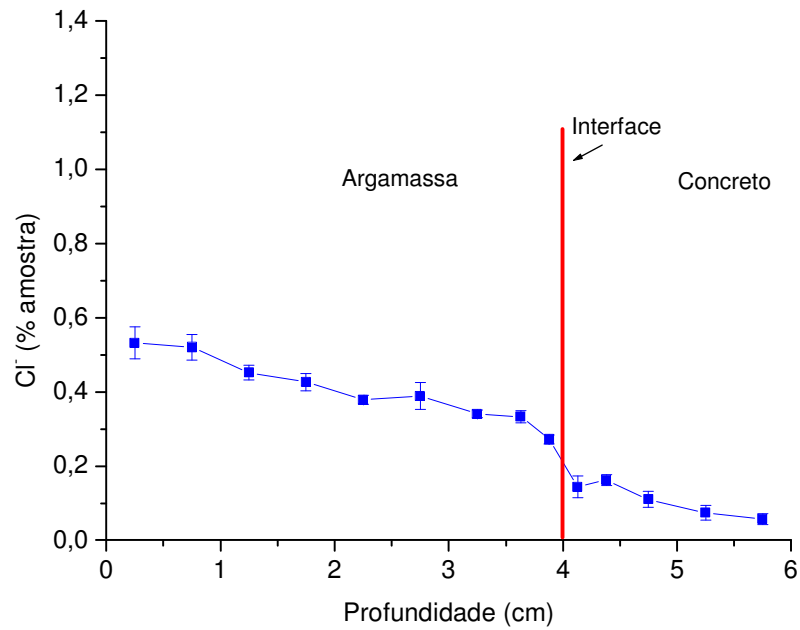


Figura 4.21 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:1:6 (volume) e com 4,0cm de espessura.

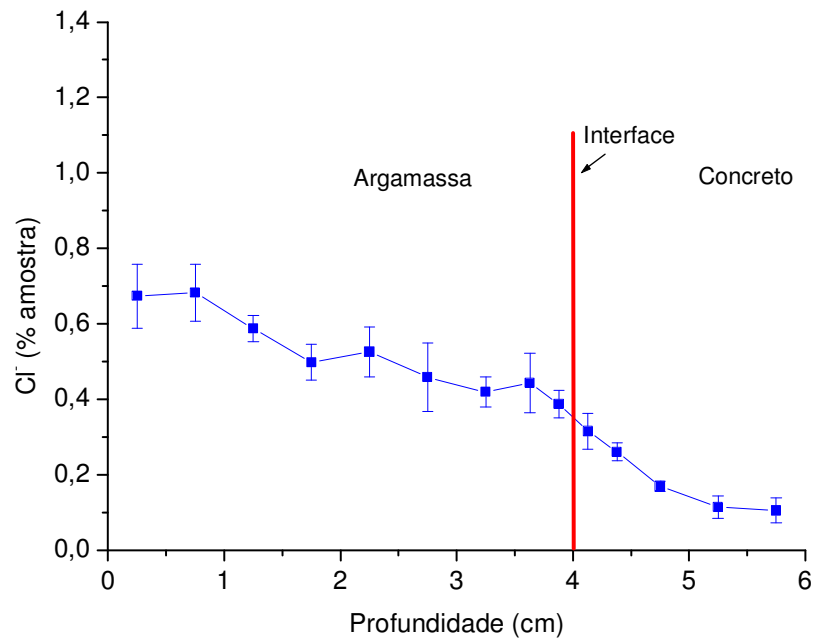


Figura 4.22 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com revestimento de argamassa na dosagem 1:2:9 (volume) e com 4,0cm de espessura.

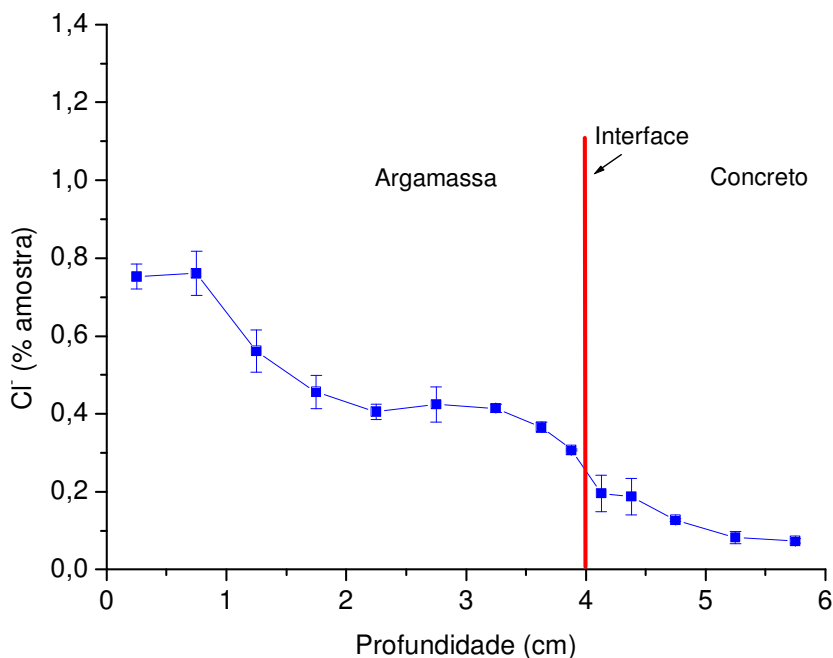


Figura 4.23 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados em argamassa industrializada e com 4,0cm de espessura.

De forma semelhante ao caso anterior, os perfis mostrados nas Figuras 4.20-4.23 mostram a tendência de formação de picos tênues na região próxima a superfície da argamassa em todas as dosagens. Como comentado anteriormente, o fato de não apresentarem estes picos de modo acentuado e a forma interna dos perfis aproximam as características dos perfis de um transporte por difusão.

A existência do acúmulo de Cl^- na região imediatamente anterior a interface, verificada para todas as situações anteriores, também é visualizada nos perfis mostrados nesta seção. Além disso, assim como aconteceu para o ensaio de difusão, os perfis gerados no interior do concreto, para os corpos-de-prova com revestimento de 4,0cm, possuem teores de Cl^- menos elevados do que aqueles provenientes de corpos-de-prova revestidos com 2,5cm.

4.2.4 Corpos-de-prova de Referência em Concreto

A partir dos corpos-de-prova de referência em concreto submetidos aos ensaios de difusão e imersão e secagem, foram obtidos os perfis de cloretos mostrados nas Figuras 4.24 e

4.25. As mesmas mostram perfis muito próximos, com um leve aumento de concentração no perfil em ciclos de imersão e secagem.

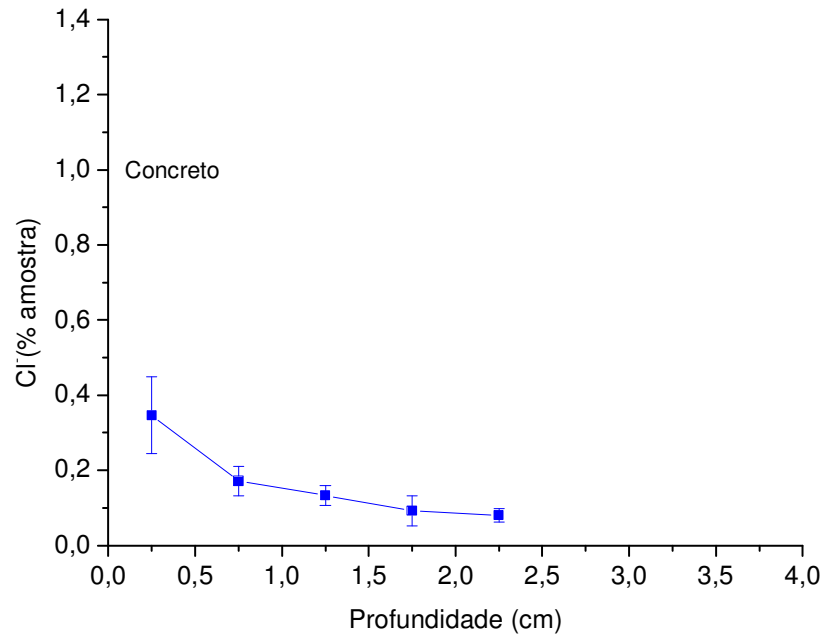


Figura 4.24 - Perfil de cloruretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova de referência moldados em concreto.

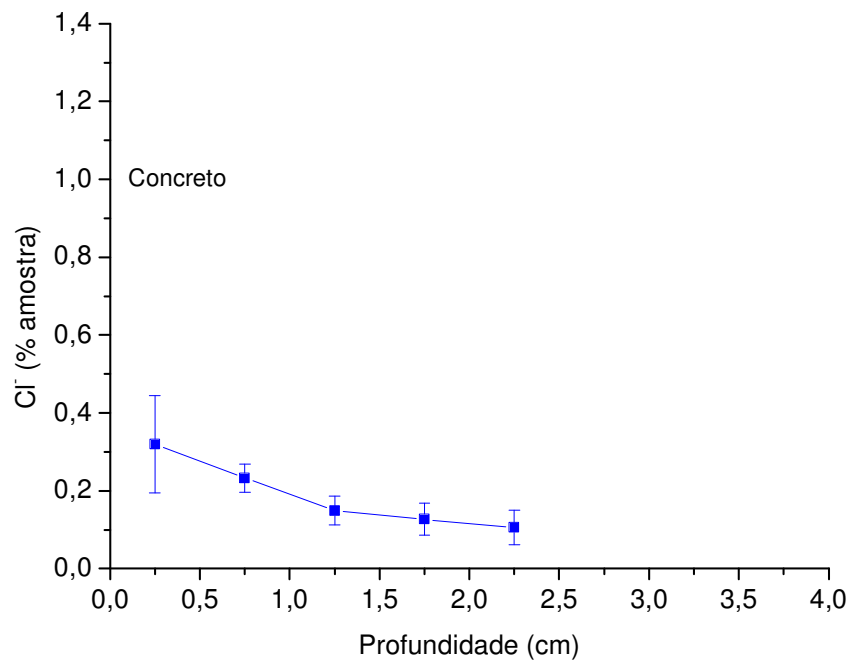


Figura 4.25 - Perfil de cloruretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova de referência moldados em concreto.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são analisados os resultados obtidos durante a fase experimental do trabalho. Os perfis de cloretos apresentados no capítulo anterior são estudados à luz dos objetivos específicos e relacionados com as características dos materiais empregados na pesquisa.

5.1 INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO EXTERNO NO TRANSPORTE DE CLORETOS

Analisando-se as Figuras 5.1 a 5.4, pode-se observar que, no caso das argamassas dosadas em laboratório, tanto para o ensaio de difusão quanto para o ensaio de imersão e secagem, independentemente da espessura do revestimento de argamassa utilizado, quanto maior o teor de cimento da argamassa, menor é a concentração de cloretos verificada na região argamassada dos perfis apresentados. Esta relação está intimamente ligada à redução de porosidade das argamassas mais ricas e a maior quantidade de C_3A , decorrente do maior consumo de cimento.

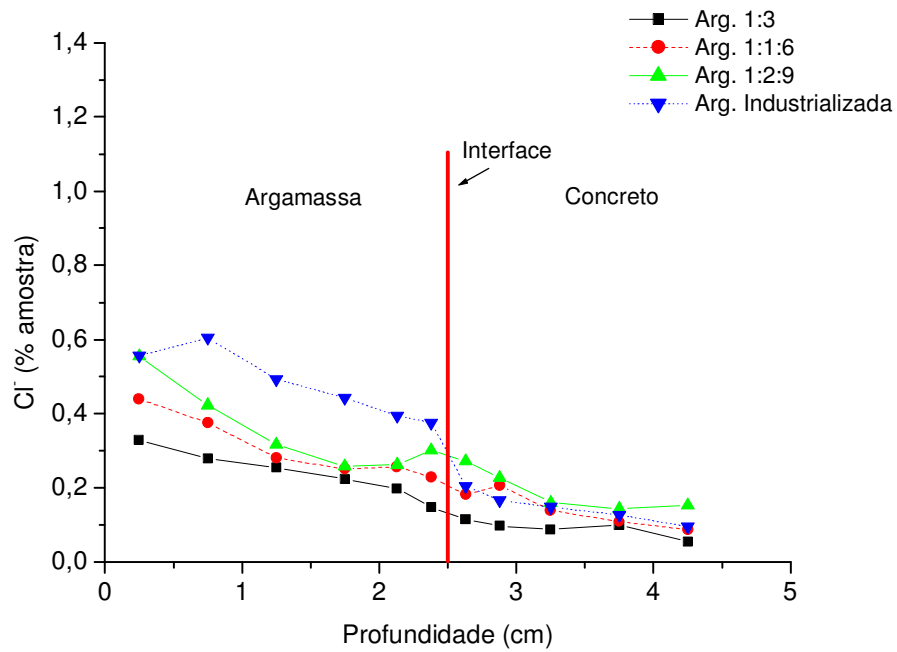


Figura 5.1 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento de argamassa.

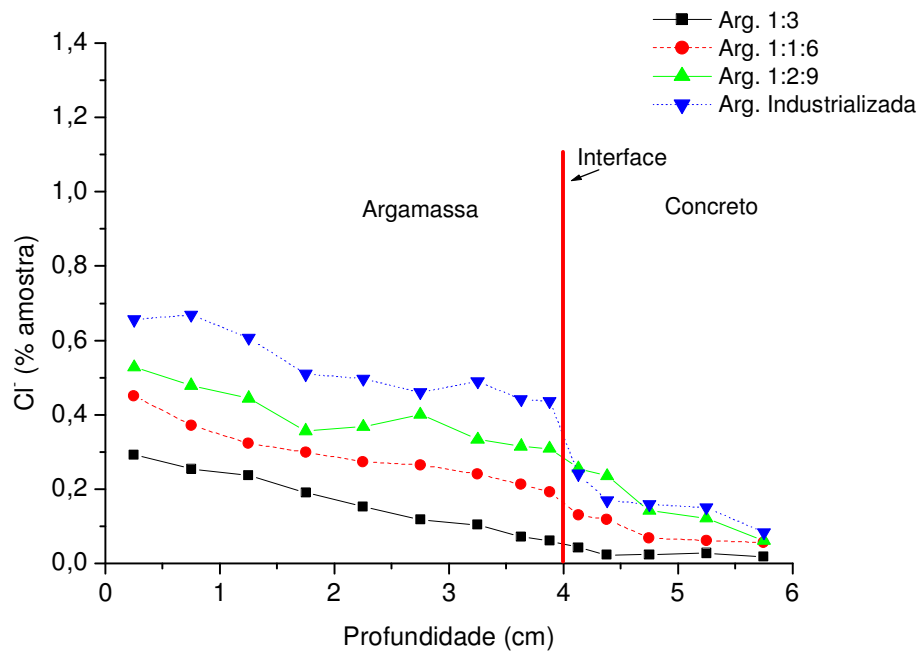


Figura 5.2 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de difusão para os corpos-de-prova moldados com 4,0cm de revestimento de argamassa.

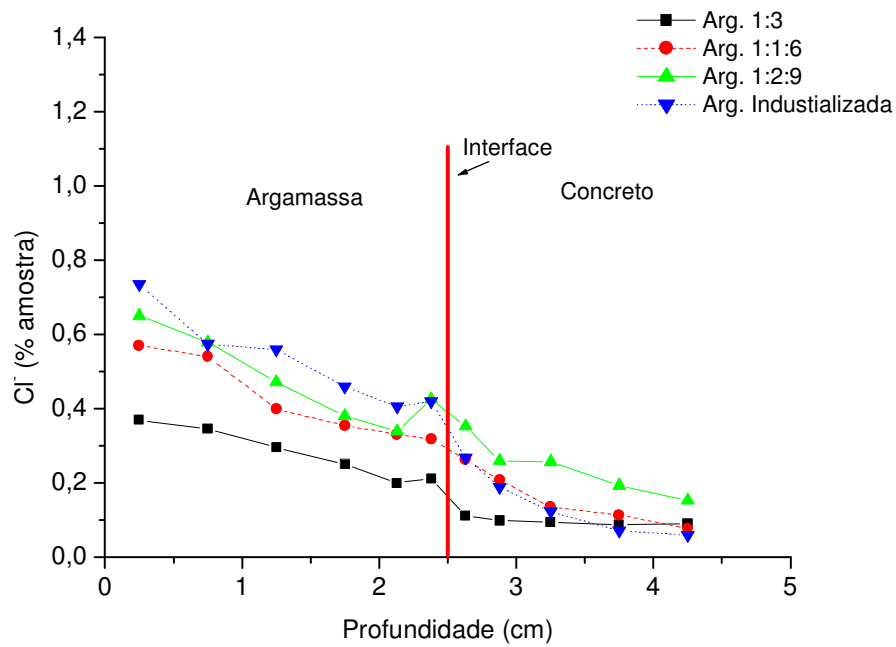


Figura 5.3 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento de argamassa.

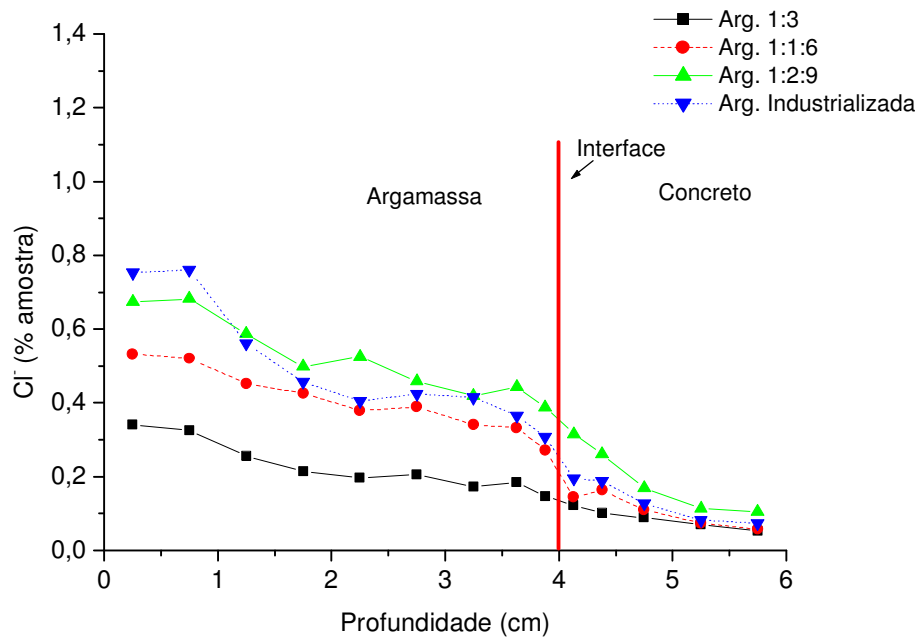


Figura 5.4 - Perfil de cloretos obtido através do ensaio de imersão e secagem para os corpos-de-prova moldados com 4,0cm de revestimento de argamassa.

No que se refere a porosidade, a Tabela 4.6 mostra densidades de massa e resultados de resistência à compressão que, juntamente com os resultados de absorção total mostrados na Tabela 4.7, apontam para um aumento de porosidade da argamassa 1:3 para a argamassa 1:2:9. Desta forma, essas argamassas também são identificadas como aquelas que apresentam, respectivamente, as menores e maiores concentrações de cloretos nos perfis estudados, independentemente do tipo de ensaio a que foram submetidas e da espessura da argamassa de revestimento aplicada. A relação água/cimento (Tabela 4.5) é outra variável que corrobora essa idéia, concordando com outros trabalhos publicados (JENSEN *et al.*, 1999; TONG e GJØRV, 2001).

No que se refere ao teor de C_3A , o maior consumo de cimento significa maior quantidade de C_3A disponível para colaborar na fixação dos íons cloreto na matriz (RASHEEDUZZAFAR *et al.*, 1990 *apud* MEIRA, 2004; OH e JANG, 2007). Esta maior capacidade de fixação reduz a quantidade de cloretos livres, que são os que efetivamente participam do transporte, e, conseqüentemente, gera perfis de cloretos com concentrações mais amenas.

De maneira geral, pode-se dizer que as diferentes dosagens de argamassa de revestimento externo utilizadas durante a pesquisa apresentam comportamento diferenciado em relação ao transporte de cloretos na argamassa, o que se observa nas Figuras de 5.1 a 5.4 e se justifica através das diferenças de porosidade e capacidade de fixação de cloretos dos materiais. Outra maneira de avaliar o efeito da composição das argamassas no transporte de Cl^- é através do comportamento de parâmetros como o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos. Esses parâmetros foram obtidos através de regressões não-lineares empregando-se a Equação 2.9, adequada às situações onde os materiais apresentam diferenças nas suas capacidades de transporte de massa, conforme se explica mais detalhadamente nas seções 5.2 e 5.3. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram o comportamento da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão aparente (D_{ap}) para as distintas argamassas empregadas. As tendências de aumento de C_s e D_{ap} das argamassas mais ricas para as mais pobres é igualmente observada, confirmando os comentários anteriores.

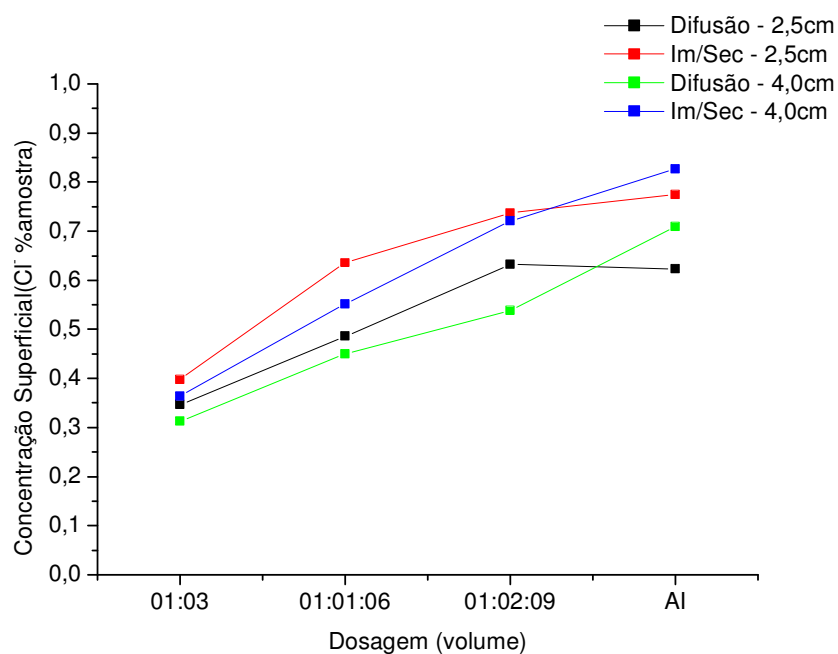


Figura 5.5 - Comportamento da concentração superficial de cloretos para as distintas argamassas estudadas.

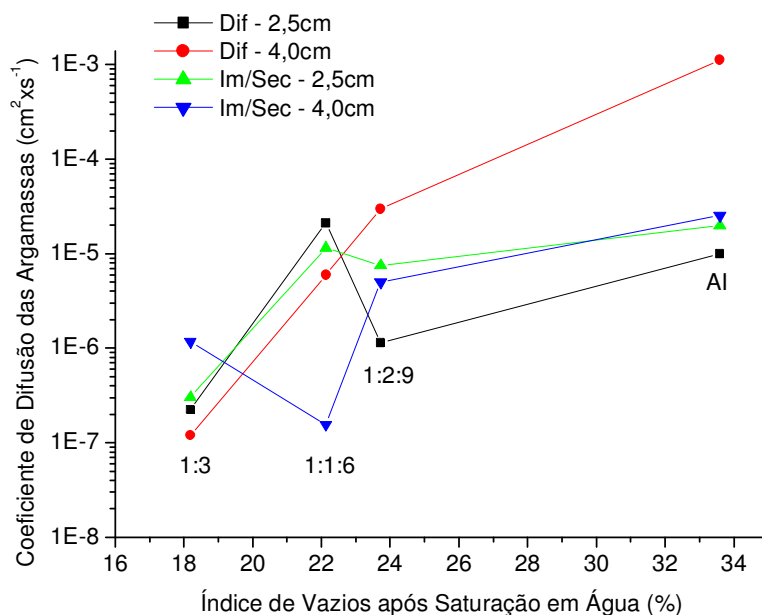


Figura 5.6 - Relação entre índice de vazios e coeficiente de difusão aparente das argamassas utilizadas.

No que se refere à argamassa industrializada, a sua tendência é de concentrações superiores às demais argamassa de revestimento, embora tenha apresentado concentrações

levemente inferiores a argamassa 1:2:9 em uma das condições analisadas (Figura 5.4). Esse comportamento pode ser justificado através da sua maior porosidade, observada nos ensaios de absorção e resistência mecânica (Tabelas 4.6 e 4.7). Informações sobre o tipo e o consumo de cimento e cal da argamassa industrializada não puderam ser obtidas junto ao fabricante, dificultando análises mais aprofundadas em relação ao efeito de outras variáveis sobre o transporte de cloretos.

Com relação a influência dessas diferentes dosagens no transporte de cloretos no concreto, pode-se dizer que as diferenças de comportamento observadas na camada de argamassa possuem influência direta nos resultados obtidos na camada de concreto. As Figuras de 5.1 a 5.4 mostram, para as argamassas dosadas em laboratório, que existe uma sintonia entre os perfis de cloretos na camada de argamassa e aqueles na camada de concreto, ou seja, se chegam menos cloretos na interface entre os materiais, menos serão transportados no interior do concreto. Considerando a prevalência de difusão nos ensaios realizados (ver item 4.2.3), os menores valores de concentração na interface entre os materiais explicam os menores teores de cloretos no concreto (Equação 2.8).

Outro fator importante a ser evidenciado é que a argamassa industrializada, apesar de apresentar maiores concentrações de cloretos em seus perfis, conduz a concentrações de cloretos bastante reduzidas no interior do concreto. Concentrações estas muitas vezes inferiores às aquelas verificadas nos perfis obtidos para argamassas dosadas em laboratório (Figuras 5.1 a 5.4). Este fato faz com que os teores de cloretos no concreto, relacionados à argamassa industrializada, se assemelhe aos resultados obtidos em sistemas com argamassas 1:1.6, em alguns casos.

Esta redução de concentrações de Cl^- no concreto, inicialmente conectada ao revestimento de argamassa, pode, na verdade, estar relacionada à variabilidade das características do material concreto. Tal suposição ainda requer estudos mais detalhados, questionando a carbonatação na superfície do concreto no período anterior à execução do revestimento e a quantidade de pasta presente em cada amostra, a qual pode sofrer significativas variações em função das dimensões do agregado graúdo.

Com relação ao tipo de ensaio empregado, pode-se observar uma leve tendência de maiores concentrações para os ensaios de imersão e sacagem (Figuras 5.1 a 5.4). Esse

comportamento decorre da maior velocidade com que ocorre o transporte convectivo. Contudo, assumindo-se que houve uma prevalência do fenômeno de difusão, mesmo nos ciclos de imersão e secagem, em função dos ciclos haverem sido curtos e a umidade relativa ambiente ser elevada (acima de 60%), essas diferenças tendem a uma atenuação, conforme discutido no Capítulo 4.

5.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO EXTERNO NO TRANSPORTE DE CLORETOS NO CONCRETO

A análise da influência da espessura da argamassa de revestimento externo no transporte de íons cloreto no interior do concreto foi realizada respeitando-se os tipos de ensaio empregados na pesquisa, ou seja, difusão e ciclos de imersão e secagem.

5.2.1 Análise com Base nos Ensaio de Difusão

A fim de avaliar a influência da espessura do revestimento de argamassa no transporte de cloretos no interior do concreto, os dados referentes aos perfis de cloreto mostrados no Capítulo 4 foram trabalhados através de regressões não-lineares baseadas na solução da segunda Lei de Fick (Equação 2.8), também conhecida como lei da difusão em regime não estacionário. Para tal, os perfis na camada de concreto foram reescalados, segundo procedimento descrito por Andrade *et al.* (1997) e mostrado na Figura 5.7. Os resultados dessas regressões são apresentados nas Figuras 5.8 a 5.11, até a profundidade de 4 cm no interior do concreto. Cabe ainda ressaltar que a solução da segunda Lei de Fick empregada nas regressões pressupõe concentração superficial e coeficiente de difusão constantes e, portanto, os resultados obtidos incorporam esses limites. O coeficiente de difusão obtido para o concreto apresentou valor médio de $4,90 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

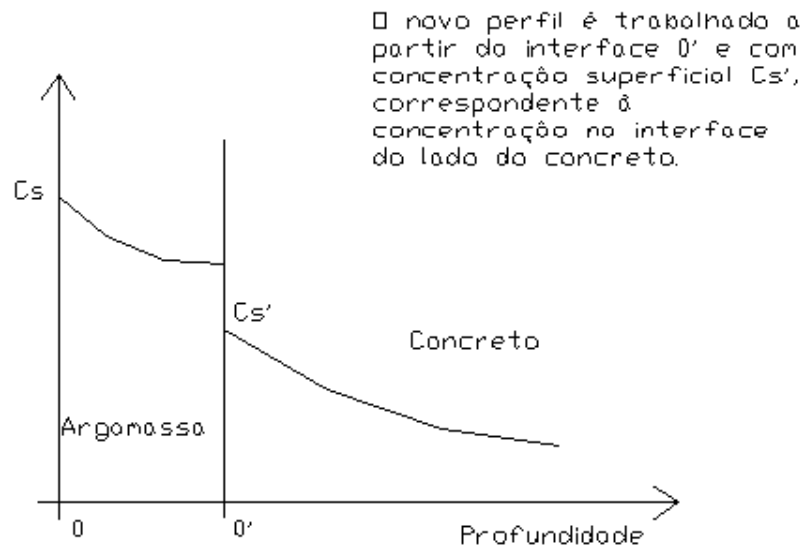


Figura 5.7 - Reescalonamento empregado nas regressões não-lineares com base na segunda Lei de Fick.

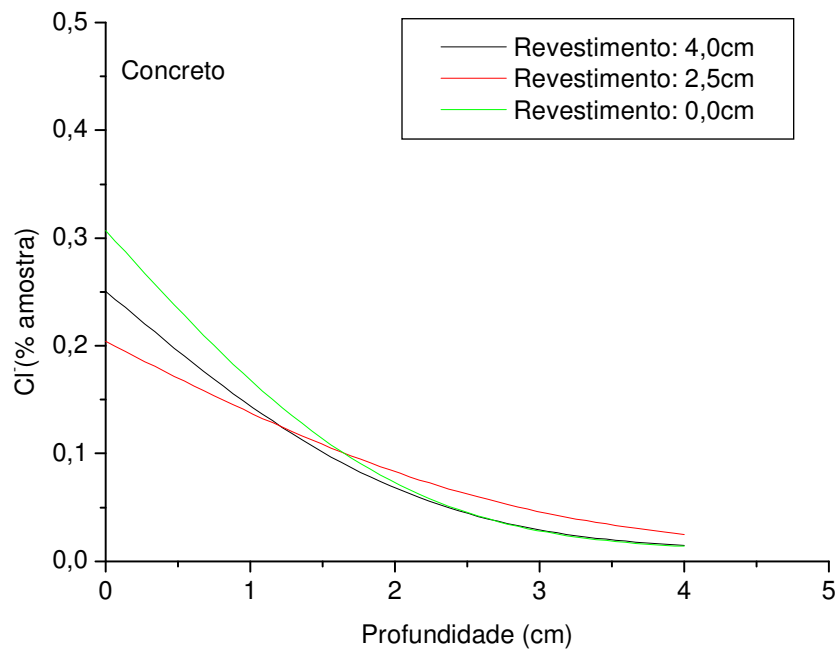


Figura 5.8 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.

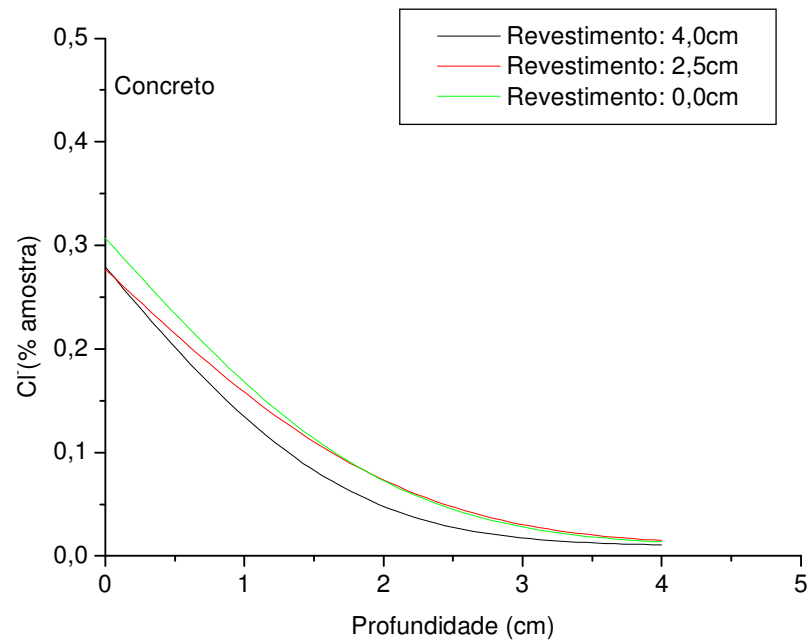


Figura 5.9 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:2:9.

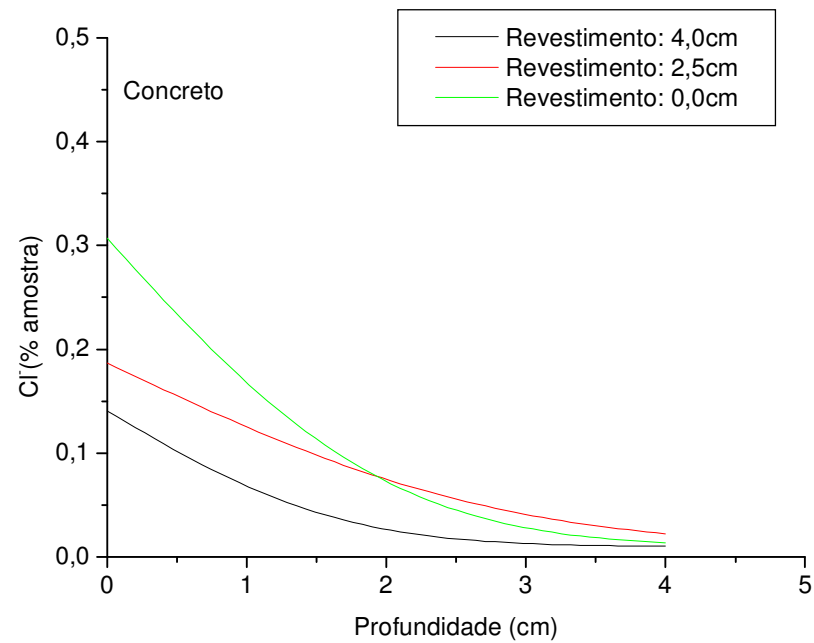


Figura 5.10 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:1:6.

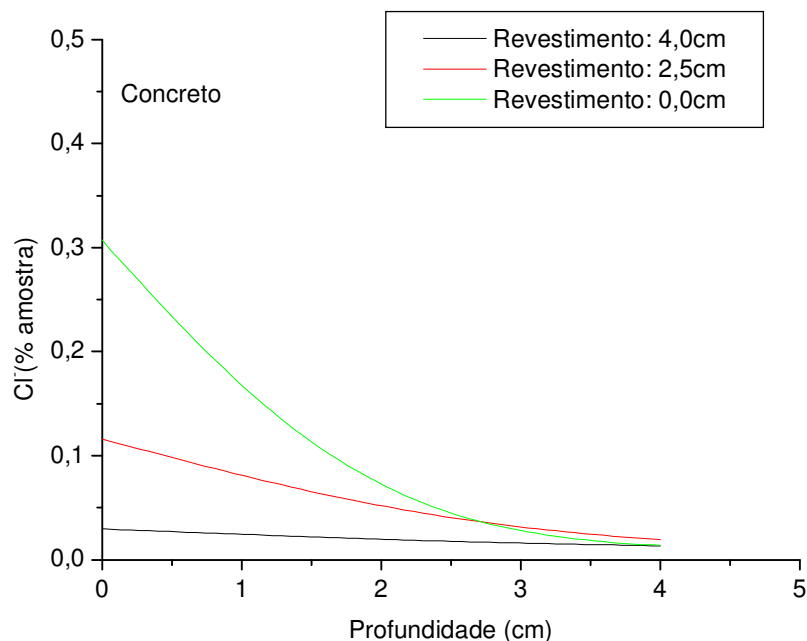


Figura 5.11 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa na dosagem 1:3.

Observa-se que a espessura do revestimento de argamassa é um fator que influencia o transporte de cloretos no interior do concreto. Contudo, essa influência se processa de forma clara nas argamassas menos porosas (Figuras 5.8 e 5.11). Nas argamassas mais porosas, há pouca diferença na quantidade de cloretos que chega à interface e, portanto, os perfis de cloretos no concreto retratam essa condição de proximidade.

Tomando-se como referência as argamassas menos porosas, o incremento da espessura de revestimento de zero para 2,5cm e deste para 4,0cm conduz a reduções significativas nas concentrações de cloretos no concreto. A fim de tornar mais clara esta afirmação, a Tabela 5.1 sintetiza profundidades equivalentes para um mesmo teor de cloretos, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem revestimento. Os seus resultados indicam que, dentro das profundidades estudadas, o revestimento de argamassa com 2,5cm de espessura pode corresponder a uma espessura equivalente de concreto entre 0,35cm e 0,90cm. Já o revestimento de argamassa com 4,0cm de espessura pode ter o mesmo efeito de uma espessura equivalente de concreto entre 1,10cm e 2,25cm.

Tabela 5.1 - Influência do incremento na espessura de revestimento de argamassa na concentração de cloretos no interior do concreto (corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão).

<i>Dosagem (volume)</i>	<i>Espessura do revestimento</i>	<i>Cl(% amostra) existente a 1cm de profundidade no concreto</i>	<i>Profundidade em que o teor de Cl indicado na coluna anterior é atingido no concreto sem revestimento</i>	<i>Cl(% amostra) existente a 2cm de profundidade no concreto</i>	<i>Profundidade em que o teor de Cl indicado na coluna anterior é atingido no concreto sem revestimento</i>
1:3	2,5cm	0,080	1,90cm	0,054	2,35cm
	4,0cm	0,025	3,25cm	0,020	3,35cm
1:1:6	2,5cm	0,125	1,40cm	-	-
	4,0cm	0,070	2,15cm	0,025	3,10cm

Outra maneira de avaliar o efeito protetor da camada de revestimento é através da análise da profundidade em que o teor crítico de cloretos é atingido nos perfis aqui apresentados. Considerando o teor crítico de 0,05% em relação à massa da amostra, valor aceito pelo CEB (Tabela 2.1), observa-se, através dos resultados mostrados na Tabela 5.2, que este teor crítico é atingido a menores profundidades para os concretos revestidos do que para aqueles sem revestimento. Fato que confirma, mais uma vez, o efeito protetor da argamassa de revestimento.

Tabela 5.2 - Profundidade na qual o teor crítico de 0,05% (em relação a massa da amostra) é atingido para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão.

<i>Espessura do revestimento</i>	<i>Profundidade em que o teor crítico de cloretos é atingido (cm)</i>	
	<i>Dosagem</i>	
	1:3	1:1:6
0,00cm	2,45	2,45
2,5cm	2,20	2,70
4,0cm	0,00	1,35

De modo geral, os ensaios de difusão mostram que o efeito protetor das argamassas de revestimento ocorre de forma significativa para as argamassas menos porosas e o mesmo cresce com a espessura desse revestimento. Contudo, é importante ressaltar que não se defende o incremento das camadas de revestimento como ação protetora das estruturas de

concreto mas, simplesmente, avaliar esse efeito, o qual ocorre de forma importante mesmo para os revestimentos com 2,5 cm de espessura.

5.2.2 Análise com Base nos Ensaio de Imersão e Secagem

De forma semelhante ao descrito nos itens 4.2.3 e 5.1, assume-se, nesta análise, a predominância do transporte por difusão na camada de concreto. Esse pressuposto se baseia nos seguintes aspectos: os perfis de cloretos relativos ao ensaio de imersão e secagem apresentam a ausência de picos típicos dos ciclos de absorção - desorção (Figura 2.12); a semelhança dos perfis com a forma típica dos perfis de difusão; o curto espaço de tempo destinado a fase de secagem durante os ciclos aliada a alta umidade relativa, típica do clima local; a interferência da espessura da argamassa de revestimento na troca de umidade do concreto com o meio externo. Estes aspectos se sobrepõem e dificultam que o processo de secagem chegue, de forma significativa, nas camadas de concreto.

Em virtude disso, os dados obtidos através do ensaio de imersão e secagem na região do concreto, foram trabalhados de igual forma que no item 5.2.1, os perfis são mostrados nas Figuras de 5.12 a 5.15. O coeficiente de difusão obtido para o concreto apresenta valor médio de $4,50 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Os valores na mesma ordem de grandeza que os ensaios de difusão corroboram o pressuposto de mecanismos de transporte semelhantes.

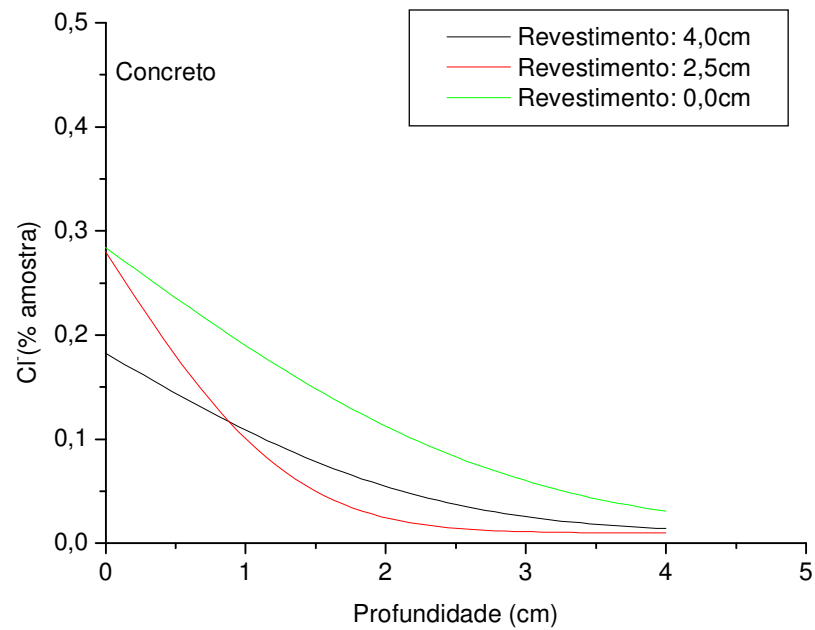


Figura 5.12 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.

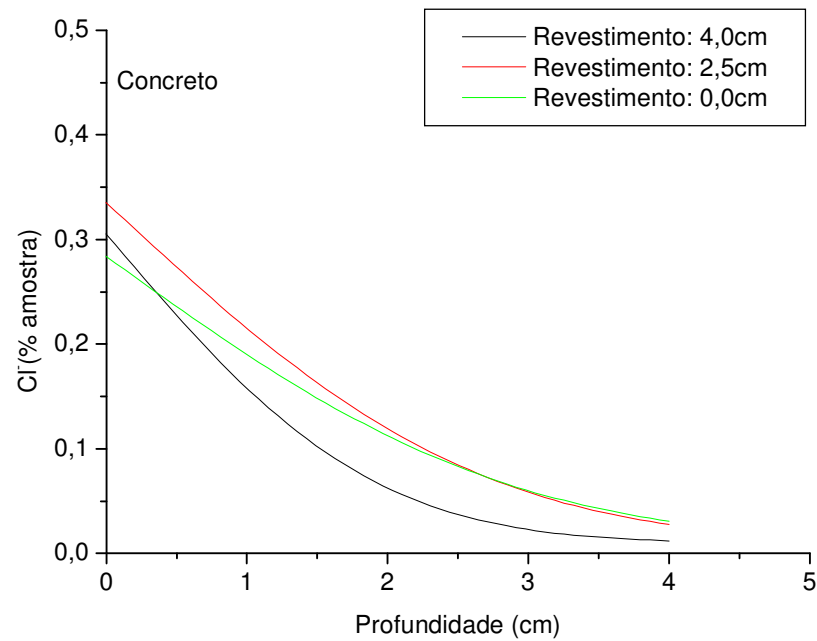


Figura 5.13 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:2:9.

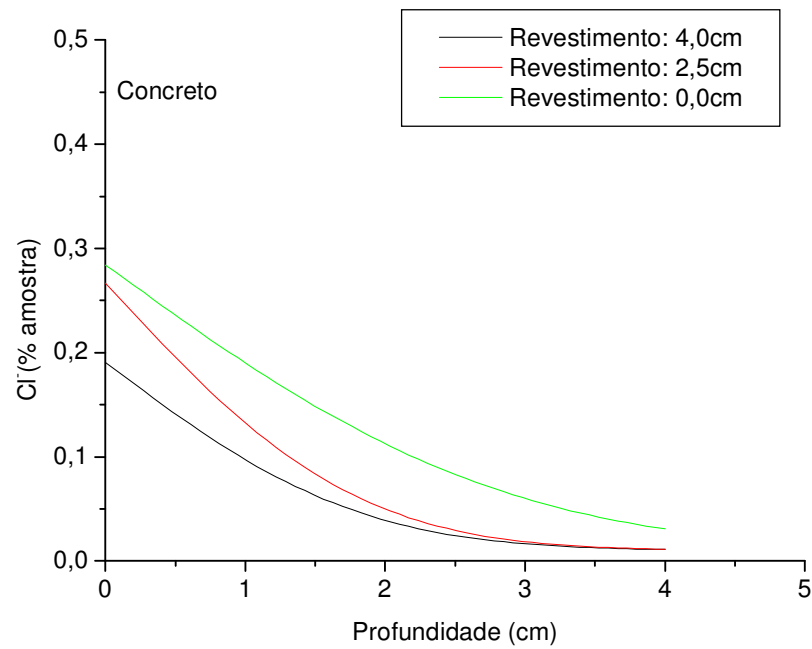


Figura 5.14 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:1:6.

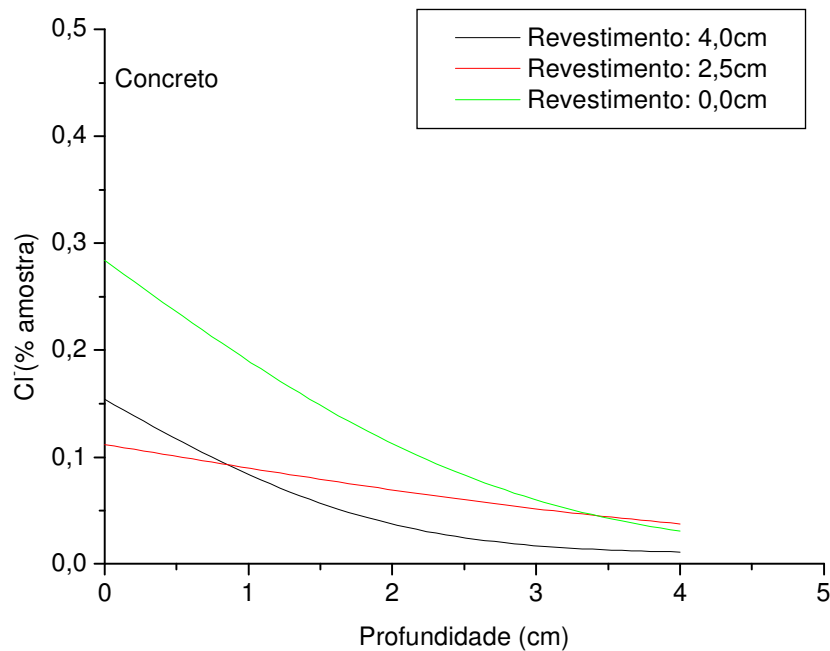


Figura 5.15 - Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento na dosagem 1:1:3.

Observa-se, também, que de modo semelhante aos ensaios de difusão, existe uma influência da espessura do revestimento de argamassa no transporte de cloretos no interior do concreto, sendo esta influência mais acentuada para as argamassas que apresentam menor porosidade e maior espessura de revestimento (Figuras 5.12 a 5.15).

A fim de tornar mais clara esta afirmação, a Tabela 5.3 sintetiza as profundidades equivalentes para um mesmo teor de cloretos, para os corpos-de-prova ensaiados com e sem revestimento. É válido ressaltar que esta tabela trata apenas das argamassas que conduzem a uma proteção mais significativa, ou seja, as argamassas de menor porosidade. Em análise a estes dados, pode-se dizer que, dentro das profundidades estudadas, o revestimento de argamassa com 2,5cm de espessura pode corresponder a uma espessura equivalente de concreto entre 0,75cm e 1,35cm. Já o revestimento de argamassa com 4,0cm de espessura pode corresponder a uma espessura equivalente de concreto entre 1,25cm e 1,70cm.

Tabela 5.3 - Influência do incremento na espessura de revestimento de argamassa na concentração de cloretos no interior do concreto (corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem).

<i>Dosagem (volume)</i>	<i>Espessura do revestimento</i>	<i>Cl(% amostra)</i>	<i>Profundidade em que</i>	<i>Cl(% amostra)</i>	<i>Profundidade em que</i>
		<i>existente a 1cm de profundidade no concreto</i>	<i>o teor de Cl indicado na coluna anterior é atingido no concreto sem revestimento</i>	<i>existente a 2cm de profundidade no concreto</i>	<i>o teor de Cl indicado na coluna anterior é atingido no concreto sem revestimento</i>
1:3	2,5cm	0,085	2,35cm	0,070	2,75cm
	4,0cm	0,080	2,50cm	0,035	3,70cm
1:1:6	2,5cm	0,135	1,75cm	0,050	3,25cm
	4,0cm	0,100	2,25cm	0,040	3,60cm

A Tabela 5.4 ajuda a avaliar o efeito protetor das argamassas de baixa porosidade através da profundidade na qual o teor crítico de cloretos é atingido nos perfis apresentados. Considerando o teor crítico igual a 0,05% em relação à massa, valor igual ao considerado para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão, os valores mostrados na Tabela 5.4 indicam que este teor crítico é atingido a menores profundidades para os concretos revestidos do que para aqueles sem revestimento. Esta observação também é feita para os corpos-de-

prova submetidos ao ensaio de difusão (item 5.2.1) e vem confirmar a existência do efeito protetor da argamassa de revestimento.

Tabela 5.4 - Profundidade na qual o teor crítico de 0,05% (em relação a massa da amostra) é atingido para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem.

<i>Espessura do revestimento</i>	<i>Profundidade em que o teor crítico de cloretos é atingido (cm)</i>	
	Dosagem	
	1:3	1:1:6
0,00cm	3,30	3,30
2,5cm	3,10	2,00
4,0cm	1,65	1,75

De posse das profundidades em que o teor crítico de cloretos é atingido, tanto para o ensaio de difusão quanto para o de imersão e secagem, sintetizou-se os valores referentes a argamassa 1:1:6 no gráfico da Figura 5.16, a fim de encontrar uma área de influência e definir valores médios de equivalência entre a espessura do concreto e a argamassa 1:1:6. Desta forma, pode-se dizer que 2,5cm de argamassa 1:1:6 pode equivaler, em média, a 0,55cm de concreto. Com o aumento da espessura para 4,0cm, a argamassa 1:1:6 pode equivaler, em média, a 1,30cm de espessura de concreto. É importante ressaltar que estes valores foram obtidos através de ensaios acelerados e, também por isso, formam um ambiente diferente do real, não devendo, portanto, serem tomados como absolutos.

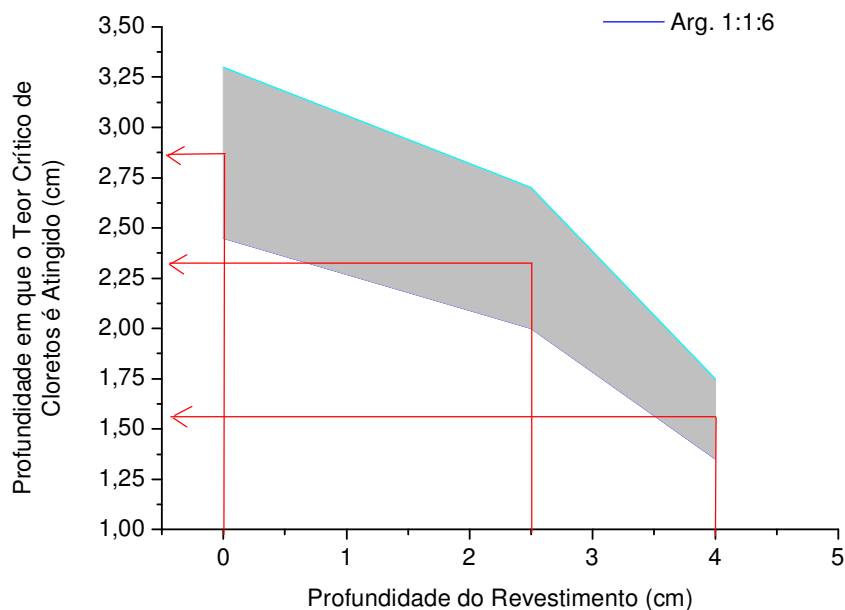


Figura 5.16 - Área delimitada pelos pontos referentes as profundidades nas quais o teor crítico de cloretos é atingido na argamassa 1:1:6, tanto para o ensaio de difusão quanto para o de imersão e secagem.

5.3 PRESENÇA DO EFEITO RESISTÊNCIA NA INTERFACE ENTRE ARGAMASSA E CONCRETO

Os perfis de cloretos referentes aos corpos-de-prova de sistema duplo apresentados no Capítulo 4, apontam a existência de um acúmulo destes íons na região imediatamente anterior a interface, seguido de uma redução no teor de cloretos na região imediatamente após a mesma interface. Esta redução no teor de cloretos quando se passa do material argamassa para o material o concreto é vista como um efeito benéfico de resistência à penetração dos íons cloreto imposto pelas características dos materiais.

Este efeito está associado a diferenças na capacidade de transporte dos materiais (ANDRADE *et al.*, 1997). Como pode ser observado na microscopia mostrada na Figura 5.17, a região do chapisco é uma região de altíssima porosidade, colaborando assim com o transporte e o acúmulo dos íons cloreto nesta região. Por outro lado, o chapisco possui uma dosagem muito rica, fato que faz com que a fixação de Cl^- , a partir da combinação com o C_3A , seja aumentada. Além disso, a espessura do chapisco é bastante reduzida (aproximadamente 2,0mm) o que leva a pensar que a contribuição do chapisco para esse efeito seja limitada.

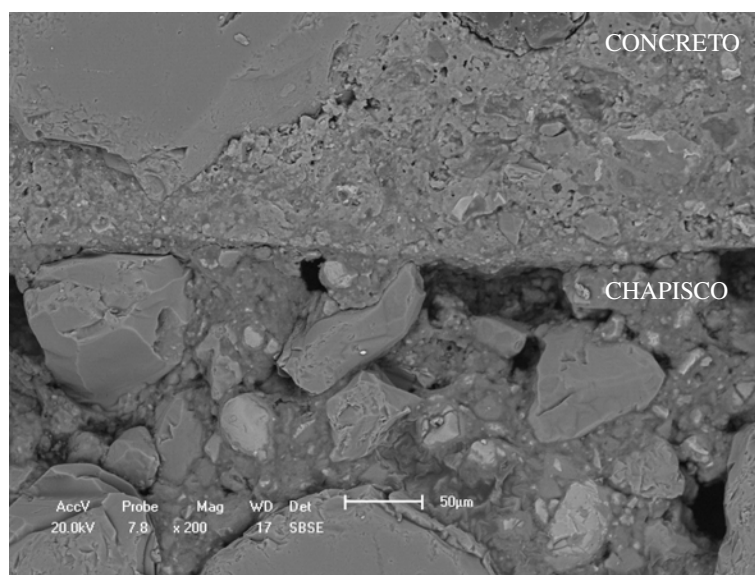


Figura 5.17 - Microscopia eletrônica de varredura realizada na região de interface da argamassa 1:1:6.

Nesse sentido, a diferença de porosidade que existe entre a argamassa de revestimento e o concreto é outro fator que contribui para este acúmulo de íons na interface. Assim, espera-se que quanto menor a porosidade da argamassa, ou seja, quanto mais próxima a porosidade da argamassa for da porosidade do concreto, menor será o efeito resistência.

Para melhor visualização deste efeito, os dados referentes aos perfis de cloreto mostrados no Capítulo 4 foram trabalhados através de regressões baseadas na solução da segunda Lei de Fick. Por se tratar de um transporte em sistema duplo, foram utilizadas diferentes equações para cada camada. Para tratar a primeira camada (revestimento de argamassa) empregou-se a Equação 2.9, conforme detalhado na seção 2.2.4. Já para a camada de concreto empregou-se a Equação 2.8, conforme descrito na seção 2.2.3. Cabe lembrar que, a exemplo do que foi feito nos itens 5.1 e 5.2.2, assumiu-se, nesta análise, a predominância do transporte por difusão. Os resultados dessas regressões são apresentados nas Figuras de 5.18 a 5.21.

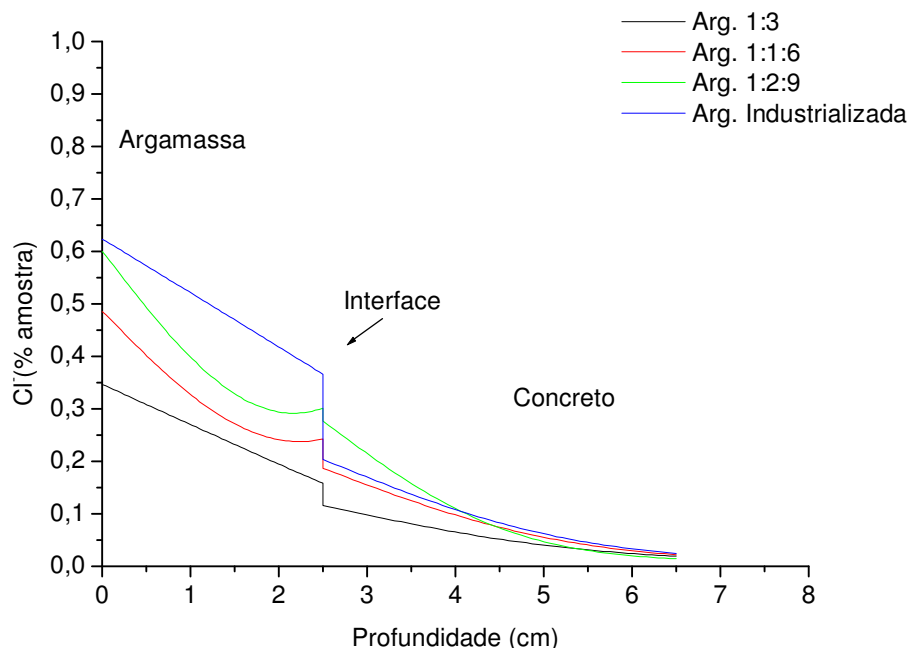


Figura 5.18 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 2,5cm de revestimento.

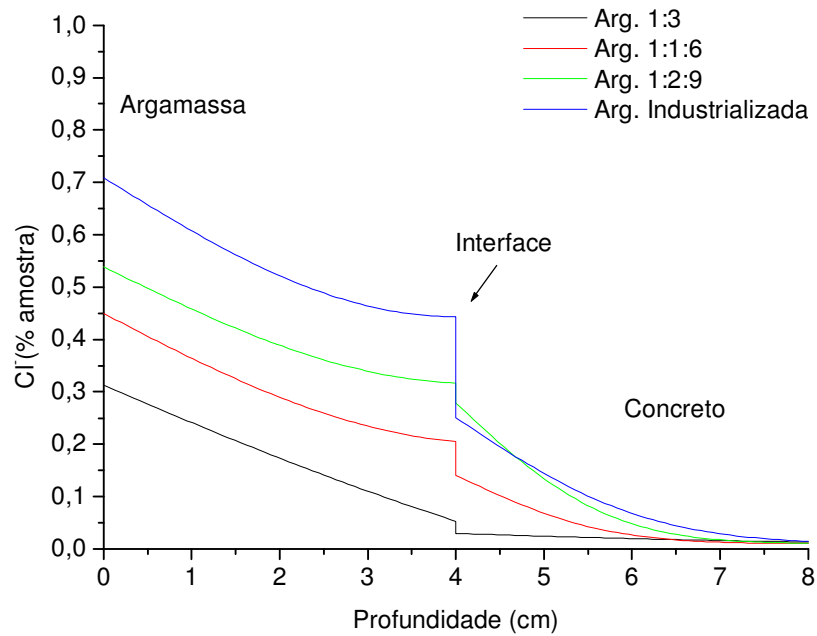


Figura 5.19 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 4,0cm de revestimento.

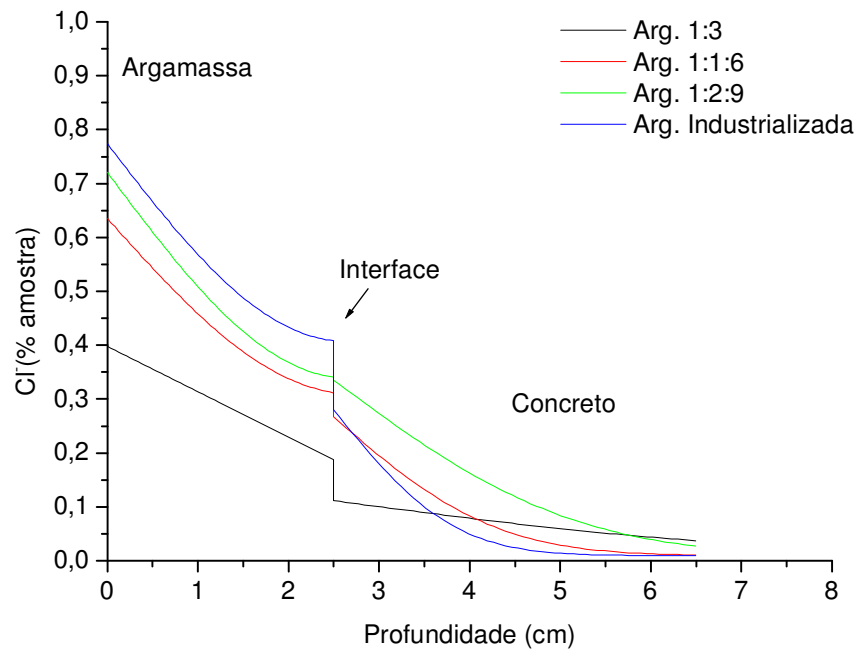


Figura 5.20 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem e moldados com 2,5cm de revestimento.

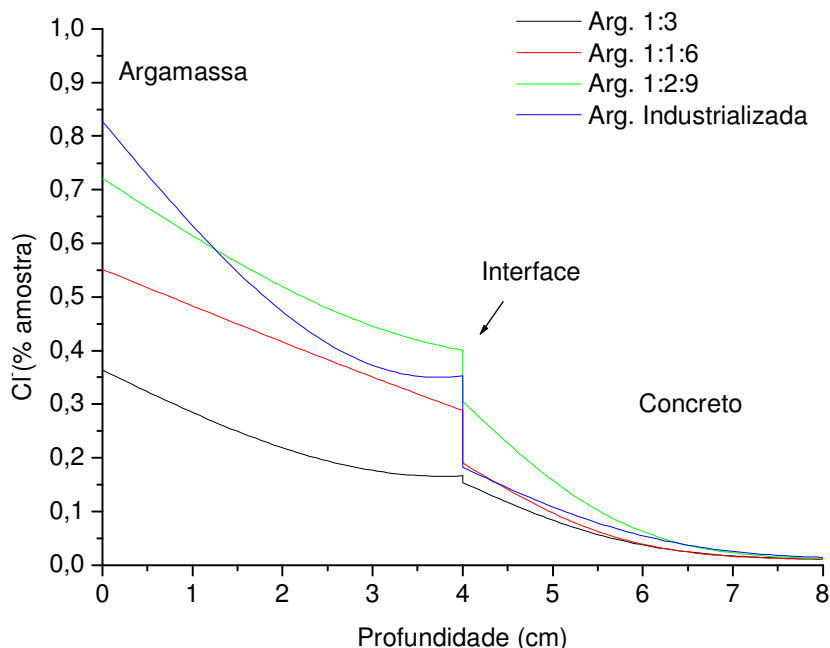


Figura 5.21 - Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão/secagem e moldados com 4,0cm de revestimento.

A partir das regressões apresentadas nas Figuras de 5.18 a 5.21 foram extraídos dados relativos à concentração de Cl^- na interface e ao acúmulo destes íons nessa região, para as argamassas dosadas em laboratório. Estes dados foram compilados nas Tabelas 5.5 e 5.6 e mostram que há uma resistência ao transporte de Cl^- entre as camadas de argamassa e concreto, representada pelo parâmetro “R” proposto por Andrade *et al.* (1997) e apresentado na Equação 2.13. Na maioria dos casos, o valor de R apresenta uma leve diminuição em função do aumento da porosidade da argamassa, fato que em princípio, vai de encontro as expectativas iniciais. Cabe ainda ressaltar que, por serem considerados inconclusivos, os dados relativos a argamassa industrializada não constam nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5 - Dados relativos as concentrações superficiais e ao acúmulo de íons cloreto na região imediatamente anterior a interface para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento.

ESPESSURA DE 2,5 cm					
Tipo de ensaio	Dosagem da argamassa	Concentração de Cl⁻ na interface - argamassa (% amostra)	Concentração de Cl⁻ na interface - concreto (% amostra)	R	Espessura do acúmulo de Cl⁻ junto à interface (cm)
Difusão	01:03	0,158	0,116	1,364	0,000
	01:01:06	0,242	0,187	1,296	0,380
	01:02:09	0,321	0,276	1,160	0,700
Im/Sec	01:03	0,188	0,111	1,682	0,000
	01:01:06	0,311	0,267	1,168	0,170
	01:02:09	0,401	0,335	2,296	0,170

Tabela 5.6 - Dados relativos as concentrações superficiais e ao acúmulo de íons cloreto na região imediatamente anterior a interface para os corpos-de-prova moldados com 2,5cm de revestimento.

ESPESSURA DE 4,0cm					
Tipo de ensaio	Dosagem da argamassa	Concentração de Cl⁻ na interface - argamassa (% amostra)	Concentração de Cl⁻ na interface - concreto (% amostra)	R	Espessura do acúmulo de Cl⁻ junto à interface (cm)
Difusão	01:03	0,053	0,029	1,788	0,000
	01:01:06	0,205	0,140	1,456	0,610
	01:02:09	0,316	0,278	1,135	1,000
Im/Sec	01:03	0,166	0,153	1,079	0,550
	01:01:06	0,288	0,190	1,512	0,000
	01:02:09	0,400	0,305	1,311	0,250

Investigando mais a fundo este fenômeno, pode-se observar que a maioria dos perfis referentes as argamassas de elevada porosidade mostrados nas Figuras 5.18-5.21, apresentam uma “horizontalidade” imediatamente anterior a região de interface. Esta “horizontalidade” é oriunda de um acúmulo precoce dos íons cloreto na região. Quanto maior for a região de

acúmulo anterior a interface, maior é o período em que os Cl^- provenientes da região da argamassa estiveram sendo acumulados nessa região e, por conseguinte, estiveram sendo transferidos para região do concreto. Este aumento no período de transferência possibilita a redução na diferença de concentrações entre argamassa e concreto na interface e, conseqüentemente, proporciona a diminuição do valor de R .

Assim sendo, as diferentes espessuras de acúmulo de Cl^- junto à interface (Tabelas 5.5 e 5.6) mostram que os patamares de concentração junto à interface foram atingidos à diferentes idades. Em virtude deste fato, não se deve comparar de forma direta os valores de R , pois estaria-se comparando diferentes situações de transporte já que para as porosidades mais elevadas o transporte de Cl^- da argamassa para o concreto estaria ocorrendo em patamares mais elevados e há mais tempo do que para as argamassas de menor porosidade. A Figura 5.22 exemplifica esse comportamento através de simulações feitas para argamassa 1:1:6 à diferentes idades.

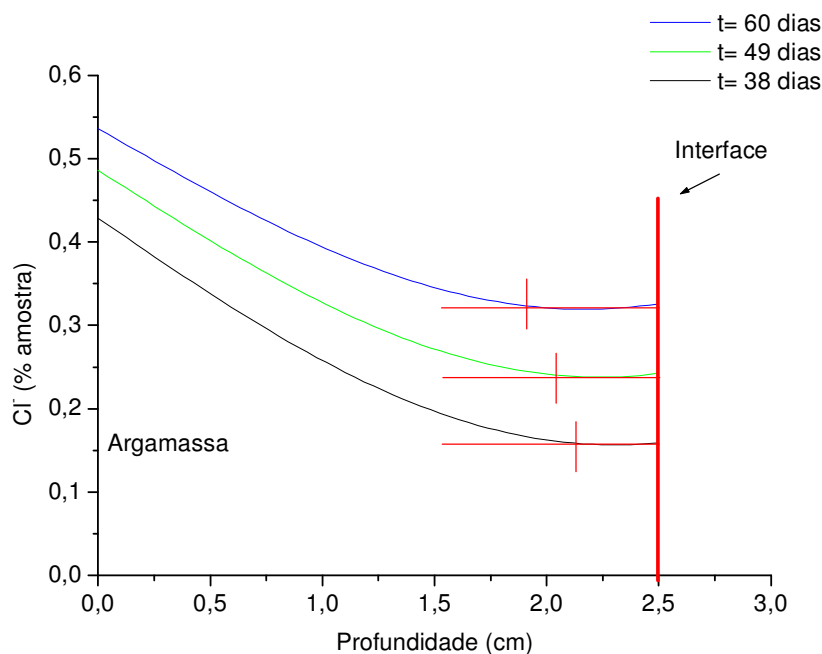


Figura 5.22 - Variação do acúmulo de cloruretos na interface em função do tempo de ensaio, para a argamassa na dosagem 1:1:6 submetida ao ensaio de difusão.

Apesar das discussões feitas a cerca da presença do efeito resistência na interface argamassa-concreto ao longo deste trabalho, sabe-se que este é um assunto complexo, ainda pouco pesquisado, e que, por isso, exige estudos mais aprofundados a seu respeito, conforme sugerido no Capítulo 6.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com a pesquisa de campo e com os ensaios realizados em laboratório durante o desenvolvimento deste trabalho, é possível enumerar algumas conclusões. Entretanto, as conclusões que se seguem não devem ser tomadas de maneira absoluta, pois se referem aos materiais investigados neste trabalho e aos ensaios acelerados aqui utilizados, os quais formam um ambiente diferente do cenário real e com uma dinâmica própria.

Desta maneira, pode-se concluir que:

1. Com relação ao emprego das argamassas na execução de revestimentos externos na região costeira da cidade de João Pessoa – Paraíba:

No que diz respeito ao tipo de argamassa e a técnica de aplicação, pode-se observar que existe uma tendência tradicionalista na região estudada. Esta afirmação está baseada na grande utilização da argamassa dosada em obra e da técnica manual adotada para a sua aplicação. Tais características são ponto de contraste com a região sudeste do Brasil, que há muito adota a argamassa industrializada e técnicas mais eficientes na execução de seus revestimentos externos.

A execução do revestimento externo segue as etapas de preparação do substrato, chapisco e emboço, com respeito aos períodos mínimos de espera entre etapas indicadas pela norma NBR 7200 (ABNT, 1998). O chapisco empregado nas obras

estudadas é predominantemente na dosagem 1:3 (em volume), com a incorporação de aditivo adesivo. Há uma grande diversidade de dosagens empregadas nas argamassas de revestimento externo, com dosagens que variam de 1:3 a 1:1:12 (em volume).

2. Com relação à influência da dosagem da argamassa de revestimento externo no transporte de cloretos no concreto:

Há uma tendência geral de redução das concentrações de cloreto nas camadas de concreto e revestimento em função da redução de porosidade das argamassas. Esse comportamento, embora não esteja claro em relação à argamassa industrializada, quando focado na camada de concreto, apresenta-se de forma visível para as argamassas dosadas em laboratório. De forma complementar, esse transporte também é influenciado pela capacidade de fixação de cloretos das argamassas, decorrente do seu consumo de cimento.

Essa tendência permanece tanto para os ensaios de difusão quanto para os ensaios de imersão e secagem, bem como para as distintas espessuras de revestimento de argamassa utilizadas.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a diferença entre as dosagens das argamassas de revestimento externo influenciam de forma direta no transporte dos íons cloreto no concreto e esta influência é mais acentuada para as argamassas de revestimento mais ricas e menos porosas.

3. Com relação à influência da espessura da argamassa de revestimento externo no transporte de cloretos no concreto:

A espessura do revestimento de argamassa é um fator que influencia de forma evidente o transporte de cloretos no interior do concreto, para as dosagens e espessuras estudadas. Quanto maior a espessura da argamassa, maior o efeito protetor proporcionado. Porém, esta é uma característica que deve ser analisada juntamente com a porosidade de cada argamassa, pois, apenas as argamassas mais nobres (1:1:6 e 1:3) apresentam esse efeito de forma mais pronunciada.

Considerando que a argamassa 1:1:6 tem uso regular nos revestimentos externos, esse efeito pode ser representativo da proteção das estruturas de concreto, mesmo considerando a espessura de revestimento de 2,5 cm. Espessuras equivalentes de concreto da ordem de 0,5cm podem representar um significativo aumento de vida útil da estrutura em zona de atmosfera marinha.

Com relação aos ensaios acelerados adotados, apesar de concentrações em geral, ligeiramente mais elevadas para os ensaios de imersão e secagem, a tendência de influência da espessura do revestimento no transporte de cloretos no concreto ocorre tanto para os ensaios de imersão e secagem quanto para os ensaios de difusão.

4. Com relação à presença do efeito resistência na interface entre argamassa e concreto:

O efeito resistência na interface argamassa – concreto, caracterizado por um acúmulo de íons cloreto na região imediatamente anterior a interface entre os dois materiais, seguido de uma redução dos cloretos na região imediatamente posterior a mesma interface, é comum a todas as argamassas estudadas e decorre das diferenças na capacidade de transporte de massa de cada um dos materiais estudados.

Esse efeito, quando medido de forma direta, através do parâmetro “R”, revela-se levemente superior para as argamassas menos porosas. Contudo, essa análise deve ser feita de forma relativa, levando em conta o acúmulo precoce de Cl^- que ocorre antes da interface argamassa-concreto. Nesse caso, a extensão desse acúmulo revela-se com tendência de ser proporcional à porosidade das argamassas.

Intervalos maiores de acúmulo de cloretos próximo à interface indicam que os cloretos atingiram um patamar de concentração mais elevada há mais tempo e, portanto, houve mais tempo para ser efetuado o transporte de mais cloretos para a camada de concreto, possibilitando a redução na diferença de concentrações entre argamassa e concreto na interface. Contudo, o estudo desse efeito carece de estudos experimentais adicionais para avaliar, com mais detalhes, aspectos como esse.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a pequena quantidade de trabalhos realizados sobre o transporte de cloretos em estruturas de concreto revestidas, muitas sugestões para novas pesquisas poderiam ser listadas. Entretanto, foram selecionadas a seguir apenas algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- Estudo envolvendo a variação do tempo de exposição dos corpos-de-prova ao ensaio acelerado;
- Estudo sobre a capacidade de proteção de argamassas de revestimento utilizando a exposição natural dos corpos-de-prova;
- Estudo mais detalhado a respeito do efeito resistência na região de interface, argamassa-concreto;
- Estudo sobre o transporte de cloretos em sistemas duplos, argamassa-concreto, envolvendo diferentes argamassas industrializadas;
- Estudo da capacidade de proteção de sistemas de pintura em relação ao transporte de cloretos no concreto;
- Estudo sobre a modelagem numérica do transporte de cloretos em sistemas duplos argamassa – concreto.

7 REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. **ASTM C 1152**. In: Annual Book of Standards. Philadelphia, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – Standard Test Method of Sat Spray (Fog) Testing. **ASTM B 117**. In: Annual Book of Standards. Philadelphia, 1990.

ANDRADE, C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C. Electrochemical Techniques for Measuring Corrosion in Concrete – Progress Report. **Materials and Structures**, v. 31, p. 153-157, 1988.

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

ANDRADE, C. **Últimos Avances en el Calculo de la Vida Util del Hormigon Estructural**. In: Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural (2000, Punta del Este, Uruguay). **Memórias...**[CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000, 31p.

- ANDRADE, C.; DIEZ, J. M.; ALONSO, C. Modelling of Skin Effects on Diffusion Process in Concrete. **Advn Cem Mat**, v. 6, p. 39-44, 1997.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Técnicas Electroquímicas Cual y Cunatitativas para Medir los Efectos de Lãs Adiciones sobre la Corrosión de lãs Armaduras. **Materiales de Construcción**, n. 182, p. 69-78, 1981.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à Previsão de Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação Por Cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 893-902, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281** – Argamassas de assentamento e revestimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14081**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro 1982;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassas e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76** - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

BAKKER, R. F. M. Initiation Period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM/ Chapman and Hall, 1988, p. 22-55.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Vol. 1, 5ª ed São Paulo, LTC, 1994.

BELLEI, H. N.; LIMA, M. G.; **Estudo do Desempenho de Perfis Estruturais Metálicos Soldados por Alta Frequência Usados na Construção de Edifícios**. In: III

Congresso Internacional da Construção Metálica, 2005, Ouro Preto.

CALÇADA, L.M.L. **Estudo da Eficácia do Ensaio de Migração de Cloretos na Previsão da Durabilidade dos Concretos**. Exame de qualificação (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. 1ª ed São Paulo, Pini – UFG, 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the Steady and Non-steady-state Chloride Diffusion Coefficients in a Migration Test by Means of Monitoring the Conductivity in the Anolyte Chamber – Comparison with Natural Diffusion Tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1411-1420, 2001.

CASTRO, P.; RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of Chloride Profiles from Concrete Exposed to Tropical Marine Environments. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 529-537, 2001.

CERNÝ, R.; PAVLÍK, Z.; ROVNANÍKOVÁ, P. Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 705-715, 2004.

CHANDRA, S.; CEDERWALL, K.; NILSON, I. H. E. **Durability Problems in Swedish Concrete Bridges – Case Studies**. In: P. K. Metha Symposium on Durability of Concrete, 1994, Nice. **Proceedings ... Nice: ACI**, 1994, p. 223-241.

CINCOTO, M. A.; CARNEIRO, A. M. P. **Estudo da Influência da Distribuição Granulométrica nas Propriedades de Argamassas Dosadas por Curva Granulométrica**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 1999, Vitória. **Anais...** 1999, CD-ROM.

COUTINHO, J. S. **Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 1998.

CRANK, J.; MCFARLANE, N.R.; NEWBY, J. C.; PATERSON, G. D.; PEDLEY, J. B. **Diffusion Processes in Environmental Systems**. Londres, Macmillan Press LTD – 1981.

DHIR, R. K.; JONES, M. R.; ELGHALY, A. E. **PFA Concrete: Exposure Temperature**

Effects on Chloride Diffusion. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 5, p. 1105-1114, 1993.

GONÇALVES, S. R. C.; BAUER, E. **Estudo de Caso da Variação da Resistência de Aderência à Tração em uma Parede**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. **Anais...** 2005, CD-ROM.

GU, P. et al. Corrosion Resistance of Stainless Steel in Chloride Contaminated Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 8, p. 1151-1156, 1996.

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

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

JALALI, S. Universidade do Minho. Escola de Engenharia. **Complementos dos Materiais de Construção**. Guimarães – Portugal, 2004.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1497-1504, 1999.

KHATIB, J. M.; MANGAT, P. S. Influence of High-Temperature and Low-Humidity Curing on Chloride Penetration in Blended Cement Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1743-1753, 2002.

LINDVALL, A. Chloride Ingress Data from Field and Laboratory Exposure – Influence of Salinity and Temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 88-93, 2007.

MANGAT, P.S.; MOLLOY, B.T. Prediction of Free Chloride Concentration in Concrete Using Routine Inspection Data. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n. 169, p. 279-287, 1994.

MARANHÃO, F. L.; JOHN, V. M. **Avaliação da Influência do Teor de Umidade na Flexibilidade de Argamassas Colantes** In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2007, Recife. **Anais...** 2007, CD-ROM.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1994.

MEIRA, G. R. **Agressividade por Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha Frente ao Problema da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, C.; BORBA, J. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 667-676, 2007.

MOHAMMED, T. U.; HAMADA, H. Relationship Between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1487-1490, 2003.

MONTEIRO, E. B.; HELEN, P.; BARBOSA, P. **A Técnica de Extração Eletroquímica de Cloretos – Nova Técnica de Reabilitação de Estruturas com Problemas de Corrosão**. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, 2003, Vitória. **Anais...IBRACON**, 2003, CD-ROM.

MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. **Avaliação do Método de Extração Eletroquímica de Cloretos para Reabilitação de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão de Armaduras**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

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

NIELSEN, E. P.; GEIKER M. R. Chloride Diffusion in Partially Saturated Cementitious Material. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 133-138, 2003.

NUGUE, F.; LORENTE, S.; OLLIVIER, J. P. Basis for the Prediction of Chloride Ingress into Cement-Based Materials. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v. 1, n. 1, p.10-21, 2004.

OH, B. H.; JANG, S. Y. Effects of Material and Environmental Parameters on Chloride Penetration Profiles in Concrete Structures. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 47-53, 2007.

- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; TARRAS, A. Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 395-406, 1981.
- PARAVISI, S.; MASUERO, A. B.; BONIN, L. C.; ISATTO, E. L. **Avaliação da Produção de Revestimento de Fachada de Argamassa com projeção Mecânica e Manual**. In: : VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2007, Recife. **Anais...** 2007, CD-ROM.
- PARROTT, L. J. A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. **Cement and Concrete Association: Building Research Establishment**, 1987.
- PEREIRA, C. H. A. F.; FIGUEIREDO, E. J. P.; BAUER, E. Avaliação da Influência da Adição de Fibras Sintéticas ao Concreto Quanto ao Ingresso de Íons Cloreto. **Vetor**, Rio Grande, v. 15(2), p. 7-17, 2005.
- PEREIRA, L. F. L.; CINCOTO, M. A. **Determinação de Cloretos em Concreto de Cimentos Portland: Influência do Tipo de Cimento**. Boletim Técnico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos: Influência do Tipo de Cimento, da Relação A/C, da Temperatura e do Tempo de Cura**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- PINHO, M. S.; SEBRÃO, M. Z.; NUNES, R. C. R.; SOARES, B. G. Avaliação da Resistência à Corrosão de Compósitos Ferromagnéticos com Policloropreno ao Ensaio de Névoa Salina. **Polímeros**, v. 13, n. 1, 2003.
- QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. **Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis. **Anais...** 2005, CD-ROM.
- SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent Studies of Chloride Ingress in Uncracked Marine Concrete at Various Exposure Times and Elevations. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 10, p. 1489-1503, 1998.
- SCHNEIDER, J. A.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAÍIA, G. C.; WEGNER, D. A. **eficiência da Escória de Alto Forno e Ativador Químico na Penetração de Íons Cloreto no Concreto**. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife. **Anais...** IBRACON, 2005, CD-ROM.

SILVA, D.; TRISTÃO, F. A.; ROMAN, H. R.; SOUZA, F. K. **Argamassas Intermediárias de Cal e Areia para Revestimentos: Efeitos das Características da Areia**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, São Paulo. **Anais...** 2003, CD-ROM.

SILVA, F. G. **Estudo de Concreto de Alto Desempenho Frente à Ação de Cloretos**. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TANG, L. Concentration Dependence of Diffusion and Migration of Chloride Ions Part 1. Theoretical Considerations. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1463-1468, 1999.

THOMAS, M. Chloride Thresholds in Marine Concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 26, n. 4, p. 513-519, 1996.

THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J. D.; HAYNES, C. A. **Chloride diffusion and reinforcement corrosion in marine exposed concretes containing pulverized-fuel ash**. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete, 1990, Warwickshire (Edited by Page, Treadaway and Bamforth) **Proceedings...** Warwickshire: SCI, 1990. p. 198-212.

TONG, L.; GJØRV O. E. Chloride Diffusivity Based on Migration Testing. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 973-982, 2001.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 468 p.

TUUTTI, K. **Effect of cement type and different additions on service life**. In: Concrete 2000 – Economic and Durable Construction Through Excellence (Edited by Dhir and Jones, 1993: Scotland, UK) **Proceedings...** Belfast: SCI, 1990. p. 258-267.

WANG, Y.; LI, L.; PAGE, C. L. Modelling of Chloride Ingress into Concrete from a Saline Environment. **Building and Environment**, v. 40, p. 1573-1582, 2005.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO EM PESQUISA DE CAMPO

Questionário para realização de diagnóstico sobre revestimentos externos

Identificação da edificação

Construtora: _____

Edifício: _____

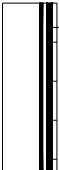
Bairro:

() Cabo Branco () Tambaú () Manaíra

Rua: _____

Aspectos relativos ao revestimento externo

1º Qual a estrutura da camada de revestimento?

()  Argamassa
Colante

()  Pasta de
cimento

() Sem revestimento cerâmico

() Outros

2º Se argamassa colante, qual a marca?

Se pasta de cimento, qual o traço?

Se outra, descrição.

3º Existe algum tipo de preparação do substrato, concreto, para melhorar sua aderência?

() Escovação manual () Escovação mecânica () Lavagem () Outras

4º Qual a dosagem empregada no chapisco?

5º É utilizado aditivo no chapisco?

() Sim Que tipo?

() Não

6º Qual a técnica de aplicação do chapisco?

() Manual () Rolo () Outras

7º Qual a dosagem da argamassa de regularização (emboço)?

8º Qual a espessura de projeto da argamassa de regularização? _____ cm

9º Qual a espessura média, na prática, da argamassa de regularização?

Começa com _____ cm

Termina com _____ cm

Média _____ cm

10º Qual a técnica de aplicação da argamassa de regularização? _____

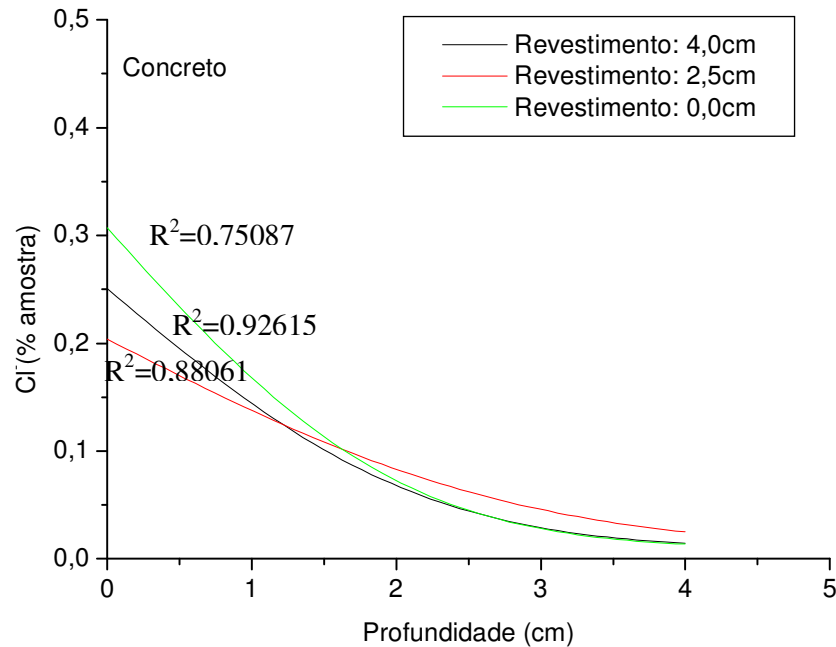
11º Qual o tempo de espera (cura) para cada fase?

Concreto _____ dias → Chapisco _____ dias → Emboço _____ dias → Revestimento cerâmico

APÊNDICE B – COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO

As tabelas a seguir apresentam, de acordo com o exemplo, os coeficientes de determinação (R^2) das regressões apresentadas no Capítulo 5.

- Regressões relacionadas ao item 5.2 – INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO EXTERNO NO TRANSPORTE DE CLORETOS NO CONCRETO



Perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.

Espessura do revestimento	R^2
0,0cm	0,75087
2,5cm	0,92615
4,0cm	0,88061

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:2:9.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,75087
2,5cm	0,75047
4,0cm	0,79914

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:1:6.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,75087
2,5cm	0,67524
4,0cm	0,78914

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de difusão, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:3.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,75087
2,5cm	0,86161
4,0cm	0,13726

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa industrializada.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,68481
2,5cm	0,93341
4,0cm	0,91065

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:2:9.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,68481
2,5cm	0,72081
4,0cm	0,87077

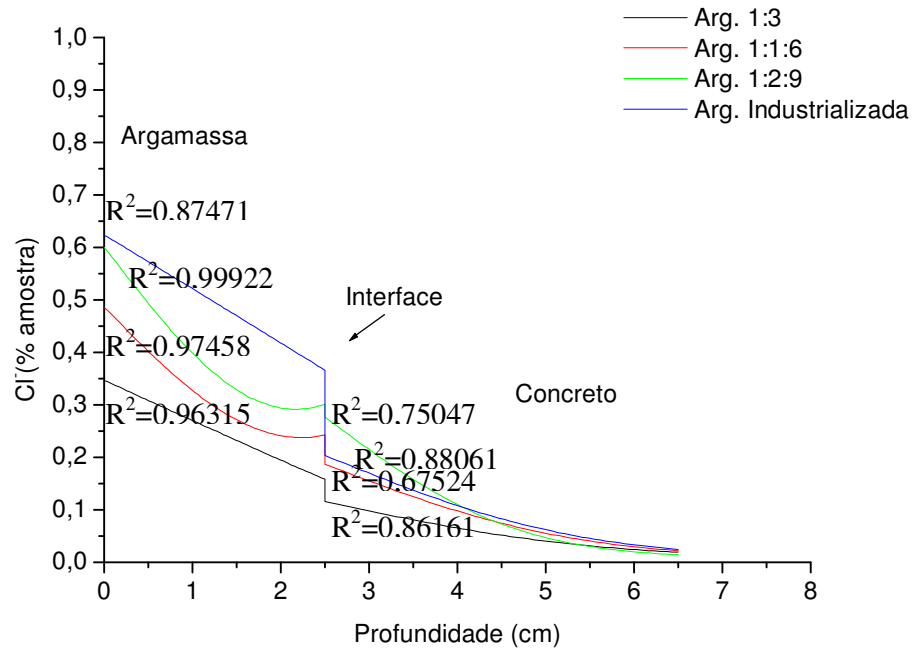
Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:1:6.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,68481
2,5cm	0,81121
4,0cm	0,75811

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos no concreto, obtidos através do ensaio de imersão e secagem, para os corpos-de-prova de referência e para aqueles com revestimento em argamassa 1:3.

Espessura do revestimento	R²
0,0cm	0,68481
2,5cm	0,73827
4,0cm	0,57121

- Regressões relacionadas ao item 5.3 – PRESENÇA DO EFEITO RESISTÊNCIA NA INTERFACE ENTRE ARGAMASSA E CONCRETO



Perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 2,5cm de revestimento.

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 2,5cm de revestimento.

Dosagem	R ²	
	Argamassa	Concreto
1:3	0,96315	0,86161
1:1:6	0,97458	0,67524
1:2:9	0,99922	0,75047
Argamassa industrializada	0,87471	0,88061

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de difusão e moldados com 4,0cm de revestimento.

Dosagem	R^2	
	Argamassa	Concreto
1:3	0,99418	0,13726
1:1:6	0,96112	0,78941
1:2:9	0,88894	0,79914
Argamassa industrializada	0,92207	0,92615

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão e secagem e moldados com 2,5cm de revestimento.

Dosagem	R^2	
	Argamassa	Concreto
1:3	0,97085	0,73827
1:1:6	0,95753	0,81121
1:2:9	0,97980	0,72081
Argamassa industrializada	0,95427	0,93341

Coefficientes de determinação relativos aos perfis de cloretos ajustados para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de imersão e secagem e moldados com 4,0cm de revestimento.

Dosagem	R^2	
	Argamassa	Concreto
1:3	0,93926	0,57121
1:1:6	0,95614	0,75811
1:2:9	0,93453	0,87077
Argamassa industrializada	0,91546	0,91065

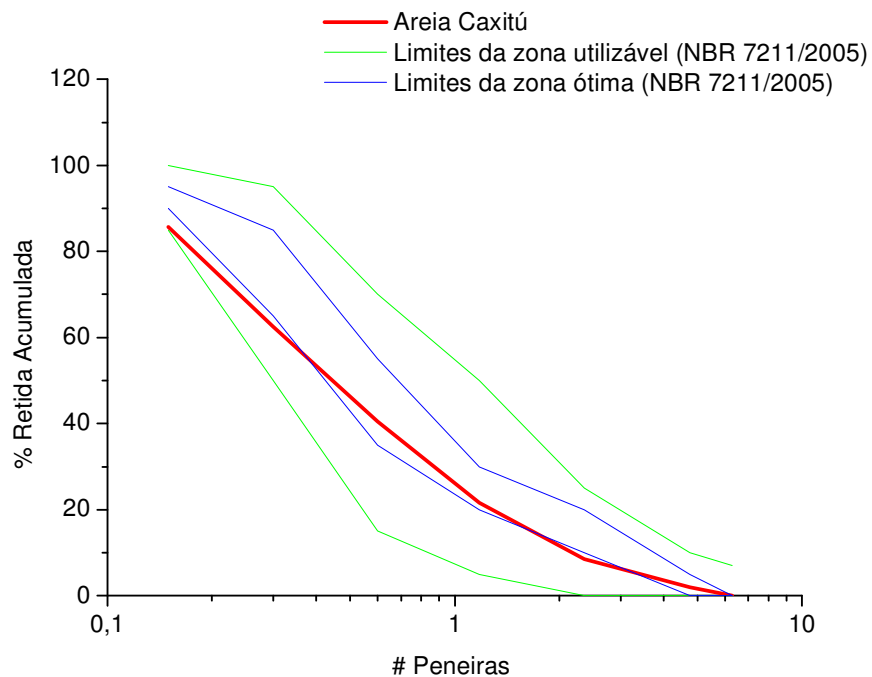
**ANEXO A – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, CURVAS GRANULOMÉTRICAS E
ENSAIOS RELATIVOS A IMPUREZAS E CONTAMINAÇÕES DOS AGREGADOS
UTILIZADOS**

Características físicas e resultados dos ensaios relativos a impurezas e contaminações dos agregados:

Propriedades físicas, impurezas e contaminações relacionados aos agregados utilizados.

	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa Unitária (Kg/dm^3)	1,672	1,404
Massa Específica (g/cm^3)	2,590	2,600
Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (%)	0,165	0,000
Impurezas Orgânicas	ok	ok

Curva e composição granulométrica do agregado miúdo:



Curva granulométrica do agregado miúdo.

Composição granulométrica do agregado miúdo.

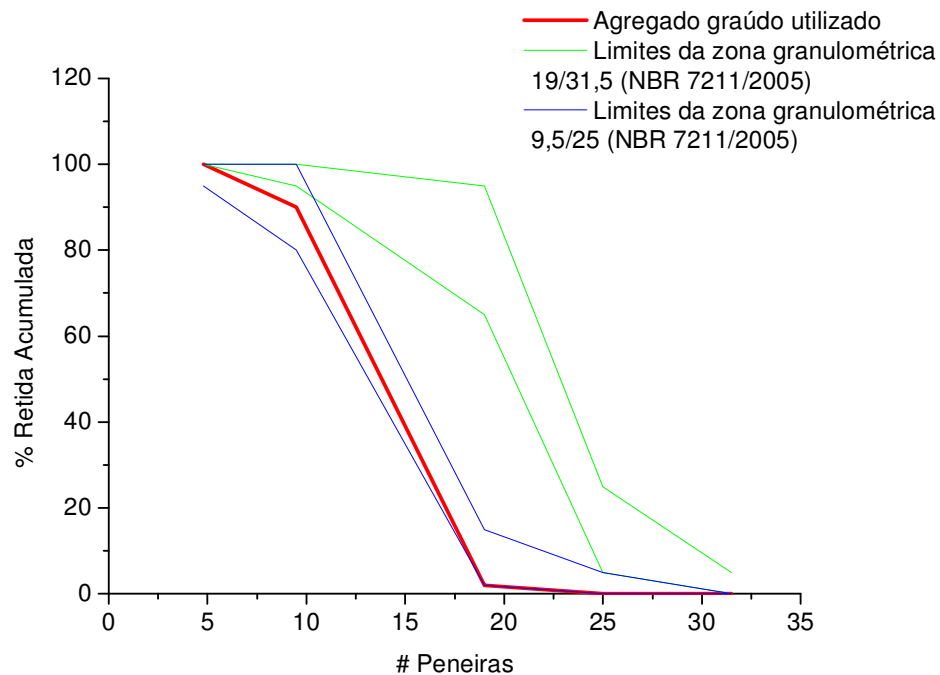
Areia utilizada (Caxitú)			
Peneiras (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,80	19,93	1,99	1,99
2,40	65,54	6,55	8,55
1,20	130,10	13,01	21,56
0,60	189,82	18,98	40,54
0,30	220,03	22,00	62,54
0,15	231,82	23,18	85,72
Resíduo	142,76	14,28	100,00

De acordo com a Tabela acima pode-se calcular:

Módulo de Finura= 2,21%

Diâmetro máximo característico= 4,80mm

Curva e composição granulométrica do agregado miúdo:



Curva granulométrica do agregado graúdo.

Composição granulométrica do agregado graúdo.

Agregado graúdo utilizado			
Peneiras (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada
31,5	0,00	0	0
25	0,00	0	0
19	100,95	2	2
9,5	4415,16	88	90
4,8	483,89	10	100

De acordo com a Tabela acima pode-se calcular:

Diâmetro máximo característico= 19mm