

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Tese

**Desenvolvimento de um Método para a Avaliação da Influência do
Revestimento Argamassado no Ataque de Cloretos às Estruturas de Concreto
Saturado e Não Saturado**

Jorge Luiz Saes Bandeira

Pelotas, 2022

Jorge Luiz Saes Bandeira

**Desenvolvimento de um Método para a Avaliação da Influência do
Revestimento Argamassado no Ataque de Cloretos às Estruturas de Concreto
Saturado e Não Saturado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

Pelotas, 2022.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

B111d Bandeira, Jorge Luiz Saes

Desenvolvimento de método para avaliação da influência do revestimento argamassado no ataque de cloretos às estruturas de concreto saturado e não saturado / Jorge Luiz Saes Bandeira ; Margarete Regina Freitas Gonçalves, orientadora ; André Tavares da Cunha Guimarães, coorientador. — Pelotas, 2022.

292 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Concreto. 2. Argamassa. 3. Íons cloreto. 4. Grau de saturação. 5. Difusão. I. Gonçalves, Margarete Regina Freitas, orient. II. Guimarães, André Tavares da Cunha, coorient. III. Título.

CDD : 620.11063

Jorge Luiz Saes Bandeira

**Desenvolvimento de um Método para a Avaliação da Influência do
Revestimento Argamassado no Ataque de Cloretos às Estruturas de Concreto
Saturado e Não Saturado**

**Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em
Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico,
Universidade Federal de Pelotas.**

Data da Defesa: 24 de fevereiro de 2022.

Banca examinadora:

.....
Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Orientador)

Doutora em Engenharia, área de concentração, Ciência dos Materiais pela
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

.....
Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães (Coorientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

.....
Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

.....
Prof. Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho

Doutor em Engenharia de Estrutura, Pavimentações e Materiais pela
Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha.

.....
Prof. Dr. Miguel Angel Climent

Doutor em Ciências Químicas pela Universidade de Alicante, Espanha.

*À minha família, razão de tudo: esposa
Carmen, os filhos Monique, Mônica, Yuri
e Sarah e os netos Rafael, Eduardo e
Júlia.*

Agradecimentos

A DEUS, nosso PAI MAIOR, o qual sempre nos reserva algo de bom na nossa caminhada, que eu tenha sempre a sabedoria e humildade para merecer suas graças.

À minha Família, que em muitos momentos deste trabalho tiveram de abrir mão da minha presença para que este fosse plenamente realizado e assim, agradeço imensamente à minha esposa Carmen pelo apoio e a nossa caçulinha Sarah que em vários momentos deixou de ter o pai presente nas suas brincadeiras.

À Professora Margarete Regina Freitas Gonçalves, por acreditar no meu trabalho desde o seu aceite para ser a minha orientadora e que desde lá sempre me acolheu, incentivou e orientou com muito zelo, responsabilidade, mas sobretudo com muito apreço.

Ao meu coorientador, amigo de muitas jornadas de estudos e com muitos méritos um grande pesquisador, Professor André Tavares da Cunha Guimarães, que ao longo do trabalho nunca se furtou de sua responsabilidade, me orientando, me cobrando, me incentivando e me proporcionando todo o seu conhecimento científico sempre com muito zelo profissional e paciência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da UFPEL, através de seu Coordenador Prof. Neftali Lenin Villarreal Carreño e aos professores, pela sempre atenção e cordialidade.

Ao Laboratório de Geotecnia e Concreto da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) onde pude realizar todas as pesquisas, em que tive parceria, colaboração e sobretudo amizade. Na pessoa do diretor Prof. Cezar Bastos, meu agradecimento especial e também aos colegas professores, laboratoristas Júlio, Luciano e Régis e secretárias Rubilaine e Lisiane, que em nenhum momento se furtaram de me ajudar, apoiar e incentivar.

Enfim a todos que, direta e indiretamente, colaboraram para a realização do presente trabalho. Deus os proteja sempre.

*“Ser Feliz não é ter uma vida perfeita,
mas deixar de ser vítima dos problemas
e se tornar o autor da própria história”.
(Abraham Lincoln)*

Resumo

BANDEIRA, Jorge Luiz Saes. **Desenvolvimento de um Método para a Avaliação da Influência do Revestimento Argamassado no Ataque de Cloretos às Estruturas de Concreto Saturado e Não Saturado**. 2022. 292f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

O concreto de cimento Portland é, atualmente, um dos materiais de construção civil mais utilizados no mundo, apresentando-se em suas modalidades em concreto simples, armado e protendido como material principal de estruturas ou como material coadjuvante, por exemplo, em estruturas metálicas mistas. Presentes nas águas do ambiente marinho e entornos bem como em instalações de dessalinização, locais de degelo que utilizam sais fundentes, etc., os íons cloreto contribuem de forma intensa para a corrosão da armadura das estruturas de concreto localizadas nesses ambientes, sendo o grau de saturação do concreto (GS) um importante fator para que esses íons penetrem em sua microestrutura. Visando a durabilidade das estruturas de concreto inúmeros estudos foram efetuados nas últimas décadas, no entanto, raramente contemplaram a atuação da argamassa como revestimento do concreto nesse ambiente. Neste contexto, essa pesquisa objetiva o desenvolvimento de método que avalie a influência do revestimento argamassado no concreto na condição saturado e não saturado. Para tal fim, foram desenvolvidos experimentos, em laboratório, com a utilização de amostras únicas de argamassa, de concreto e revestidas, onde são expostas à difusão do cloreto de sódio com GS de 100%, 80% e 60%. As amostras foram divididas em dois grupos: um grupo para avaliação do comportamento do GS na condição revestida e outro grupo para a avaliação da difusão. Para análise do GS foi pesquisada adaptações na metodologia existente, visando as amostras de concreto revestidas e para a análise da difusão foi utilizado um modelo matemático. Com os resultados obtidos, concluiu-se que para determinar o GS em amostras compostas devem ser feitas separando-se as partes e medindo o GS de cada parte e no aspecto da difusão verificou-se que, embora a condição microestrutural da argamassa em relação ao concreto, houveram alterações no fluxo dos cloretos na condição revestida comparativamente ao concreto aparente, e que as relações entre os valores do coeficiente de difusão da argamassa e concreto quando atuam de forma única e na atuação conjunta são mais definidos para GS maiores e com mais idade de ensaio.

Palavras-chave: concreto; argamassa; íons cloreto; grau de saturação; difusão.

Abstract

BANDEIRA, Jorge Luiz Saes. **Development of a Method for Assessing the Influence of Mortared Coating on Chloride Attack on Saturated and Unsaturated Concrete Structures**. 2022. 292f. Thesis (Doctoral Degree in Science and Materials Engineering) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

The reinforced Portland concrete, is one of the most used construction material in the world. There is many types of concrete: simple concrete, steel bar reinforced concrete and others putting this material as one of the main when building infrastructure or as supporting role, for example, in mixed metallic structures. Present in the waters of the marine environments and surroundings as well as in desalinization facilities, defrost sites that fluxing salts, etc. Chloride contribute intensely to the corrosion if the reinforcement of the structures of the concrete located in these environments, and the degree of saturation of course is an important factor of these ions to penetrate into their microstructure. Aiming at the durability of concrete structures, numerous studies have been carried out in recent decades, however, they rarely, contemplated the performance of the mortar as a concrete coating in this environment. In this context, this research aims at the development of a method that evaluates the influence of mortar coating on concrete in saturated and unsaturated conditions. To do so, experiments were carried out in the laboratory with the use of single samples of mortar, concrete and coated, where they are exposed to the diffusion of sodium chloride with 100, 80 and 60% SD. The samples were divided into two groups: one group for evaluation of the behavior of SD in the coated condition and another group for the evaluation of diffusion. For SD analysis, adaptations to the existing methodology were researched, aiming at the coated concrete samples and for diffusion analysis a mathematical model was used. With the results obtained, it was concluded that the SD determinations in composite samples it must be done by separating the parts and measuring the SD of each part and in the diffusion aspect verified-whereas, although the microstructural condition of the mortar in relation to the concrete, there have been changes in the flow of chlorides in the condition coated compared to the apparent concrete, and that the relationships between the values of the mortar diffusion coefficient and concrete when acting uniquely and in the joint action are more defined for larger SD and with older test age.

Keywords: concrete; mortar; chloride ions; degree of saturation; diffusion

Lista de Figuras

Figura 1-	Esquema de uma estrutura em concreto armado exposta às ações do ambiente marítimo.....	34
Figura 2-	Fluxograma dos aspectos da durabilidade em estruturas de concreto armado.....	36
Figura 3-	Gráfico do modelo de vida útil.....	39
Figura 4-	Gráfico do modelo de vida útil.....	40
Figura 5-	Ábaco para estimar espessura de cobrimento de armaduras para zona predominante de névoa. Considerando 40mm como cobrimento mínimo para ambiente marítimo pela norma NBR 6118 (ABNT, 2000).....	41
Figura 6-	Nomograma utilizado para obter o coeficiente de difusão do cloreto – R_{GS} – valor médio anual levando em consideração as variações sazonais do GS.....	43
Figura 7-	Desenho esquemático das formas de ocorrência de íons cloreto na microestrutura dos materiais cimentícios.....	58
Figura 8-	Gráfico da relação entre cloretos fixos e livres, através das isotermas de Langmuir, Freundlich e isoterma linear.....	59
Figura 9-	Gráfico da influência de C_3A no cloreto ligado em pastas de cimento contendo adições de cloretos.....	60
Figura 10-	Desenho esquemático da influência do mecanismo da carbonatação sobre a difusão de cloretos.....	61
Figura 11-	Forma esquemática dos principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior da rede porosa dos materiais.....	64
Figura 12-	Gráfico de coeficientes para absorção capilar em função da umidade relativa interna de concretos com relação a/c diferentes.....	68
Figura 13-	Representação esquemática dos fatores que interveem no mecanismo de absorção capilar.....	69
Figura 14-	Desenho esquemático com as diferentes zonas de umidade para estruturas costeiras e marítimas.....	70
Figura 15-	Desenho esquemático com modelo de difusão, em regime estacionário, de um gás em uma placa metálica: (a) difusão do gás na placa; (b) perfil de concentrações linear para a difusão no modelo esquemático.....	73
Figura 16-	Gráfico de concentração de elemento em difusão com a variação no tempo, de acordo com o segundo estágio da difusão, estágio não estacionário.....	74
Figura 17-	Gráfico de perfil de concentração para difusão em regime não estacionário.....	76
Figura 18-	Gráfico de relação entre coeficiente de difusão e temperatura.....	82
Figura 19-	Gráfico da relação entre o teor de umidade no interior do concreto e a umidade relativa do ambiente externo.....	83
Figura 20-	Gráfico da relação entre o C_s e distância desde a estrutura até a linha de maré.....	85

Figura 21-	Gráfico representando o modelo da influência da altura sobre o valor de C_s	86
Figura 22-	Gráfico de perfil de cloretos e a distância do concreto em relação ao mar.....	88
Figura 23-	Gráfico de perfil de cloretos de pastas de cimento com diferentes condições de exposição.....	89
Figura 24-	Esquema e gráfico demonstrando as diferentes condições de uma estrutura de concreto situada em ambiente marítimo.....	89
Figura 25-	Esquema e gráfico demonstrando as diferentes condições de uma estrutura de concreto parcialmente enterrada.....	91
Figura 26-	Gráfico de relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e grau de saturação de vários concretos executados com aglomerantes diferentes.....	92
Figura 27-	Representação gráfica do percentual das faixas dos diâmetros dos poros para cada tipo de concreto.....	93
Figura 28-	Gráficos demonstrando a influência da adição de cinza volante ou escória de alto-forno na evolução da estrutura porosimétrica de pastas de cimento, em relação ao tempo.....	95
Figura 29-	Gráfico de perfil de cloretos para concretos com adições, comparativamente com concreto sem adição, em amostras situadas em ambiente marítimo após 18 anos.....	96
Figura 30-	Gráfico demonstrando a estrutura de poros em pastas cimentícias com e sem adições.....	96
Figura 31-	Gráfico relacionando o coeficiente de difusão de cloretos e o fator de espaçamento de fissuras em concreto fissurado por ataque de congelamento-degelo.....	98
Figura 32-	Gráfico que relaciona a porosidade de concreto com a relação a/c	100
Figura 33-	Gráfico do efeito da cura e da relação a/c na profundidade limite de cloretos.....	103
Figura 34-	Ilustração do mecanismo de deterioração de estrutura de concreto exposta a ambiente marinho em diferentes escalas.....	104
Figura 35-	Gráficos teor de difusão de cloretos: a) somente ação de cloretos; b) ação combinada de cloretos e carbonatação.....	105
Figura 36-	Gráfico que relaciona volume de poros de pastas de cimento, relação a/c e o diâmetro dos poros.....	107
Figura 37-	Esquema das diferentes formas dos poros no interior das massas cimentícias.....	108
Figura 38-	Esquema das diferentes posições para extração de testemunhos	109
Figura 39-	Imagem através de MEV destacando a presença da zona de transição na interface pasta e agregado.....	110
Figura 40-	Desenho esquemático da forma de deterioração progressiva devido à corrosão do aço do concreto: a) penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade; b) fissuração devida às forças de expansão dos produtos de corrosão; c) lascamento do concreto e redução da seção da armadura.....	114
Figura 41-	Ilustração com formas de corrosão na armadura do concreto.....	115
Figura 42-	Desenho esquemático de uma seção de concreto com os elementos constituintes para a despassivação da armadura.....	116

Figura 43-	Desenho digitalizado do meio poroso construído a partir de modelo computacional, onde as partes mais claras representam o sólido e as demais, representam os poros.....	120
Figura 44-	Gráfico com valores médios do coeficiente de difusão efetivo (Def) em função do GS.....	121
Figura 45-	Desenho esquemático da rede de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes valores de GS.....	122
Figura 46-	Gráficos da medida do GS médio ao longo do tempo: a) concretos com relação a/c de 0,65; b) concretos com relação a/c de 0,5.....	126
Figura 47-	Gráfico das médias sazonais do GS.....	127
Figura 48-	Ilustrações da distribuição de umidade e rede de poros de pasta com GS de 50%: a) e b) distribuição inicial; c) e d) distribuição simulada de umidade e vapor.....	129
Figura 49-	Gráfico da evolução do coeficiente de difusão efetivo com GS obtida para amostras de 5 e 10 meses após o início da difusão....	131
Figura 50-	Gráfico da variação de GS do concreto de 18 anos ao longo da superfície até 140 mm.....	133
Figura 51-	Representação esquemática da distribuição de umidade e transporte de cloreto (Cl ⁻) em sistemas de poros.....	134
Figura 52-	Gráfico com exemplo do perfil de umidade em concreto após 2 anos de exposição a ambiente marinho e transporte de cloreto....	135
Figura 53-	Gráfico da evolução do coeficiente de difusão de cloretos D (t; GS) com a idade (28 dias 50 anos) em argamassa cimentícia com vários graus de saturação (GS).....	135
Figura 54-	Ilustração de amostra da microestrutura de uma argamassa mista de cal e cimento traço de 1:2:12, onde a parte em azul são os vazios da interface pasta-agregado e pasta muito porosa.....	138
Figura 55-	Desenho esquemático das solicitações impostas às superfícies externas das construções.....	139
Figura 56-	Desenho esquemático da microestrutura de um revestimento argamassado: a) argamassa com alto teor de cimento provocando fissuras na superfície por retração na secagem; b) argamassa com baixo teor de cimento sem provocar fissuras na superfície mas com falhas na interface pasta/agregado.....	145
Figura 57-	Gráfico da distribuição de volume dos poros de três argamassas.....	149
Figura 58-	Fluxograma com etapas do desenvolvimento experimental.....	151
Figura 59-	Fluxograma com etapas do desenvolvimento experimental, fase de Pré-Testes.....	153
Figura 60-	Fotografias para confecção dos CPs: a) b) CPs de concreto (10x20cm); c) d) CPs de argamassa (10x2,5cm); e) Forma para revestimento de CPs de concreto (revestimento 2,5cm); f) Colocação de anel de silicone antes execução do revestimento; g) Execução de revestimento argamassado; h) CPs de concreto revestido.....	155
Figura 61-	Desenho esquemático dos cortes nos CPs de concreto.....	161

Figura 62-	Fotografias dos procedimentos para uniformização dos CPs: a) conjunto 1; b) conjunto 2; c) lacramento com guilhotina térmica; d) colocação em estufa 50°C.....	159
Figura 63-	Fotografias dos procedimentos para separação das partes dos CPs revestidos: a) anel de silicone na interface concreto-argamassa; b) início da retirada do anel; c) anel retirado; d) separação; e) retirada de todo resíduo de argamassa; f) pesagem de cada parte (argamassa e concreto).....	160
Figura 64-	Equipamento para extração; a) desenho esquemático; b) de sequência de montagem do equipamento.....	162
Figura 65-	Desenho esquemático das disposições e dimensões das camadas de extração dos CPs revestidos.....	163
Figura 66-	Fotografia das ferramentas e utensílios utilizados para a extração de amostras pulverizadas dos CPs.....	163
Figura 67-	Fotografias do processo de extração de amostras pulverizadas dos CPs de concreto revestido: a); b) fixação do CP no equipamento de extração; c);d); e) extração com furadeira elétrica; f) controle de espessura de camada com paquímetro; g) juntar material em pó para retirar; h) remover material em pó; i); j) revestimento em argamassa com extração pronta.....	164
Figura 68-	Amostras dos materiais constituintes dos CPs: a) cimento Portland; b) brita nº 1 e nº 0; c) areia; d) cal hidratada.....	165
Figura 69-	Gráfico da composição granulométrica da areia utilizada.....	168
Figura 70-	Gráfico da composição granulométrica agregado graúdo.....	169
Figura 71-	Desenho esquemático com dimensões e forma dos CPs confeccionados.....	172
Figura 72-	Fotografias da confecção e cura dos CPs: a) CPs de argamassa e concreto revestido; b) confecção dos CPs de concreto (10x20cm); c) CPs em câmara úmida; d) CPs de concreto em cura por imersão de 21 dias.....	172
Figura 73-	Fotografias dos ensaios de caracterização dos materiais: a) consistência do concreto por Slump Test; b) resistência à compressão concreto; c) CPs de argamassa para ensaios de resistência mecânica; d) resistência à compressão em CPs de argamassa; e) resistência à tração na flexão de CPs de argamassa; f) pesagem hidrostática de CPs; g) CP de argamassa após rompimento de flexão; h) ensaio de absorção por capilaridade em CPs de concreto e argamassa.....	174
Figura 74-	Fluxograma para avaliação do comportamento do GS nos CPs de concreto revestido (CR).....	176
Figura 75-	Fluxograma para a saturação de água dos CPs com o sistema a vácuo.....	177
Figura 76-	Sistema de saturação a vácuo: a) recipiente com fechamento hermético e válvulas para controle de fluxo da água e do vácuo; b) depósito graduado para água destilada; c) bomba de vácuo; d) sistema completo.....	178
Figura 77-	Procedimentos antes e após aplicação do sistema de saturação a vácuo: a) pesagem inicial das amostras; b) pesagem final; c) imersão em água destilada até novos procedimentos do experimento.....	179

Figura 78-	Fotografias da obtenção do GS alvo de 80% e 60% para cada tipo de CPs: a) estufa com controle de temperatura 50°C; b) interior da estufa com os CPs em secagem parcial.....	179
Figura 79-	Fotografia do material para ensacamento CPs; sacos plásticos e fita de alta adesão.....	181
Figura 80-	Fotografia dos materiais e equipamentos utilizados para ensacamento dos conjuntos de CPs.....	182
Figura 81-	Fotografias da colocação dos espaçadores de borracha nos CPs do conjunto.....	183
Figura 82-	Fotografia do ensacamento de um Conjunto de CPs com os espaçadores e disposição definida.....	183
Figura 83-	Fotografias do fechamento hermético com seladora elétrica de um Conjunto de CPs.....	184
Figura 84-	Fotografias da utilização de vácuo para vedação complementar em conjunto de CPs: a) sistema duto-bomba de vácuo; b) aplicação do vácuo; c) vácuo aplicado.....	184
Figura 85-	Fotografias dos CPs em estufa a 50°C para uniformização da umidade: a) detalhe de 1 conjunto; b) vários conjuntos.....	185
Figura 86-	Fotografias dos procedimentos para determinação GS de cada parte separada dos CPs tipo CR: a) pesagem do conjunto após uniformização da umidade; b) retirada do invólucros dos CPs; c) pesagem de cada CPs do conjunto; d); e); f); separação da argamassa de revestimento do concreto em CPs tipo CR; g); h) pesagem após separação; i); j) saturação a vácuo; k) l) pesagens das partes após saturação.....	187
Figura 87-	Fotografias dos procedimentos para contaminação dos CPs com NaCl: a) recipiente de cloreto de sódio; b) trituração; c) moagem peneira; d) CPs com 10g de sal; e) vedação do contaminante f) CPs contaminado e vedado.....	189
Figura 88-	Gráfico para cálculo da densidade da solução em função da UR..	190
Figura 89-	Gráfico para cálculo do glicerol em função da UR.....	191
Figura 90-	Fotografias dos procedimentos para acondicionamentos dos CPs para o processo de difusão: a) dosagem glicerol e água destilada; b) apoio em PVC para CPs; c) CPs contaminados e devidamente acondicionados; d) acondicionamento por GS; e) acondicionamento em ambiente com temperatura controlada.....	193
Figura 91-	Desenho esquemático das camadas para extração nos CPs tipo C e tipo ARG50.....	195
Figura 92-	Fotografias dos procedimentos para extração do material em pó: a); b) pesagem para verificar GS médio; c) retirada de algum resquício de NaCl com escova de aço; d) lixamento da superfície que recebeu o cloreto de sódio; e) aplicação de ar comprimido como última etapa de limpeza superficial; f) amostra tipo CR com extração concluída da parte do revestimento; g) amostra tipo C com extração concluída; h) material em pó proveniente da extração; i) material extraído de cada camada e embalado.....	196

Figura 93-	Fotografias dos procedimentos para obtenção dos perfis de cloreto: a); homogeneização das amostras; b) pesagem em balança analítica; c) secagem em estufa; d) (80%)esfriamento em dessecador; e) aplicação de solução de ácido nítrico; f) fervura; g) lavagem paredes recipiente pós fervura; h) aplicação de hidróxido de cálcio; i) correção de pH; j) Amostras prontas para a potenciometria; k); l) potenciometria.....	199
Figura 94-	Fotografia da balança analítica utilizada nas pesagens das amostras: a) balança; b) detalhes técnicos da balança.....	200
Figura 95-	Fotografia do Titulador potenciométrico modelo Q-799D: a) pHmetro; b) titulador.....	200
Figura 96-	Gráfico do perfil de penetração de cloretos ajustado.....	201
Figura 97-	Gráfico do perfil de penetração de cloretos ajustado para CPs tipo CR.....	203
Figura 98-	Gráfico da demonstração da variação do GS em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, na fase de pré-testes.....	206
Figura 99-	Gráfico da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, na fase de pré-testes.....	206
Figura 100-	Gráfico da demonstração da variação do GS (80%)em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C.....	207
Figura 101-	Gráfico da demonstração da variação do GS (60%) em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C.....	208
Figura 102-	Gráfico da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, GS proposto de 80%.....	209
Figura 103-	Gráfico da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, GS proposto de 60%.....	209
Figura 104-	Gráfico com valores de GS nas amostras de concreto: após separação do revestimento e na forma única.....	210
Figura 105-	Gráfico com valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única.....	211
Figura 106-	Gráfico dos valores de GS nas amostras de concreto: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 80%....	212
Figura 107-	Gráfico dos valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 80%....	212
Figura 108-	Gráfico dos valores de GS nas amostras de concreto: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 60%....	213
Figura 109-	Gráfico dos valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 60%....	214
Figura 110-	Gráfico dos perfis de cloretos CPs tipo C, para vários valores de GS.....	216
Figura 111-	Gráficos dos perfis de cloretos CPs tipo ARG50, para vários valores de GS.....	218
Figura 112-	Gráficos dos perfis de cloretos CPs tipo CR, para vários valores de GS.....	219

Figura 113-	Gráficos dos perfis de cloretos no concreto para corpos de prova com revestimento de espessuras de diferentes e sem revestimento.....	221
Figura 114-	Gráficos dos perfis de cloretos no concreto para corpos de prova com revestimento e sem revestimento, com variação do GS.....	221
Figura 115-	Gráficos dos perfis de cloretos CPs tipo CR, para vários valores de GS, com 280 dias de difusão.....	223
Figura 116-	Gráficos dos perfis de cloretos no concreto para CPs tipo CR de idades diferentes, com variação do GS.....	224
Figura 117-	Gráficos dos perfis de cloretos após ajuste em CPs de concreto..	225
Figura 118-	Gráfico dos perfis de cloretos após ajuste em CPs de argamassa	226
Figura 119-	Gráfico dos perfis de cloretos com aplicação da modelagem em CPs de concreto revestido.....	227
Figura 120-	Gráfico dos perfis de cloretos com aplicação da modelagem em CPs de concreto revestido com idade de difusão de 280 dias.....	228
Figura 121-	Gráfico da relação de D x GS argamassa, amostra pura (ARG)....	231
Figura 122-	Gráfico da relação de D x GS concreto, amostra pura (C).....	231
Figura 123-	Gráfico D e GS para amostra de argamassa integrante de (CR)...	232
Figura 124-	Gráfico D x GS para amostra de concreto integrante de (CR).....	233
Figura 125-	Gráfico da relação de D1 e D2 do modelo e dos materiais separados.....	235
Figura 126-	Gráfico do coeficiente de difusão, em relação ao GS, para o concreto na condição separado do sistema revestimento/concreto e no modelo (D2).....	236
Figura 127-	Gráfico D x GS para o concreto na forma única e combinada.....	236
Figura 128-	Gráficos dos modelos de previsão da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto revestido com argamassa, considerando a variação do GS, localizadas à beira mar.....	238
Figura 129-	Gráficos dos modelos de previsão da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto revestido com argamassa, considerando a variação do GS, localizadas a 100m da costa.....	239

Lista de Tabelas

Tabela 1-	Classes de agressividade ambiental (CAA).....	46
Tabela 2-	Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	47
Tabela 3-	Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.....	48
Tabela 4-	Classes de exposição gerias que produzem corrosão de armaduras.....	50
Tabela 5-	Classes de exposição em função das condições ambientais.....	51
Tabela 6-	Fator de equivalência de recobrimento (λ) para argamassas em ambiente IIIa, em função da velocidade de penetração de cloretos da argamassa de revestimento.....	52
Tabela 7-	Fator de equivalência de recobrimento (λ) para argamassas em ambiente IIIa, em função da capilaridade da argamassa de revestimento.....	53
Tabela 8-	Características da argamassa a empregar nos revestimentos.....	53
Tabela 9-	Concentração na superfície (Cs) de cloretos em estrutura de concreto.....	85
Tabela 10-	Estimativa da Concentração de Cloreto (Cs) em Estruturas de Concreto Armado em Ambientes Marinhos.....	86
Tabela 11-	Correspondência entre o ambiente de exposição da estrutura de concreto e as características considerando ambiente marítimo.....	90
Tabela 12-	Coefficientes de difusão x GS.....	125
Tabela 13-	Características da areia e efeitos sobre as propriedades das argamassas.....	147
Tabela 14-	Características dos CPs para a fase de pré-testes.....	156
Tabela 15-	Características do cimento Portland.....	167
Tabela 16-	Características da cal hidratada.....	167
Tabela 17-	Composição granulométrica da areia.....	168
Tabela 18-	Composição granulométrica agregado graúdo.....	169
Tabela 19-	Massa específica, Massa unitária, Módulo de finura e Diâmetro máximo agregados miúdo e graúdo.....	170
Tabela 20-	Características dos CPs.....	171
Tabela 21-	Características do concreto e argamassa.....	175
Tabela 22-	Discriminação dos conjuntos de CPs para GS de 80%.....	180
Tabela 23-	Discriminação dos conjuntos de CPs para GS de 60%.....	181
Tabela 24-	Determinação do volume de glicerol.....	192
Tabela 25-	Previsão de vida útil para concreto armado revestido.....	240
Tabela 26-	Concentração de cloretos na interface argamassa-concreto.....	240

Lista de Quadros

Quadro 1 -	Classificação das argamassas de acordo com a função.....	141
Quadro 2 -	Classificação das argamassas em diversos aspectos.....	141
Quadro 3 -	Ensaio realizados nas matérias primas utilizadas na obtenção do concreto e da argamassa.....	166
Quadro 4 -	Ensaio de caracterização de amostras de concreto e argamassa e de CPs revestidos.....	173
Quadro 5 -	Valores de D, Cs, Dmédio; D/Dmáx e Gsmédio em CPs tipo ARG e C.....	229
Quadro 6 -	Resultados dos ensaios de difusão desta e de outras pesquisas.....	230
Quadro 7 -	Valores de D, Cs e demais relações com os coeficientes de difusão em CPs tipo CR.....	234

Lista de Abreviaturas

a/aglom	Relação água/aglomerante
a/c -	Relação água/cimento
ARI -	Alta resistência inicial
CP -	Corpo de prova
CPs -	Corpos de prova
dd	dias
GS -	Grau de saturação
NBR -	Norma Brasileira
UR	Umidade relativa
SD	Saturation Degree

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 Importância e Justificativa do Tema.....	25
1.2 Objetivos.....	31
1.3 Estrutura da Tese.....	32
2 O CONCRETO EM AMBIENTE MARÍTIMO.....	34
2.1 Durabilidade do concreto.....	35
2.1.1 Modelos para previsão de vida útil.....	38
2.1.1.1 Tuutti.....	38
2.1.1.2 Helene.....	40
2.1.1.3 Guimarães.....	40
2.1.1.4 Guimarães e Helene.....	42
2.1.2 Revestimento do concreto no contexto da durabilidade – Normas Técnicas.....	44
2.1.2.1 Prescrições das normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015).....	45
2.1.2.2 Prescrições de Normas Internacionais.....	49
2.1.2.2.1 Norma argentina – Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.....	49
2.1.2.2.2 Norma Portuguesa NP EN 1992-1-1 de 2010, Eurocódigo 2 – Projecto de Estruturas de Betão.....	51
2.1.2.2.3 Norma Espanhola, Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08	52
2.1.2.2.4 Norma Francesa, La Norme Béton, NF EN 206-1.....	54
2.1.2.2.5 Outras normas internacionais.....	54
2.2 Íons Cloretos.....	56
2.2.1 Presença dos Cloretos.....	57
2.2.2 Mecanismos de Transporte de Cloretos na Matriz Cimentícia.....	62
2.2.2.1 Permeabilidade.....	65
2.2.2.2 Migração Iônica.....	66
2.2.2.3 Absorção Capilar.....	67
2.2.2.4 Difusão.....	70
2.2.3 Fatores externos que influem na penetração de cloretos.....	80

2.2.3.1	Temperatura.....	81
2.2.3.2	Umidade.....	83
2.2.3.3	Concentração Superficial de Cloretos (Cs).....	84
2.2.3.4	Condições de Exposição.....	88
2.2.4	Fatores relacionados ao concreto que influem na penetração de cloretos	91
2.2.4.1	Tipo de cimento e adições.....	91
2.2.4.2	Fissuras.....	97
2.2.4.3	Relação água-cimento (a/c).....	99
2.2.4.4	Grau de Hidratação da pasta cimentícia.....	101
2.2.4.5	Consumo de cimento.....	101
2.2.4.6	Cura do concreto.....	102
2.2.4.7	Grau de carbonatação.....	103
2.2.4.8	Porosidade.....	105
2.2.4.9	Tipo de superfície exposta.....	108
2.2.4.10	Zona de transição.....	109
2.2.5	A ação dos cloretos nas armaduras do concreto.....	111
2.2.5.1	A passivação da armadura.....	111
2.2.5.2	O processo de corrosão do aço.....	112
2.2.5.3	A desp passivação da armadura pelos íons cloreto.....	115
2.3	O Grau de saturação (GS) do concreto e a influência na difusão de cloretos	118
2.3.1	Estudos sobre o GS.....	119
2.3.1.1	Martys.....	119
2.3.1.2	Guimarães.....	120
2.3.1.3	Climent <i>et al.</i>	123
2.3.1.4	Nielsen e Geiker.....	124
2.3.1.5	Meira.....	125
2.3.1.6	Souza.....	126
2.3.1.7	Gil.....	128
2.3.1.8	Zhang <i>et al.</i>	128
2.3.1.9	Bernal.....	129
2.3.1.10	Dridi e Lacour.....	130
2.3.1.11	Bandeira.....	131
2.3.1.12	Bao e Wang.....	132

2.3.1.13	McCarter <i>et al.</i>	132
2.3.1.14	Zhang e Ye.....	133
2.3.1.15	Yang <i>et al.</i>	134
3	ARGAMASSAS.....	138
3.1	Aspectos Gerais.....	138
3.2	Classificação das argamassas.....	140
3.3	Propriedades físicas e mecânicas das argamassas.....	142
3.3.1	Propriedades físicas e mecânicas no estado fresco.....	142
3.3.2	Propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido.....	143
3.4	Materiais básicos constituintes das argamassas.....	144
3.4.1	Cimento Portland.....	145
3.4.2	Água.....	146
3.4.3	Areia.....	146
3.4.4	Cal Hidratada.....	147
3.5	Características gerais dos revestimentos argamassados.....	147
3.6	Argamassas situadas em ambiente marítimo – porosidade.....	148
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	151
4.1	Etapa de Pré-Testes.....	152
4.1.1	Confecção de CPs.....	154
4.1.2	Grau de Saturação nos CPs.....	157
4.1.3	Uniformização da umidade.....	158
4.1.4	Procedimentos para verificação do GS em cada material dos CPs revestidos.....	159
4.1.5	Procedimentos para extração de camada e amostras pulverizadas dos CPs revestidos.....	161
4.2	Caracterização de matérias-primas.....	165
4.2.1	Cimento Portland.....	166
4.2.2	Cal hidratada.....	167
4.2.3	Agregado Miúdo e Graúdo.....	168
4.3	Confecção de corpos de prova (CPs).....	170
4.3.1	Ensaio de caracterização do concreto, da argamassa e dos CPs de concreto revestido.....	172
4.3.1.1	Características do concreto e argamassa.....	175

4.4	Comportamento do Grau de Saturação (GS).....	175
4.4.1	Saturação dos CPs.....	176
4.4.2	Obtenção do GS de 80% e 60%.....	179
4.4.3	Ensacamento dos conjuntos de amostras.....	180
4.4.4	Determinação do GS das partes dos CPs tipo CR após uniformização..	185
4.5	Processo de Difusão.....	188
4.5.1	Colocação de NaCl sobre os CPs.....	189
4.5.2	Ensacamento e acondicionamento dos CPs.....	190
4.6	Extração.....	193
4.7	Ensaio de Potenciometria.....	196
4.7.1	Obtenção dos perfis de cloreto.....	197
4.7.2	Obtenção dos Coeficientes de difusão (D) e da Concentração superficial (Cs) para os de concreto e de argamassa.....	200
4.7.3	Obtenção dos Coeficientes de difusão (D) e de Concentração superficial (Cs) para CPs de concreto revestido modelagem numérica.....	201
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	204
5.1	Comportamento do Grau de Saturação (GS).....	204
5.1.1	Verificação do (GS) durante processo de uniformização da umidade....	205
5.1.1.1	Fase de Pré-testes.....	205
5.1.1.2	Segunda Fase.....	207
5.1.2	Determinação do (GS) após separação das partes dos CPs tipo CR.....	210
5.1.2.1	Fase de Pré-testes.....	210
5.1.2.2	Segunda Fase.....	212
5.2	Perfis de Cloretos.....	214
5.2.1	Perfis de Cloretos – CPs de concreto.....	215
5.2.2	Perfis de Cloretos – CPs de argamassa.....	217
5.2.3	Perfis de Cloretos – CPs de concreto revestido.....	219
5.3	Coeficientes de Difusão (D) e Concentração Superficial (Cs).....	225
5.3.1	Ajustes dos Perfis dos teores de cloretos.....	225
5.3.2	Valores de D e Cs para CPs de concreto e CPs de argamassa.....	228
5.3.3	Valores de D e Cs para CPs de concreto revestido.....	231
5.3.3.1	Valores de D a partir da correlação com GS.....	231
5.3.3.2	Valores de D e Cs a partir do modelo matemático.....	233

5.4	Previsão da frente de cloretos em tempos variados.....	237
5.5	Resumo da metodologia.....	242
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	244
7	SUGESTÕES DE ATIVIDADES FUTURAS.....	249
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	250
	APÊNDICE A.....	272
	APÊNDICE B.....	275
	APÊNDICE C.....	277
	APÊNDICE D.....	280
	APÊNDICE E.....	282
	APÊNDICE F.....	287
	APÊNDICE G.....	288
	APÊNDICE H.....	290

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e Justificativa do Tema

O concreto de cimento Portland, nas suas formas simples, armado ou protendido, é um dos materiais de construção civil mais utilizados no mundo, principalmente em sistemas estruturais únicos ou compostos com outros materiais.

Na forma de concreto armado, tem-se a concepção de um compósito que aproveita a máxima potencialidade individual de cada um dos materiais constituintes: o concreto com sua capacidade de resistência mecânica aos esforços de compressão e o aço com a capacidade aos esforços de tração, esforço ao qual o concreto tem relativa baixa resistência e ao mesmo tempo cabendo ao concreto o papel de proteção às armaduras embutidas em seu interior, já que o aço apresenta reduzida estabilidade química em condições naturais (MAGALHÃES, 2019).

Essa união quase perfeita, aliada a facilidade de produção, de lançamento, custos reduzidos em comparação a outros materiais, versatilidade de utilização, propriedades mecânicas satisfatórias e durabilidade ao longo do tempo, se observados os aspectos de manutenção e condições ambientais, fazem com que o concreto se mantenha a frente dos demais materiais de construção no âmbito da utilização. Segundo a Federação Íbero-americana do concreto pré-moldado, em termos mundiais foram produzidos em 2015 em torno de 2,4 bilhões de metros cúbicos de concreto pré-misturado, o que corresponde a aproximadamente 180 vezes o volume de concreto utilizado na construção da hidroelétrica de Itaipu (CLA, 2020).

O concreto tão largamente utilizado, é constituído de materiais de fácil obtenção universal, tais como a areia, a brita, o cimento e a água. No entanto, apesar da aparente simplicidade apresenta uma microestrutura altamente complexa, resultante da heterogeneidade de seus constituintes, que gera uma rede de poros de formas e tamanhos variados, interligados ou não, que podem estar parcial ou totalmente repletos de solução alcalina (ACI, 1977).

Uma das propriedades do concreto em que evidencia a complexidade da sua microestrutura, é o fenômeno da fluência, onde as deformações crescem ao longo do tempo, mesmo sob carga constante (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) quando ocorre uma diminuição dos níveis de umidade (secagem) na rede porosa interligada do concreto, pode haver uma microfissuração adicional na zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, isto se deve à retração por secagem, o que contribui para o aumento da deformação por fluência. Por outro lado, a movimentação de água pela rede porosa do concreto ocasionará tensões internas que também contribuirão para o aumento das deformações através da fluência (OLIVEIRA, 2018).

Neste contexto assemelha-se o concreto, à madeira e a outros sistemas “vivos”. Para Hansson (1995) essa é a diferença fundamental entre o concreto e outros compósitos pois as propriedades da pasta de cimento não permanecem constantes após o processamento, mas variam de acordo com tempo, temperatura e umidade relativa do ar. Segundo Ollivier e Vichot (2014) a complexidade da pasta cimentícia devido às reações físico-químicas que ocorrem no processo de hidratação, ainda não são completamente conhecidas no mundo científico sendo, portanto, objetos de contínuas pesquisas.

No aspecto da durabilidade do concreto armado, segundo Helene (1993), durante a primeira metade do século XX a resistência mecânica e o custo inicial foram objetos principais de preocupação dos pesquisadores e construtores e, por isto, somente a partir da década de 60 começaram a surgir estudos a respeito da corrosão das armaduras e a partir da década de 80 houve uma grande expansão das pesquisas e preocupações de governantes, empresas e centros de pesquisas mundiais afim de encontrar subsídios técnicos para o aumento da vida útil das construções em concreto armado. Dentre essas instituições se destacam: o Portland Cement Association - PCA (EUA), Construction Industry Research and Information Association - CIRIA (Reino Unido), Comité Euro-international du Béton - CEB (Europa), Instituto Eduardo Torroja (Espanha) coordenado pela pesquisadora Maria del Carmen Andrade, e na Noruega o pesquisador Odd E. GjØrv que realizou vários estudos sobre durabilidade das estruturas marítimas localizadas no Mar do Norte (HELENE, 1993). Além destes, destacam-se, também, os trabalhos de Inre Biczok na Hungria (BICZOK, 1972), Fernández Cánovas na Espanha (CÁNOVAS, 1977) e Kyösti Tuutti na Suécia (TUUTTI, 1982). No Brasil o primeiro livro nacional sobre o tema foi publicado em 1986, através do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (HELENE, 1986).

No campo da normalização, as normas técnicas também seguiram a mesma linha, isto é, sem parâmetros de durabilidade em seus escopos. Segundo Gjörv (2015), esses conceitos chegaram na década de 90 nos Estados Unidos e Europa. Mas antes, na década de 70, através de entidades como o American Concrete Institute-ACI, American Society for Testing and Materials-ASTM e National Association of Corrosion Engineers-NACE, foram criados comitês para o estudo da corrosão das armaduras e na Europa a The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures-RILEM publicou estudos abrangendo o estado da arte sobre corrosão do aço no concreto (HELENE, 1993). No Brasil, a partir de 2000 com a revisão da NBR 6118, antiga NB 1 (ABNT, 1978), foram estabelecidos conceitos de durabilidade das estruturas em concreto armado com a norma NBR 6118 (ABNT, 2003). Posteriormente, em 2013, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), relacionou a durabilidade como um dos indiscutíveis critérios de desempenho das construções civis.

Atualmente, o setor da indústria da construção civil se caracteriza como sendo uma das maiores consumidoras de materiais, sendo que em torno de 40% de todos materiais utilizados estão relacionados a esse segmento industrial. Nesse aspecto o concreto sendo o material mais consumido, gera enorme impacto ambiental. (GJÖRV, 2015). Por isso, a crescente preocupação com a durabilidade e vida útil das construções em concreto armado tem levado a comunidade técnico-científica mundial a, cada vez mais, gerar soluções visando a redução dos danos derivados do processo de degradação (DAL MOLIN *et al.* 2016).

Portanto, aumentar a durabilidade das construções em concreto não se torna importante apenas no aspecto econômico, mas, também, nas questões de sustentabilidade ambiental. Logo, a previsão da vida útil de serviço de novas e existentes estruturas se torna um desafio global.

Existem inúmeras estruturas de concreto, construídas pelo mundo, que seguem cumprindo satisfatoriamente as funções para as quais foram projetadas. Biczok (1972) cita alguns exemplos de estruturas construídas nos primórdios do concreto armado: tais como a ponte sobre o Rio Danúbio em Budapest na Hungria, com mais de 120 anos; o depósito de águas em Greenwich, em Londres, construído em 1892; as eclusas do canal de Neckar, Stuttgart na Alemanha, construído entre 1920 e 1958, etc.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) o concreto convenientemente dosado para as finalidades que se propõe, devidamente preparado e lançado em obra e juntamente com um controle permanente, tanto a nível local como em laboratório, deverá se apresentar duradouro.

No tocante ao concreto armado, de acordo com Osio-Norgaard (2018), aproximadamente 3,4% do PIB global (US \$ 2,5 trilhões de dólares) são gastos a cada ano para prevenir, mitigar e reparar danos à infraestrutura devido à corrosão da armadura causada por cloretos. Nos Estados Unidos, segundo Yunovich *et al.* (2001), o custo para reparação e substituição de pontes em concreto com problemas de corrosão foram estimados em cerca de US\$ 8,3 bilhões e a previsão para 2021 era de um custo de US\$ 9,4 bilhões. Na Europa, Raupach (2006) estimou o custo anual de reparos de estruturas de concreto a valores aproximados de 20 bilhões de dólares.

Gjörv (2015) expõe que a deterioração prematura e descontrolada das estruturas de concreto armado emergiu como um dos maiores desafios para a indústria da construção, sendo a corrosão da armadura o tipo dominante de deterioração, seguido da reação álcali-agregado e a ação deletéria do congelamento e descongelamento. Em seus estudos, o autor cita inúmeras estruturas em concreto localizadas em instalações portuárias ao longo da costa norueguesa, que apresentaram sinais de corrosão da armadura em poucos mais de 10 anos de vida, e outras localizadas em alto mar, mesmo com uma durabilidade maior, também foram identificadas manifestações patológicas devido à corrosão da armadura.

No cenário brasileiro, Meira (2019) destaca estudos de vários pesquisadores nacionais dentre os quais: Cascudo (1991), Figueiredo (1994), Meira (2004), Medeiros (2008) e Medeiros Júnior (2014) tendo como tema, as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado devido à corrosão das armaduras, sendo a maior escala, para estruturas localizadas em zonas de costa marítima, “offshore”, indústrias químicas e naquelas banhadas por águas agressivas, como redes de esgoto.

Os íons cloreto, presentes nas águas do ambiente marinho e entornos, bem como em instalações de dessalinização, instalações de fabricação de PVC e locais de degelo que utilizam sais fundentes, contribuem de forma intensa para a corrosão da armadura das estruturas de concreto armado ou protendido, desde que seja facilitada a sua penetração no interior da massa concretícia (ANTÓN, 2009).

O grau de saturação do concreto (GS) é um importante fator para o processo de penetração de íons cloreto no seu interior. O nível de saturação da estrutura porosa

interligada determina caminhos para os cloretos durante o processo de difusão. Além disso, as variações do grau de saturação geram movimento (convecção) da água contida na rede porosa, fazendo com que o fluxo seja tanto para dentro como para fora do concreto (BERNAL, 2014).

A influência do GS sobre a difusão de íons cloreto tem sido objeto de inúmeras pesquisas, sendo demonstrada a sua importância em modelos de análise de vida útil de estruturas de concreto armado e protendido. Entre vários desses estudos, pode-se citar: Hedenbland (1995), Balabanic *et al.* (1996), Martys (1999), Guimarães e Helene (2000, 2007), Climent *et al.* (2002, 2007), Nielsen e Geiker (2003), Meira (2004), Souza (2005), Rodrigues (2009), Antón (2009), Guimarães *et al.* (2011, 2015), Zhang *et al.* (2014), Lacour e Dridi (2014), Bandeira *et al.* (2014, 2015), Bao e Wang (2017), Moradlo e Ley (2017), Savoye *et al.* (2018), Guo (2018), Zhang e Ye (2020), entre outros.

Existem diversas estratégias adicionais e medidas de proteção adotadas e outras pesquisadas para minimizar a entrada de íons cloreto para o interior do concreto armado e, por consequência, evitar a corrosão da armadura. Pan *et al.* (2017) fez uma revisão das pesquisas realizadas para o desenvolvimento de tratamentos de superfície de concretos sujeitos aos agentes de deterioração e classificou esses tratamentos em revestimentos hidrofóbicos, bloqueadores de poros e de multifunções e concluiu que ainda são necessários mais estudos para desenvolver a melhor solução, já que esta depende das condições do substrato de concreto, do processo e do custo. De Belie *et al.* (2016), estudou a precipitação de CaCO_3 induzido por bactérias na proteção de superfícies de concreto e na correção de fissuras e concluiu que a utilização deste composto biogênico diminuiu a permeabilidade do concreto, porém há ainda questões para serem resolvidas na prática, como por exemplo o controle da temperatura do ambiente onde as bactérias podem realizar o processo. Helene *et al.* (2018), pesquisou sobre a formação de concreto autocicatrizante ativado por aditivo cristalino e verificou que em relação à previsão de vida útil o uso destes compostos proporcionou aumento de até 34%.

Dyer (2015) estudou a utilização de fôrmas de permeabilidade controlada (FPC) as quais tem a finalidade de limitar o “efeito de pele” em superfícies do concreto; sistemas de película para superfície com formulações orgânicas como os polímeros e elastômeros ou formas inorgânicas que incluem materiais cimentícios e de silicatos alcalinos; seladores de superfícies que incluem soluções em solventes de epóxi,

poliuretano e acrílico; e impregnantes hidrofóbicos tais como o isobutil-silano e os oligômeros, são soluções adotadas como forma de proteção para o concreto armado Gjórv (2015) enumera outras medidas adotadas para a minimização dos efeitos dos agentes deletérios nas estruturas de concreto: adoção de armaduras de aço inoxidável e utilização de compostos de polímero de fibra de carbono reforçada (FRP) como substituto da armadura convencional.

A utilização dessas soluções de proteção é observada em diversas estruturas sujeitas ao ataque de cloretos, porém outras inúmeras estruturas adotam somente o concreto aparente com as prescrições normativas em relação às condições ambientais e de vida útil requerida (DYER, 2015).

No entanto, encontra-se nesse ambiente estruturas de concreto armado que são revestidas com cerâmicas ou revestimento argamassado, como por exemplo: prédios situados nas regiões costeiras dos centros urbanos, instalações portuárias, instalações em indústria de salinização, etc. Neste contexto, inúmeras construções ao longo das regiões costeiras nos diversos países estão sujeitas a ação do aerossol marinho, que se define como pequenas partículas compostas na maioria por cloreto de sódio dissolvidos em água e que se depositam nos paramentos e outros componentes das edificações.

A maioria dos estudos sobre o comportamento dos materiais cimentícios frente ao ataque de cloretos tem sido realizados considerando-os de forma individual, isto é, o concreto, a argamassa ou a pasta de cimento. A influência desses componentes atuando de forma combinada, caso de concretos revestidos com argamassa, raramente foram estudados seja em laboratório ou sob exposição natural (MALHEIRO *et al.*, 2011).

Há alguns estudos sobre o denominado “efeito de pele” que consideram com um segundo material a camada de cobrimento da armadura ou até mesmo uma camada anterior à camada de cobrimento, (ANDRADE *et al.*, 1997; KREIJGER, 1984; PRESUEL-MORENO, 2018). Carslaw (1959 *apud* Cranck, 1975) apresentou um modelo matemático para transporte por difusão de íons em meios distintos, onde a camada externa tem propriedades diferentes de difusão do restante do meio.

Nesta lacuna de pesquisas que abordam a durabilidade do concreto em ambiente marítimo na situação de revestido com camada de argamassa, encontra-se o estudo de Malheiro (2008) que objetivou identificar o efeito do revestimento argamassado nas concentrações de íons cloreto de concretos saturados.

No entanto em exposição natural as estruturas estão sujeitas as diversas variações do grau de saturação, o qual depende da localização da estrutura, da temperatura local, condições de ventos, etc., logo, há necessidade de haver estudos considerando a situação de concretos revestidos não saturados, pois como citado anteriormente o grau de saturação é um importante fator de influência na penetração de cloretos.

Considerados os aspectos acima, nessa pesquisa, analisou-se em laboratório a atuação dos íons cloreto em concreto com revestimento argamassado considerando a variação do grau de saturação (GS).

Inicialmente foi pesquisada uma metodologia para a apuração do GS de cada material componente do conjunto (concreto-argamassa) e, posteriormente, com as amostras contaminadas com cloreto de sódio (NaCl) foram obtidos perfis de cloreto que foram comparados com os perfis de amostras dos materiais puros, ou seja, de concreto e de argamassa. Por fim, para a análise dos resultados utilizou-se o modelo matemático apresentado em Cranck (1975) para a definição do coeficiente de difusão da argamassa e do concreto nas amostras de concreto revestido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método para a avaliação do ataque de cloretos em estruturas de concreto, saturado e não saturado, revestidas com argamassa.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal foram necessários os seguintes objetivos secundários:

- a) desenvolver uma metodologia para obter o GS do concreto e da argamassa para um mesmo ambiente;
- b) desenvolver um método de medição do perfil de cloreto para o conjunto revestimento de argamassa/concreto;
- c) analisar, utilizando um modelo matemático, as condições de contorno do sistema revestimento de argamassa/concreto.

1.3 Estrutura da Tese

Este trabalho de pesquisa é constituído de 6 (seis) Capítulos, além das Referências e do Apêndice.

No **Presente Capítulo**, estão a importância e justificativa do tema, objetivo geral e os objetivos específicos.

O **Capítulo 2**, cujo título é: “ O Concreto em Ambiente Marítimo”, são feitas considerações a respeito da durabilidade do concreto, a atuação dos íons cloreto e a influência do grau de saturação (GS).

O **Capítulo 3**, denominado: “Argamassas”, estão tratados aspectos em relação às argamassas, classificações, propriedades físicas e químicas nos estados fresco e endurecido, materiais constituintes e argamassa em ambientes marítimos.

No **Capítulo 4**, intitulado de “Desenvolvimento Experimental”, são percorridos todos os procedimentos feitos na parte experimental da pesquisa, materiais e métodos.

O **Capítulo 5** que tem como título, “Resultados e Discussões”, são apresentados e analisados os resultados obtidos com o desenvolvimento experimental.

No **Capítulo 6**, “Considerações Finais”, são apresentadas as principais conclusões obtidas na pesquisa em consonância com os objetivos definidos.

No **Capítulo 7**, “Sugestões de Atividades Futuras”, são apresentadas algumas sugestões sobre pesquisas futuras a fim de dar maior abrangência e averiguar outros resultados ao tema.

Ao final são descritas todas as **Referências Bibliográficas** que contribuíram com o Estado da Arte e após o **Apêndice**, onde são exibidas as planilhas dos dados dos experimentos.

2 O CONCRETO EM AMBIENTE MARÍTIMO

O concreto, embora sendo considerado um material extremamente durável, está sujeito a diversos processos de deterioração como as reações álcali-agregado, exposição extrema de temperatura (gelo e congelamento), ataques químicos como a carbonatação e sulfatos e ataques físicos como cavitação, abrasão, erosão. Inúmeras estruturas de concreto armado e protendido, situadas em ambiente marinho, tais como portos, docas, cais, molhes, pontes, quebra-mares, muros de contenção, edifícios costeiros e etc. estão sujeitas de forma direta ou indireta a alguma forma de deterioração causada pela ação das águas oceânicas (OTIENO e THOMAS, 2016).

Para Ollivier e Vichot (2014) esse é um problema complexo tendo em vista que diversos fatores podem interferir em um ataque por água do mar como, por exemplo:

- a) a diversidade das condições ambientais como imersão total, amplitude das marés, aspersão e maresia;
- b) a multiplicidade das reações químicas passíveis de ocorrer em relação à pluralidade de íons presentes na água do mar (cloretos, sulfatos e carbonatos);
- c) as agressões físicas e mecânicas simultâneas ocasionadas pelos ciclos de umedecimento/secagem, gelo, ações mecânicas das ondas, erosão etc.;
- d) além desses ataques físicos-químicos se sobrepõe as degradações físicas e mecânicas decorrentes da corrosão do aço.

A figura 1 ilustra de modo esquemático as diferentes ações às quais as estruturas de concreto armado podem estar submetidas quando expostas ao meio marítimo.

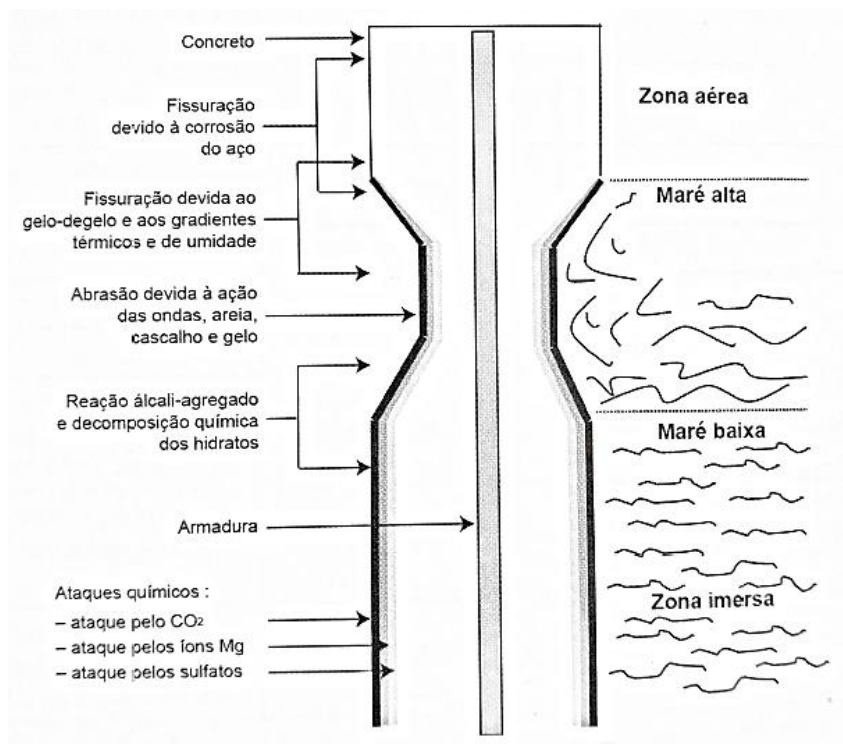


Figura 1 – Esquema de uma estrutura em concreto armado exposta às ações do ambiente marítimo.

Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014.

O esquema apresentado na figura 1, reporta diferentes situações da estrutura em relação aos níveis da água do mar:

- na zona permanentemente imersa a agressividade química da água do mar frente ao concreto é moderada, salvo em situações de gelo, as degradações permanecem superficiais. Nessas zonas, em que o concreto é constantemente saturado, os riscos de corrosão do aço são limitados devido ao coeficiente de difusão do oxigênio ser muito baixo;
- nas zonas de maré, as zonas suscetíveis a respingos e à névoa marinha, são aquelas mais expostas em razão das atividades físicas que se superpõem aos processos químicos, como os efeitos mecânicos das ondas, a erosão pela areia e cascalhos carregados pela água, os ciclos de umedecimentos/secagem, as variações de temperatura diárias ou sazonais, a dissolução/recristalização dos sais cloreto de sódios, Nesta zona os riscos de corrosão da armadura são os mais elevados;
- nas zonas aéreas o concreto estará exposto ao ar que transporta sal marinho não estando, porém, em contato com a água do mar diretamente.

Salienta Gjrv (2015) que nos últimos anos, por diversos fatores, tem crescido sobremaneira as construções de concreto situadas nesse ambiente e, portanto, sujeitas ao ataque de cloretos, contribuindo para o surgimento de numerosos casos de deterioração pela corrosão do aço, induzida por cloretos. Para esse autor a corrosão da armadura é, ainda, a maior e mais grave ameaça à durabilidade e ao desempenho dessas estruturas, tornando-se um desafio aos pesquisadores e construtores.

2.1 Durabilidade do concreto

A durabilidade é uma das principais características do concreto, sendo um dos fatores para a utilização em grande escala do concreto armado, na comparação da madeira, aço e bloco cerâmico, por exemplo. (RIBEIRO, 2014).

No entanto, salienta Bertolini (2010) que, devido aos efeitos do ambiente, os materiais sofrem ao longo de sua vida uma decadência progressiva do seu desempenho. Para este autor, o conceito de durabilidade é intrinsecamente associado  definição de vida útil de projeto, ou seja, se a vida útil de uma estrutura for pelo menos igual a requerida na fase de projeto, pode-se considerar que a estrutura  durável.

Mehta e Monteiro (2014), propuseram uma abordagem global para considerar todos os aspectos da durabilidade das estruturas de concreto armado. A figura 2 mostra essa abordagem através de um fluxograma.

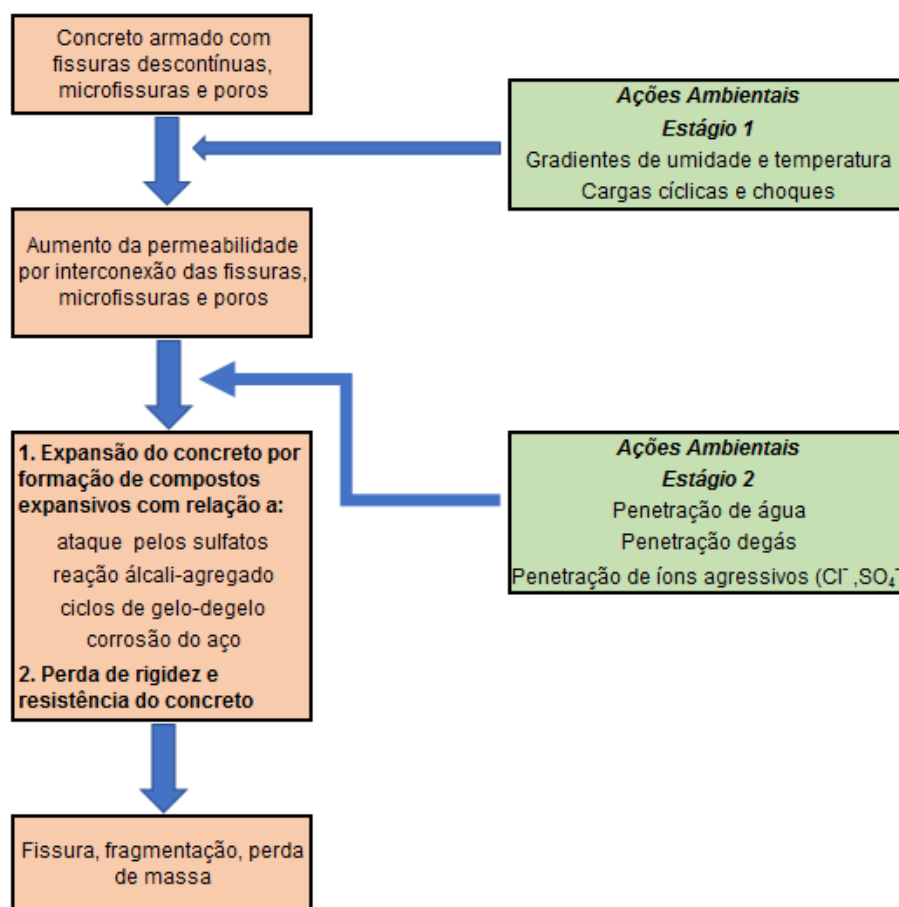


Figura 2 – Fluxograma dos aspectos da durabilidade em estruturas de concreto armado.
Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014.

No modelo proposto por Mehta e Monteiro (figura 2), no estágio 1 o concreto que é por natureza medianamente poroso e microfissurado tem sua permeabilidade aumentada sob a ação de tensões ambientais e de serviço. E, no estágio 2, a penetração dos agentes agressivos pode provocar diversas reações, que conduzirão à degradação do material e de suas características mecânicas.

Nas últimas décadas inúmeras estruturas de concreto vieram a colapsar com pouco tempo de uso. Segundo Ribeiro (2014), um dos fatores para o aumento das manifestações patológicas, as soluções determinadas nos métodos de cálculo estrutural fazendo com que as estruturas se tornem extremamente esbeltas, com redução do cobrimento das armaduras e incremento das cargas em serviço devido às deformações excessivas. Neste contexto, Dal Molin *et al.* (2016) destacaram que as construções de edificações estão cada vez mais esbeltas e econômicas devido ao

desenvolvimento de novas tecnologias, aperfeiçoamento de processos construtivos e novos materiais de construção, mas, aliada a essa evolução há uma mão de obra arcaica e setor com alta competitividade que busca a incessante redução dos custos de produção, o que tem contribuído de forma negativa para a qualidade das construções de modo geral. Também, Oliveira (2018) descreve em seus estudos que as mudanças significativas na dosagem do concreto com alterações nas características originais e a evolução dos métodos estruturais com a utilização de estruturas mais flexíveis e mais deformáveis, promovem sobrecargas nos sistemas e subsistemas das edificações e por consequência o surgimento de manifestações patológicas que facilitam a degradação dos materiais constituintes em geral.

A previsão da vida útil da estrutura é um fator importante, pois pode ser utilizada para o planejamento da manutenção e dos possíveis reparos a executar ao longo do tempo nas existentes e, naquelas em fase de projeto e adequar características que permitam alcançar a vida útil projetada.

Um dos principais desafios ao se desenvolver modelos de vida útil é o de definir todos os fatores que influenciam o tempo de vida de uma estrutura. Maage *et al.* (1996) afirmam que as variáveis relacionadas aos diversos materiais que compõem o concreto aliados a forma de execução e do ambiente climático que a estrutura está inserida, fazem com que os parâmetros que definem um modelo matemático sejam menos fáceis de estabelecer. Por isso, deve-se indicar uma faixa de valores que levem em conta as características do material, cobrimento do aço e severidade do ambiente de serviço da estrutura de concreto (KHATRI E SIRIVIVATNANON, 2004).

As previsões de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto obtiveram ganhos de crescimento nos últimos tempos, levando em conta não somente as prescrições tradicionais relacionadas à valores limite de parâmetros da mistura como relação a/c , teor de cimento e resistência à compressão, mas também abordagens visando o desempenho como influências combinadas da composição do material, procedimentos de construção e as influências ambientais (BEUSHAUSEN, 2019).

Angst (2018), em uma crítica a alguns modelos existentes, afirma que para prever o início da corrosão do aço deve ser considerado que a concentração de cloretos em uma determinada profundidade e o teor crítico de cloretos podem variar consideravelmente e por isso devem ser tratadas como variáveis estocásticas.

Nesse cenário, os modelos de previsão de vida útil, devem retratar o processo de degradação das estruturas de concreto armado ao longo de sua vida. Muitos destes

modelos tratam da manifestação patológica mais presente nas estruturas de concreto armado que é a corrosão da armadura, onde, esses modelos, procuram representar os mecanismos de penetração dos agentes agressivos responsáveis pela despassivação do aço: o dióxido de carbono (CO_2) e os íons cloreto (Cl^-) (DAL MOLIN *et al.* 2016).

Citam, ainda, Dal Molin *et al.* (2016) que diversos projetos relacionados ao tema da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, advindos de vários países, tem contribuído na evolução dos estudos para garantir às construções a vida útil requerida, exemplificando: o Duracrete (Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structure), desenvolvido em 1999 pela comunidade europeia; Lifecon, também desenvolvido na Europa em 2002; Darts (Durable and Reliable Tunnels Structures), desenvolvido em 2003 para aspectos relacionados à vida útil de túneis; Duracon, desenvolvido em 2004 que objetiva o mapeamento da agressividade do ambiente de exposição em cada país Ibero-americano.

2.1.1 Modelos para previsão de vida útil

A seguir são apresentados alguns modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, no intuito de ilustrar a contribuição que a comunidade técnico-científica vem concedendo, para que as estruturas sejam duradouras notadamente aquelas sujeitas aos principais agentes degradadores.

2.1.1.1 Tuutti (1982)

Um dos primeiros pesquisadores a elaborar um modelo de vida útil para estruturas de concreto armado foi o sueco Tuutti (1982), onde relacionou o grau de corrosão da armadura e o tempo de vida de uma estrutura.

No modelo, através de um gráfico, este pesquisador define dois tempos: a iniciação e a propagação. A figura 3, a seguir, apresenta o modelo de Tuutti (1982).

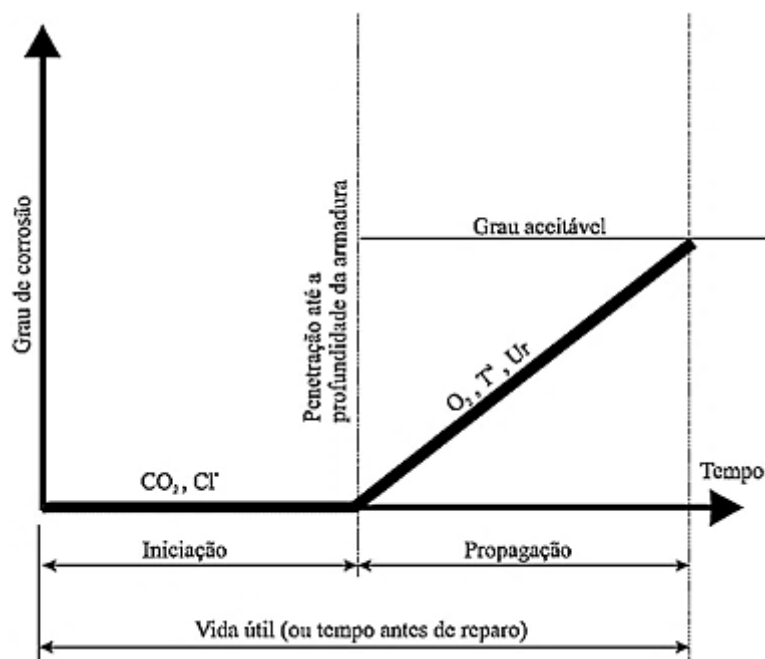


Figura 3 – Gráfico do modelo de vida útil.
Fonte: TUUTTI, 1982.

O primeiro período denominado de iniciação, corresponde ao tempo que os agentes agressivos penetram no concreto até atingir a armadura e provocar a despassivação desta. A duração deste período depende da resistência do concreto ao ingresso das substâncias nocivas como os cloretos (Cl^-), dióxido de carbono (CO_2), sulfatos (SO_4), dentre outros. Segundo Ollivier e Vichot (2014), este período é importante no tocante à preservação das armaduras, uma vez que ele controlará o início dos fenômenos de corrosão.

A propagação refere-se ao período em que as substâncias nocivas provocam a corrosão da armadura, isto é, quando a armadura está despassivada. Neste período os efeitos da corrosão começam a manifestar-se: manchas marrons na superfície do elemento afetado, lascamento de partes de concreto com a consequente exposição da armadura e perda de seção da armadura.

A soma dos dois períodos, *iniciação* e *propagação*, é denominado de vida útil ou período antes do reparo da estrutura. A partir daí, para que a estrutura continue a atender plenamente à sua finalidade, torna-se necessário a execução de reparações.

No entanto, para uma condição mais conservadora, o processo de iniciação já seria um limite ao conceito de vida útil, ou seja, a chegada dos agentes agressivos à interface da armadura (ANTÓN, 2009).

2.1.1.2 Helene (1994)

Helene (1994) propôs um modelo similar ao de Tuutti (1982), tendo por base a corrosão das armaduras do concreto. Refere-se o modelo proposto ao desempenho da construção em relação ao tempo, definindo vida útil de projeto ao período que ocorre a despassivação da armadura. A partir daí o desempenho começa a diminuir, a não ser que intervenções de manutenção e reparos reestabeleçam a vida útil da construção. A figura 4 ilustra o modelo de vida útil proposto.

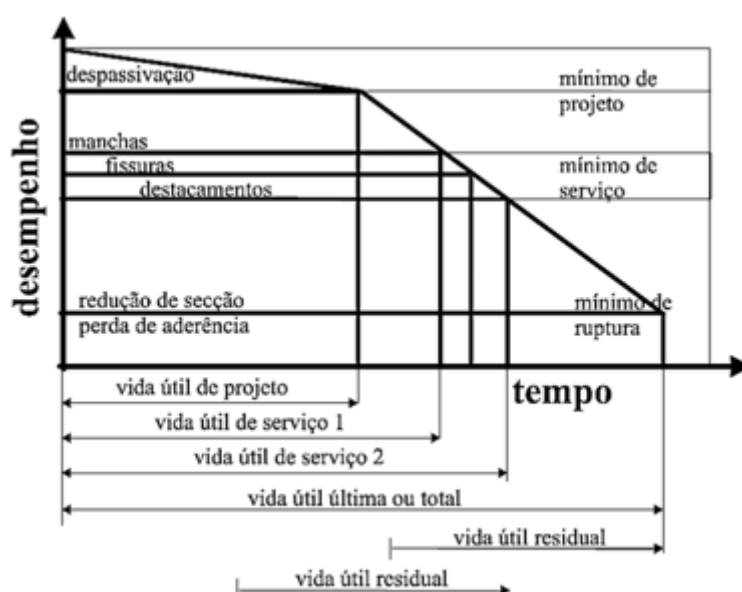


Figura 4 – Gráfico do modelo de vida útil.
Fonte: HELENE, 1994.

No modelo de Helene (1994) foi inserido o conceito de vida útil de serviço, em que outros indicadores além da corrosão, podem determinar o fim da vida útil. Esses indicadores poderão ser: manchas em fachadas, fissuras, destacamentos, etc. Esses requisitos irão variar conforme a necessidade da construção. A vida útil residual, seria aquela correspondente ao tempo em que, a partir de uma vistoria na construção, fossem estabelecidos critérios, dependendo da necessidade da construção.

2.1.1.3 Guimarães (2000)

Guimarães (2000) pesquisou estrutura de concreto armado, inserida em ambiente marítimo, e desenvolveu um modelo de vida útil considerando o mesmo ambiente, materiais e técnicas da obra pesquisada, com a alteração apenas da

resistência a compressão do concreto, utilizando como base o ábaco para estimar a penetração de íons cloreto em função da vida útil desejada, sugerido por Helene (1993).

O modelo proposto foi definido através de um ábaco que estima a espessura de cobrimento da armadura para as faces laterais dos elementos estruturais em relação a posição de concretagem localizada em zona predominantemente de névoa com aproximadamente 10% do ano como zona de respingo. Salienta o pesquisador, que para faces de topo o valor obtido deve ser aumentado em 16% e quando se tratar de superfície externa de fundo, pode ser subtraído de 11%. A figura 5 mostra o ábaco desenvolvido pelo pesquisador.

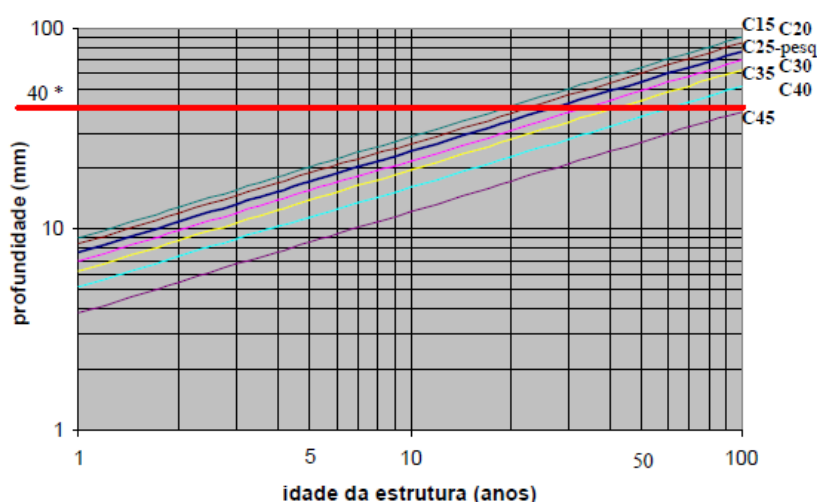


Figura 5 – Ábaco para estimar espessura de cobrimento de armaduras, em zona predominante de névoa. Considerando 40mm como cobrimento mínimo para ambiente marítimo pela norma NBR 6118 (ABNT, 2000).

Fonte: GUIMARÃES, 2000.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) considera para ambiente marinho o emprego de concreto tipo C30 ou maior e cobrimento mínimo de 40mm. Pelo ábaco proposto e considerando os dados da norma, tem-se em torno de 35 anos de vida útil para a estrutura. Já para zonas de respingo de maré, a norma prescreve concretos tipo C40 ou maior e cobrimento mínimo de 50mm, logo, pelo ábaco proposto, a vida útil da estrutura com as condições mínimas da norma seria estimada em 90 anos.

Concluiu o pesquisador, que, aumentando de 30MPa para 40MPa a resistência característica do concreto e em 10mm o cobrimento da armadura, obtém-se um acréscimo de, no mínimo, 55 anos na vida útil da estrutura, já que o ábaco foi estabelecido para zona predominante de névoa.

2.1.1.4 Guimarães e Helene (2007)

Com o intuito de estimar o coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto considerando a influência de variáveis, tais como o tipo de cimento, as temperaturas médias de cada estação climática, o grau de saturação (GS) e a posição da superfície atacada em relação à superfície de colocação do concreto, Guimarães (2000) definiu índices de redução para o coeficiente de difusão: R_C ; R_T ; R_{GS} e R_{SC} , referentes ao tipo de cimento, temperatura, grau de saturação e posição da superfície atacada, respectivamente. Os valores desses índices foram obtidos em testes de laboratório com amostras de cimento Portland pozolânico com GS de 100%. O valor da difusão efetiva foi obtido conforme a expressão 1:

$$D_{const.Cl^- (ef)} = D_{const.Cl^- (lab)} R_C R_T R_{GS} R_{SC} \quad (1)$$

Onde:

$D_{const.Cl^- (ef)}$ = coeficiente de difusão de cloretos considerando as condições de exposição de exposição em um determinado ambiente;

$D_{const.Cl^- (lab)}$ = coeficiente de difusão obtido em laboratório utilizando concreto saturado (GS = 100%);

R_C ; R_T ; R_{GS} ; R_{SC} = fatores de redução.

Após esses estudos, Guimarães e Helene (2007) desenvolveram um modelo de forma a proporcionar uma maneira de cálculo para o coeficiente de redução (R_{GS}) em concretos não saturados, sendo elaborado a partir dos resultados de ensaios que resultaram em modelos de influência do GS e de valores de GS com diferentes tipos de superfícies expostas em diferentes microambientes.

A partir desse modelo foi gerado um nomograma para a obtenção de valor médio anual do coeficiente R_{GS} , considerando as mudanças sazonais no GS para concreto exposto e localizado no sul do Brasil. A figura 6 apresenta o nomograma desenvolvido pelos pesquisadores.

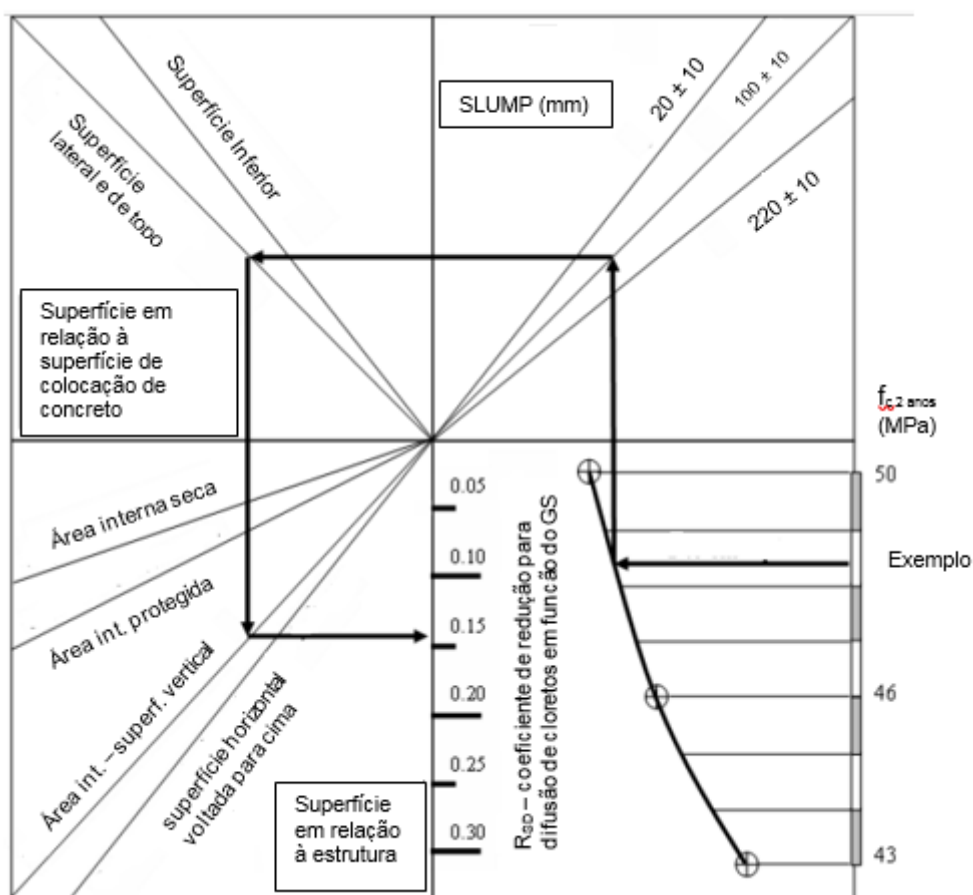


Figura 6 - Nomograma utilizado para obter o coeficiente de redução do coeficiente de difusão do cloreto - R_{GS} - valor médio anual levando em consideração as variações sazonais do GS.

Fonte: GUIMARÃES e HELENE, 2007.

No próprio nomograma os autores demonstram um exemplo de aplicação no qual, considerando um concreto com resistência média à ruptura, em 2 anos, de 48,40MPa, slump de 100mm $\pm$ 10mm, para superfície lateral e de topo, interna e vertical, obtém-se o valor de 0,14 para R_{GS} .

Por fim, observaram os autores que esse modelo foi elaborado em ambiente onde os invernos apresentam chuvas intensas, portanto, deve-se fazer correções ao ser aplicado em outras regiões do Brasil.

Outros estudos seguiram neste enfoque, como Andrade (2001), Lin *et al.* (2010) e Zhang e Ye (2019), no intuito de desenvolver modelos de previsão de vida útil para as estruturas de concreto em ambiente marítimo.

2.1.2 Revestimento do concreto no contexto da durabilidade - Normas Técnicas

A partir da década de 80, as instituições técnico-científicas de diversos países começaram a se preocupar com preceitos de durabilidade das estruturas de concreto, tendo em vista as manifestações patológicas presentes em variadas obras, mais notadamente nas situadas em ambiente marinho ou costeiras. Nesse contexto, os organismos responsáveis pelas normas técnicas iniciaram processos de revisão das mesmas no intuito de adicionar prescrições visando a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Nesse novo enfoque normativo, para Olliver e Vichot (2014), o projeto estrutural de uma obra em concreto deveria ser antecedido de uma análise das ações devidas ao meio ambiente.

Essas ações ambientais, divididas em classes de exposição estabeleceram valores mínimos aplicáveis à composição do concreto, classe da resistência mínima e espessura mínima de cobrimento das armaduras nas revisões normativas. Paralelamente à essa abordagem prescritiva, segundo os autores, logo em seguida um outro tipo de abordagem complementar à prescritiva começou a ser permitida pelas normas. Essa nova abordagem relacionou o desempenho do concreto considerando algumas características do material capazes de prever a evolução da durabilidade a partir da exposição a uma dada condição ambiental.

Outrossim, Otieno e Thomas (2016) em seus estudos ressaltaram que fatores como temperatura, concentração de íons agressivos na água do mar, intensidade e direção dos ventos e duração dos ciclos de umedecimento e secagem devido às marés, afetam o grau de agressividade de determinado ambiente ao concreto, porém as diretrizes apresentadas pelas normas para um determinado ambiente marinho, não levam em conta as variações desses fatores que acontecem de um local para outro.

A seguir, são apresentados parâmetros para a durabilidade do concreto, prescritos na norma brasileira, Projetos de Estruturas de Concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014) e de algumas normas internacionais observando a presença ou não de alguma prescrição relativamente ao revestimento do concreto.

2.1.2.1 Prescrições das normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015)

A norma brasileira para Projetos de Estruturas de Concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014, p.17), estabelece para durabilidade das estruturas que:

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas à época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil”.

Salienta a Norma que, para a vida útil estabelecida pelo projetista seja cumprida, as questões que envolvam as condições de uso, inspeção e manutenção das estruturas, além das questões de dosagem, preparo, lançamento e cura dos concretos sejam observadas.

A classificação da agressividade do meio ambiente às estruturas de concreto armado e protendido pode ser avaliada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes pela tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) que define as Classes de Agressividade Ambiental (CAA), no local onde a estrutura a ser projetada estará presente. A tabela 1, a seguir, transcreve as prescrições da tabela 6.1 da norma técnica.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

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

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantes secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118, ABNT, 2014.

Como se verifica na tabela 1, a norma brasileira faz uma classificação muito simplificada das condições de agressividade, tipo de ambiente e riscos de deterioração.

No caso de ambientes expostos à névoa marinha, há estudos comprovantes de que à medida que a distância da estrutura em relação ao mar aumenta, há menor probabilidade de penetração de cloretos. Essa relação, depende também da direção e intensidade dos ventos que sopram da costa em direção às edificações em concreto armado (CASTAGNO *et al.*, 2005; NUNES, 2007; HAILONG YE, 2016).

Um aspecto, um tanto confuso, apresentado na tabela 1, refere-se à alínea *a*, onde afirma que: “pode admitir uma classe acima para microclimas para ambientes internos secos”, sendo que a norma considera tais ambientes como: “salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviços de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais, ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura”. Nesse caso, a norma mescla ambientes internos secos, caso de salas e dormitórios com ambientes úmidos, caso de banheiros, e áreas de serviço com concreto revestido de argamassa e pintura. No entanto, nesse caso, a norma deixa claro que para atenuar a classe de agressividade é necessário tratar-se de ambiente interno e subtende-se que para ambientes externos, mesmo naquelas estruturas revestidas, não há possibilidade de alteração da classe para um nível acima.

A tabela 7.1 da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece para cada classe de agressividade, a classe do concreto mínima, de acordo com a resistência à compressão, e a relação a/c máxima correspondente. A tabela 2, a seguir, apresenta esses parâmetros de durabilidade.

Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118, ABNT, 2014.

Valores máximos para a relação a/c e valores mínimos para resistência à compressão, em condições especiais de exposição, são estabelecidos na tabela 3 da norma Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento, NBR 12655 (ABNT, 2015). A tabela 3, a seguir, apresenta a tabela da referida norma.

Tabela 3 – Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água	0,50	35
Exposição a processos de congelamentos e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar ou respingos ou borrifação desses agentes	0,40	45

Fonte: NBR 12655, ABNT, 2015.

Apesar dos valores máximos impostos para relação água/cimento (a/c) e dos valores mínimos para a resistência à compressão, apresentados nas tabelas 2 e 3, essas duas normas brasileiras são praticamente omissas na questão do tipo de cimento a ser utilizado em concretos situados em ambiente marítimo ou outro ambiente que tenha a presença de cloretos. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014), item 6.3.3.2, p.16 indica que: “o uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico é também recomendável nestes casos”.

Em estudos de Guimarães e Helene (2007), utilizando amostras de concreto confeccionadas com cimento nacional tipo CP-IV-32 (NBR 16697, ABNT, 2018), com aproximadamente 50% de pozolana em sua composição, os pesquisadores obtiveram melhores desempenhos para a penetração de cloretos do que os estudos de Rodrigues (2009), que utilizou cimento nacional tipo CP-V-ARI-RS (NBR 16697, ABNT, 2018) com 12% de adição pozolânica e Bandeira (2015a), que utilizou cimento espanhol, tipo CEM I 52,2 R (UNE-EN 197-1, AENOR, 2011) com características de cimento ARI-RS. Logo verifica-se que mesmo atendendo aos requisitos da norma os cimentos tipo ARI-RS, sem adições e estudos, não são recomendáveis para concretos em ambientes marítimos.

2.1.2.2 Prescrições de Normas Internacionais

Foram estudadas algumas normas internacionais tais como a norma argentina, portuguesa, espanhola e francesa, com a finalidade de verificar alguma indicação nos aspectos de durabilidade em geral e para concretos revestidos com argamassa localizados em ambiente marinho.

2.1.2.2.1 Norma argentina – Reglamento Argentino de Estructuras

2.1.2.2.2 de Hormigón (INTI-CIRSOC 201-2005)

No capítulo 2, Especificações para a resistência e durabilidade, essa norma estabelece que as exigências contidas propõem uma vida útil de 50 anos, sendo válidas para concreto exposto sem levar em conta algum revestimento. E, expressamente, prescreve que: “os recobrimentos de armaduras e a qualidade do concreto a utilizar na estrutura não podem ser modificados pela aplicação de revestimentos superficiais”.

Diferente da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) a norma argentina ao definir classes ambientais de exposição, amplia a classificação em subclasses. Isso acaba definindo de forma muito clara as prescrições para os diversos ambientes. A tabela 4, expõe parte da tabela 2.1 da norma argentina onde relaciona as classes para exposição aos cloretos:

Tabela 4 – Classes de exposição gerais que produzem corrosão de armaduras

Exposição						
Designação	Classe	Subclasse	Tipo de processo	Descrição do meio ambiente	Exemplos ilustrativos de estruturas expostas a esta classe	
CL	Úmido ou submerso, com cloretos diferentes do meio marinho		Corrosão por cloretos	Superfícies de concreto expostas a respingos ou a variação do nível de água com cloretos. Concreto exposto a águas naturais contaminadas por desagües industriais.	Pilares de piscinas sem revestir. Fundações em contato com águas subterrâneas. Cisternas. Elementos de pontes. Construções afastadas da costa, mas na zona de influência dos ventos carregados de sais marinhos*.	
M1		Aéreo	Corrosão por cloretos	A mais de 1 km da linha da maré alta e contato eventual com ar saturado de sais.		
M2		Aéreo	Corrosão por cloretos	A menos de 1 km da linha de maré alta e contato permanente ou frequente com ar saturado de sais.	Construções próximas à costa.	
Marinho					Estruturas de defensas costeiras. Fundações e elementos submersos de pontes e edifícios no mar.	
		Submerso	Corrosão por cloretos	Submersos na água do mar, por debaixo do nível das marés.	Estruturas ou defensas costeiras, fundações e elementos de pontes e edifícios.	
M3		Submerso	Corrosão por cloretos	Na zona de flutuação da maré ou exposto à respingos do mar.		

(*) A distância máxima depende da direção dos ventos predominantes. Quando esses proveem do mar, como ocorre na maior parte do litoral da Província de Buenos Aires, esta zona está entre 1 km e 10 km. A maior parte da Patagônia esta zona é inexistente. O projetista deverá acatar os limites de aplicação desta zona de agressividade.

(*) A distância máxima depende da direção dos ventos predominantes. Quando esses proveem do mar, como ocorre na maior parte do litoral da Província de Buenos Aires, esta zona está entre 1 km e 10 km. A maior parte da Patagônia esta zona é inexistente. O projetista deverá acatar os limites de aplicação desta zona de agressividade.

Fonte: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, INTI-CIRSOC 201-2005.

Apesar do bom detalhamento das classes de exposição, a norma argentina não faz menção em nenhum de seus artigos com relação ao tipo de cimento para cada classe.

Assim como a norma brasileira, a norma argentina estabelece para cada classe de exposição valores máximos de relação água/cimento e de valores mínimos para a resistência à compressão do concreto, a norma argentina estabelece esses valores, sendo que são similares à brasileira.

2.1.2.2.3 Norma Portuguesa NP EN 1992-1-1 de 2010, Eurocódigo 2 – Projecto de Estruturas de Betão

A comunidade europeia, para efeitos de normalização, criou os Eurocódigos, que são numerados de 0 (zero) a 8 (oito), cada um deles numa especificidade. Coube a cada país membro, de forma autónoma, criar anexos em cada Eurocódigo nas questões peculiares, única de cada nacionalidade.

A norma portuguesa, assim como a argentina, é abrangente ao definir as classes de exposição em função das condições do ambiente e as classifica em 18 (dezoito) estados ambientais. A tabela 5, transcreve parte do quadro 4.1 da norma, especificamente, onde define os ambientes com corrosão induzida por cloretos.

Tabela 5 – Classes de exposição em função das condições ambientais

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
3 Corrosão induzida por cloretos		
XD1	Umidade moderada	Superfícies de concreto expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Úmido, raramente seco	Piscinas; Elementos de concreto expostos a águas industriais contendo cloretos
XD3	Alternadamente úmido e seco	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloretos; Pavimentos;
4 Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contato com a água do mar	Estruturas próximas da costa ou na costa
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas

Fonte: Projecto de Estruturas de Betão, NP - EN 1992-1-1, 2010.

Além de um desdobramento maior com relação às classes ambientais, a norma ao definir as classes dos concretos em relação às condições do ambiente, relaciona com o tipo de cimento, por exemplo: para as classes XD3, XS2 e XS3, estabelece classe de concreto mínima de C60 para a utilização de cimentos sem ou com alguma adição na sua composição, ao utilizar cimentos com maiores teores de adições, a classe do concreto é reduzida para C45.

Comparando com a norma brasileira: para as mesmas condições ambientais da XS3, a norma brasileira especifica classe mínima de C40 e sem mencionar algum tipo de cimento.

No aspecto da utilização de algum revestimento no concreto, que possa amenizar os efeitos dos cloretos, a norma especifica que: “no caso do concreto com proteção adicional (por exemplo, revestimento), o recobrimento mínimo poderá ser reduzido de 5mm” salienta, porém, que sejam cumpridos os requisitos da norma portuguesa NP EN 1504-2, Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de concreto (IPQ, 2006).

2.1.2.2.4 Norma Espanhola, Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, (AENOR, 2008)

Dentre as normas pesquisadas, além das definições de classes de exposição ambiental como as anteriores, a norma espanhola possui parâmetros que definem a contribuição das argamassas de revestimento em ambientes expostos a cloretos, porém, somente para aquelas estruturas situadas em ambientes marinho, acima do nível de preamar ou elementos exteriores de estruturas situadas a menos de 5km da costa (classe de exposição tipo IIIa, na classificação de exposição definida na norma). Como exemplos dessas estruturas, a norma, cita: “elementos estruturais de edificações nas proximidades da costa; pontes nas proximidades da costa; zonas aéreas de diques e outras obras de defesa no litoral; instalações portuárias”.

Para aplicar a contribuição do revestimento em argamassa a norma define um termo, denominado de fator de equivalência de recobrimento (λ) que será multiplicado ao valor da espessura do revestimento para determinar o recobrimento equivalente que será somado ao recobrimento real do concreto. As tabelas 6, 7 e 8, transcritas da norma espanhola, apresentam as condições mínimas para os revestimentos argamassados e os valores estabelecidos para o fator λ .

Tabela 6 – Fator de equivalência de recobrimento (λ) para argamassas em ambiente IIIa, em função da velocidade de penetração de cloretos da argamassa de revestimento

Velocidade de penetração de cloretos* (mm/dia)	λ
$\leq 3,4$	0,5
$\leq 1,7$	1,0
$\leq 1,1$	1,5
$\leq 0,9$	2,0

* Para a determinação da velocidade de penetração de cloretos, na falta de uma norma específica, é recomendado seguir as condições de ensaio descritas no capítulo 3 da norma AASTHO T259-80.

Fonte: Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, Anexo 9°, AENOR, 2008.

Tabela 7 – Fator de equivalência de recobrimento (λ) para argamassas em ambiente IIIa, em função da capilaridade da argamassa de revestimento

Capilaridade (kg/m ² h), segundo recomendação RILEM CPC 11.2	λ
$\leq 0,40$	0,5
$\leq 0,20$	1,0
$\leq 0,15$	1,5
$\leq 0,10$	2,0

Fonte: Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, Anexo 9º, AENOR, 2008.

Tabela 8 – Características da argamassa a empregar nos revestimentos

Características	Requisito
Resistência a flexotração, segundo UNE-EM 1015-11	$\geq 2 \text{ N/mm}^2$
Módulo de elasticidade, segundo ASTM C 469	$\leq 25000 \text{ N/mm}^2$
Retração de secagem aos 28 dias, segundo ASTM C157	$\leq 0,04\%$
Resistência de aderência, segundo UNE-EM 1542	$\geq 0,8 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente de dilatação térmica, segundo UNE-EN 1770	$\leq 11,7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Fonte: Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, Anexo 9º, AENOR, 2008.

Utilizando os dados das tabelas acima, pode-se exemplificar da seguinte maneira: em um revestimento argamassado cobrindo um elemento estrutural em concreto, com espessura de 30mm e admitindo-se uma velocidade de penetração de cloretos menor do que 0,9 mm/dia e que a argamassa atenda a todos requisitos da tabela 8, o fator de equivalência de recobrimento (λ), será de 2,0.

De acordo com a norma o valor de λ deve ser multiplicado pela espessura do revestimento, porém, deve ser utilizado até no máximo 20mm de espessura, mesmo que o revestimento seja maior. Logo o recobrimento equivalente à contribuição da argamassa é de: $20\text{mm} \times 2,0 = 40\text{mm}$, valor este que se somará ao recobrimento real. Este cálculo está considerando a máxima hipótese.

Para a mínima hipótese, ou seja, considerando uma velocidade de penetração de cloretos menor que 3,4mm/dia e com λ de 0,5, o recobrimento equivalente será de $20\text{mm} \times 0,5 = 10\text{mm}$.

Nas prescrições para recobrimentos mínimos a norma espanhola estabelece para a zona IIIa, para uma vida útil de projeto de 100 anos, o valor de 65mm para recobrimento, logo utilizando o fator de equivalência calculado no exemplo acima, o recobrimento final seria de 25mm, na melhor hipótese, é de 55 mm na pior condição, dependendo do tamanho da estrutura pode ser representativo para o cálculo estrutural essa diferença de cobertura.

Um outro aspecto positivo dessa norma, são aqueles relacionados ao tipo de cimento conforme a classe de exposição. Para aquelas sujeitas à penetração de cloretos na estrutura, a norma estabelece que somente cimentos com adições pozolânicas (tipo CEM IV – UNE-EN 197-1:2005) e escória de alto forno (tipo CEM III – UNE-EN 197-4:2005) ou concretos com adições mínimas de 6% de microsílica ou com adição mínima de 20% de cinzas volantes, poderão ser utilizados.

2.1.2.2.5 Norma Francesa, La Norme Béton, NF EN 206-1, (AFNOR, 2004)

Relativo à durabilidade a norma francesa, segundo Ollivier e Vichot (2014), a norma francesa considera a durabilidade do concreto fundamentando-se sobre o conceito de classes de exposição, informando ao projetista da obra que em função desta exposição a necessidade de definir os riscos de ataques aos quais o concreto da obra, ou cada uma de suas partes, estará exposto durante a vida útil da estrutura.

Da mesma forma que as normas europeias citadas anteriormente, as classes de exposição são divididas de forma ampla, de modo que estão caracterizados praticamente todos os locais e características para inserção das estruturas de concreto e os preceitos necessários para a durabilidade.

A norma não faz referência quanto a diferenciar concretos revestidos para amenizar a entrada de cloretos ou algum outro agente deletério. Em relação ao tipo de cimento, determina que: “a escolha do cimento deve levar em consideração as agressões ambientais a que a estrutura estará exposta” e estabelece, por exemplo, que concretos situados nas regiões marítimas possuam no mínimo de 15% de cinza volantes como adição.

2.1.2.2.6 Outras normas internacionais

A norma britânica BS 6349 (BSI, 2013), é considerado o conjunto de códigos contemporâneo mais abrangente para o projeto de obras de engenharia civil localizadas em ambientes marítimos (SMITH, 2016). Essa norma fornece recomendações prescritivas de durabilidade com referência à classe de exposição e à vida útil de projeto, incluindo tipos de cimentos, além de prescrever, por exemplo, para estruturas projetadas para 100 anos de vida útil, relação água/aglomerante máximo de 0,35, estabelecendo também faixas de percentuais de adições aos

cimentos para estruturas com vida útil projetada de 30, 50 e 100 anos, expostas a regiões com variações de maré ou respingo.

Nos Estados Unidos da América (EUA), várias entidades publicaram prescrições para estruturas marítimas. Entre elas, destaca-se o American Concrete Institute (ACI), que publicou o Guia para o Projeto e Construções de Estruturas de Concreto Offshore, o ACI 357R-84 (ACI, 1997) e posteriormente, mais abrangente, o Requisitos de Código de Construção para Concreto Estrutural, o ACI 318-05 (ACI, 2005). Os requisitos de durabilidade estabelecidos nos códigos americanos são comparáveis aos demais existentes, no entanto, não há previsão da utilização de adições ao concreto de modo que possa melhorar a sua impermeabilidade notadamente nas regiões onde predominam ambientes com cloretos ou outros agentes deletérios.

As normas australianas, Projeto de Estruturas Marítimas AS 4997 (CS, 2005) e Estruturas de Concreto AS 3600 (CS, 2009), prescrevem requisitos apenas para uma vida útil de 25 anos e não fornecem orientações para maiores idades, sugerindo apenas que sejam utilizados aditivos ou revestimentos para o incremento à durabilidade sem, no entanto, especificar tipos de aditivos e de revestimentos. A abordagem do código australiano, no aspecto da durabilidade, é muito semelhante à norma americana do American Concrete Institute (ACI).

No Japão, as diretrizes para estruturas de concreto são estabelecidas pela Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis – JSCE (Smith, 2016). A norma N° 15 Projetos e Diretrizes para Estruturas de Concreto (JSCE, 2010), contém alguns requisitos prescritivos com base de classes de exposição, mas a maioria dos requisitos são baseados no desempenho. Os códigos japoneses se caracterizam por determinar que para estruturas marítimas o indicador de desempenho é a concentração de cloretos na superfície, coeficientes de difusão de íons cloreto e o cobrimento e flexibilizam os materiais e as misturas de concreto para atingir aos requisitos, desde que sejam efetuados testes para a comprovação da eficácia, notadamente do coeficiente de difusão dos cloretos.

Na África do Sul, por ter muitas pontes rodoviárias próximas ao litoral, inseridas, portanto, no ambiente marinho, o South African Bureau of Standards (SANS), desenvolveu índices de durabilidade próprios tendo como base os Eurocódigos. Nessas questões de estrutura situadas no ambiente marítimo, a norma sul-africana, prescreve que todos os tipos de cimento devem possuir alguma proporção de adições

pozolanas como, por exemplo, cinzas volantes ou escória de alto forno e salientando que o cimento tipo CEM I, que na sua composição não possui nenhuma adição não é recomendado.

2.2 Íons Cloreto (Cl⁻)

Os íons cloreto, presentes numa estrutura de concreto, são uma das principais causas de corrosão da armadura agindo tanto no início como na continuidade do processo de corrosão da armadura, podendo penetrar na massa concretícia a partir do ambiente externo através de vários processos de transporte de massa (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

Segundo Somodíková *et al.*, (2018), Femenias *et al.*, (2018) e Magalhães (2019), as estruturas localizadas em ambientes com a presença de íons cloreto tem sua vida útil limitada devido às ações degradantes levadas a efeito nas suas armaduras, a não ser que medidas preventivas sejam utilizadas tanto a nível de projeto como a nível de execução. Neste contexto, McCarter *et al.*, (2016), afirmaram que a entrada de cloretos nas estruturas de pontes em concreto e a consequente corrosão da armadura, acabam gerando significativas perdas econômicas na manutenção, inspeções e testes periódicos e, também, provocam custos indiretos como atrasos no tráfego e perda de produtividade. Isso, segundo esses pesquisadores, geram despesas da ordem de 0,01 a 0,1% do PIB de países como EUA, Canadá, Japão, Austrália e Reino Unido. Para Galan *et al.*, (2015) concentrações mais altas de cloretos no interior da microestrutura das massas cimentícias podem gerar compostos denominados de hidroxicloretos que podem causar expansão no concreto endurecido, porém ainda não estão conhecidos a sua estabilidade e a coexistência com outras fases do cimento. Para Dyer (2015) além desses efeitos, outra preocupação refere-se ao grande número de possibilidades que esses íons possuem de adentrarem em suas microestruturas.

Nas seções seguintes estão relatadas as formas de presença e mecanismos de entrada de cloretos e a despassivação da armadura.

2.2.1 Presença dos Cloretos

No ambiente, os cloretos solúveis ocorrem principalmente em duas fontes: água do mar e sais descongelantes de estradas rodoviárias devido à formação de neve. Outras formas da presença de cloretos que possam adentrar na microestrutura dos concretos são através do meio externo no contato da estrutura de concreto de águas servidas ou residuais, lavagem de fachadas e/ou pisos com ácido clorídrico, atmosferas industriais, produtos armazenados em tanques industriais e, ocasionalmente, gases liberados na queima de produtos plásticos à base de PVC. (RIBEIRO, 2014).

Também, para Helene (1993), os cloretos podem adentrar ao concreto no momento da mistura através de aditivos químicos, de pega e aceleradores de endurecimento que contêm cloreto de cálcio (CaCl_2) na sua composição, agregados contaminados ou, até mesmo, através da água de amassamento contaminada ou salobra.

Segundo Neville (2015) a ação dos cloretos tende a ser mais agressiva se for introduzido na mistura inicial, em relação a mesma quantidade, ou se penetrar na pasta já endurecida. No entanto, nas mesmas circunstâncias, a capacidade de consolidação dos cloretos é ligeiramente maior nos concretos onde estes foram introduzidos na mistura do que naqueles que penetraram na massa endurecida. Isso, se deve, porque uma maior quantidade de sal de Friedel pode ser formada o que faz um incremento para fixação dos cloretos (CHANG, 2017).

A porosidade do concreto, relacionada com o tamanho, distribuição e a conexão dos poros faz com que seja um dos principais fatores que contribui para a penetração dos íons cloreto para o interior da massa cimentícia e sua consequente interação com os compostos originados a partir da hidratação do cimento (PINKOSKI *et al.*, 2018).

Para Dyer (2015), na água do mar ocorrem principalmente cloretos de sódio (NaCl), de magnésio (MgCl_2) e de cálcio (CaCl_2), devendo variar a concentração, em função da salinidade do mar que varia de 3,5% ou 35g/l a, aproximadamente, 19.000mg/l. Em pesquisa realizada por Guimarães (2005) foi identificado no canal de acesso ao Porto do Rio Grande (RS) valores próximos a este.

Conforme Ollivier e Vichot (2014) e Dyer (2015), os íons cloreto interagem também com a matriz cimentícia através da adsorção nas estruturas do C-S-H ou

reagindo quimicamente com outros elementos, gerando novos compostos como, por exemplo, o monocloroaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como “sal de Friedel” ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Segundo esses autores os íons cloreto podem se apresentar nas seguintes formas no concreto:

- a) os cloretos livres, que se encontram sob a forma iônica na solução intersticial e que podem ser extraídos pela água, por isso são conhecidos como “cloreto solúveis em água;
- b) aqueles ligados quimicamente à matriz de cimento, ao aluminato tricálcico (C_3A), formando o cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel;
- c) adsorvido nas superfícies dos poros.

A figura 7 ilustra esquematicamente as formas da presença dos cloretos no interior da massa cimentícia.

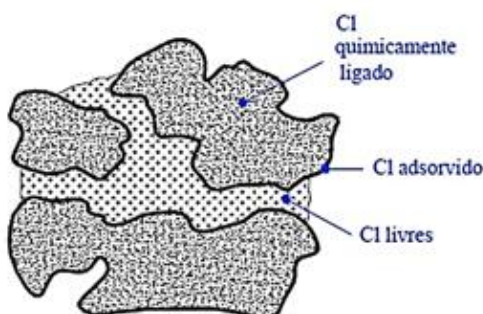


Figura 7 – Desenho esquemático das formas de ocorrência de íons cloreto na microestrutura dos materiais cimentícios.

Fonte: CASCUDO, 1997.

Para descrever a relação entre os íons cloreto livres e aqueles fixados à matriz cimentícia, Zhai *et al.* (2018) fizeram medições em amostras de concreto imersas em solução de NaCl e utilizando três tipos de isotermas para a relação, verificaram que a isoterma de Langmuir foi a mais adequada, embora as outras duas tiveram resultados similares. A figura 8 apresenta o gráfico dos resultados desses autores e observa-se que a relação de cloretos livres para cloretos fixados obtida foi da ordem de 15 vezes.

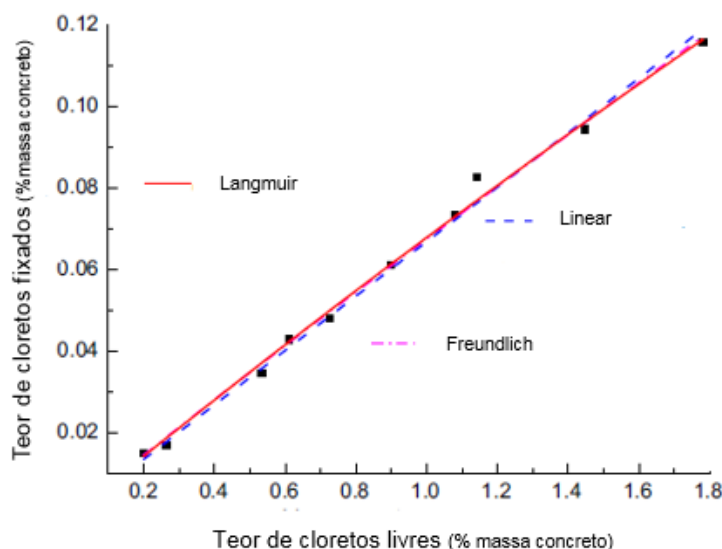


Figura 8 – Gráfico da relação entre cloretos fixos e livres, através das isothermas de Langmuir, Freundlich e isoterma linear.
Fonte: ZHAI *et al.*, 2018.

Para Bernal (2014) somente os cloretos livres contribuem para o processo de corrosão da armadura, no entanto, torna-se mais difícil de determiná-los a partir da concentração total de íons cloreto. Salienta, ainda o autor, que os cloretos fixados nas proximidades das armaduras podem ser liberados quando da diminuição do pH devido à despassivação da armadura. Por isso, é necessário considerar a observação de Antón (2009), de que, onde não é levado em conta a combinação de cloretos na análise de um perfil de concentração total, sempre será obtido um coeficiente de difusão menor que o real.

Outro aspecto a considerar em materiais cimentícios é o sal de Friedel que é uma fase hidratada do cimento formada quando o cimento hidratado é colocado em contato com íons cloretos dissolvidos. Sua fórmula química é: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, podendo o ferro e outros cátions substituir o alumínio, e outros ânions, como o hidróxido e o iodeto, tomarem o lugar do cloreto (DYER, 2015). Segundo Shen *et al.* (2019), o sal de Friedel atua diminuindo a porosidade e impedindo assim a difusão de substâncias.

Ao penetrarem na massa cimentícia os cloretos tenderão a se ligarem quimicamente ao C_3A ou serem adsorvidos, porém por mais forte que seja essa tendência, haverá sempre cloretos livres e são estes que podem difundir-se e desempenhar um papel ativo no processo de despassivação e de corrosão das

armaduras. Por isso é importante a utilização de concretos com cimentos com alto valor de C_3A para que, assim, hajam menos cloretos livres para agirem no processo corrosivo do aço (OLLIVIER E VICHOT, 2014). No entanto, Guimarães (2007) e Rodrigues (2009) demonstraram que cimentos com alto teor de C_3A apresentam uma rede de poros muito interligada, favorecendo a penetração de cloretos livres. Para Tuutti (1982) não se pode creditar somente ao C_3A a capacidade de retenção de cloretos, outros produtos de hidratação podem ser capazes de fixar um determinado valor de cloretos, como por exemplo, a soma das fases C_3A+C_4AF é a que melhor se correlaciona com a capacidade de fixação de cloretos. O gráfico apresentado na figura 9, demonstra a capacidade do conteúdo de C_3A na fixação do cloreto em pastas de cimento.

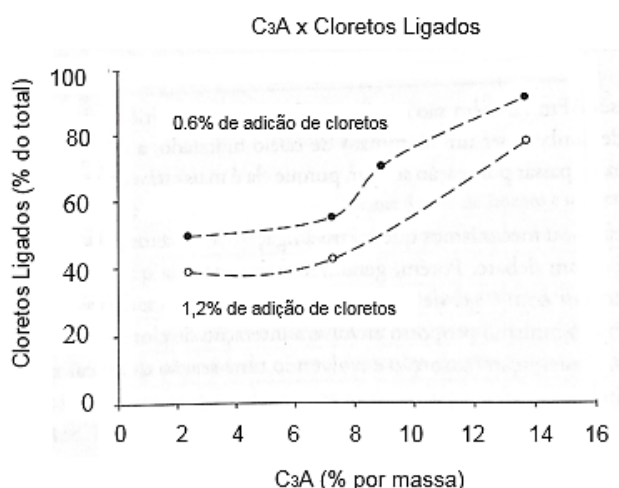


Figura 9 – Gráfico da influência do conteúdo de C_3A no cloreto ligado em pastas de cimento contendo adições de cloretos.

Fonte: DYER, 2015.

Outrossim, Berke (2018) afirma que valores mais baixos de C_3A são requeridos para uma maior resistência aos sulfatos sendo que taxas da ordem de 5 a 8% de C_3A atendem a esse requisito e aliado a uma menor relação a/c atenderia também aos critérios para fixação dos cloretos. Também os silicatos de cálcio são capazes de fixar íons cloreto. O mecanismo neste caso é diferente do que acontece com o C_3A , ocorrendo por adsorção física através de forças da superfície (NEVILLE, 2015).

Cascudo *et al.* (2014) demonstraram em seus estudos que para concretos a base de cimento Portland e pozolana a formação do sal de Friedel está relacionada com o teor de alumina reativa da pozolana, sendo que em relação ao composto anidro C_3A a alumina é responsável por maior taxa de formação do sal.

Para Shen *et al.*, (2019) a influência da carbonatação no efeito de ligação dos cloretos na massa cimentícia tende a ser destruída. A figura 10 representa de forma esquemática a relação entre a entrada dos íons cloreto e de CO_2 , presentes na atmosfera, na massa cimentícia.

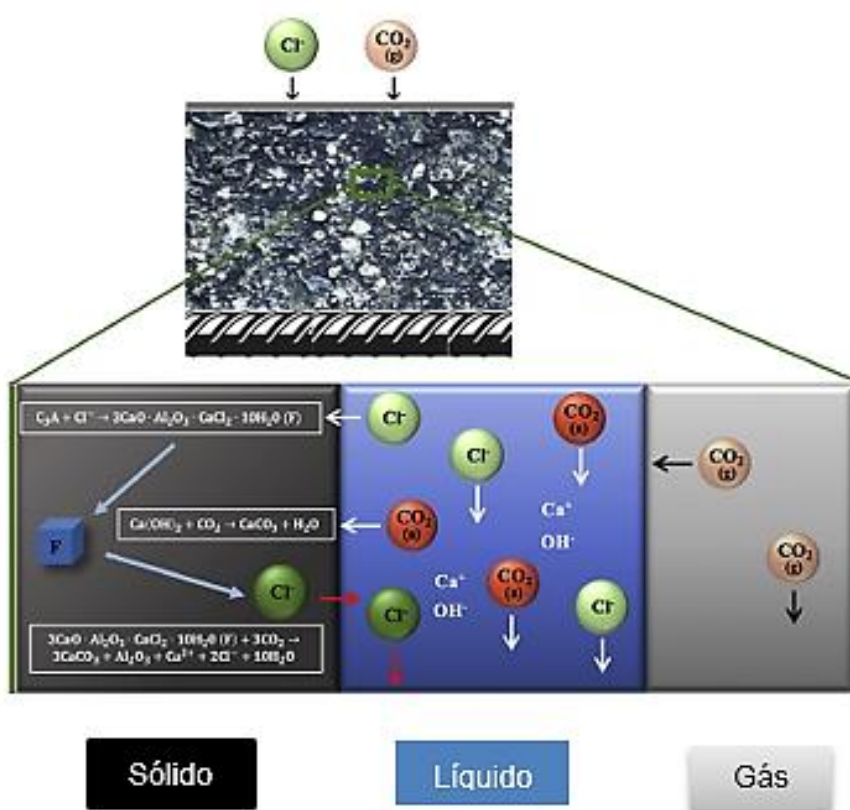


Figura 10 – Desenho esquemático da influência do mecanismo da carbonatação sobre a difusão de cloretos.

Fonte: SHEN *et al.* (2019).

No esquema mostrado na figura 10, a partir da entrada dos agentes deletérios na rede porosa do concreto, haverá formação do sal de Friedel, através dos cloretos que reagem com os compostos do cimento hidratado enquanto que o CO_2 reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) e que, segundo Shen *et al.*, (2019) irá decompor o sal de Friedel, liberando íons cloreto (Cl^-) para o ataque às armaduras. Além disso uma parte do dióxido de carbono (CO_2) contribui para diminuição do pH da solução porosa, o que favorece a despassivação da armadura.

No entanto, nos estudos que realizaram Shen *et al.* (2019) para verificarem a conexão entre a carbonatação e a difusão de cloretos, apuraram que as estruturas de concreto situadas em regiões marítimas, mais especificamente naquelas denominadas de zona de respingo, a carbonatação e a difusão acontecem alternadamente e na zona de atmosfera marinha, esses fenômenos acontecem simultaneamente. Como a carbonatação pode alterar a estrutura de poros aumentando a fase sólida do concreto e diminuindo dessa forma sua porosidade, a difusão dos cloretos podem ser prejudicada na zona de respingo, neste caso haveria uma contribuição da carbonatação para limitar a entrada de íons cloreto.

Os cloretos encontrados na forma de cristal sólido (ou fixos) não representam riscos elevados para as estruturas, pois não podem penetrar na porosidade do concreto, por terem dimensões maiores que a dos poros. Os mesmos podem depositar-se por impactação na superfície do concreto e aí permanecerem até que as águas os dissolvam, tornando-os livres, podendo então ocorrer o transporte para o interior da estrutura (HELENE, 1993).

2.2.2 Mecanismos de Transporte de Cloretos na Matriz Cimentícia

A estrutura porosa dos concretos é constituída de poros capilares e de poros dos produtos resultantes da hidratação do cimento. Os poros capilares, que são os de maior dimensão, influenciam fortemente as propriedades de transporte por entre a rede interconectada nos concretos (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

Portanto, a movimentação de gases, fluidos e íons através do concreto é importante não somente relacionada à interação destes com os constituintes do concreto como, também, para às questões de durabilidade, eis que podem modificar a sua integridade, de forma direta ou indireta.

Esses movimentos que transcorrem pela rede porosa interligada têm diversas combinações de fatores físicos que o provocam: pressões diferenciais da água e ar; variações de umidade e de concentrações; e diferenças de temperatura (BERNAL, 2014).

Ueda e L. Wang (2011) concluíram em seus estudos que a água desempenha um processo importante nos mecanismos de transporte sendo o principal agente responsável de deterioração do concreto ou o meio principal pela qual agentes agressivos (como íons cloreto ou sulfato) são transportados para o seu interior. Nesse

sentido, Olsson *et al.*, (2013) afirmam que, devido as condições do clima onde se tem variabilidade de precipitações pluviométricas aliadas a grandes variações de temperatura haverá, por consequência, sempre haverá a existência de oscilações na distribuição de umidade do concreto, sendo isto uma grande força motriz para o transporte de umidade pelo seu interior.

No aspecto geral, conforme Bertolini (2010) o movimento de espécies gasosas é favorecido na atmosfera ou nos poros cheios de ar, mas as espécies iônicas, por exemplo, se movimentam nos poros através da água, estejam esses poros total ou parcialmente saturados. A figura 11 apresenta esquema, elaborado por esse autor, evidenciando os principais fatores que contribuem para determinar o transporte das espécies agressivas no interior dos materiais.

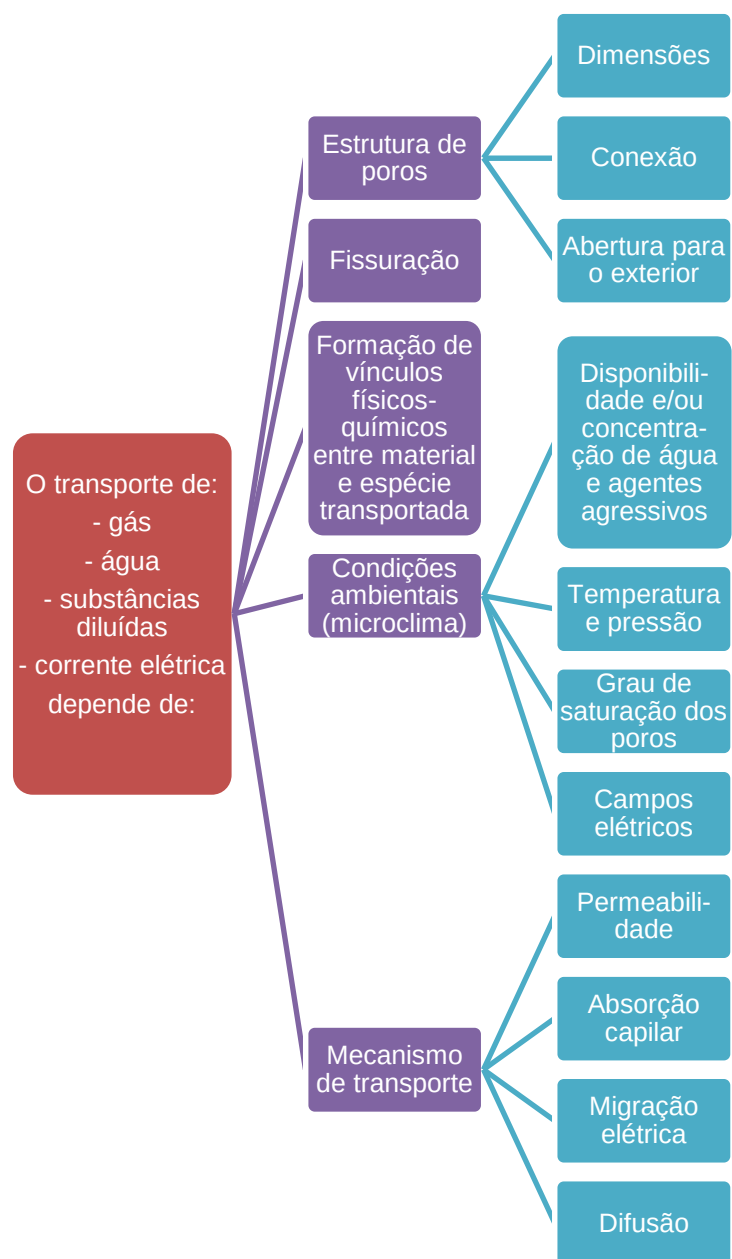


Figura 11 – Forma esquemática dos principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior da rede porosa dos materiais.

Fonte: BERTOLINI, (2010).

Dentre os mecanismos de transporte de fluidos por entre os poros interligados dos materiais cimentícios, evidencia-se como mais influentes no processo de entrada de cloretos: a permeabilidade, absorção capilar, difusão e a migração iônica (RIBEIRO, 2014).

Para Nielsen e Geiker (2003) a absorção capilar e a difusão são os mecanismos mais presentes em relação à migração iônica e permeabilidade. No entanto, em

algumas situações, há uma combinação de mecanismos como por exemplo: absorção capilar e difusão em concretos não totalmente saturados onde se tem uma das superfícies do concreto em contato com uma solução iônica e por outro lado o ar com baixa umidade relativa. Em outras situações, o ingresso de cloretos é iniciado por um mecanismo e passa para outro tipo posteriormente, é o caso de concreto secos, que ao entrar em contato com a água do mar, inicia-se a movimentação de cloretos por absorção capilar, mudando mais tarde para difusão (ANTÓN, 2009). Neste sentido, em seus estudos para verificar o desenvolvimento do transporte de massa em argamassas cimentícias fissuradas, Ghasemzadeh *et al.* (2016) verificaram que na fase inicial de absorção de água, as fissuras atuam como tubos capilares absorvendo a água rapidamente e fornecendo acesso aos poros capilares e no estágio próximo, os mecanismos de difusão desempenham um papel mais significativo como meio para entrada de substâncias na microestrutura da massa cimentícia. Bao e Wang (2017) atestaram que o movimento de cloretos em concretos sob um ambiente marinho é devido à combinação da ação simultânea de absorção capilar e difusão, e que dependem em grande parte da conexão dos poros da pasta de cimento hidratada bem como de microfissuras existentes no interior, causadas essas por stress mecânico, térmico e químico.

2.2.2.1 Permeabilidade

A permeabilidade é conceituada como a facilidade que um fluido pode escoar através de um meio poroso, sob um gradiente de pressão, em função do tamanho e interligação da estrutura de poros desse meio (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O escoamento em poros capilares pode ser expresso através da Lei de Darcy para fluxo laminar através de meio poroso. A Lei de Darcy considera que há um fluxo laminar em regime estacionário, não turbulento, que o fluido presente nos capilares esteja em temperatura ambiente e desconsidera a ação da gravidade nas partículas (OLLIVIER e VICHOT, 2014). A relação de Darcy expressa a vazão volumétrica (Q) de um fluido de viscosidade (μ) que atravessa uma espessura (dx) de um material de seção aparente (A), sob uma diferença de pressão (dp). A Equação 1 define a relação de Darcy:

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão volumétrica (m³/s)

k = permeabilidade hidráulica (m/s)

μ = viscosidade do fluido (kg s/m²)

A = área da seção do meio poroso (m²)

dp = pressão (kg/m²)

dx = comprimento (m)

A pressão parcial dos gases agressivos, presentes na atmosfera, e agressivos aos concretos é muito baixa, pois irá depender muito de sua concentração. Por isso para os gases como o oxigênio (O₂) e o gás carbônico (CO₂) este mecanismo de transporte para o interior das massas cimentícias não é muito levado em conta. Segundo Ribeiro (2014) o ingresso de cloretos por permeabilidade pode ocorrer de forma indireta, através de sua dissolução em água.

Para Helene (1999) nos concretos a permeabilidade aos gases tende a ser menor em ambientes com níveis maiores de umidade, pois a umidade e a água presentes nos poros dificultam o movimento dos gases, por isso que em ambientes secos há maiores probabilidades da frente de carbonatação ser mais profunda.

2.2.2.2 Migração Iônica

O mecanismo da migração iônica é definido como um evento que causa um fluxo de íons devido à ação de um campo elétrico oriundo de uma diferença de potencial. O campo elétrico formado pode ser oriundo de pilhas de corrosão ou através da diferença de potencial gerada por uma fonte externa (MALHEIRO, 2008). Portanto, segundo Ribeiro (2014) é um processo artificial, diferente dos mecanismos de transporte tais como a permeabilidade, absorção capilar e a difusão.

Para Cascudo *et al.* (2014), o mecanismo de migração iônica é praticamente improvável de acontecer nas estruturas de concreto, no entanto, é muito utilizado nos métodos acelerados de penetração de cloretos ou em ensaios de migração para a determinação do coeficiente de difusão aparente.

A solução intersticial do concreto é fortemente concentrada em espécies iônicas, o que caracteriza um eletrólito. Como os íons, por natureza, possuem uma carga elétrica, o gradiente de concentração não é somente o responsável pelo seu fluxo, há um gradiente de potencial local devido a outros íons. (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

A partir de um modelo que se constituiu a equação de Nernst-Planck. Andrade (1993), propõe uma metodologia para calcular o coeficiente de difusão, utilizando a técnica dos ensaios acelerados de migração iônica, em condições estacionárias e não havendo convecção, para uma diferença de potencial da ordem de 10 a 15 V.

De acordo com Salcilo (2005) a utilização deste mecanismo de transporte de íons por uma massa porosa, causado por uma diferença de potencial elétrico, também, pode ser utilizado em manutenção de estruturas de concreto através da dessanilização ou re-alkalinização de estruturas deterioradas.

Um parâmetro ligado à migração iônica e que é utilizado em ensaios para medir a porosidade do concreto é a resistividade elétrica. Para Bertolini (2010), a resistividade depende substancialmente das espécies iônicas presentes e da sua concentração, mas também depende do conteúdo de água presente nos poros.

2.2.2.3 Absorção Capilar

A absorção capilar pode ser definida como o fluxo de um fluido no interior da rede porosa de um material devido a um gradiente de umidade.

Ribeiro (2014) define absorção capilar, como sendo o mecanismo de transporte de líquidos que atua devido à tensão superficial atuante nos poros capilares da rede porosa dos materiais. Para este pesquisador é mais difícil de ser controlada a absorção da água no concreto, pois os diâmetros dos capilares são muito variáveis no tempo e ainda dependem de diversos fatores físicos e químicos, tais como a composição química, grau de saturação, uso de adições e aditivos e relação a/c do concreto. Para determinar a velocidade deste fluxo é necessário conhecer a pressão do empuxo, diâmetro dos poros interconectados, da tensão superficial do líquido, da sua densidade e da sua viscosidade (BERNAL, 2014).

Para Martys e Ferraris (1997), somente a atuação do mecanismo de difusão, para ingresso de íons cloreto ou sulfato no concreto, torna-se um processo muito lento, por isso afirmam que a absorção capilar, especialmente próximo à superfície de

concreto não saturado, é o mecanismo dominante. Relatam, os pesquisadores, que a absorção capilar exibe uma dependência complexa do tempo, pois nas primeiras horas, em seus experimentos com argamassas e concretos, a absorção capilar aumenta na ordem de $\sqrt{t}$, em períodos da ordem de dezenas de dias diminuem as taxas de absorção e em períodos de centenas de dias verificaram uma absorção mais lenta impulsionada, muito provavelmente, pelos poros de gel.

A absorção ocorre através da rede de poros interligados do concreto, assim sendo, na grande maioria dos casos, concretos com menores relações a/c tendem a apresentar poros menos interligados e acabam por dificultarem o mecanismo de absorção capilar. No entanto, com poros menores estes concretos podem ter uma maior absorção capilar (altura da coluna), desde que estes poros sejam interconectados (HELENE, 1999).

Neste contexto, Honglei *et al.* (2020) em estudos que visaram investigar a influência da umidade relativa interna, relação a/c e de adições minerais na absorção capilar de amostras de concreto, concluíram que a força que propulsiona a absorção capilar torna-se mais forte para valores de umidade relativa mais baixos.

A figura 12, mostra o gráfico proposto por Honglei *et al.* (2020) relacionando as taxas de absorção capilar, a umidade relativa interna para concretos com variação da relação a/c sem adições minerais. O concreto tipo U1 possui relação a/c de 0,45, enquanto, que o tipo U2 tem 0,35 de relação a/c.

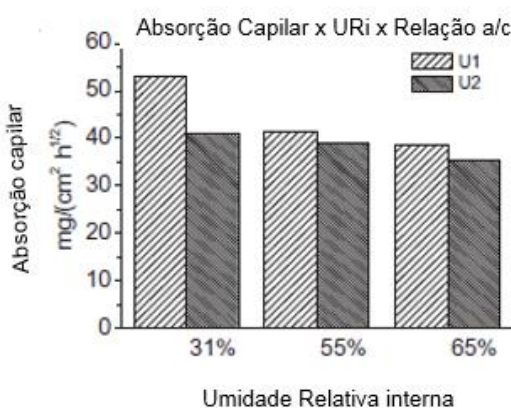


Figura 12 – Gráfico de coeficientes para absorção capilar em função da umidade relativa interna de concretos com relação a/c diferentes.

Fonte: HONGLEI, 2020.

Conforme Nepomuceno (2005), estando os materiais saturados, o mecanismo de absorção não acontece, pois, seus poros devem estar secos ou parcialmente secos

para que seja possível a absorção de água por capilaridade. Assim, para esse pesquisador em concretos não saturados a absorção capilar passa a ser um dos principais mecanismos de penetração de líquidos. Similarmente, Medeiros *et al.* (2014) apontam que este mecanismo de transporte é um dos mais importantes com relação ao ingresso de cloretos no concreto, destacando que no período de secagem a solução salina com a evaporação da água faz com que o sal permaneça na estrutura e como esse processo é cíclico, a concentração de cloreto no concreto tende a superar a concentração da solução de cloreto do período de umedecimento.

A figura 13 representa de forma esquemática os fatores que interveem no processo de absorção capilar.

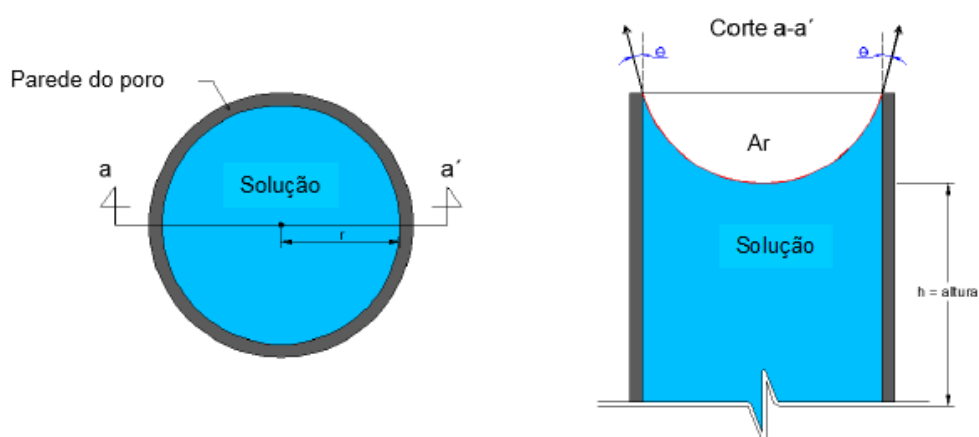


Figura 13 – Representação esquemática dos fatores que interveem no mecanismo de absorção capilar.

Fonte: CAMACHO, 2014.

Bernal (2014) destaca que o mecanismo de sucção capilar pode ser visto a partir da definição da pressão de empuxo dentro do capilar, para isso, considera um capilar longo e estreito que está em contato com uma quantidade de água relativamente grande, essa água deverá se mover para o capilar formando um menisco e causando assim uma diferença de pressão através da interface água-ar no interior do capilar.

De acordo com Dyer (2015), nas situações em que as estruturas estejam localizadas em regiões marítimas e onde ocorrem ciclos de umedecimento e secagem, a ação capilar desempenha seu papel mais significativo como instrumento para entrada de cloretos além da concentração superficial de cloretos.

A figura 14 mostra, de forma esquemática, as situações de umedecimento e secagem que acontece para as estruturas localizadas em regiões costeiras ou “*off shore*” e onde o mecanismo de absorção capilar contribui de forma significativa.

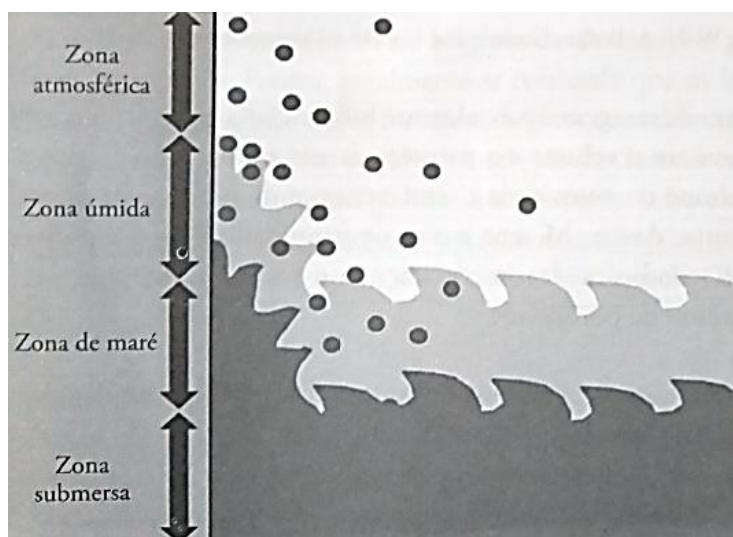


Figura 14 – Desenho esquemático com as diferentes zonas de umidade para estruturas costeiras e marítimas.
Fonte: DYER, 2015.

O período de secagem que acontece nas zonas com a variabilidade da umidade, acaba levando a uma concentração de cloretos na superfície externa. Quando a superfície for molhada novamente haverá uma taxa mais elevada de absorção capilar, eis que os poros estão secos. Isso acaba fazendo com que o ingresso de cloretos seja maior, logo o ciclo de secagem e umedecimento exerce um papel importante nas taxas de absorção capilar e por consequência na quantidade de cloretos a entrar na rede porosa (DYER, 2015)

2.2.2.4 Difusão

Segundo Bertolini (2010), o mecanismo de transporte por difusão ocorre por efeito de um gradiente de concentração. As substâncias irão mover-se de uma região onde há uma concentração mais elevada, por exemplo a superfície do material, para uma zona de baixa concentração, no interior do material. Ainda, conforme esse autor, a difusão depende da espécie que se difunde, da estrutura porosa do material e do teor de umidade. As substâncias gasosas difundem-se mais nos poros cheios de ar

do que naqueles cheios de água, já as substâncias iônicas difundem-se mais naqueles saturados.

Dyer (2015) considera que a porosidade, constrictividade e tortuosidade da microestrutura dos materiais cimentícios afetam as taxas de difusão de substâncias por entre a rede porosa. Para o autor, a constrictividade e porosidade baixas juntamente com a tortuosidade alta, dificultam a movimentação de agentes como íons cloreto, por difusão, no interior dessas massas. Ressaltando que a constrictividade representa as alterações na seção transversal dos poros e a tortuosidade é uma medida da extensão em que a substância deve-se desviar de sua rota direta. Similarmente Y. Liu e X. Shi (2012) citam que a porosidade e a tortuosidade são propriedades que afetam consideravelmente o comportamento a difusão em materiais cimentícios. Relativamente às condições iniciais de hidratação do concreto e a maneira pela qual a umidade se distribui no interior da sua microestrutura, Zhang e Ye (2019) creem que estes são fatores que influem fortemente na difusão como mecanismo de transporte de cloretos nos compósitos a base de cimento. Para Sukrit e Mukherjee (2020) a ampla variação das escalas de comprimento dos poros constituintes da microestrutura dos concretos juntamente com os agregados e suas interfaces com a matriz cimentícia, tornam a difusão um fenômeno complexo.

A apuração da origem, a nível microscópica, do transporte por difusão dá-se pela análise da atividade de íons e moléculas, dispostos em uma solução, que se mantém em movimento contínuo, chocando-se entre eles e mudando sua direção, porém, esse movimento aleatório se dá em maior quantidade em uma direção do que em outra, assim gerando gradientes de concentração. Esse gradiente de concentração é a força propulsora para a difusão (BERNAL, 2014).

Zhang *et al.* (2020) mencionam que, devido à intrínseca complexidade da microestrutura do concreto, da distribuição de umidade por essa microestrutura e da natureza complexa do fenômeno da difusão, torna-se difícil a precisão da sua determinação. Na questão da difusão de íons cloreto, pela rede porosa dos concretos, esses autores, definem que ela é sempre acompanhada de movimentos dos cátions afim de se manter o equilíbrio elétrico da solução de poro e que ao ser exposto a uma solução aquosa de NaCl, no interior do concreto esses cátions tendem a se movimentar mais rápido em relação aos ânions. Para que haja o equilíbrio na difusividade, uma dupla camada elétrica é formada para que haja um retardamento dos cátions e assim os cloretos são forçados a se difundir em conjunto.

Para Ribeiro (2014), a difusão é o mecanismo predominante para a penetração de agentes responsáveis pela degradação das estruturas de concreto. Os principais agressores que comprometem as armaduras, os íons cloreto (Cl^-) e o dióxido de carbono (CO_2), tem sua penetração controlada pela difusão, além do oxigênio (O_2) que é a substância essencial para a despassivação do aço.

Fenaux (2013) afirma que é possível definir vários tipos de coeficientes de difusão para o concreto devido a sua microestrutura porosa composta de canais tortuosos e conectados. Assim, este autor, define o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) o qual considera a difusão dos cloretos livres contidos na solução de poro e o coeficiente de difusão aparente (D_{ap}) que considera a interação do sólido e das partículas que difundem. H. Ye *et al.* (2012) em estudos onde comparam o coeficiente de difusão em concretos fissurados e sem fissuras, define que há uma relação da ordem de 2 (duas) grandezas, sendo o valor maior em concretos com fissuras. Do mesmo modo, Tungning *et al.* (2020) averiguaram as alterações nos coeficientes de difusão devido à aplicação de cargas que resultem em tensões de tração no concreto sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem e concluíram que as fissuras decorrentes desses esforços alteram parâmetros como porosidade, tortuosidade e saturação, os quais estão diretamente relacionados com o coeficiente de transporte.

Os transportes por difusão pelo interior de um meio cimentício, segundo Ollivier e Vichot (2015), podem ocorrer sob duas condições: gasosa ou líquida. A condição gasosa diz respeito, especialmente, ao concreto parcialmente saturado onde haverá transporte de vapor d'água como também a penetração de gases agressivos ao concreto como o gás carbônico (CO_2) e o oxigênio (O_2). A condição aquosa refere-se ao transporte de espécies iônicas em solução intersticial, como por exemplo, os íons cloretos presentes nas águas marítimas ou o ácido carbônico de um solo rico em matérias orgânicas.

Callister (2015) caracteriza a difusão como um processo dependente do tempo, isto é, a quantidade de massa que se movimenta de um ponto a outro de um dado material é função do tempo, sendo definidos dois estágios para a difusão: o estágio estacionário, que caracteriza o fluxo constante das substâncias ao longo do processo, e o outro estágio da difusão, denominado de estágio não estacionário ou de difusão aparente. Para esse autor, um exemplo de difusão em regime estacionário, acontece quando átomos de um gás se movimentam, por difusão, através de uma placa metálica para qual as concentrações se mantêm constantes em ambas superfícies da

placa. Para a representação da concentração C de massa em função da posição ou da distância no interior de um sólido, a curva resultante é denominada de perfil de concentrações. No regime estacionário o perfil de concentrações é considerado linear, conforme mostrado a figura 15.

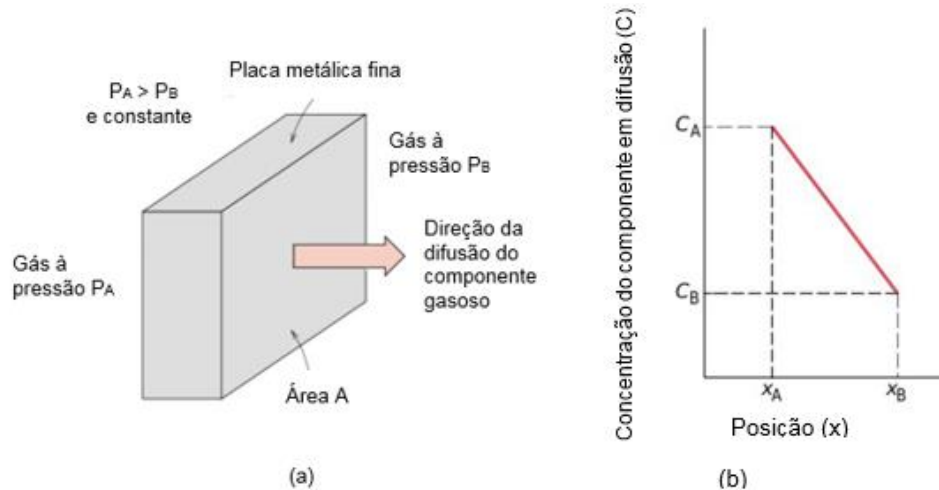


Figura 15 – Desenho esquemático com modelo esquemático de difusão, em regime estacionário, de um gás em uma placa metálica: (a) difusão do gás na placa; (b) perfil de concentrações linear para a difusão no modelo esquemático.

Fonte: CALLISTER, 2015.

A primeira Lei de Fick representa o estado estacionário, também denominado de difusão efetiva, e definida pela equação 2:

$$J = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Onde:

J = velocidade de transporte de massa, em $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ ou $\text{moles/m}^2 \text{ s}$;

D = coeficiente de difusão, em m^2/s ;

∂C = gradiente de concentração, em kg/m^4 ou moles/m^4 ao longo do comprimento ∂x .

A equação 2 mostra que o fluxo de fluido decorrente do processo de difusão (J) é proporcional ao gradiente da concentração deste fluido e o sinal negativo indica que o fluxo de massa ocorre no sentido em que diminui o gradiente da concentração (CRANK, 1975).

O outro estágio da difusão, denominado de estágio não estacionário ou de difusão aparente, a qual representa, segundo Ribeiro (2014), o período em que o transporte de íons ocorre de forma combinada com sua fixação às fases do cimento, diferente do estágio estacionário em que a fixação dos cloretos não ocorre mais e o fluxo passa a ser constante.

Conforme Callister (2015), a difusão sob regime não estacionário é como ocorrem na maioria das situações práticas, ou seja, o fluxo difusional e o gradiente de concentração em um ponto determinado da rede porosa de um material sólido variam com o tempo, havendo um esgotamento ou acúmulo da substância que está se difundindo. A figura 16 mostra perfis de concentração em três momentos diferentes ilustrando a característica principal do regime não estacionário que é a variação do fluxo difusional com o tempo.

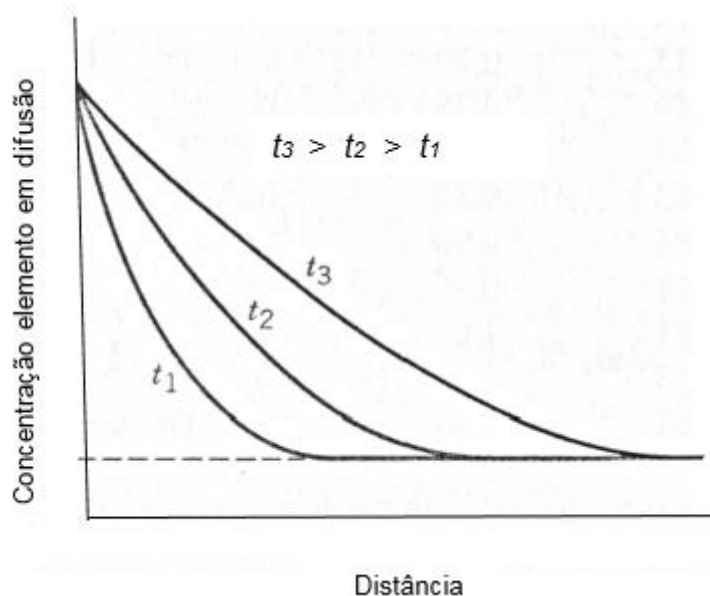


Figura 16 – Gráfico de concentração de elemento em difusão com a variação no tempo, de acordo com o segundo estágio da difusão, estágio não estacionário.

Fonte: CALLISTER, 2015.

A segunda Lei de Fick representa, matematicamente, o estágio não estacionário através da equação diferencial parcial a seguir, (3):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Onde:

D = coeficiente de difusão, que no caso da simplificação da equação é considerado constante, em m^2/s ;

∂C = gradiente de concentração, em kg/m^4 ou $moles/m^4$ ao longo do comprimento ∂x ou ao longo do tempo ∂t .

Quando não especificadas condições de contorno, que possuam um sentido físico, há possibilidade de obtenção de soluções para a equação 3, através da formulação de algumas hipóteses. Cranck (1990), apresentou uma coletânea abrangente dessas soluções, considerando as seguintes hipóteses:

- a) os elementos da substância a se difundir que estiverem no sólido, antes da difusão estão distribuídos de maneira uniforme, com uma concentração C_0 ;
- b) o valor de x na superfície é zero (0) e aumenta com a distância para o interior do sólido;
- c) o instante imediatamente anterior ao início do processo de difusão é definido como tempo zero (0).

As hipóteses acima podem ser representadas através dos limites dos parâmetros t e C :

Para $t = 0$, $C = C_0$ e,

Para $t > 0$, $C = C_s$, para $x = 0$ e $C = C_0$ em $x = \infty$.

Substituindo essas condições na equação 3, obtém-se a solução da mesma, representada na equação 4 a seguir:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4)$$

Onde:

C_x = concentração em uma profundidade x após um tempo t ;

C_0 = concentração inicial;

erf = função erro de Gauss;

D = coeficiente de difusão (constante);

t = tempo do evento;

C_s = concentração superficial (constante).

A equação 4 demonstra, assim, as relações entre o tempo, posição e a concentração. Isto é, C_x sendo uma função do parâmetro adimensional $x/\sqrt{Dt}$, pode ser determinado em qualquer tempo e para qualquer posição, desde que os parâmetros C_0 , C_s e D sejam conhecidos.

A figura 17, mostra um perfil de concentração para a difusão, destacando os parâmetros de concentração definidos pela equação 4.

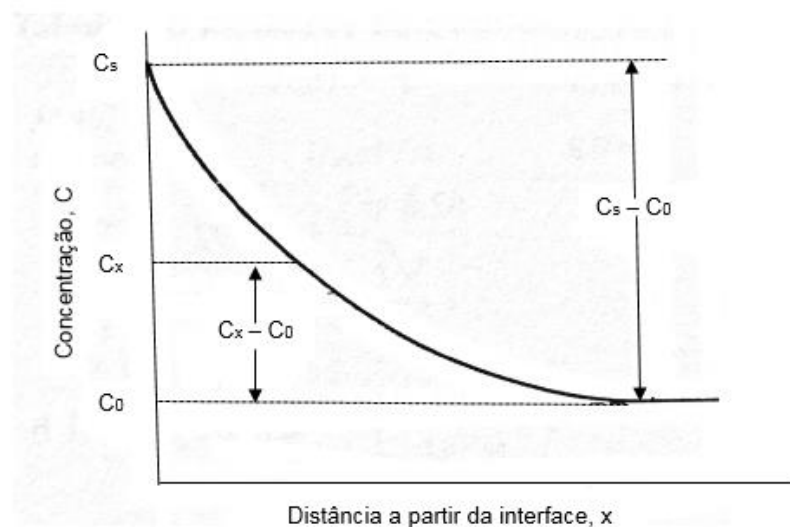


Figura 17 – Gráfico de perfil de concentração para difusão em regime não estacionário.
Fonte: CALLISTER, 2015.

Em outro aspecto pode-se definir a equação 4 considerando, por exemplo, uma determinada concentração de íons cloreto, C_{cl} , no meio poroso de um concreto. O lado esquerdo da expressão se torna então:

$$\frac{C_{cl} - C_0}{C_s - C_0} = \text{constante} \quad (5)$$

Considerando, no lado direito da equação 4, o coeficiente de difusão, D , constante, tem-se:

$$\frac{C_{cl} - C_0}{C_s - C_0} = \frac{x}{2 \sqrt{D_{const} t}} = \text{constante} = K_1 \quad (6)$$

Assim, da expressão 6, considerando-se:

$$x = K_1 \cdot 2 \sqrt{D_{const} t} \quad (7)$$

Assim, da expressão 7, tem-se:

$$x = K \sqrt{t} \quad (8)$$

Onde:

K = constante que depende principalmente da concentração dos íons no meio externo.

A equação 8 é um modelo muito utilizado para prever o avanço da frente de ataque dos cloretos e da carbonatação, na avaliação das estruturas em uso (GUIMARÃES, 2000).

Segundo Rodrigues (2009) normalmente realiza-se a previsão da vida útil residual das estruturas de concreto existente através da medição dos teores de íons cloreto a profundidades especificadas no elemento estrutural, em determinado tempo t . De posse do perfil de penetração de cloretos resultante, são determinados os valores da concentração superficial (C_s) e do coeficiente de difusão de cloretos (D).

Antón (2009) reitera que, embora as expressões definidas de determinação da concentração de cloretos estabelecem o coeficiente de difusão e a concentração superficial constantes, torna-se necessário considerar variações do coeficiente de difusão devidas ao melhoramento da microestrutura do concreto em decorrência do aumento da hidratação e variações da concentração superficial.

Neste aspecto, Guimarães (2000) considerou alguns fatores que interferem na difusão de substâncias que adentram à rede porosa dos concretos como: grau de hidratação do cimento, relação água/cimento, tipo de cimento, variação da temperatura, direção do vento, insolação e grau de saturação (GS) e considerou a intervenção destes fatores determinando os seguintes índices:

- a) R_C , influência do tipo de cimento;
- b) R_T , influência da temperatura média por estação do ano;
- c) R_{GS} , influência do grau de saturação;
- d) R_{SC} , influência da posição da superfície de ataque em relação à superfície de concretagem.

Considerando todos esses fatores, esse autor define o coeficiente de difusão conforme expressado na equação 9:

$$D_{\text{const (est)}} = D_{\text{const (lab)}} \cdot R_C \cdot R_T \cdot R_{GS} \cdot R_{SC} \quad (9)$$

Onde:

$D_{\text{const (est)}}$ = indica o coeficiente de difusão estimado, considerando as condições de exposição no micro ambiente;

$D_{\text{const (lab)}}$ = indica o coeficiente de difusão obtido em laboratório na condição de concreto saturado (GS = 100%);

R_C = coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao tipo de cimento;

R_T = coeficiente de redução de difusão devido à temperatura;

R_{SC} = coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido à diferença da posição da superfície exposta em relação à concretagem;

R_{GS} = coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido à variação do GS.

De outra forma, Ollivier e Vichot (2015) afirmam que a aplicação da segunda lei de Fick para determinação do coeficiente de difusão, trata-se de uma simplificação já que o fluxo difusional deve ser expresso segundo a equação de Nernst-Planck, desde que se conheça o campo elétrico local criado pelos outros íons componentes do ambiente de difusão. Nesse contexto argumentam, esses pesquisadores, que na

forma aquosa da difusão a solução intersticial do concreto é fortemente concentrada na movimentação de íons que por sua natureza são carregados eletricamente e por consequência formam campos elétricos. Logo, concluem que a movimentação de íons não é só devida pelo gradiente de concentração, mas também pelo gradiente de potencial local devido a outros íons.

A Equação de Nernst-Planck é obtida a partir do fluxo gerado pelo potencial elétrico, e define a mobilidade iônica relacionada com o coeficiente de difusão e o fluxo devido ao gradiente de concentração dado pela primeira lei de Fick:

a) Equação do fluxo decorrente do potencial elétrico:

$$J = -u c \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (10)$$

Onde:

u = mobilidade iônica;

c = concentração do íon em movimento em determinado ponto;

$\frac{\partial \psi}{\partial x}$ = gradiente de potencial elétrico.

b) Equação de Nernst- Einstein da mobilidade iônica em relação ao coeficiente de difusão:

$$u = \frac{D z F}{R T} = \quad (11)$$

Onde:

D = coeficiente de difusão da espécie iônica;

z = valência da espécie iônica;

F = constante de Faraday;

R = constante dos gases perfeitos;

T = temperatura.

c) Substituindo a equação 11 na equação 10 e somando com a primeira lei de Fick (equação 2), obtém-se a equação de Nernst-Planck:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{z F}{R T} c D \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (12)$$

Os erros cometidos ao relacionar apenas o fluxo difusional pela parcela da primeira lei de Fick visto na expressão (12), não são muito importantes, porém, de acordo com Ollivier e Vichot (2015), na outra parcela dessa expressão se explicam resultados que seriam inexplicáveis pela lei de Fick.

Em estudos de análise da difusão para concretos não saturados, Saetta *et al.* (1993) propõem um modelo de determinação do coeficiente de difusão em função da umidade relativa relacionada com o coeficiente de difusão para umidade relativa de 100%. A equação 13, expressa o modelo desses autores:

$$D = \left(1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-RH_c)^4} \right)^{-1} \quad (13)$$

Onde:

D = coeficiente de difusão a determinar para uma dada umidade relativa RH ;

RH = umidade relativa;

RH_c = Coeficiente de difusão para $RH = 100\%$.

Para Nielsen e Geiker (2003), o modelo proposto por Saetta *et al.* (1993) deve fornecer estimativas mais precisas na determinação do coeficiente de difusão já que o valor deste é dependente da quantidade de umidade disponível para a substância difusora.

Em Capítulo próximo são apresentados diversos estudos a respeito da influência no mecanismo de difusão pelo teor de umidade no interior da massa porosa em materiais cimentícios.

2.2.3 Fatores externos que influem na penetração de cloretos

Vários são os fatores externos que influenciam a penetração de agentes agressivos por entre a rede porosa interligada dos concretos. Conhecê-los é de grande importância para que possa mitigá-los através de soluções que visam a durabilidade. Alguns desses fatores são descritos nesta seção.

2.2.3.1 Temperatura

Neville (2015) define que a temperatura é um fator importante que deve ser levado em conta na vida útil de uma estrutura de concreto, pois influencia sobremaneira a movimentação iônica e a umidade interior. Estruturas inseridas em regiões mais quentes deterioram mais rapidamente do que em regiões frias, quando sujeitas à penetração dos íons cloreto. Bertolini (2010) salienta que é muito importante abordar aspectos da variação de temperatura e seus efeitos sobre os materiais em geral, pois essa variação influi na velocidade que ocorrem as reações químicas responsáveis pela degradação destes. Para Cascudo (1997) a temperatura pode ter influência em dois aspectos na penetração de cloretos: para um acréscimo de temperatura haverá um aumento na velocidade de corrosão e da mobilidade iônica, no entanto a diminuição da temperatura irá provocar condensações nas paredes da rede porosa, as quais podem produzir incrementos locais no teor da umidade.

A temperatura é uma das variáveis que afeta significativamente o limite crítico de cloretos. Em estudos apresentados por Meira (2004), o aumento da temperatura de 20°C para 70°C reduziu o limite crítico de cloretos em pelo menos cinco vezes e tal fato se dá em função de que o incremento de temperatura irá reduzir o teor de OH⁻ na solução dos poros do concreto o que irá provocar uma redução do pH, facilitando assim a liberação dos cloretos combinados. Neste sentido, em ensaios realizados em argamassas, Cascudo (1997), verificou que os teores limites (críticos) de cloretos diminuiram com o aumento da temperatura.

Climent *et al.* (2012), em pesquisas com a utilização de dois traços de concreto com quantidades diferentes de cimento e de relação água/cimento, constataram que nos dois tipos de concreto ao aumentar a temperatura de 15°C para 30°C os coeficientes de difusão de penetração de cloretos foram maiores, havendo um incremento de aproximadamente 40%.

De maneira análoga Matsumura *et al.* (2008) realizaram ensaios com amostras de concreto de relação água/cimento diferentes (0,4; 0,5 e 0,6) imersas em solução de 10% NaCl e variando a temperatura dessa solução (25; 45; 65; 80 e 90°C). Os pesquisadores verificaram que acréscimos de temperatura corresponderam a aumento do coeficiente de difusão, sendo que as amostras com maior relação a/c, o crescimento da difusão foi maior. A figura 18 mostra um gráfico elaborado pelos

autores com os resultados obtidos confirmando a evolução do coeficiente de difusão com a temperatura.

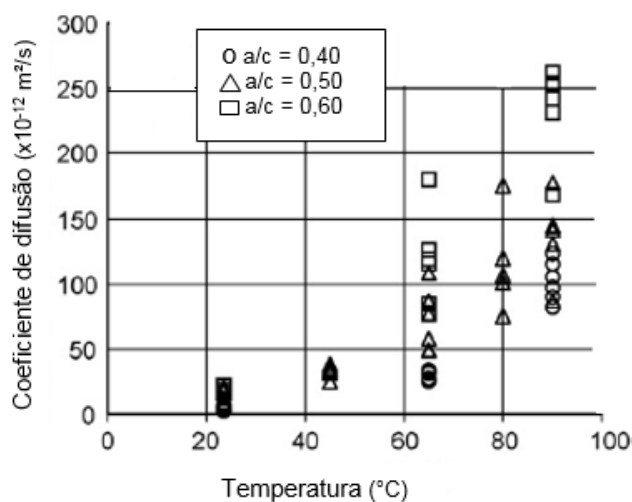


Figura 18 – Gráfico de relação entre coeficiente de difusão e temperatura.
Fonte: MATSUMURA *et al.*, 2008.

A influência da temperatura na velocidade e intensidade de penetração dos íons cloreto nas estruturas de concreto armado é dada pela equação de Arrhenius, definida pela expressão abaixo:

$$D_T = D_{T_0} e^{-K(1/T - 1/T_0)} \quad (14)$$

Onde:

D_T = coeficiente de difusão na temperatura T ;

D_{T_0} = difusividade efetiva à temperatura T_0 ;

k = constante de reação;

T, T_0 = temperaturas em grau Kelvin.

Page *et al.* (1981) realizaram ensaios de difusão de íons cloreto com variação da temperatura, utilizando a expressão (14). Com os resultados desses ensaios obtiveram valores de k de 5511,5 e 4766,6 para relação a/c de 0,5 e 0,4 respectivamente.

2.2.3.2 Umidade

Segundo Meira (2004) o aumento do teor de umidade na malha porosa interconectada do concreto faz com que o teor crítico de cloretos decresça, isso tem por consequência o aumento do eletrólito e as condições para a instalação da célula corrosiva, todavia, com o acréscimo de umidade interior há diminuição da entrada de oxigênio o que dificulta as reações para a formação da corrosão. Para Peraça (2009) desde que o concreto não esteja saturado a umidade relativa está diretamente relacionada com a quantidade de água no seu interior e isto influencia sobremaneira a difusão de cloretos.

Por outro lado, Bernal (2014) afirma que a umidade presente na rede porosa dos concretos tem sua importância não somente pela difusão como também pelo próprio fluxo através dos poros interconectados não saturados ao arrastar substâncias dissolvidas.

Para esse autor, em condições normais, a umidade relativa induz a uma dinâmica na água contida na rede porosa, pois se estabelece um gradiente da quantidade de água do interior e do exterior do concreto, provocando assim uma força motriz para retirar a água contida nos poros ou para saturar os poros. A figura 19 ilustra gráfico que relaciona o teor de umidade no interior do material e a umidade relativa do ambiente externo.

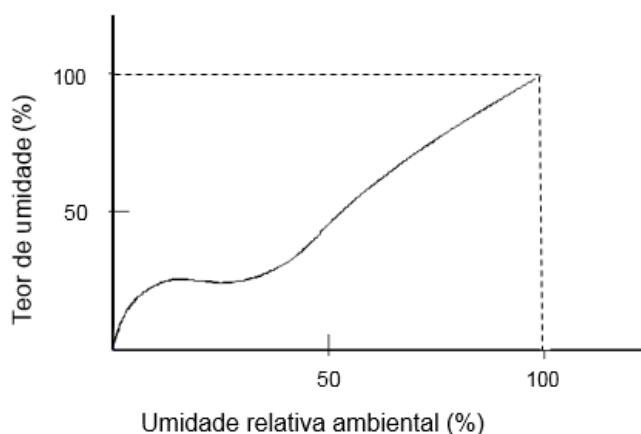


Figura 19 – Gráfico da relação entre o teor de umidade no interior do concreto e a umidade relativa do ambiente externo.

Fonte: CEB, 1993.

2.2.3.3 Concentração Superficial de Cloretos (C_s)

Para todas as estruturas de concreto situadas em ambientes contendo cloreto, a concentração desse ânion é estabelecida como a concentração acumulada na superfície (C_s) após determinado tempo de exposição. Gjrv (2015) afirma que o C_s é normalmente maior do que a máxima concentração de cloreto observada e que fatores tais como: exposição ambiental local, qualidade do concreto, forma geométrica da estrutura e altura acima da água afetam a quantidade da concentração do cloreto na superfície, logo há uma alta dispersão e variabilidade do C_s nas estruturas. Porém, ressalta esse autor que ao analisar aspectos de durabilidade, é importante estimar e selecionar valores apropriados de C_s a fim de que seja tão representativo quanto possível das partes mais expostas e mais críticas da estrutura.

De acordo com Guimarães *et al.* (2007) a concentração de cloretos na superfície das estruturas é considerada um dos fatores importantes para a velocidade de penetração dos íons cloreto para o interior da pasta cimentícia. Esses autores, também, afirmam que conforme pesquisas efetuadas em estruturas de concreto armado, o C_s determinado foi aproximadamente igual para ambientes similares mesmo em diferentes concretos. Juárez e Castro (2011) consideram que a concentração superficial de cloretos é um fator extremamente importante em modelos de previsão de vida útil, pois influem na velocidade de ingresso dos cloretos nas estruturas de concreto, havendo entre C_s e a profundidade de penetração desses íons uma relação direta.

Dyer (2015) considera que o efeito da concentração superficial sobre a taxa de ingresso de cloretos é um tanto complexo, eis que obteve valores menores de coeficiente de difusão de cloretos, em concreto com relação a/c 0,40, para maiores taxas de concentração de cloretos. Afirma esse autor de que o decréscimo do coeficiente de difusão deve-se ao fato que há uma maior interação entre íons com concentrações mais altas, fazendo com que seja bloqueado o movimento pleno desses íons para o interior do material. Mas, salienta o autor que esse fenômeno precisa ser visto dentro de um contexto.

Para Helene (1993) e Silva (2010), fatores tais como a relação a/c , presença de adições, tipo e quantidade de cimento, direção dos ventos predominantes, ciclos de molhagem e secagem e concentração de cloretos no meio ambiente, influenciam a concentração superficial (C_s) dos íons cloreto.

Nunes (2006) em pesquisas com estruturas localizadas próximas ao mar, na região sul do Brasil, observou que o C_s varia cerca de 5 vezes considerando uma estrutura à beira mar e outra situada a 630 metros da linha do mar, já para outra estrutura situada a 160 metros, o C_s decresceu cerca de 3 vezes. Relata esse autor que essas estruturas estão situadas nas mesmas condições de ventos e temperatura, porém são de concretos diferentes. A figura 20 apresenta gráfico elaborado por esse autor com os dados de sua pesquisa da concentração superficial (C_s) em relação à distância da linha da maré.

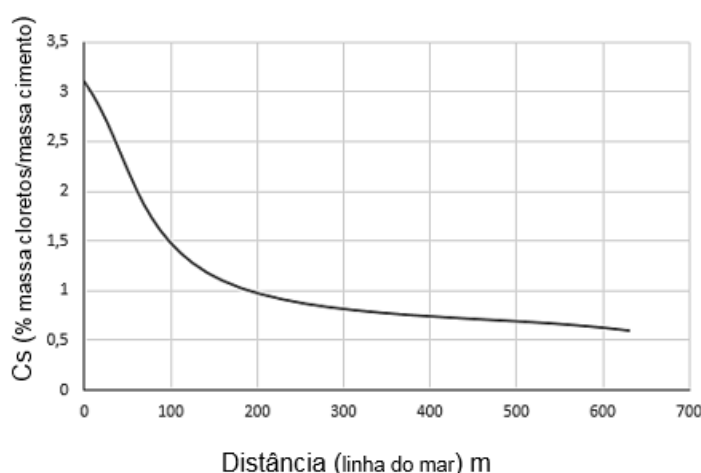


Figura 20 – Gráfico da relação entre o C_s e distância desde a estrutura até a linha de maré.
Fonte: NUNES, 2006.

O código japonês para estruturas de concreto, Concrete Standard Specifications (JSCE, 1999), estabelece valores muito próximos aos obtidos por esse autor. A tabela 9 transcreve os dados inseridos no código japonês, adaptando-a, no entanto, para a mesma unidade de C_s apresentada por Nunes (2006).

Tabela 9 – Concentração na superfície (C_s) de cloretos em estrutura de concreto

Zona de respingo	Distância do mar (km)				
	Beira-mar	0,1	0,25	0,5	1,0
3,25	2,25	1,13	0,75	0,50	0,38

Fonte: Adaptada de JSCE, 1999.

Em relação a distância vertical da estrutura à linha d'água, Helene (2004) e Castagno (2004) observaram em seus estudos que o C_s varia verticalmente em relação ao nível do mar, ou seja, à medida que se afasta da linha de maré o C_s diminui.

Neste mesmo sentido, utilizando dados de Castro *et al.* (2001) e por meio de método de regressão, Guimarães *et al.* (2007) elaboraram um modelo da influência da altura sobre o C_s , evidenciando que, quanto maior a distância vertical em relação a água, menores são os valores encontrados para C_s . A figura 21 mostra graficamente o modelo para C_s elaborado por esses autores.

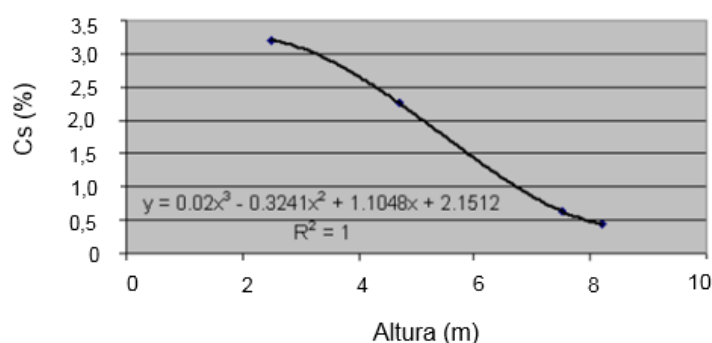


Figura 21 – Gráfico representando o modelo da influência da altura sobre o valor de C_s .
Fonte: GUIMARÃES *et al.*, 2007.

No gráfico da figura 21, os valores de C_s obtidos foram de 3,2%, 2,26%, 0,64% e 0,44% de cloreto em relação à massa de cimento, respectivamente para alturas de 2,5 m; 4,7 m; 7,5 m e 8,2 m em relação ao nível de água em levantamento no Lago de Maracaibo (Venezuela), demonstrando que com o aumento da altitude do concreto em relação à água, menor será o valor de C_s . Observa-se assim, que os valores obtidos para C_s por Nunes (2006) e Guimarães *et al.* (2007) estão compatíveis com aqueles estabelecidos pela norma japonesa (tabela 9).

Gjörv (2015) executou diversas medidas de penetração de cloretos em grande número de estruturas ao longo da costa norueguesa e concluiu que o C_s tende a estabilizar após um tempo de exposição em valores bem razoáveis, fazendo com que possa ser utilizado como parâmetro de entrada constante para um dado ambiente. Assim, esse pesquisador elaborou uma tabela com valores estimativos de C_s em função do ambiente marinho. A tabela 10 exhibe os valores estimados por esse autor.

Tabela 10 – Estimativa da Concentração de Cloreto (C_s) em Estruturas de Concreto Armado em Ambientes Marinhos

Ação Ambiental	C_s (% por massa de cimento)	
	Valor médio	Desvio padrão
Alta	5,5	1,3
Média	3,5	0,8
Moderada	1,5	0,5

Fonte: GJØRV, 2015.

Ao se distanciar da costa marítima haverá uma redução na disponibilidade de cloretos no ar, logo haverá também uma redução na concentração de cloretos no concreto. Para Andrade *et al.* (2010), esse comportamento não tem uma relação linear e pode ser representado pela equação 15, a seguir:

$$C_{\text{tot}} = C_0 + k_d \sqrt{D_{ac}} \quad (15)$$

Onde:

C_{tot} = média do total de cloretos no concreto;

C_0 = teor inicial de cloretos;

K_d = coeficiente dependente das condições ambientais do local;

D_{ac} = deposição acumulada de cloreto no dispositivo da pesquisa.

Para esses autores a expressão (15) pode ser uma alternativa para representar a relação entre cloretos do aerossol marinho e sua acumulação em concretos expostos na zona da atmosfera marinha, eis que obtiveram dados compatíveis com pesquisas anteriores.

Complementarmente, a figura 22 mostra o gráfico, elaborado pelos autores com a variação da concentração de cloretos em função da distância, o que vai ao encontro dos estudos mostrados nessa seção. O gráfico é representativo de concreto relação a/c de 0,50.

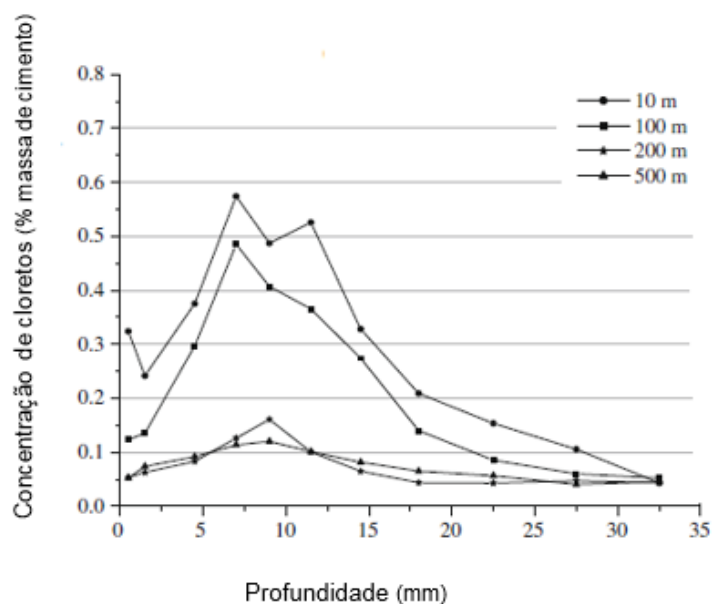


Figura 22 – Gráfico de perfil de cloretos e a distância do concreto em relação ao mar.
Fonte: ANDRADE *et al.*, 2010.

2.2.3.4 Condições de Exposição

As condições de exposição da estrutura são fatores que muito influem para a penetração de agentes agressivos ao concreto tendo influência significativa sobre os mecanismos de transporte desses agentes. Os ciclos de molhagem e de secagem das marés e respingo, características do ambiente marítimo, tornam o ambiente propício para a entrada dos cloretos. Este ciclo de umedecimento e secagem induz a um estado não saturado do concreto e resulta em uma distribuição não homogênea da umidade no interior da massa cimentícia (GJØRV, 2015).

Neste aspecto Xie *et al.* (2017) verificaram em amostras de pasta de cimento, que ficaram imersas por 36 dias em solução 3,5% de NaCl que, obtiveram teores de cloretos significativamente menores dos obtidos nas que ficaram sujeitas a ciclos de secagem e umedecimento por 18h. Os pesquisadores observaram, também, que as amostras imersas não apresentaram no perfil de cloreto a concentração máxima ($C_{máx}$), e isto, segundo eles, deve-se ao fato de que o único mecanismo de transporte atuando nesse caso é a difusão, ao contrário das amostras sujeitas aos ciclos de umedecimento e secagem em que, inicialmente, atua a absorção capilar como mecanismo de transporte. Nesse sentido, o trecho do gráfico até o máximo de concentração é denominado de zona de convecção e após como zona de difusão. A figura 23 mostra o gráfico obtido para as amostras da pesquisa nas três condições de

exposição: denominação W40-R, pasta submetida à imersão e as demais, submetidas aos ciclos. A indicação 40, diz respeito à relação a/c.

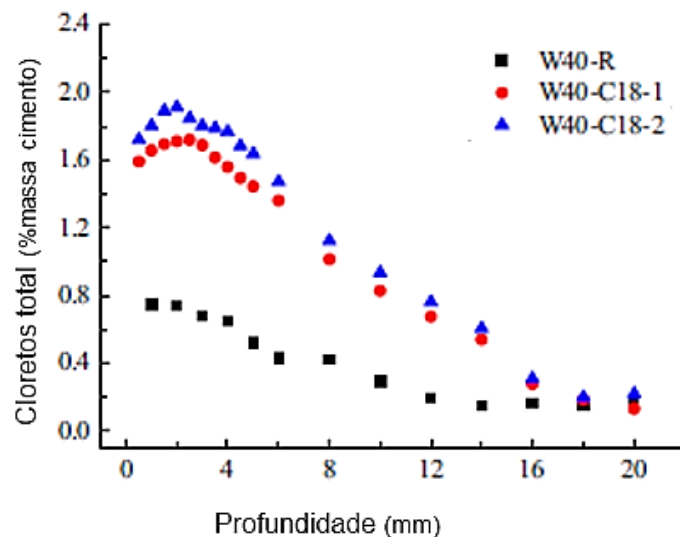
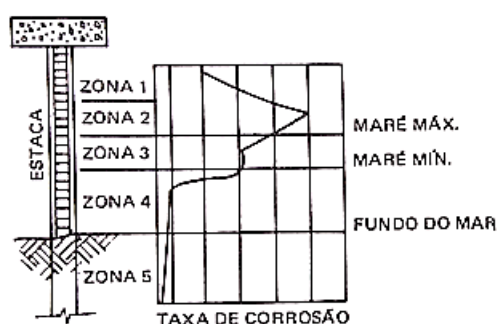


Figura 23 – Gráfico de perfil de cloretos de pastas de cimento com diferentes condições de exposição.

Fonte: XIE *et al.*, 2017.

Segundo Helene (1993), o ataque dos cloretos em ambiente marítimo, normalmente, é maior na zona de respingos que na zona de névoa e é maior na zona de maré do que em zona submersa. O esquema apresentado na figura 24, ilustra as diferentes condições que uma estrutura de concreto armado (estaca) situada em ambiente marítimo está sujeita.



- ZONA 1 – Aérea
- ZONA 2 – Sujeita a respingos
- ZONA 3 – Variação da maré
- ZONA 4 – Constantemente submersa
- ZONA 5 – Enterrada

Figura 24 – Esquema e gráfico demonstrando as diferentes condições de uma estrutura de concreto situada em ambiente marítimo.

Fonte: Adaptado de HELENE, 1986.

Na figura 24, observa-se que a zona sujeita a respingos (zona 2) e a de variação da maré (zona 3) são as mais críticas para a ocorrência da corrosão das armaduras. Já nas zonas 4 e 5, que são aquelas em que a estrutura está submersa ou enterrada, as taxas de corrosão são baixas. No caso da zona 1, em que está sujeita aos aerossóis de água marinha, as condições para a corrosão são menores, mas acima das zonas 4 e 5.

A tabela 11 caracteriza essas diferentes situações para uma estrutura exposta às condições de um ambiente marítimo.

Tabela 11 – Correspondência entre o ambiente de exposição da estrutura de concreto e as características considerando ambiente marítimo

Local	Característica
Zona de atmosfera marinha (névoa salina)	O concreto não está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos normalmente diminui à medida que as estruturas se afastam do mar, mas, em alguns casos, dependendo do tipo da costa e da direção preferencial dos ventos, a névoa salina pode avançar alguns quilômetros do litoral, porém com teores menores. As distâncias podem ser relacionadas na vertical também, em locais mais altos em relação ao nível da maré média estarão sujeitos à névoa marinha.
Zona de variação das marés	O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem/secagem, onde há uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons, restando uma grande quantidade de cloretos no interior do material. Além disso, existe o efeito físico do choque das ondas e partículas em suspensão, que podem causar lascamentos das camadas superficiais do material.
Zona submersa	O mecanismo de difusão é o único meio de transporte atuante. Contudo, o concreto pode estar sujeito à ação de ataques químicos, principalmente por íons magnésio ou sulfato.

Fonte: Adaptada de GUIMARÃES, 2000.

A figura 25 ilustra o esquema de uma estrutura de concreto armado que está parcialmente enterrada, mas que pode estar sujeita à degradação por cloretos.

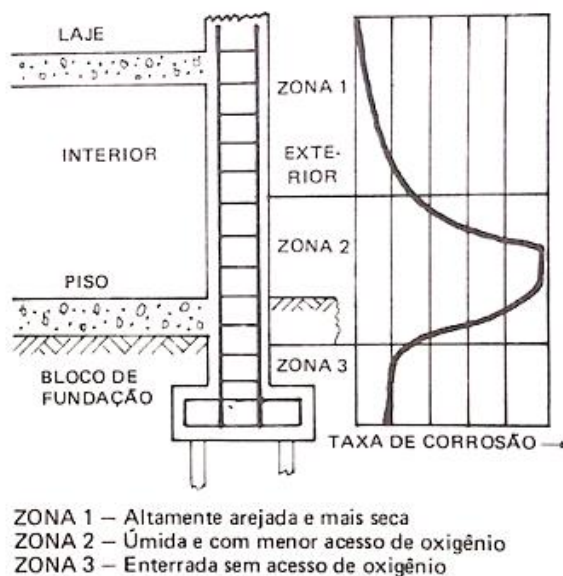


Figura 25 – Esquema e gráfico demonstrando as diferentes condições de uma estrutura de concreto parcialmente enterrada.

Fonte: Adaptado de HELENE, 1986.

2.2.4 Fatores relacionados ao concreto que influem na penetração de cloretos

2.2.4.1 Tipo de cimento e adições

Dois aspectos podem ser verificados quando são feitos estudos para determinar a influência do tipo de cimento na degradação do concreto sobretudo devido aos íons cloreto: o primeiro, no sentido da capacidade do cimento fixar os cloretos na matriz cimentícia, visto somente os cloretos livres participam do processo de corrosão da armadura; e segundo, na dificuldade que o cimento irá proporcionar à movimentação dos cloretos (MEIRA, 2004).

Bandeira *et al.* (2015b) observaram em suas pesquisas que o cimento tipo CP-IV 32 (ABNT NBR 16697, 2018) com aproximadamente 50% de material pozolânico em sua composição, teve melhor desempenho para ser utilizado em ambiente marítimo, notadamente em regiões sujeitas às variações de maré e respingos. Essa verificação deu-se na comparação com concretos utilizando cimento tipo ARI de fabricação espanhola (CEM I 52,5 R (UNE-EN 197-1, 2005) com e sem adições e com estudos de Rodrigues (2009) que utilizou cimento tipo CP-V ARI-RS (ABNT NBR 16697, 2018). A figura 26 espelha os resultados obtidos pelos pesquisadores em gráfico que demonstra a relação entre coeficiente de difusão de cloretos e o grau de saturação do concreto.

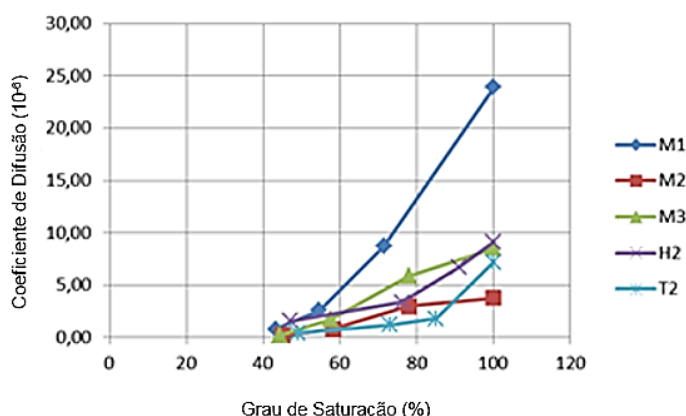


Figura 26 – Gráfico de relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e grau de saturação de vários concretos executados com aglomerantes diferentes.

Fonte: BANDEIRA *et al.*, 2015.

Identificando, na Figura 26, os concretos objetos de estudos foram os seguintes:

- concreto tipo M1, M2 e M3, elaborados com cimento espanhol, sendo que o primeiro (M1), foi utilizado sem adições, o segundo (M2) com 10% de substituição do cimento por sílica ativa e o terceiro (M3) com 20% de escória de alto forno na substituição do cimento;
- concreto tipo H2 elaborado por Rodrigues (2009);
- concreto tipo T2 elaborado por Guimarães e Helene (2007).

No gráfico apresentado na figura 26, verifica-se que depois do concreto com cimento pozolânico, o segundo melhor desempenho foi o concreto com cimento adicionado de sílica ativa. Houve uma pequena vantagem para o concreto tipo CP-V ARI, que tem 12% de material pozolânico em sua composição em relação ao concreto tipo M3. Por último desempenho o tipo M1, que foi utilizado cimento puro.

Em outro estudo, Bandeira *et al.* (2016) verificaram o efeito sobre a porosidade relacionando os mesmos materiais do trabalho anterior (descrito no parágrafo acima) e verificou que há um refinamento maior de poros para o concreto tipo (T2), o que confirma os resultados esperados em função dos valores do coeficiente de difusão para este concreto ser menor que todos os demais. A figura 27 apresenta gráfico que destaca os níveis de porosidade nos materiais.

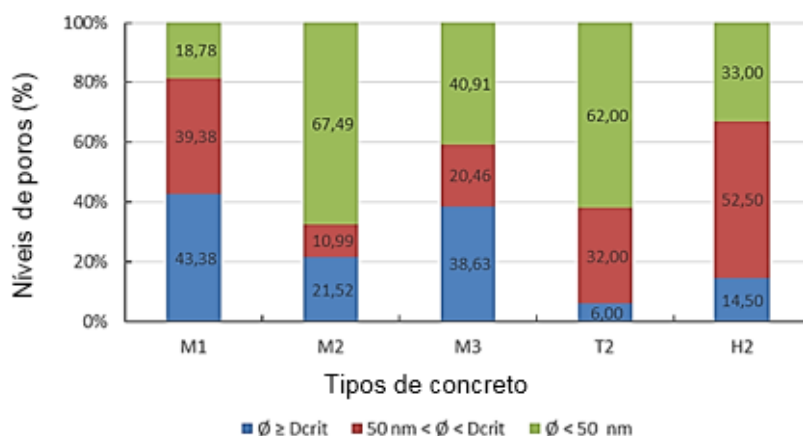


Figura 27 – Representação gráfica do percentual das faixas dos diâmetros dos poros para cada tipo de concreto.

Fonte: BANDEIRA *et al.*, 2016.

De outro modo, a respeito dos cimentos, Helene (1997) verificou que as quantidades de C_3A e C_4AF no cimento determinam a capacidade de combinação com os íons cloreto. Os cimentos com baixas quantidades de C_3A e C_4AF tem menos possibilidades de imobilizar os íons cloreto para a formação do sal insolúvel, cloro-aluminato de cálcio hidratado, denominado sal de Friedel, o que reduz as concentrações de íons cloretos livres na solução aquosa da rede porosa dos concretos.

No entanto, para Neville (2015) o C_3A em grandes quantidades aumenta o calor de hidratação desprendido nas reações iniciais do concreto, elevando assim a temperatura no interior da massa cimentícia. Em grandes massas de concreto, como é o caso de muitas estruturas marítimas, poderá haver a formação de fissuras facilitando, assim, a entrada de substâncias degradantes ao concreto entre elas os íons cloreto. Da mesma forma, observaram Ollivier e Vichot (2014) que deve haver limites para as quantidades de C_3A , principalmente, para os concretos situados em meio marítimo, pois o anidro residual que não reagiu com o sulfato de cálcio regulador da pega, pode transformar-se em etringita expansiva. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) somente para cimentos com teores de C_3A muito superiores a 8% é que acontece a fixação química de cloretos, no entanto, Gjrv (2015) observou em concreto de uma estrutura portuária a penetração de cloretos em até 80mm, concreto este executado com cimento Portland com teor de 16% de C_3A e relação água aglomerante de 0,38.

No aspecto das adições, que sejam inseridas diretamente no cimento, por ocasião da fabricação, ou como sejam na substituição parcial do cimento na confecção

dos concretos, estas têm papel importante na durabilidade dos concretos principalmente frente ao ataque de cloretos, pois os componentes dos aglomerantes empregados têm a capacidade de reagir com esses agentes agressivos e fixá-los, evitando assim a presença de cloretos livres na solução porosa, enfatiza Camacho (2014). Para Guimarães (2000) concretos executados com cimentos adicionados de escória de alto forno ou cinza volante tendem a fixar mais íons cloreto do que o cimento Portland comum e essa tendência representa em torno de 85% para cimentos com escória e cerca de 57% para cimentos com cinza volante.

Outrossim, Saciloto (2005) afirma que misturas que apresentaram maiores taxas de cloretos fixos, não foram necessariamente as que apresentaram a menor taxa de corrosão. E isto se deve, segundo o autor, à grande influência que cada adição exerce sobre a fixação de cloretos, a concentração de OH^- nos poros e a difusão de óxidos e íons ferrosos.

Em relação a essa capacidade de fixação dos íons cloreto, Ollivier e Vichot (2014), afirmam que as adições minerais ao possuírem teores de aluminatos em sua composição, quando substituem parte do cimento, tendem a provocar alterações na estrutura dos poros e na composição aquosa aumentando as condições para diminuir a quantidade de cloretos livres. Estes autores constataram, ainda, que em estudos realizados na pasta de cimento que a cinza volante e a escória de alto forno propiciam aumentos de porosidade e do tamanho dos poros nas idades iniciais, decorrentes de uma hidratação mais lenta, porém a longo prazo há uma porosidade de mesma ordem de grandeza, mas com a diminuição dos poros. Salientam, porém, que tais resultados dependem fortemente da reatividade da cinza volante e da escória, da temperatura e da duração da cura.

Ollivier e Vichot (2014), em seu estudo sobre porosidade de massas cimentícias, confeccionaram três tipos de pastas de cimento: a primeira utilizando cimento comum tipo CEM I (UNE - EN 197-1, 2005), cimento com 95 a 100% de clínquer; a segunda adicionando 35% cinza volante e a terceira adicionando 70% de escória de alto forno. Todas as pastas tiveram a mesma relação a/c de 0,45. Esses autores apresentaram seus resultados através de gráficos relacionando porosidade aberta, diâmetro dos poros e a idade das pastas cimentícias. A figura 28 apresenta os gráficos obtidos pelos autores.

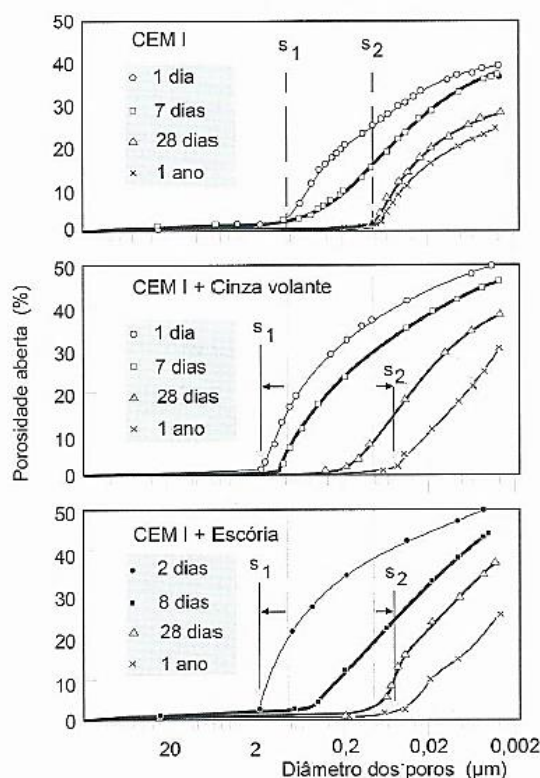


Figura 28 – Gráficos demonstrando a influência da adição de cinza volante ou escória de alto-forno na evolução da estrutura porosimétrica de pastas de cimento, em relação ao tempo.

Fonte: OLLIVIER E VICHOT, 2014.

Nos gráficos da figura 28, S_1 representa o limite dos poros maiores. Para o caso das pastas contendo adições, em idades iniciais, esse limite é maior do que aquela somente com cimento comum, o mesmo relacionado à porosidade aberta. Para idades maiores do que 28 dias, as pastas com adições levam à diminuição do tamanho dos poros maiores (S_2), verifica-se também, que a quantidade de porosidade não varia, mas com as dimensões menores dos poros favorece a durabilidade.

McCarter *et al.* (2018) em pesquisa com corpos de prova de concreto armado instalados por 18 (dezoito) anos em ambiente marítimo caracterizado por variações de maré e sujeito à respingos de água salina, observaram que as amostras que utilizaram adições a base de cinza volante e escória granulada de alto forno foram as que tiveram uma melhor performance à penetração de cloretos em relação às amostras que utilizaram cimento comum, sem adições. A relação a/c média foi de 0,40. A figura 29, apresenta o gráfico elaborado pelos pesquisadores mostrando a influência positiva na utilização de adições ao material aglomerante para a durabilidade.

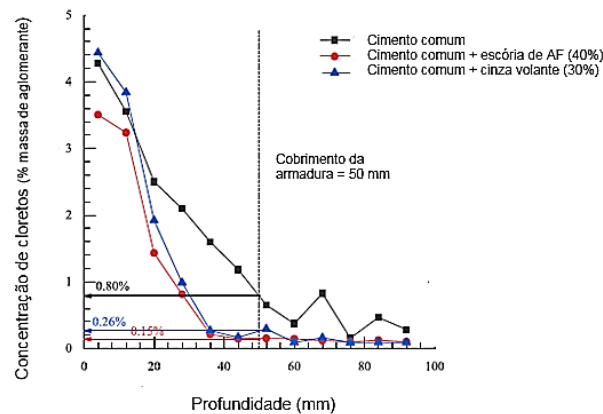


Figura 29 – Gráfico de perfil de cloretos para concretos com adições, comparativamente com concreto sem adição, em amostras situadas em ambiente marítimo após 18 anos.
Fonte: McCarter, 2018.

Em pesquisa para verificar os efeitos da utilização de adições na porosidade de pastas e de argamassas cimentícia, De Shutter *et al.* (2019) relacionaram também os efeitos da variação da fração volumétrica e granulometria de agregados. Essa variante com relação aos agregados, segundo os autores teria a finalidade de verificar também os efeitos da zona de transição que ocorre na fronteira entre os agregados e a massa cimentícia.

A figura 30, mostra graficamente os resultados obtidos pelos pesquisadores, relacionando a porosidade total e tamanho dos poros para cada tipo de amostra.

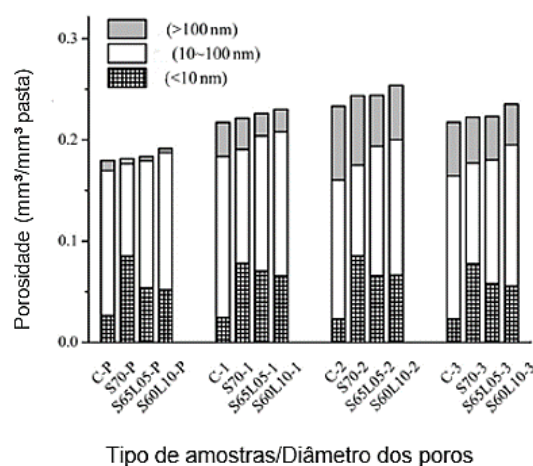


Figura 30 – Gráfico demonstrando a estrutura de poros em pastas cimentícias com e sem adições.
Fonte: DE SHUTTER, 2019.

Pode ser observado na figura 30 que a porosidade total aumenta com o acréscimo da fração de agregado (misturas 2). Esse aumento é contribuído principalmente pelo aumento do volume de poros maior que 100nm. Também se observa que há um visível refinamento dos poros, quando são utilizadas adições, principalmente na amostra com 70% de escória que tem as maiores taxas de poros menores do que 10nm.

Em se tratando da substituição parcial de cimento por alguma adição, cabe sempre o questionamento a respeito da quantidade dessa substituição para que se tenha uma satisfatória resistência à penetração dos cloretos. Sengul e Gjrv (2007) afirmam que em cimentos substituídos parcialmente por cinzas volantes para que aconteçam as reações pozolânicas depende do volume de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Logo, observaram que em cimentos substituídos por mais de 30% de cinzas volantes com baixo teor de cálcio (Ca), ocorreram baixíssimos ganhos de resistência à penetração dos íons cloreto.

Para a substituição parcial do cimento por escória de alto forno, esses pesquisadores apuraram que, ao contrário das cinzas volantes, há resultados satisfatórios para maiores quantidades. Utilizando concretos com relação a/c de 0,40 e teores de 40%, 60% e 80% de escória de alto forno, concluíram que em 28 dias as amostras já apresentavam reduções na difusividade de $11,2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (amostra com cimento 100%) para 4,9; 3,6 e $2,3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ considerando as substituições de 40%, 60% e 80%, respectivamente.

2.2.4.2 Fissuras

As fissuras existentes nas estruturas de concreto, sejam estruturais, sejam ocasionadas pela cura insatisfatória, pela expansão causada por fatores diversos e outras causas, contribuem para a entrada de agentes agressivos no interior da massa cimentícia.

Para Dyer (2015) as fissuras são um dos fatores que mais influencia o coeficiente de difusão de um elemento de concreto, sendo um caminho relativamente desimpedido para a entrada de cloretos. O autor verificou em suas pesquisas que para concretos submetidos à flexão, casos de vigas, os perfis de concentrações de cloretos têm nas zonas sob tensão as maiores taxas e isso se deve à influência da largura e da densidade das fissuras e definiu um fator que relaciona a distância média entre

fissuras e a largura das mesmas, que é o fator de espaçamento de fissuras (f), expressado pela equação 16:

$$f = \frac{l}{w} \quad (16)$$

Onde:

l = distância média entre fissuras ao longo de uma linha reta na superfície do concreto;

w = largura média das fissuras.

A partir da determinação do fator de espaçamento de fissuras e relacionando o coeficiente de difusão de cloretos, Dyer (2015) traçou um gráfico em que expressa o quanto influi o fissuramento do concreto na permeabilidade do concreto aos íons cloreto. A figura 31 expõe o gráfico obtido.

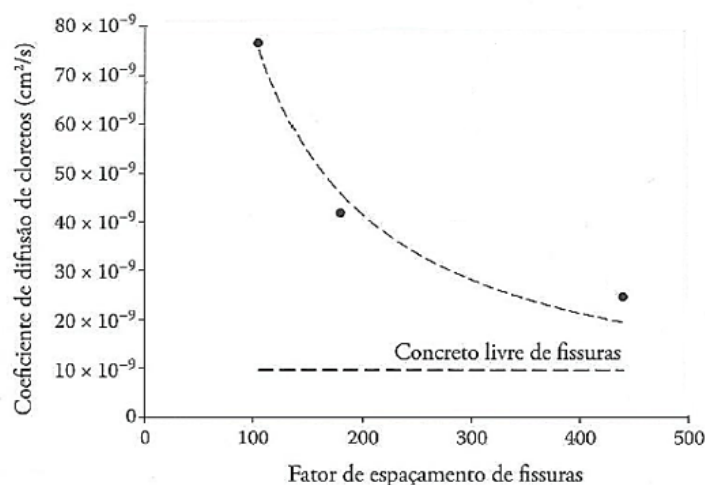


Figura 31 – Gráfico relacionando o coeficiente de difusão de cloretos e o fator de espaçamento de fissuras em concreto fissurado por ataque de congelamento-degelo.

Fonte: DYER, 2015.

Da mesma forma, Tongning *et al.* (2020) afirmaram que a tensão gerada por uma carga de flexão ou tração, e que cria microfissuras dentro do concreto, irá alterar as características microestruturais do concreto. Especialmente na zona de tensão, as microfissuras irão aumentar fazendo com que haja diminuição das tortuosidades da rede porosa criando assim rotas adequadas para a movimentação dos íons cloreto pelo interior de sua microestrutura.

Quanto as dimensões das fissuras, Smith (2016) considera que podem atuar como caminhos para que os cloretos entrem na matriz de concreto as fissuras maiores de 0,3mm de abertura. Cita, esse autor, que a norma britânica recomenda esse valor máximo para estruturas localizadas em ambiente sujeito aos cloretos.

2.2.4.3 Relação água-cimento (a/c)

A relação água/cimento (a/c) é um dos fatores importantes na distribuição dos poros da pasta cimentícia, pois quanto maior a relação a/c, maiores e mais interligados serão os poros da pasta de cimento.

Para Mehta e Monteiro (2014), a relação a/c influi no ataque de íons cloreto sobre o concreto, pois existe uma relação desse fator com a permeabilidade, ou seja, quanto maior a permeabilidade, mais intensa será a facilidade no transporte de cloretos. Segundo os autores, nas pastas de cimento com baixa relação a/c, os vazios capilares podem variar entre 10 e 50nm, por outro lado, em pastas com elevadas taxas da relação a/c os vazios capilares podem atingir 3 a 5µm. Meira (2004) avalia que a relação água/cimento tem uma forte influência sobre a porosidade do concreto e nesse sentido pode gerar um concreto mais ou menos denso, logo facilitando ou dificultando o transporte de cloretos por entre a rede capilar dos concretos.

Tendo em vista a importância da relação a/c na melhoria da permeabilidade do concreto ao ataque dos agentes agressores, as normas técnicas pertinentes definem valores máximos para a relação a/c para os concretos localizados em locais sujeitos a esses agentes:

- a) o ACI Building Code 318 (2014), define, para concretos expostos à água do mar relação a/c máxima de 0,40;
- b) a norma argentina Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (INTI-CIRSOC 201, 2005), estabelece que em estruturas localizadas em zonas de flutuação de marés e de salpicos de água do mar a relação a/c máxima deve ser de 0,40. Para aquelas situadas a mais de 1 km da costa, mas ainda sujeita, mesmo que eventual, a ventos saturados de sais, a relação máxima é de 0,50;

- c) a norma espanhola Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08, 2008), prescreve para a zona descrita na alínea anterior relação a/c máxima de 0,45;
- d) a norma britânica Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206 (BS 8500-1, BSI, 2016), prescreve para estruturas localizadas no ambiente marítimo valores entre 0,35 e 0,55 de relação a/c;
- e) A norma brasileira Projetos de Estruturas de Concreto (ABNT NBR 6118, 2014), estabelece para estruturas em locais sujeitos a respingos de maré, a/c máxima de 0,45.

Xie *et al.* (2017) utilizando pastas de cimento com 5 (cinco) diferentes relações a/c, verificaram variação proporcional na porosidade total das pastas e obtiveram valores de diâmetro crítico que variaram de 30,6nm a 49,0nm para relação a/c de 0,30 a 0,50, respectivamente. Concluíram esses pesquisadores que a relação a/c exerce influência na profundidade de penetração de cloretos através da evolução da estrutura de poros.

Gjörv (2015) em ensaios com concretos utilizando cimento Portland comum (sem adições) e variando a relação água cimento, verificou que se a relação a/c exceder de 0,40 o concreto adquire claramente uma porosidade mais alta. A figura 32 ilustra o gráfico elaborado pelo autor, onde demonstra essa afirmativa comparando os concretos de relação a/c igual a 0,50 e 0,60 com o concreto de relação a/c igual a 0,40.

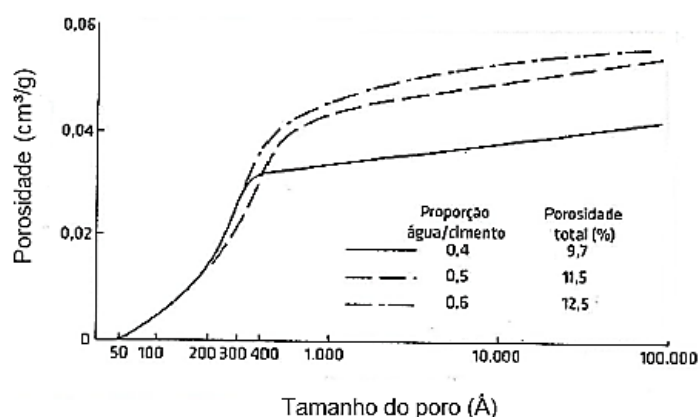


Figura 32 – Gráfico que relaciona a porosidade de concreto com a relação a/c.
Fonte: GJÖRV, 2015.

Gjörv (2015), ainda, salienta que mesmo sendo a relação a/c um fator importante para a baixa permeabilidade do concreto, a seleção do cimento ou sistema aglomerante adequado pode ser tão ou mais importante do que a seleção de uma baixa relação a/c.

2.2.4.4 Grau de Hidratação da pasta cimentícia

O cimento Portland anidro não é um material cimentante tão somente com areia e agregado graúdo, ele irá adquirir propriedade adesiva quando misturado com água. A reação química entre a água e o cimento é o que se chama de hidratação do cimento gerando produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA, e MONTEIRO, 2014).

Conforme Souza (2005), o grau de hidratação do concreto é um fator que deve ser levado em conta, pois dependendo do estágio de hidratação, maior ou menor poderá ser a porosidade capilar.

Neste sentido Oliveira *et al.* (2017) ao verificarem a relação entre o grau de hidratação com a resistividade elétrica a fim de medir a porosidade de concretos, observaram que o grau de hidratação aumentou junto com a resistividade das amostras independentemente do grau de saturação e tipo de adição, ou seja, a diminuição da porosidade deu-se à ampla hidratação do cimento. Os valores obtidos por esses pesquisadores foram idênticos nos três tipos de concreto utilizados.

Vários fatores podem contribuir para uma melhor hidratação do concreto, dentre eles a correta dosagem, a cura de acordo com as condições do ambiente em que se encontra e a qualidade do cimento e dos agregados.

2.2.4.5 Consumo de cimento

A relação água/cimento juntamente com o tipo de aglomerante utilizado nos concretos são os parâmetros mais influentes na capacidade de adensar a pasta cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Porém, a quantidade de aglomerante tem seu papel, no sentido de que se for em quantidades menores, o concreto terá menos resistência mecânica podendo implicar em fissuramentos que irá beneficiar a entrada de cloretos. Por outro lado, para maiores quantidades, pode causar maiores retrações na massa, o que leva a

fissuramentos. No entanto, quanto maior volume de massa cimentícia, menor quantidade de zonas de transição, o que melhora o nível de porosidade. Meira (2004) afirma que o maior consumo de cimento, ocasionará maior quantidade de clínquer e assim maior capacidade de fixação de íons cloreto.

Embora o consumo de cimento não seja o fator único para os aspectos de durabilidade, a normalização mundial define taxas mínimas de cimento por unidade de volume de concreto em função das condições ambientais do local da estrutura de concreto.

2.2.4.6 Cura do concreto

O processo de cura no concreto pós-lançado, é um importante meio de manter ou melhorar as condições a que foi proposto o concreto. Uma cura malfeita ou insuficiente certamente causará ao concreto efeitos danosos na sua vida útil.

Para Page *et al.* (1981) o tipo de cura influencia na estrutura de poros na pasta de cimento. Similarmente, Guimarães (2000), afirmou que a cura é importante para a durabilidade do concreto armado pois conforme o tipo de cura haverá uma estrutura de poros na pasta de cimento, alterando a permeabilidade do concreto.

Já Neville (2015) concluiu que o tempo de cura é importante e que quanto mais prolongado ele for, o início de provável corrosão do aço é substancialmente aumentado. Identicamente, Saciloto (2004), verificou que o coeficiente de difusão de íons cloreto diminui com o prolongamento da cura úmida de 3 para 7 ou 28 dias, tanto para concretos com adições de sílica ativa ou com adição de escória de alto forno, bem como para concretos sem adições. Do mesmo modo, Tabarelli *et al.* (2019) verificaram que o coeficiente de difusão de amostras de concreto curadas em 3 (três) dias foi três vezes maior do que em amostras curadas em 28 dias.

Conforme Meira (2004), o efeito da cura com o passar do tempo, sobre as camadas nas quais os limites de cloretos são atingidos, é menos expressivo do que nas primeiras idades e na figura 33 observa-se, através do gráfico, essa afirmativa. Considerando a mesma relação a/c, a cura de 3 para 7 dias influencia diretamente a profundidade para que seja atingido o limite de 0,4% de cloretos sobre % de massa de cimento.

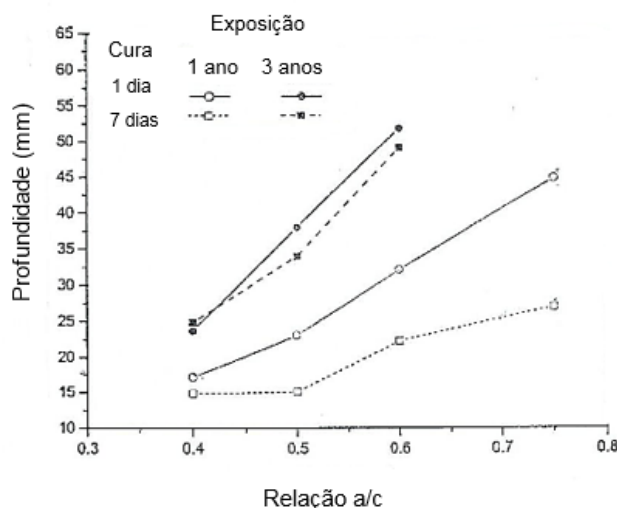


Figura 33 – Gráfico do efeito da cura e da relação a/c na profundidade limite de cloretos.

Fonte: MEIRA, 2004.

2.2.4.7 Grau de carbonatação

Para Tuuti (1982), o processo de carbonatação presente no interior da massa cimentícia, pode liberar íons cloreto fixados na pasta endurecida, provocando uma elevação do teor desses íons livres, facilitando o aumento de sua concentração o que poderá causar a despassivação da armadura. Guimarães (2000) considera que a combinação destes dois mecanismos de agressão ao concreto pode aumentar a intensidade da ação corrosiva do aço, sendo que esta é a causa de muitos problemas severos de corrosão da armadura do concreto.

Li *et al.* (2018) afirmaram que é notório a contribuição da carbonatação no transporte de cloretos, pois ela tem a capacidade de impedir o transporte de cloretos diminuindo o volume de vazios, mas também incentivar o transporte de íons cloreto liberando os cloretos ligados do sal de Fridel. Shen *et al.* (2019) complementam, afirmando que com o avanço da frente de carbonatação sobre o concreto podem ocorrer expansões, gerando fissuras que favorecerão a entrada de agentes predadores como os íons cloreto.

Em ambiente marinho as estruturas de concreto estão expostas a condições extremas devido aos cloretos, umidade e também a presença do dióxido de carbono (CO_2) devido à poluição, etc. Jiang *et al.* (2019) realizaram pesquisas em uma estrutura de concreto para verificar a relação entre a carbonatação e os íons cloreto

considerando as variações de umidade do ambiente. Os autores concluíram, que a variação da umidade no interior da estrutura é preponderante para a entrada desses agentes e que há uma relação de influência mútua entre os cloretos e o dióxido de carbono para a despassivação do aço, bem como a temperatura. Verificaram, também, que com acréscimos na temperatura combinado com menor umidade ocorrendo uma concentração maior de CO_2 implicará em liberação mais rápida de cloretos ligados.

A figura 34, ilustra, de forma esquemática, o mecanismo de deterioração das estruturas de concreto armado expostas a esse ambiente havendo a combinação de CO_2 e os cloretos.

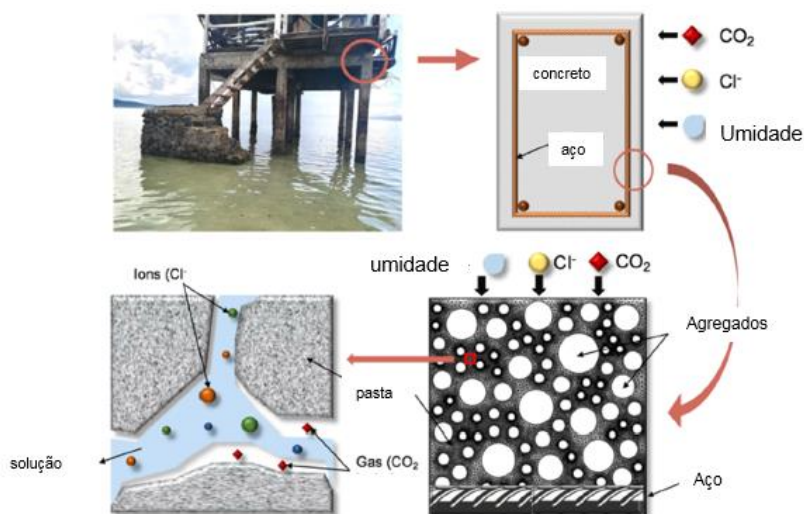


Figura 34 – Ilustração do mecanismo de deterioração de estrutura de concreto exposta a ambiente marinho em diferentes escalas.

Fonte: JIANG, 2019.

Na figura 34, de forma macroscópica tem-se a estrutura de concreto à beira mar enfrentando a intrusão de cloretos e o dióxido de carbono, em que ambos podem causar a destruição da camada passivadora do aço provocando a sua corrosão. Na escala meso e microscópica tem-se o mecanismo de transporte desses agentes pela rede porosa conectada em meio a uma solução aquosa que satura de forma incompleta os poros, facilitando a entrada do gás.

Da mesma forma, para verificar a relação entre o grau de carbonatação e a penetração de cloretos, Malheiro *et al.* (2020) utilizaram amostras de argamassa sem e com adição de cinzas volantes (20%; 40% e 60%). Para relacionar as duas ações sobre os materiais cimentícios, os pesquisadores, testaram amostras sujeitas apenas

à ação dos cloretos e compararam com amostras que sofreram a ação combinada de carbonatação e cloretos. A figura 35 apresenta os resultados obtidos através de dois gráficos: o primeiro com as amostras sujeitas apenas à ação dos cloretos e o segundo sobre à ação combinada.

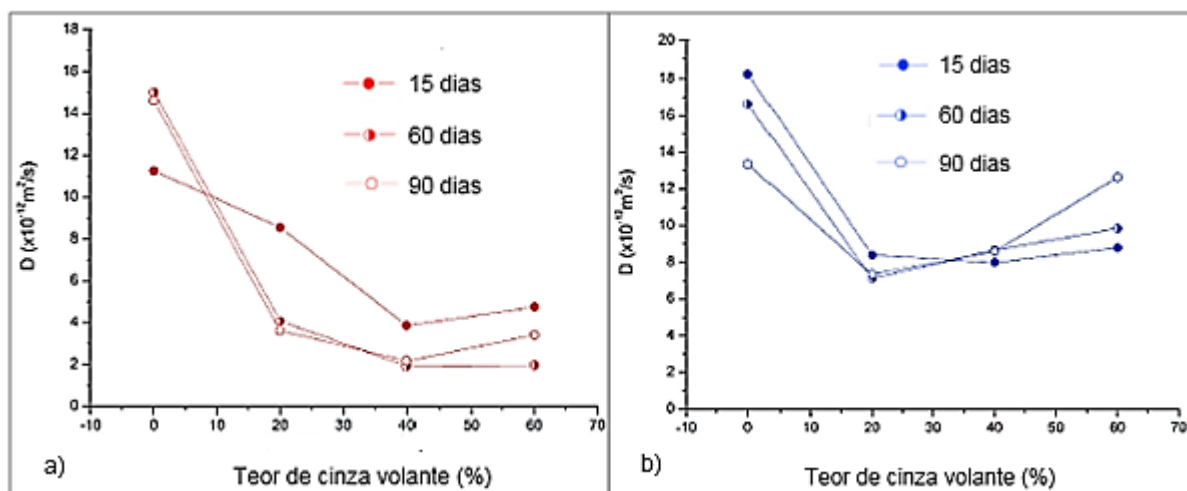


Figura 35 – Gráficos teor de difusão de cloretos: a) somente ação de cloretos; b) ação combinada de cloretos e carbonatação.

Fonte: MALHEIRO *et al.*, 2020.

Analisando os gráficos da figura 35 verifica-se que houve um aumento no coeficiente de difusão na ação combinada de cloretos e carbonatação independentemente da quantidade de adição de cinza volante. Porém, a adição de cinza volante contribuiu para menores valores da difusão nas duas situações. No aspecto da duração do ensaio, vê-se dois resultados diferentes: na ação exclusiva de cloretos, à medida que o ensaio avança a difusão é menor e na ação combinada ao contrário, para tempo maior do ensaio (90 dias), o coeficiente de difusão é maior.

2.2.4.8 Porosidade

O transporte dos íons cloreto e de outras substâncias nocivas ou não, através dos mecanismos de transporte (absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica), no interior das massas cimentícias está intrinsicamente relacionada com a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Neste sentido a interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta, e a distribuição do tamanho dos poros constituem-se fatores importantes na questão da vida útil das estruturas de concreto

armado (METHA e MONTEIRO, 2014). Esses autores consideram que a porosidade total não é o mais importante e sim a distribuição do tamanho dos poros, pois essa irá controlar efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações de volume da pasta de cimento endurecida. Além de que a distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação a/c e pelo grau de hidratação (idade) do cimento e os poros maiores ($> 50\text{nm}$) influem na resistência à compressão e permeabilidade, enquanto que os poros pequenos ($< 50\text{nm}$) influem na retração por secagem e molhagem.

Por outro lado, Guimarães *et al.* (2012) definiram o diâmetro crítico (D_{crit}) como sendo o menor diâmetro dos poros que fazem parte da rede porosa interligada e que o volume total de poros não é o mais importante para os aspectos da durabilidade das estruturas de concreto armado e sim a relação entre o volume de poros de diâmetro maior ou igual ao D_{crit} e o volume total de poros. Para esses pesquisadores, quanto menor for essa relação, mais refinada será a rede de poros o que resulta em maior resistência ao ataque dos agentes agressivos.

Os vazios que apresentam as massas cimentícias podem ser classificados pelo diâmetro dos poros. Vários autores apresentam essa classificação em função de faixas de diâmetro, destaca-se, neste trabalho, a classificação e características de cada tipo segundo Mehta e Monteiro (2014):

- a) microporos ou denominados também de poros de gel, tem diâmetro entre 1 a 3nm e relacionam os espaços inter-laminares do gel C-S-H. A representatividade dentro da porosidade total é de aproximadamente 28% e devido às suas pequenas dimensões não influem na durabilidade do concreto, outrossim podem influir pela presença de água em seu interior na estabilidade volumétrica do conjunto, gerando inconvenientes na retração e fluência do concreto;
- b) mesoporos denominados também de poros capilares, tem diâmetro entre $1\mu\text{m}$ a 50nm , representam os espaços não preenchidos pela pasta endurecida do cimento podendo conter água que não reagiu no processo de hidratação do cimento e por isso, estão relacionados com o grau de hidratação, bem como com a relação a/c;
- c) macroporos tem diâmetro entre 5 a $1000\mu\text{m}$ e são os maiores responsáveis pela entrada dos agentes agressores que irão intervir na durabilidade do concreto.

A figura 36 apresenta graficamente a distribuição dos tamanhos dos poros em pastas de cimento com diversas relações a/c e o volume total. Os pontos de inflexão nas curvas indicam o diâmetro crítico (D_{crit}). A porosidade das pastas de cimento foi analisada aos 28 dias de idade.

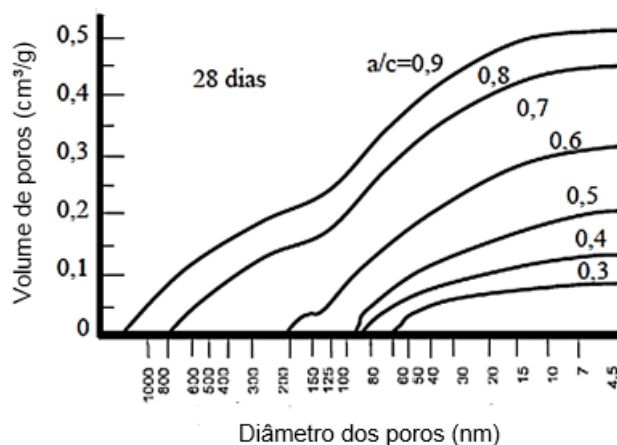


Figura 36 – Gráfico que relaciona volume de poros de pastas de cimento, relação a/c e o diâmetro dos poros.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

Observa-se no gráfico da figura 36 que as pastas com relação a/c variando de 0,9 a 0,6 tem, aproximadamente o mesmo D_{crit} e que o percentual de volume de poros com diâmetro maior que o D_{crit} diminui da relação a/c de 0,9 para a relação a/c 0,6. Segundo os autores o volume de poros maiores que o diâmetro crítico é da ordem de 15% do volume total de vazios para pasta de cimento com relação a/c de 0,6 e o percentual de poros maiores que o diâmetro crítico para pasta de cimento com relação a/c de 0,5 deve ser menor que 15% do volume total de vazios.

Já Isaíá (2000), no desenvolvimento de sua pesquisa verificou que a presença de poros após a completa hidratação dos compostos cimentícios deve-se ao fato de que os produtos de hidratação formados ocupam menor volume que a soma dos respectivos volumes absolutos do cimento anidro e água. Para o autor a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros são os determinantes da permeabilidade, sendo que somente os poros situados acima de 50nm e 100nm contribuem significativamente para o transporte de massa através do concreto.

Da mesma forma, Bernal (2014), avaliou que para se classificar um concreto a luz da durabilidade, deve-se analisar também a distribuição geométrica e espacial da rede porosa pois, materiais podem apresentar a mesma porosidade, no entanto a ligação entre os poros, isto é, sua interconectividade pode ser diferente e a resposta ao ataque de agentes agressivos consequentemente apresentar resultados distintos. E essas diferenças dá-se pelo tipo de cimento, dosagem, relação a/c, processo de adensamento, utilização de aditivos e adições, método de cura e idade. O autor, também, observou que essa rede porosa formada por diversos orifícios de diferentes diâmetros tem um grande grau de complexidade, pois é impossível que seus extremos coincidam no sentido longitudinal com o princípio e o término do comprimento de uma peça de concreto, ou seja, há uma inter-relação entre os poros de tal forma que esta rede pode ser confundida como uma “teia”, mas sem a regularidade geométrica e física e cuja dimensão longitudinal pode ser até maior que o comprimento da peça. A figura 37 mostra em forma esquemática as diversas formas da rede porosa presente nos concretos.

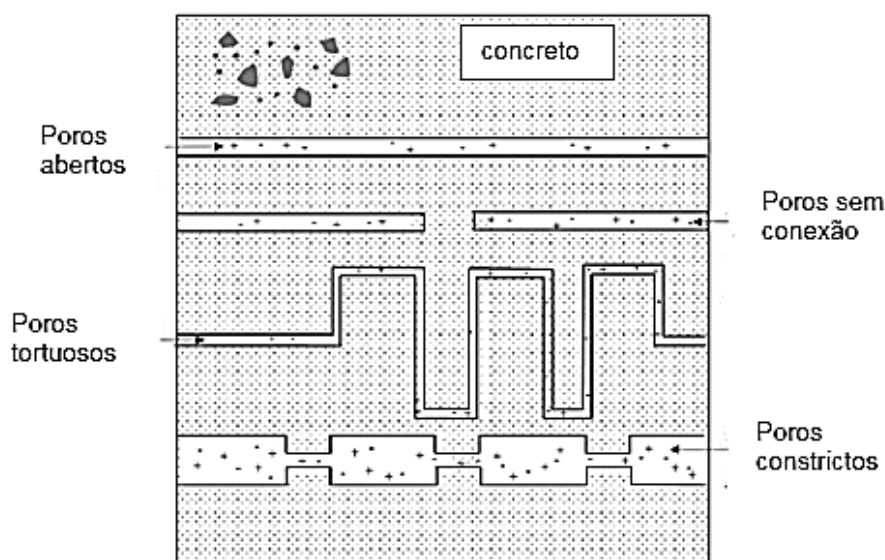


Figura 37 – Esquema das diferentes formas dos poros no interior das massas cimentícias.
Fonte: McCARTER *et al.*, 2018.

2.2.4.9 Tipo de superfície exposta

Guimarães *et al.* (2005) analisaram os efeitos da posição da superfície do concreto em relação à superfície de concretagem. Os autores compararam o desempenho de superfícies externas de concreto e de testemunhos retirados do

interior de corpos de prova, frente ao ataque de cloretos. Utilizaram quatro traços de concreto com diferentes relações a/c e várias consistências.

A figura 38 demonstra o modo que esses pesquisadores obtiveram as amostras.

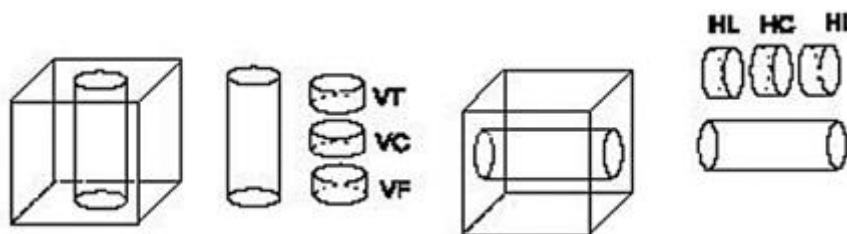


Figura 38 – Esquema das diferentes posições para extração de testemunhos.
Fonte: GUIMARÃES *et al.*, 2005.

Os testemunhos obtidos foram fatiados em 3 (três) partes denominadas de VT, VC e VF, para aqueles da forma vertical. Os testemunhos de forma horizontal também foram fatiados em 3 (três) partes e denominadas de HL e HC. Para todas as amostras foram realizados ensaios de penetração acelerada de cloretos por diferença de potencial (migração). Os autores verificaram que as superfícies externas laterais (HL) e de fundo (VF) apresentaram melhores desempenhos ao ataque dos agentes agressivos em relação ao topo (VT) e as superfícies internas (VC e HC) extraídas dos corpos de prova, evidenciando assim que a posição influencia nas taxas de penetração de cloretos, mesmo tratando-se de concreto igual.

Em um trabalho anterior, Guimarães (2000), também, realizou prospecções em concretos de estacas no cais do porto do Rio Grande (RS), Brasil, para verificar a variabilidade de comportamento do concreto frente ao ataque de íons cloreto devido à diferença dos tipos de superfície em relação à superfície de concretagem. Neste estudo, a superfície de fundo apresentou um melhor comportamento do que a superfície de topo, embora ambas estivessem expostas ao mesmo microambiente.

2.2.4.10 Zona de transição

A zona de transição é geralmente considerada como o terceiro constituinte morfológicamente influente nas propriedades importantes do concreto e pode ser definida como a fronteira entre o agregado e a matriz da pasta de cimento. Possui propriedades de microestrutura, morfologia e densidade diferentes da matriz da pasta cimentícia mesmo que seja composta de fase similares a essa matriz e assim tem um

papel importante na resistência mecânica e nas propriedades de transporte de substâncias pela microestrutura dos materiais cimentícios (ZHANG, 2014).

Para De Shutter *et al.* (2019), os agregados influenciam a permeabilidade do concreto aos agentes degradantes como o cloreto, por dois efeitos opostos: o primeiro reduzindo a área efetiva da pasta de cimento e segundo, ao aumentar a tortuosidade do caminho de transporte desses agentes, embora também influencie os mecanismos de deslocamento pois se caracteriza por alta porosidade na zona fronteira com a pasta de cimento. Isso acaba ocasionando que o movimento de íons cloreto pela zona de transição, seja mais rápido do que através da pasta de cimento.

Ao comparar amostras de argamassas cimentícias variando a quantidade e tamanho dos agregados, De Shutter *et al.* (2019) verificaram que houve um incremento da porosidade total e também do diâmetro crítico (D_{crit}) quando foi utilizado agregados mais finos e ao manterem a mesma proporção de agregados, mas incorporando uma parcela de agregado mais grosso, a porosidade diminuiu bem como o D_{crit} . Concluíram que o uso de agregados de maior diâmetro reduz a área de face e assim diminui as zonas de transição, ao passo que agregados mais finos com a mesma proporção aumentam as zonas de transição. Segundo Mehta e Monteiro (2014) a espessura da zona de transição situa-se na faixa de 10 e 50 μm .

A figura 39 mostra a imagem obtida através de microscopia eletrônica por varredura (MEV) de um concreto salientando a interface agregado e pasta de cimento.

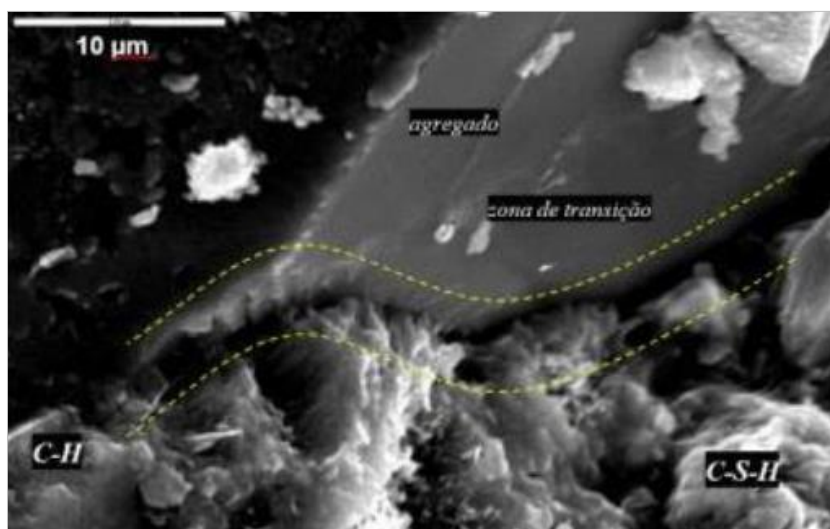


Figura 39 – Imagem através de MEV destacando a presença da zona de transição na interface pasta e agregado.

Fonte: LINTZ *et al.*, 2020.

2.2.5 A ação dos cloretos nas armaduras do concreto

O concreto armado é pretendido presente nas estruturas em grande parte, tem uma característica intrínseca que é de proteção à armadura que lhes confere a resistência aos esforços de tração. Mas para que essa proteção aconteça a contento, é necessário conferir ao concreto qualidades que não permita ou pelo menos diminua as ações dos agentes externos inseridos no meio ambiente.

As estruturas situadas em regiões de ambientes marinhos, regiões costeiras, regiões sujeitas à formação de neve onde são utilizadas soluções de sais fundentes, entre eles o NaCl e entre outras situações, estão expostas à ação dos íons cloreto. Helene (2018) considera que a penetração de íons cloreto é um dos principais mecanismos de deterioração de estruturas de concreto armado. Isto é devido, em parte, à possibilidade desses íons serem transportados para o interior de concreto, atingindo o aço e causando corrosão do mesmo.

Neste contexto Lisboa (2020) ressalta que é necessário a análise minuciosa dos mecanismos envolvidos no processo corrosivo das armaduras do concreto para que haja um controle efetivo afim de combater a corrosão. Da mesma forma Kutz (2018) acentua que deve ser devidamente compreendida e reduzida a corrosão do aço do concreto pois é de grande importância para a subtração de custos do ciclo de vida de pontes, estruturas marinhas, estruturas de estacionamento e outras estruturas de concreto localizadas em ambientes de severa agressividade. Reforça esse autor que, segundo dados obtidos, nos Estados Unidos o custo anual para recuperação de estruturas com relação à corrosão da armadura foi de aproximadamente US \$ 15 bilhões.

2.2.5.1 A passivação da armadura

Segundo Dyer (2015), a alcalinidade presente no meio poroso da pasta de cimento é responsável pela formação e estabilidade da película que irá proteger o aço embutido no concreto, é a denominada película passivadora, camada de óxido altamente impermeável e que possui menos de 1µm de espessura.

Os compostos alcalinos presentes no fluido dos poros como por exemplo o Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e o íon hidróxido (OH⁻) formam um extrato aquoso no concreto com pH da

ordem de 12 a 13 à temperatura ambiente, proporcionando assim um ambiente favorável à formação dessa película passivadora no aço (MAGALHÃES, 2019).

Uma rápida e extensa reação eletroquímica gera a película passivadora, entretanto tem de ter a presença de oxigênio para que esta reação eletroquímica se processe. Essa membrana extremamente fina é composta por óxidos de ferro (Fe_3O_4 , Fe_2O_3) além dos oxihidróxidos tipo (FeOOH) e, apresenta uma elevada resistência ôhmica, conferindo taxas de corrosão desprezíveis, uma vez que impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos ao aço (CASCUDO, 1997).

De acordo com Ollivier e Vichot (2014) nos concretos à base de cimento Portland, os silicatos C_2S e C_3S e os aluminatos C_3A e C_4AF em contato com a água da mistura, hidratam-se formando certa quantidade de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), isto faz com que já nas primeiras idades o pH interno é básico. De toda a massa cimentícia hidratada, cerca de 25% é formada por hidróxido de cálcio (HELENE, 1986).

2.2.5.2 O processo de corrosão do aço

De forma generalizada a corrosão dos metais pode ser vista como uma reversão da transformação dos metais como estão na natureza. Os metais estão normalmente na forma original como óxidos, silicatos, sulfatos, etc. Como exemplo deste retorno às origens é o ferro que ao oxidar-se produz a “ferrugem” que é o óxido de ferro (MEIRA, 2017). Sendo a corrosão, para Ribeiro (2014), o resultado de uma ação eletroquímica já que os metais possuem elétrons livres capazes de criar pilhas eletrolíticas nas interfaces, gerando uma diferença de potencial. Antón (2009) sublinha que esse processo eletroquímico quando ocorre na presença de água, produz uma reação de oxidação e outra de redução, sendo que a zona de oxidação atua como ânodo a qual libera elétrons para a zona catódica (redução). Conforme Mehta e Monteiro (2014) sendo a corrosão do aço um processo eletroquímico, os potenciais para formar as células de corrosão podem ser formados pelas diferenças de concentração de íons dissolvidos nas proximidades do aço, íons como os álcalis, cloretos, sulfato e oxigênio.

De forma prática Biczok (1972) definiu a corrosão da armadura no concreto armado como sendo um processo de natureza complexa, onde pode-se atribuir a diversos fatores que agem ou não de forma simultânea, dependendo das condições

no meio que esse material está inserido, isto é, das concentrações de gases, ácidos, bases ou sais que este meio ambiente possui e ainda das condições climáticas existentes. Complementa, esse autor, que a corrosão da armadura irá depender também das propriedades do concreto através dos materiais que o constitui, da forma de fabricação, da dosagem, do lançamento por ocasião da construção, dos processos de cura, idade, etc.

Ollivier e Vichot (2014) definiram, de forma geral, a corrosão do aço como sendo resultado de um processo de movimentação de íons e elétrons na interface metal-solução. Sendo que dois tipos de reações podem ocorrer na superfície do metal:

- a) reação anódica onde terá a formação de íons, com perda de elétrons. Essa fase denomina-se de oxidação e pode ser expressa pela equação 17 abaixo:



- b) reação catódica que corresponde à redução do oxidante presente na solução e a captura de elétrons provenientes do ânodo, neste caso ocorre ganho de elétrons. A expressão abaixo (18) define essa fase:



Estas reações principais de oxidação e de redução são seguidas das reações secundárias que definem, quimicamente, a formação dos produtos de corrosão na superfície do aço (ferrugem), conforme as expressões equações 19 e 20 a seguir:



Helene (1986), salienta que, na análise de uma estrutura a qual apresente sinais de corrosão na armadura, apenas indicar a falta de um revestimento adequado em relação às normas pertinentes é uma solução muito simples e cômoda, pois vários aspectos devem ser analisados entre os quais a microrregião de onde ser encontra

um elemento da estrutura como um todo, bem como a própria natureza do elemento. Por exemplo, lajes, vigas, pilares ou paredes devem ser tratados de forma desigual no caso do cobrimento. Portanto, as variáveis que intervêm no processo de corrosão provêm de diversas fontes e em muitos casos torna-se difícil e demorado obter as verdadeiras causas do ataque das armaduras.

A corrosão da armadura ao se manifestar no concreto pode causar manchas ferruginosas, expansões, fissuramentos e lascamentos do cobrimento onde pode ocorrer a perda da aderência entre o aço e o concreto bem como a diminuição da seção transversal da armadura. Assim, a resistência inicialmente projetada, diminui podendo ocorrer um colapso na estrutura (MEHTA E MONTEIRO, 2014). A figura 40, de forma esquemática ilustra um processo de corrosão da armadura e os efeitos que pode causar ao concreto.

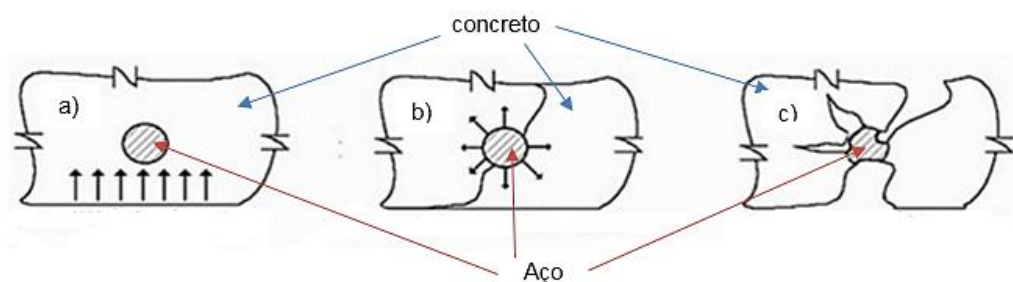


Figura 40 – Desenho esquemático da forma da deterioração progressiva devido à corrosão do aço do concreto: a) penetração de agentes agressivos por difusão, absorção ou permeabilidade; b) fissuração devida às forças de expansão dos produtos de corrosão; c) lascamento do concreto e redução da seção da armadura.

Fonte: SOUZA E RIPPER, 2009.

No aço, pode-se manifestar de forma generalizada, típica dos processos de carbonatação e na forma de pontos, que é característica do ataque de cloretos. A figura 41 ilustra esses dois casos característicos de corrosão no aço.

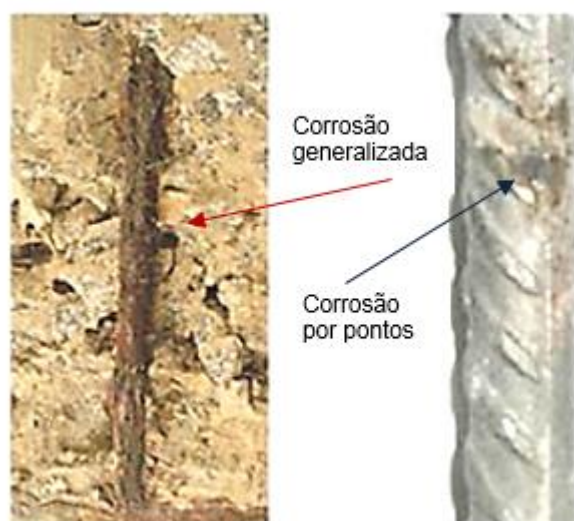


Figura 41 – Ilustração com formas de corrosão na armadura do concreto.
Fonte: MAGALHÃES, 2019.

A corrosão denominada “por pites” ou cavidades (lado direito da figura 41), é aquela que ocorre quando o filme de passividade se rompe localmente. Segundo Bertolini (2010) a probabilidade de corrosão por pites aumenta com o aumento do teor de cloretos no ambiente e do teor de oxigênio. Para o autor, pites é uma forma de corrosão particularmente agressiva, pois a sua propagação favorece a concentração do ataque fazendo com que haja uma maior migração de cloretos para esse local (zona anódica) e assim criar um ambiente extremamente agressivo e embora apresente uma extensão limitada, pode penetrar muito rapidamente com valores de que podem chegar a alguns mm/ano.

2.2.5.3 A despassivação da armadura pelos íons cloreto

Helene (1986) enumera três fatores principais e necessários para que aconteça a despassivação da armadura do concreto:

- a) existência de eletrólito que irá permitir a dissolução e movimentação dos íons ao longo das regiões anódicas e catódicas entre a superfície do aço e os poros da matriz cimentícia;
- b) existência de diferença de potencial;
- c) presença de oxigênio.

Complementa, esse autor, que nessa solução pode existir agentes agressivos, caso dos íons sulfeto (S^{2-}), íons cloreto (Cl^-), dióxido de carbono (CO_2), nitritos (NO_3^-), gás sulfídrico (H_2S), cátion amônio (NH_4^+), óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), que atuam como catalisadores da despassivação.

Ao adentrarem no concreto, juntamente com a água e o oxigênio e encontrarem a película passivadora da armadura, os íons cloreto provocam uma acidificação local gradual até que a camada passivadora seja rompida. Os ânions de cloreto reagem com cátions metálicos, criando produtos de corrosão e prótons liberadores que resultam em um ambiente local mais ácido, promovendo maior despassivação (OSIO-NORGAARD *et al.*, 2018). A figura 42 apresenta de forma esquemática os elementos que constituem a despassivação da armadura do concreto.

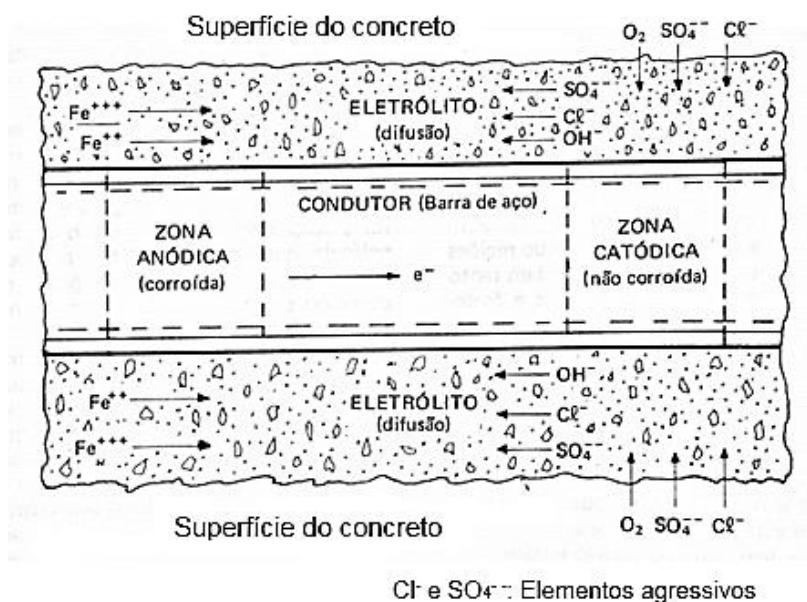


Figura 42 – Desenho esquemático de uma seção de concreto com os elementos constituintes para a despassivação da armadura.

Fonte: HELENE, 1986.

Lima *et al.* (2019) enumeraram as reações que ocorrem, devido aos cloretos, no processo de despassivação do aço, descritas pelas expressões 21 e 22, abaixo:



Na expressão 22 tem-se a representação do ácido clorídrico como produto resultante destas reações. O ácido clorídrico destrói a película passivadora na forma de pite (corrosão pontual) e se mantém ativo aumentando em profundidade devido ao ambiente ácido.

Um dos fatores que favorece a despassivação da armadura é a concentração de íons cloreto na superfície do aço, segundo McCarter (2018) caso exceda um certo valor crítico, a despassivação ocorrerá e a corrosão será iniciada.

Neste aspecto, Souza (2005) salienta que a determinação do valor crítico para a concentração de cloretos depende de diversos fatores e assim causa uma certa dificuldade para ser estabelecido um valor padrão. Do mesmo modo, Ribeiro (2014) citou que a elevada resistividade ou a própria qualidade do concreto podem alterar o valor crítico entre as massas de cloretos e de cimentos e além disso uma pequena variação do pH do concreto pode conduzir a uma enorme variação do número de íons hidróxidos disponíveis dentro dos poros e conseqüentemente, alterar a relação OH^-/Cl^- . Devido a isso diversos pesquisadores tem definido valores, mas sem um consenso inclusive, no que diz respeito à sua medição.

Segundo Torres-Luque (2014) alguns autores consideram que os cloretos fixados não oferecem risco para iniciação à corrosão e aí estabelecem a relação com cloretos livres e massa do concreto, outros relacionam o teor total de cloretos e a massa de cimento: Ollivier e Vichot (2014) definiram que a relação entre Cl^-/OH^- deve ser no máximo igual a 0,6 e estando compreendida entre 0,6 e 1 conduz a uma concentração de cloretos da ordem de 0,4% em relação à massa de cimento; Mehta e Monteiro (2014), estabeleceram as concentrações de cloretos entre 0,6 a 0,9 kg/m³ no concreto ou de 200 a 1200 g/l na solução dos poros; Saciloto (2005) definiu que o teor crítico para cloretos livres é de 0,39% a 1,06% em relação à massa de cimento e para cloretos totais os valores de 1,024% a 3,08% da massa do cimento; Andrade *et al.* (2004) estabeleceram valores de 0,283% para cloretos livres e 0,316% para cloretos totais em relação à massa cimento; e Helene (1993) estabeleceu o percentual de 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento.

Em termos de prescrições das normas técnicas para o teor crítico de cloretos tem-se o seguinte: O Eurocódigo EN 206-1:2005, define valores de 0,20% a 0,40% em relação à massa do cimento; O American Concrete Institute (ACI), através da Norma 222R-01 (2001), define os valores críticos para teores de íons cloreto sobre a massa de cimento, em função da exposição da estruturas, em estruturas expostas a

ambientes úmidos os valores são de 0,08% a 0,10% e para estruturas expostas a ambientes secos a variação é de 0,15% e 0,20%; a norma brasileira NBR 12655 (ABNT, 2015), estabelece valores diferenciados de acordo com a exposição da estrutura, nas estruturas expostas a ambientes seco ou protegidas da umidade o valor é 0,40% e para aquelas expostas a ambientes marinhos e respingos de maré, o valor crítico é de 0,15% sobre a massa de cimento; e a norma argentina Reglamento CIRSOC 201 (2005), estabelece 0,15% para ambientes com cloretos e de 0,30% para demais ambientes.

2.3 O Grau de saturação (GS) do concreto e a influência na difusão de cloretos

O Grau de Saturação (GS) é uma grandeza relacionada com o teor de umidade do concreto. Essa umidade tem início em sua camada mais externa, evoluindo para seu interior. É definido pela relação entre o nível de umidade que se encontra o concreto e o nível máximo de umidade, em percentuais.

Pode ser obtido pela expressão 23 abaixo:

$$GS = \frac{A_{dGS}}{A_{m\acute{a}x}} \cdot 100 \quad (23)$$

Onde:

GS = indica o grau de saturação em percentual,

A_{dGS} = absorção para o GS da amostra, obtida pela expressão (24),

$A_{m\acute{a}x}$ = indica a absorção máxima obtida em ensaio específico.

$$A_{dGS} = \frac{M_{GS} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (24)$$

Onde:

M_{GS} = indica a massa da amostra para o GS previsto;

M_s = indica a massa seca da amostra a 105°C.

Devido às condições de exposição, as estruturas de concreto podem estar 100% saturadas, como por exemplo, quando estão na condição submersa, ou parcialmente saturadas, como aquelas situadas junto às variações de marés ou em zona de respingos. Mesmo as estruturas que não estão expostas ao ambiente marítimo, têm condições de saturação ou parcialmente saturação devido às condições climáticas, etc.

Vários estudos, a nível mundial, têm sido realizados para medir as propriedades de transporte em materiais cimentícios saturados e não saturados. Estes estudos envolvem detalhes de materiais, espécimes, condição de cura, condições de umidade, condições ambientais, condições climáticas, métodos de ensaios, etc. Essas investigações experimentais, realizadas à luz de soluções empíricas ou analíticas tem trazido como resultados diversos modelos para a definição da movimentação no interior da matriz cimentícia de íons cloreto. Na seção a seguir são expostos alguns desses estudos, desde os mais antigos até os mais recentes.

2.3.1 Estudos sobre o GS

2.3.1.1 Martys (1999)

Martys estudou o transporte de íons por difusão em meio poroso em função da saturação do fluido e propriedades higroscópicas do material. Através do método da treliça de Boltzmann modelou a separação de fases de uma mistura binária, por exemplo ar e água, e a partir daí avaliou a difusão para cada fase. A simulação numérica permitiu obter a localização de cada fase fluida no poro, utilizando os efeitos da tensão superficial entre dois fluidos e entre a interface de fluido e sólido (parede do poro). Nesta simulação, esse autor, relaciona a rede de poros interligada, ou seja, sem os poros menores que D_{crit} .

Considera Martys que nesta mistura binária uma delas tende a ficar mais perto da superfície do poro e a outra não. Assim, denomina a porção que fica perto da superfície do poro como material úmido e o outro não úmido. No exemplo de água e ar, o concreto cheio de água e ar, a água fica junta à superfície do poro.

A modelagem computacional deu-se através da inserção de esferas sobrepostas digitalizadas, colocadas aleatoriamente, e resultou em modelos onde

varia o tamanho das esferas e o percentual de porosidade. A figura 43 ilustra um dos modelos de Martys com porosidade total de 44%:

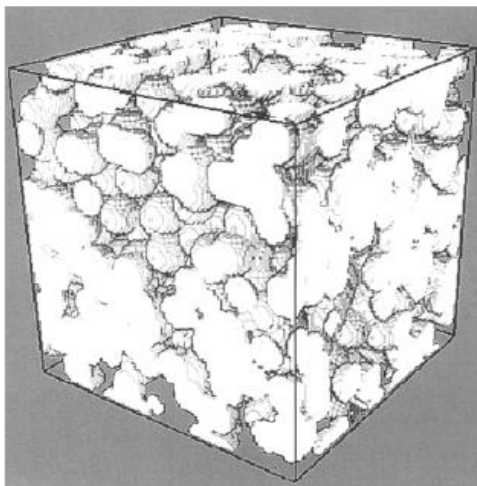


Figura 43 – Desenho digitalizado do meio poroso construído a partir de modelo computacional, onde as partes mais claras representam o sólido e as demais, representam os poros.

Fonte: MARTYS, 1999.

Com os resultados obtidos, Martys concluiu que houve uma forte dependência da difusão em relação ao grau de saturação da rede porosa e uma significativa diminuição quando o GS é cerca de 50%.

2.3.1.2 Guimarães (2000)

Guimarães estudou o comportamento da água no interior da pasta cimentícia de amostras elaboradas com cimento Portland tipo CP-V-ARI (ABNT-NBR-16697, 2018), contaminadas com uma camada de calda de cimento com 5% de NaCl, colocada no topo dos corpos de prova (CPs) com variação do GS em 55%, 75%, 90% e 100%.

A figura 44, mostra o gráfico a partir dos resultados obtidos por Guimarães, relacionando o coeficiente de difusão com o GS.

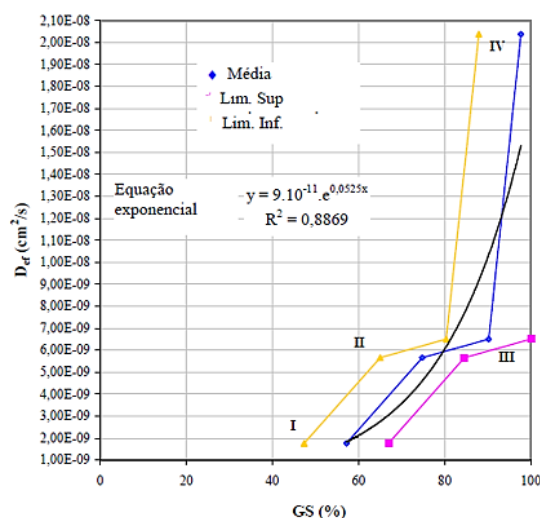


Figura 44 – Gráfico com valores médios do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) em função do GS.

Fonte: GUIMARÃES, 2000.

Na figura 44 observa-se os valores médios de GS, a curva exponencial, e as curvas dos limites dentro do intervalo de confiança. Os pontos IV e III, referidos no gráfico, reportam-se ao intervalo onde a difusão diminui rapidamente com a diminuição do GS. Segundo, Guimarães, esse intervalo corresponde a rede de poros maiores que o diâmetro crítico. No intervalo de GS 85% e 75% que corresponde aos pontos III e II, o coeficiente de difusão decresce de forma menor, e isso acontece, pois, a perda de água acontece nos poros menores que o diâmetro crítico. Os pontos I e II aludem à diminuição da água adsorvida nas paredes dos poros maiores que o diâmetro crítico.

O conhecimento do comportamento da água na rede porosa interligada é reiterado por Guimarães, nesse trabalho, pois, irá possibilitar o melhor entendimento da sua atuação no processo de transporte de massa e sendo o diâmetro crítico ($d_{crít}$) um parâmetro muito importante. A figura 45 apresenta um esquema elaborado por esse autor, onde mostra as condições da rede porosa com diferentes graus de saturação de água, considerando pasta cimentícia de relação a/c igual a 0,50.

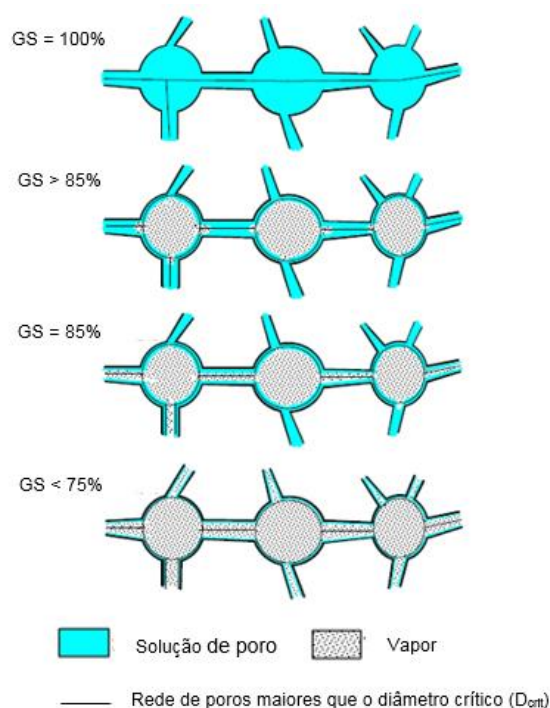


Figura 45 – desenho esquemático da rede de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes valores de GS.

Fonte: GUIMARÃES, 2000.

Observa-se no esquema da figura 45 as seguintes situações:

- na pasta de cimento endurecida saturada (GS=100%) todos os poros acima do diâmetro crítico estão cheios de água, facilitando a difusão de íons. A seção transversal destes poros é a seção transversal da difusão;
- diminuindo o GS de 100% até aproximadamente 85% deve diminuir mais acentuadamente a água na rede de poros com diâmetros maiores que o diâmetro crítico. A rede de poros interligada (diâmetro dos poros > diâmetro crítico) terá apenas água adsorvida. Logo a seção transversal de difusão dos íons pode diminuir muito. Nesse caso, os íons também têm que percorrer distâncias maiores, pois precisam circundar o poro para ultrapassá-lo. Para pequenas espessuras de água (0,9nm) é de se esperar que os elementos precipitados, como o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , tornando-se obstáculos que dificultam a passagem dos íons cloretos, os quais possuem diâmetro de 0,36nm;

- c) para GS menor que 85% o coeficiente de difusão deve diminuir com menos intensidade, provavelmente devido ao início da perda de água nos poros menores que o diâmetro crítico, poros esses com menor influência no transporte de massa;
- d) para GS menor que 75% os poros tendem a ficar cheios de vapor de água e uma camada de água adsorvida em suas paredes. Salienta esse autor que a espessura dessa camada de água adsorvida será função da umidade relativa.

Na conclusão da pesquisa o autor deduziu que a difusão de íons cloreto é diretamente proporcional ao GS e este deve ser considerado nos modelos de vida útil das estruturas de concreto armado em ambiente marítimo.

2.3.1.3 Climent *et al.* (2002), Climent *et al.* (2007)

Climent *et al.* (2002) realizaram estudos com o objetivo de medir o coeficiente de difusão de cloretos em concretos não saturados e a influência que é interposta pelo grau de saturação do concreto com controle sobre a quantidade de água e submetendo as amostras à contaminação com produtos de combustão de PVC que contém o cloreto de hidrogênio gasoso através de uma certa quantidade limitada sem, no entanto, perturbar o teor de água no interior do concreto.

Para a elaboração da pesquisa os autores confeccionaram amostras de concreto utilizando dois traços diferentes, variando a relação a/c, o tipo de cimento e mantendo constante o consumo de cimento e sujeitando os CPs à difusão por 180 dias.

Algumas considerações, em relação ao fluxo de íons pela rede porosa das massas cimentícias foram feitas pelos autores:

- a) a relação entre os íons cloretos, o coeficiente de difusão e o grau de saturação deve ser feita levando-se em conta que os cloretos são transportados pela fase líquida existente na rede porosa interligada e caso seja diminuída ou cessada a quantidade de água, a movimentação desses

íons será feita apenas pela solução de poro e sendo esse movimento muito restrito não haverá um fluxo contínuo;

- b) há uma relação desse fluxo de água com a umidade relativa do ambiente (UR). Para valores de UR superiores a 70% haverá uma continuidade do fluxo, e para valores abaixo a difusão tenderá a diminuir.

Climent *et al.* (2002) concluíram que a variação do GS influi na difusão dos íons cloreto, sendo que onde o GS diminui de 70% a 30% o coeficiente de difusão chega a diminuir cerca de duas ordens de grandeza. Salientam, também esses autores que o GS deve estar em equilíbrio com a UR do ambiente e ainda que a resistividade elétrica do concreto com teores de umidade revelam ser um bom indicador para o estudo das propriedades de movimentação iônica por difusão em concretos parcialmente saturados.

Em um trabalho posterior Climent *et al.* (2007), continuaram com a mesma metodologia, mas, no entanto, mantiveram as amostras sobre o efeito do agente contaminante por até 3 (três) anos, porém, avaliando, em tempos menores até completar essa idade, a influência do GS sobre a difusão.

Nesse estudo, o mesmo resultado foi obtido na relação do coeficiente de difusão e o grau de saturação, onde para os dois concretos testados com relações a/c de 0,6 e 0,5 os valores diminuem de $6 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ (GS de 70% a 80%) para $2 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ (para GS entre 40% a 30%). Esses valores menores de GS, podem ser considerados como valores de limite inferior para o mínimo teor de água necessário para existência de um caminho conectado para a realização da difusão iônica, concluíram os autores.

2.3.1.4 Nielsen e Geiker. (2003)

Para os pesquisadores Nielsen e Geiker (2003) o coeficiente de difusão é dependente da quantidade de umidade disponibilizada para a substância que está se difundindo.

O trabalho desses autores propõe um modelo que tem como abordagem a quantidade de umidade no interior dos materiais e assim obter estimativas mais precisas do fluxo difusional.

Em seu experimento utilizaram amostras de argamassa de relação a/c igual a 0,5, utilizando cimento Portland de alta resistência inicial e com consumo da ordem de 440kg/m³. As amostras parcialmente saturadas foram condicionadas para umidade relativa (UR) da ordem de 65% e 85%, a contaminação por cloretos deu-se imergindo as amostras em solução de 26% de NaCl durante 2,0h, seguido por secagem da superfície até que a amostra obtivesse a massa antes da contaminação. Amostras previamente saturadas à vácuo, condicionadas com UR de 85%, foram submersas em solução de 3% de NaCl durante 30 dias.

Assim, os pesquisadores obtiveram os seguintes resultados explicitado na tabela 12, abaixo:

Tabela 12 – Coeficientes de difusão x GS

Coeficiente de Difusão (m ² /s)	GS (%)
12,9 x 10 ⁻¹²	100
3,8 x 10 ⁻¹²	59,4
2,7 x 10 ⁻¹²	53,8

Fonte: NIELSEN E GEIKER, 2003.

Analisando os números apresentados na tabela 12, verifica-se que houve uma redução de aproximadamente 79% do coeficiente de difusão ao variar o GS de 100% para 60%, evidenciando assim, a influência do GS na difusão dos íons cloreto.

Os pesquisadores obtiveram, também, concordância dos valores medidos e os simulados nos modelos os quais mostraram que a difusão em um material poroso é dependente do teor de umidade, considerando a composição deste material e o grau de hidratação.

2.3.1.5 Meira (2004)

Utilizando CPs com diversos traços, em vários pontos de exposição externa, Meira estudou o grau de saturação (GS) monitorando as amostras por cerca de 630 dias nos locais de exposição situados a 10, 100, 200 e 300m da costa marítima, a partir de 120 dias após a colocação das amostras nos pontos determinados. As amostras foram confeccionadas com cimento tipo CP-IV e relação a/c de 0,5 a 0,65.

Na figura 46, através de gráfico são obtidos os dados do monitoramento para cada localidade e cada tipo de concreto.

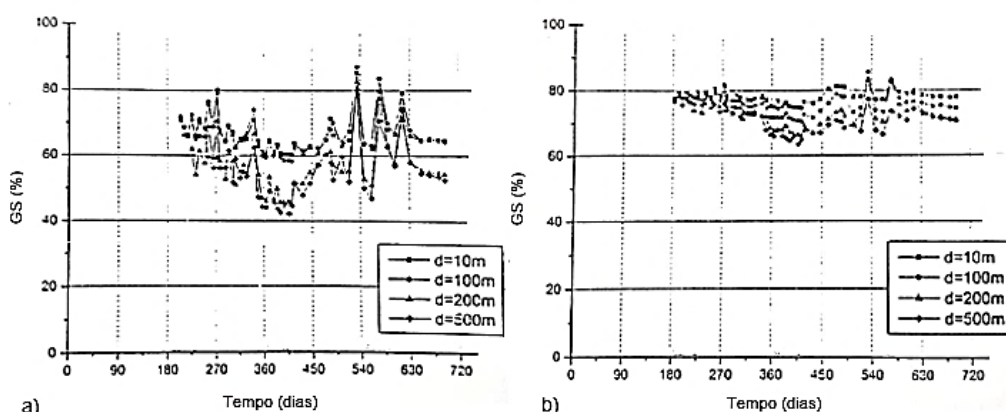


Figura 46 – Gráficos da medida do GS médio ao longo do tempo: a) concretos com relação a/c de 0,65; b) concretos com relação a/c de 0,5.
Fonte: MEIRA, 2004.

Na análise dos gráficos, percebe-se que houve uma tendência dos concretos com relação a/c de 0,5 obter valores maiores de GS. Segundo Meira, ocorre uma variabilidade mais intensa nos teores de água para os concretos mais porosos quando estes ganham ou perdem umidade no meio, outrossim os valores médios de GS tendem a serem baixos nestes concretos pois secam mais rápido e em maior profundidade na interação com o meio.

Conforme o autor, o monitoramento também incluiu o controle das condições meteorológicas para verificar a influência dos dias mais ou menos chuvosos no GS. Observou, o pesquisador, que houveram efeitos dos dias chuvosos na medida do GS e que em concretos com menor porosidade ($a/c = 0,5$) os efeitos formam menores. Deve-se isso ao maior refinamento da rede porosa dos CPs com menor relação a/c e que possuem a tendência de menor capacidade de transferência de umidade com o meio.

Por fim, o estudo mostrou que, também, que houve uma leve tendência de valores menores para GS nas amostras mais afastadas da costa, confirma-se este aspecto na razão em que há um afastamento maior da fonte de umidade.

2.3.1.6 Souza (2005)

A partir da confecção de amostras de concreto com variações de traços na questão da consistência e da relação a/c, com consumo de cimento da ordem de 308 a 419kg/m³, Souza desenvolveu um modelo probabilístico sobre o comportamento do

GS para previsão de vida útil de estruturas situadas em ambiente marítimo, considerando a variabilidade do GS.

A metodologia adotada foi de inserir testemunhos, a partir dos CPs elaborados, em ambiente externo e controlar diariamente no período de um ano o comportamento do GS. Com os dados das medições foi executado um devido tratamento estatístico caracterizando, assim o comportamento do GS.

A figura 47 mostra um gráfico, elaborado pela pesquisadora, demonstrando a variabilidade do GS por estação do ano.

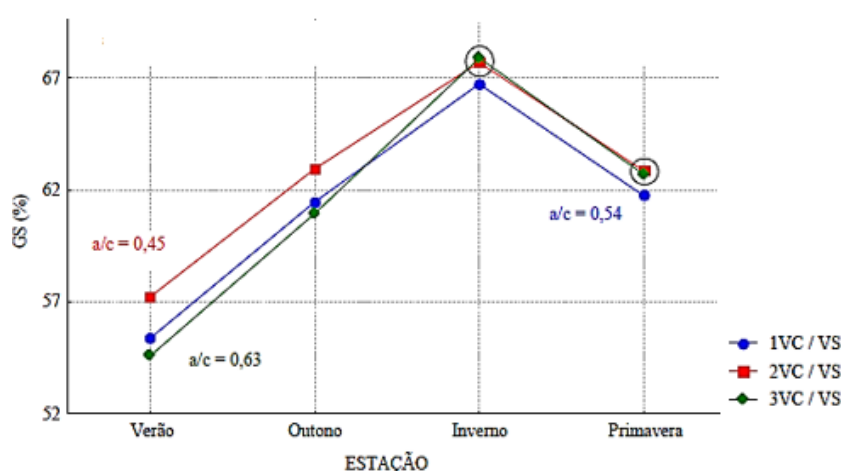


Figura 47 – Gráfico das médias sazonais do GS.
Fonte: SOUZA, 2005.

Na legenda do gráfico da figura 47, VC representa o testemunho colocado com a face exposta na vertical e VS representa a face do testemunho voltada para o sul.

Assim como Meira (2004) nesse estudo foi observado que o concreto com menor reação a/c (0,45) possui médias maiores de GS comparativamente a concreto com maior relação a/c (0,54).

Concluiu a autora desse trabalho que, tanto a análise determinística quanto a análise probabilística apontaram que os valores obtidos pela equação da 2ª lei de Fick para teores de cloreto são conservadores em comparação as medidas alcançadas nas medições *in situ* e que é importante a participação do GS nos modelos de previsão de vida útil das estruturas de concreto.

2.3.1.7 Antón (2009)

Antón averiguou em seus estudos a influência da presença de umidade no fluxo difusional de partículas iônicas no interior de massas cimentícias e a relação com a umidade relativa externa.

Conforme o autor o fluxo de espécies iônicas pelo interior da microestrutura porosa do concreto será limitado caso não houver um caminho líquido contínuo. E a manutenção desse curso fluídico somente será possível com uma umidade relativa superior a 70%, podendo ser alterado esse valor a depender do nível de porosidade do material.

Em seus experimentos, Antón utilizou 3 (três) tipos de concreto de cimento Portland com adição de 6 a 20% de material carbonático, variando a relação a/c em 0,6; 0,5 e 0,38 e o GS com valores desde 18% até 100%, concluindo que:

- a) para amostras com GS de 45% a 100% a umidade relativa de equilíbrio está no intervalo entre 64% e 100%;
- b) à medida que o GS decresce, no intervalo entre 100% e 33%, o coeficiente de difusão decai pelo menos duas ordens de grandeza, com valores próximos de 10^{-11} m²/s a 10^{-13} m²/s;
- c) considerando o mesmo GS, há diferenças do coeficiente de difusão para concretos de diferentes relações a/c, sendo que aqueles com menor relação a/c, tem menor coeficiente de difusão;
- d) de modo geral ao reduzir o GS, há redução nos valores da difusão.

2.3.1.8 Zhang *et al.* (2014)

Utilizando-se de técnicas computacionais através da utilização de raio x por micro-tomografia em 3D, Zhang *et al.* estudaram a permeabilidade da água e difusividade iônica em materiais cimentícios saturados e não saturados.

O estudo partiu de micro amostras de 250µm de pasta utilizando cimento Portland com relação a/c de 0,5, curadas e posteriormente digitalizadas com 1, 7 e 28 dias.

A figura 48 ilustra um dos resultados obtidos da microestrutura da pasta em amostras com 7 dias de idade.

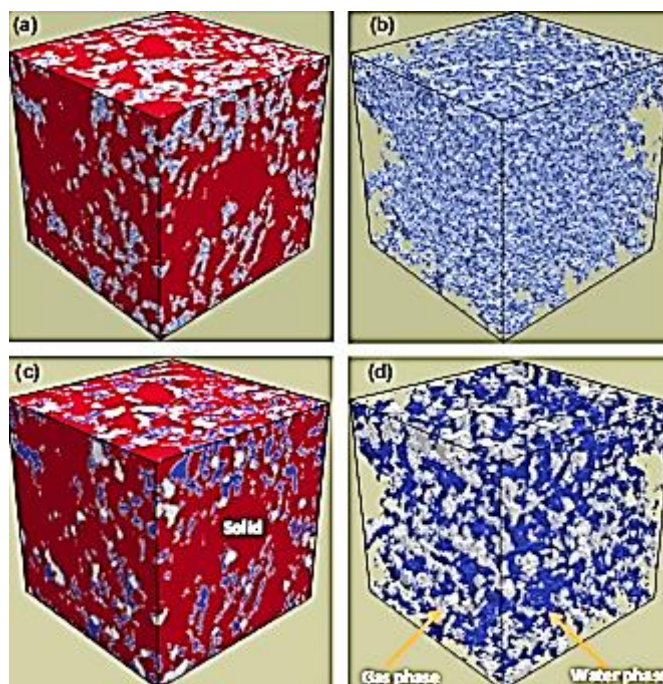


Figura 48 – Ilustração da distribuição de umidade e rede de poros de pasta com GS de 50%: a) e b) distribuição inicial; c) e d) distribuição simulada de umidade e vapor.

Fonte: ZHANG *et al*, 2014.

Na figura 48 a cor vermelha representa a fase sólida composta de grãos hidratados de cimento, a cor azul a fase úmida e a cor cinza claro a fase de vapor.

Os autores ainda definiram o grau de saturação crítico que ocorre quando o grau de conectividade da fase água atinge o seu menor valor, e isso acontece a partir da redução do nível de saturação de água. Segundo os autores, para esse trabalho, as saturações críticas da água obtidas para idades de cura de 1, 7 e 28 dias foram de 34%, 45% e 61%, respectivamente.

2.3.1.9 Bernal (2014)

Bernal pesquisou, dentre outros parâmetros, a influência do transporte de cloretos em concretos com variados graus de saturação. Para isso confeccionaram-se amostras de concreto que foram posteriormente contaminadas com NaCl em quatro diferentes graus de saturação: 100%; 85%; 65% e 50%.

O autor verificou que as amostras com GS superior a 80% mostraram maiores concentrações de cloreto em relação aquelas com GS inferior, sendo que as amostras com GS da ordem de 50% apresentaram valores acentuadamente menores.

Justifica o pesquisador esse resultado, destacando que há uma redução dos canais de penetração (solução de poro) que acaba limitando a área de acesso dos íons cloreto ocasionando um maior caminho a percorrer, já que anteriormente os poros estavam cheios de água e com a diminuição do GS eles tem somente uma película de água.

Conclui o autor que o GS tem alto grau de influência na difusão dos cloretos no interior do concreto, porém menos influência quanto menor o grau de hidratação da pasta cimentícia. Também constatou que a intensidade de diminuição dos coeficientes de difusão irá depender da estrutura porosa do concreto e para GS superior a 75% essa variação é tanto maior quanto maior o tamanho do poro.

2.3.1.10 Dridi e Lacour (2014)

Neste trabalho os pesquisadores desenvolveram um método para a determinação da difusão iônica em materiais à base de cimento, parcialmente saturados. Utilizaram amostras de pastas de cimento Portland comum, com relação a/c de 0,4.

A metodologia consistiu em colocar duas amostras do material (fonte e alvo) em contato comum em uma célula selada, colocar o soluto de difusão sem perturbar o conteúdo inicial de água do material. Depois de um certo tempo de difusão (5 a 10 meses), os perfis de concentração do soluto dentro das amostras são medidos por mapeamento usando a técnica de Espectroscopia Induzida por Laser (LIBS). As análises dos perfis de difusão obtidos mostram uma diminuição da difusividade da fase líquida com o decréscimo da saturação.

A figura 49 expressa gráfico dos resultados obtidos pelos autores, com resultados compatíveis com outros estudos já apresentados.

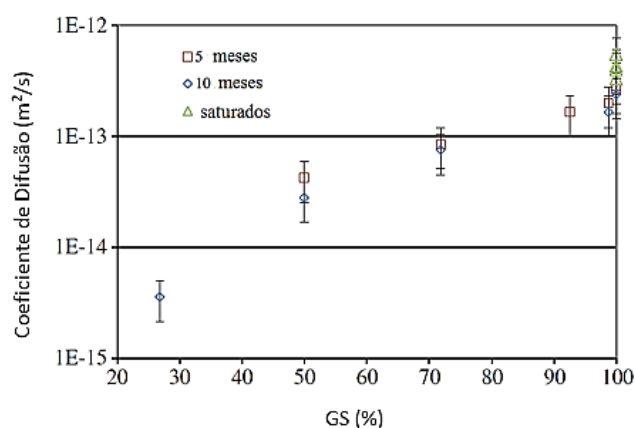


Figura 49 – Gráfico da evolução do coeficiente de difusão efetivo com GS obtida para amostras de 5 e 10 meses após o início da difusão.

Fonte: DRIDI e Lacour, 2014.

2.3.1.11 Bandeira (2015)

Em 2015, o autor da presente tese desenvolveu um trabalho e verificou a influência do GS na difusão de íons cloreto em amostras utilizando concreto com diferentes composições de aglomerante e variados graus de saturação. Concluiu este que:

- há uma certa complexidade que inclui mecanismos físico-químicos, no transporte de massa em concretos insaturados;
- a temperatura máxima e a umidade relativa do ar são fatores que respondem de forma maior ou menor ao grau de umidade no interior da rede porosa desses materiais;
- a rede porosa interligada e não o volume de poros numa dada microestrutura cimentícia, é o fator relevante para a movimentação de substâncias aquosas ou gasosas;
- as dimensões dos poros interconectados influem na difusão com o grau de umidade;

2.3.1.12 Bao e Wang (2017)

Esses pesquisadores investigaram o mecanismo do fluxo de água e íons cloreto em concretos com variação do GS (0%, 50% e 100%) e sujeitos a esforço de compressão simultâneo com a contaminação por NaCl. Visando assim, obter correlações entre o fluxo iônico e os efeitos da aplicação do esforço considerando a carga aplicada em até 50% da capacidade resistiva do concreto.

Verificaram, ao longo do experimento, que o teor cumulativo de umidade nos CPs em um determinado tempo exposto, diminui inicialmente com o aumento da pressão, porém, em um tempo posterior já com o máximo de esforço, o teor de umidade aumenta.

Concluíram os autores, que a medida que o esforço vai se alterando, provoca variação nas estruturas porosas estabelecendo alterações no fluxo aquoso e por consequência alterando o transporte dos íons cloreto.

Logo, com os dados apurados nos ensaios, construíram uma relação empírica entre o coeficiente de difusão e a tensão aplicada para cada grau de saturação e em cada estágio de aplicação da carga.

2.3.1.13 McCarter *et al.* (2018)

Nesse estudo os pesquisadores avaliaram o desempenho de lajes de concreto armado utilizando vários tipos de cimento e colocadas em exposição ao ambiente marítimo e monitoradas por 18 anos. A avaliação se deu nos aspectos de porosidade, grau de saturação, concentração de cloreto e resistividade, pela profundidade de 150mm a partir da superfície exposta.

Na confecção dos CPs foram utilizados três tipos concreto variando o tipo de aglomerante e a relação a/c: cimento Portland CEM I, CEM III com adição em substituição ao cimento de 40% de escória de alto-forno e CEM II com substituição de 30% de cinza volante cimento estes adequados a Norma Europeia UNE-EM 197-1:2005 e analogamente à Norma Brasileira pode-se comparar ao CP-I, CPIII e CP-II.

No tocante à umidade presente nos CPs, afirmam, após as análises, os pesquisadores afirmam que as movimentações dos cloretos livres presentes na microestrutura foram significativamente influenciadas pelo estado de umidade do concreto sendo, portanto, apenas móveis se através dos poros capilares contínuos

houver água presente nos poros capilares e contínuos. Expõem também que para valores de GS abaixo do teor crítico de umidade, o transporte se dá por absorção capilar, porém, menos cloreto será transferido pela solução de poro, pois não há forças para o transporte das substâncias.

A figura 50 apresenta graficamente com os dados do GS por tipo de concreto.

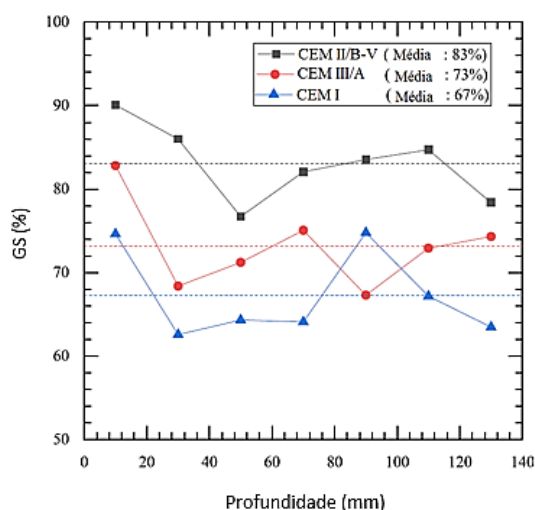


Figura 50 – Gráfico da variação de GS do concreto de 18 anos ao longo da superfície até 140 mm.

Fonte: McCARTER *et al*, 2018.

Concluíram os autores, de que o GS se mostrou na ordem inversa da porosidade do concreto, ou seja, concretos com maior porosidade total, tem menor GS.

2.3.1.14 Zhang e Ye (2019)

Com o objetivo de apresentar um modelo para previsão do coeficiente de difusão em materiais concretos não saturados, os pesquisadores Zhang e Ye confeccionaram amostras de concreto com variações de tipos de cimento e adições além de variar a relação a/aglomerante das amostras.

No esquema da figura 51, esses autores demonstram que nessa rede porosa microestrutural pode-se definir três categorias de poros.

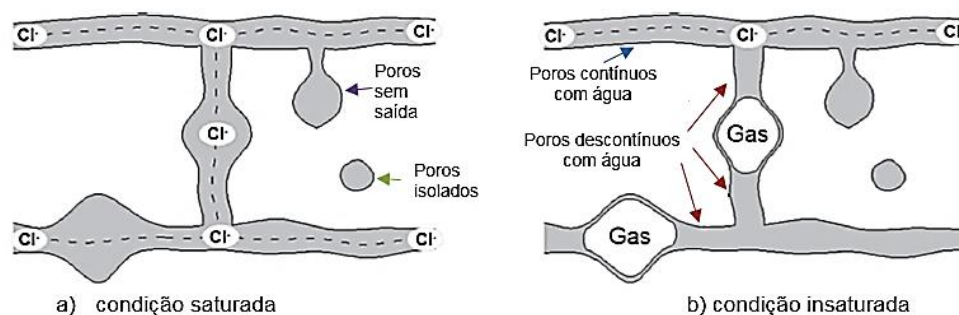


Figura 51 – Desenho da representação esquemática da distribuição de umidade e transporte de cloreto (Cl^-) em sistemas de poros.

Fonte: ZHANG e Ye, 2019.

Os poros conectados podem formar uma rede relacionada às superfícies opostas de uma amostra, os poros sem saída são aqueles que são conectados a apenas uma superfície da amostra, enquanto que os isolados são aqueles que não tem conexão com nenhuma superfície.

Para os autores na condição saturada todos os poros conectados contribuem para o transporte iônico, enquanto que na condição não saturada a fase aquosa se dá preferencialmente nos poros de menor diâmetro e os poros maiores tendem a ser preenchidos com a fase gasosa que impedem o transporte das substâncias iônicas. Para um determinado GS a continuidade de poros cheios de água determina a taxa de difusão no sistema poroso.

2.3.1.15 Yang *et al.* (2020)

Yang *et al.* apresentam nesse trabalho uma análise do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos não saturados a longo prazo, levando em conta a evolução da estrutura de poros e o grau de saturação em função do tempo.

Os pesquisadores verificaram que há uma diminuição acentuada do coeficiente de difusão a longo prazo e que não é causada somente pela densificação da microestrutura devido à hidratação, mas pela diminuição do grau de saturação do concreto com a profundidade.

Para os estudos os pesquisadores utilizaram amostras de pasta e de argamassa a base de cimento Portland, variando o tipo de adição suplementar (30% de cinza volante ou 70% de escória de alto forno, variando também a relação

água/aglomerante em 0,4; 0,5 e 0,6. Para a contaminação com cloretos foi utilizado testes rápidos de migração.

Em gráfico elaborado pelos autores e apresentado na figura 52, mostra essa afirmação da variação do GS ao longo da profundidade do material.

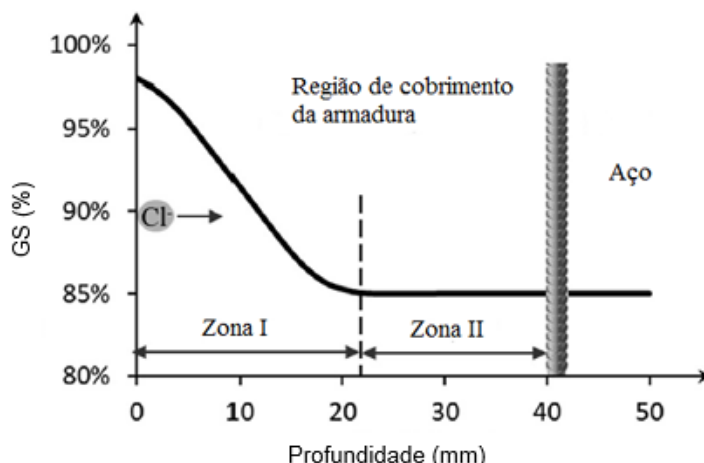


Figura 52 – Gráfico com exemplo de perfil de umidade em concreto após 2 anos de exposição a ambiente marinho e transporte de cloreto.

Fonte: YANG *et al.*, 2020.

No perfil de umidade apresentado na figura 52, a parte superficial do concreto é que detém a maior parte de umidade, com o GS alto, por causa da entrada de umidade do ambiente externo, na zona II o nível de umidade é menor e a penetração de cloretos é impulsionada exclusivamente por difusão.

Relacionando o coeficiente de difusão (D) ao longo do tempo com o GS, a figura 53 exprime um dos gráficos, neste caso, para as amostras sem adição, somente cimento comum e com relação a/c de 0,5.

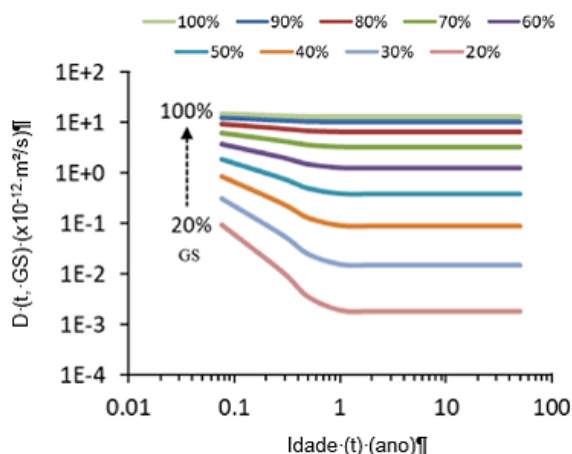


Figura 53 – Gráfico da evolução do coeficiente de difusão de cloretos $D(t; GS)$ com a idade (28 dias 50 anos) em argamassa cimentícia com vários graus de saturação (GS).

Fonte: YANG *et al.*, 2020.

Em relação ao gráfico da figura 53, afirmam os pesquisadores que obtiveram características semelhantes para as demais composições das amostras com adições e para diversas relação $a/aglomerante$.

Assim, observa-se que o coeficiente de difusão (D) geralmente diminuiu com a idade, especialmente no primeiro ano. No estado saturado ($GS = 100\%$), a diferença da difusão exibe uma diminuição relativamente pequena com a idade. No entanto, aumenta com decrescente nível de saturação GS . Logo, em idades mais longas, o nível de saturação do material irá desempenhar um papel cada vez mais importante nos valores do fluxo difusional, reiteram os autores.

Concluíram, os autores, que o GS das estruturas deve ser sempre levado em conta quando do estudo de misturas de concreto ou nos modelos de previsão de vida útil. Mesma conclusão estabelecida por Guimarães (2000) e comprovada também por todos demais trabalhos sobre o tema.

3 ARGAMASSAS

Este estudo trata os aspectos da durabilidade do concreto saturado e parcialmente saturado, frente ao ataque de íons cloreto considerando-o revestido com argamassa. Formação esta, presente em inúmeras construções costeiras sejam residenciais, dentro do contexto urbano de localidades litorâneas, sejam industriais ou sejam aquelas de apoio portuário, mas que de uma forma ou de outra, todas estão sujeitas aos efeitos dos íons cloreto, presentes neste cenário.

Neste capítulo, como referencial teórico de apoio à pesquisa, são abordados diversos aspectos, propriedades e outras considerações pertinentes às argamassas compostas de cimento e cal como aglomerante, material utilizado no desenvolvimento experimental.

3.1 Aspectos Gerais

Segundo Quarcioni *et al.* (2011) a utilização de aglomerante mineral nas argamassas, como nos tempos atuais, foi desenvolvida pelos romanos que a herdaram dos etruscos. Normalmente, essas argamassas tinham em sua composição um ligante inorgânico, com pozolanas, cal aérea e areias naturais.

A partir do patenteamento do cimento Portland, em 1824, foi adicionado às argamassas esse material onde havia necessidade de uma pega mais rápida e maior resistência (SABBATINI E BAÍA, 2016).

Por definição, a argamassa é uma mistura de um ou mais aglomerantes e areia. Os aglomerantes utilizados podem ser cimento Portland, cal e gesso que, após o endurecimento de uma mistura em proporções adequadas dos seus componentes, obtém-se um produto com diversas funções a cumprir nas construções (AMBROZEWICZ, 2012).

Define-se, também, a argamassa como um material trifásico, isto é, no seu estado endurecido compõe-se de agregado, pasta e vazios, variando no tempo as características da microestrutura da pasta e da interface pasta agregado.

Descrevendo a microestrutura Quarcioni *et al.* (2011) caracterizaram a argamassa como um compósito heterogêneo com matriz frágil e polifásica composta das fases hidratadas de cimento e que, quando carbonatada, prevalecem carbonatos com textura ultrafina e cristalizados, grãos de agregados de diferentes formas, composições e tamanho, adições minerais e etc. Os vazios possuem dimensões variadas, compondo-se de microporos dos constituintes da sua matéria prima residual, do C-S-H e, dos carbonatos originários da carbonatação da cal (menores de 10 μ m), e vazios da interface pasta-agregado. A figura 54 mostra uma imagem de uma microestrutura de argamassa mista de cal e cimento com traço em volume de 1:2:12.

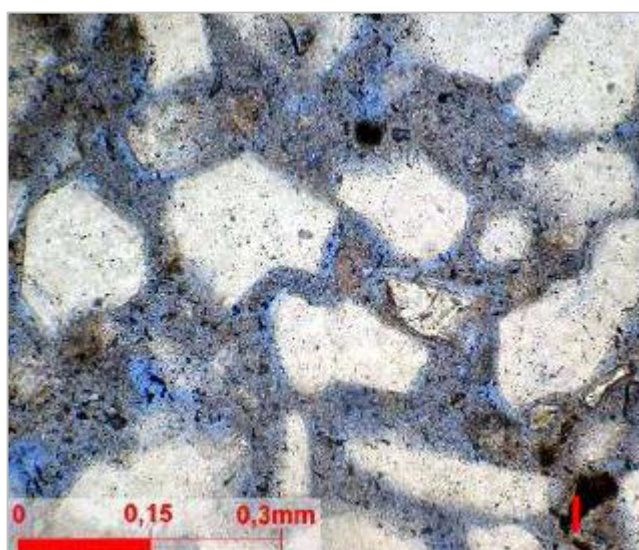


Figura 54 – Ilustração de amostra da microestrutura de uma argamassa mista de cal e cimento traço de 1:2:12, onde a parte em azul são os vazios da interface pasta-agregado e pasta muito porosa.

Fonte: QUARCIONI *et al.*, 2011.

As funções básicas das argamassas são de unir tijolos, blocos ou pedras, selando as juntas bem como de revestimento interno e externo de paredes, pisos e tetos e estruturas de concreto. Para Carasek (2010), quando utilizadas no revestimento de paramentos sejam de alvenaria ou concreto, apresentam algumas funções como regularizar as superfícies, proteger contra a ação do intemperismo, servir como isolante térmico, acústico, estanqueidade à água e resistência ao desgaste superficial. Mas, para que possam cumprir adequadamente com essas

funções é necessário que apresentem desempenho que satisfaça às condições mínimas estabelecidas.

De acordo com Cincotto (1995), as condições de desempenho dos revestimentos argamassados são afetados por profusos fatores classificados em extrínsecos, relacionados às solicitações sobre o sistema de revestimento enquanto que os intrínsecos são aqueles que relacionam com as propriedades, aos atributos de materiais, componentes e sistemas. Segundo Gonçalves e Rodrigues (2012), os revestimentos argamassados realizam, também, todas as trocas de umidade entre o ambiente e o suporte, determinando a distribuição de umidade e de sais presentes no ambiente externo e na sua composição. A figura 55 ilustra de forma esquemática as solicitações extrínsecas prescritas aos revestimentos argamassados.

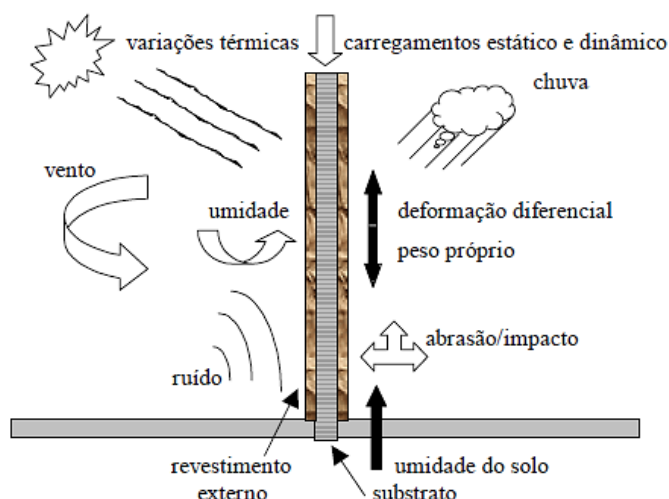


Figura 55 – Forma esquemática de solicitações impostas às superfícies externas das construções.

Fonte: BAUER E SOUZA, 2005.

Além dos constituintes básicos: aglomerante(s), agregado e água, as argamassas podem ter a adição de produtos especiais, com a finalidade de melhorar ou conferir determinadas propriedades (PETRUCCI, 1973).

Segundo Bauer e Souza (2005), surge constantemente no mercado novos materiais para a produção de argamassas, como por exemplo, cales aditivadas, cales pré-misturadas com cimento, aditivos incorporadores de ar, aditivos retentores de água, aditivos poliméricos, fibras sintéticas, etc. Para os autores, é extremamente necessária uma melhor avaliação sobre a contribuição de cada material na

composição das argamassas para que não se tornem inócuos ou tragam alguma anomalia ao revestimento.

Neste mesmo sentido os autores relatam que as argamassas, mesmo sendo um material milenar, carece de muito estudos ainda, pois há para sua elaboração e aplicação muito empirismo.

E isso é notório na literatura técnica, principalmente com relação às argamassas como material de revestimento de estruturas de concreto em ambiente marítimo, há poucos estudos tratando do tema.

De acordo com Veiga e Silva (2019), as argamassas são materiais compósitos de alta complexidade devido à composição, muito ligada às técnicas e tradições locais e às mudanças de tempo pela interação com o ambiente. Para que apresente ao longo de sua vida útil boa durabilidade, as argamassas devem ser eficazes (capaz de cumprir suas funções específicas) e compatíveis (não induzir ações prejudiciais, tais como retenção indevida de água ou estresse excessivo no confinamento de elementos ou através de reações químicas).

Para esses autores um aspecto a ser salientado no desempenho e durabilidade das argamassas diz respeito à economia do material e de seus materiais incorporados, pois elas no sentido de melhorar suas características podem ser complementadas com materiais naturais inorgânicos e orgânicos sem, no entanto, exigir maiores processamentos. Além disso, possivelmente, tenha sido um dos primeiros materiais a utilizar materiais reciclados a fim de melhorar determinada característica.

3.2 Classificação das argamassas

As argamassas podem ser classificadas de acordo com diversas modalidades. Para Carasek (2007), há vários critérios que podem ser utilizados para a classificação das argamassas.

Os quadros 1 e 2 apresentam alguns critérios de classificação das argamassas, comumente utilizados na literatura (CARASEK, 2007).

Quadro 1 - Classificação das argamassas de acordo com a função.

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento Argamassa de fixação(ou encunhamento)-alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de piso	Argamassa de contra piso Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/pisos)	Argamassa de assentamento de peças de cerâmica-colante Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: CARASEK, 2007.

Quadro 2 - Classificação das argamassas em diversos aspectos

Critério de classificação	Tipo
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal Argamassa de cimento Argamassa de cimento e cal Argamassa de gesso Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	Argamassa seca Argamassa plástica Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	Argamassa pobre ou magra Argamassa média ou cheia Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	Argamassa leve Argamassa normal Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	Argamassa preparada em obra Argamassa industrializada Argamassa dosada em central Mistura semi pronta para argamassa

Fonte: Carasek, 2007.

3.3 Propriedades físicas e mecânicas das argamassas

Conforme Cardoso (2009) as características das matérias primas (agregado e aglomerantes) e o proporcionamento das mesmas na formulação, determinam as propriedades das argamassas, sendo que a mineralogia dos agregados e a composição químicas dos finos reativos são fatores preponderantes nas propriedades mecânicas bem como a cinética de consolidação do compósito é devida à composição química dos aglomerantes.

3.3.1 Propriedades físicas e mecânicas no estado fresco

Segundo Carasek (2010) para a argamassa no estado fresco, pode-se destacar algumas propriedades importantes que interferem na qualidade final da argamassa:

- a) consistência e plasticidade: a consistência está associada à capacidade da argamassa deformar-se sob a ação de cargas. É de extrema importância, influenciada pelo comportamento da pasta (quantidade de água, tipo de aglomerante) e pelas características do agregado, tais como a granulometria deste. Argamassas de consistência mais fluidas apresentam menor tensão de escoamento. Já a plasticidade está relacionada com a capacidade de a argamassa manter-se deformada após a redução das tensões de deformação;
- b) trabalhabilidade: é a propriedade que determina a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea;
- c) retenção de água: é a capacidade da argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água de amassamento, seja por evaporação seja pela absorção de água da base;
- d) teor de ar incorporado: é a porção de ar contida na argamassa. O percentual de ar incorporado intervém na trabalhabilidade e densidade da argamassa. A ASTM C-270 (ASTM, 2007) recomenda que o teor máximo de ar incorporado em argamassas contendo cal seja de 14%;

- e) massa específica: varia com os materiais constituintes da argamassa e com o teor de ar incorporado. Quanto menor a massa específica, mais leve será a argamassa, consequentemente, será mais trabalhável a longo prazo;
- f) adesão inicial: caracteriza-se pela capacidade da argamassa unir-se ao substrato. Depende das características de trabalhabilidade da argamassa e do substrato onde ela será aplicada. A redução da tensão superficial da pasta propicia um maior contato com os grãos de agregado e com a base, melhorando a adesão. A cal na argamassa contribui para a diminuição da tensão superficial e consequentemente melhora na adesão da argamassa ao substrato. A autora afirma que a aderência entre o substrato e a argamassa decorre do inter-travamento de cristais de etringita no interior dos poros do substrato.

3.3.2 Propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido

Para a argamassa no estado endurecido, pode-se destacar algumas propriedades importantes que interferem na qualidade final da argamassa (CARASEK, 2010):

- a) retração: é resultado de um mecanismo complexo, associado com a variação de volume da pasta aglomerante e apresenta papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, especialmente quanto à estanqueidade e à durabilidade. A retração também é influenciada pelo teor de materiais pulverulentos e pelo teor de água das argamassas. De uma forma geral, quanto maior o teor de finos, maior a retração, pois requer maior quantidade de água de amassamento;
- b) resistência de aderência à tração: a aderência está diretamente relacionada com a trabalhabilidade da argamassa, com a energia de impacto no processo de execução, além das características e propriedades do substrato e de fatores externos. Argamassas contendo elevado teor de cimento apresentam alta resistência de aderência, mas podem ser menos duráveis por possuir maior tendência ao desenvolvimento de fissuras. Por outro lado, argamassas contendo cal possuem maior extensão de aderência, pois preenchem mais facilmente e de maneira mais completa

toda a superfície do substrato. Por isso, para garantir uma boa aderência, procura-se utilizar argamassas mistas de cimento e cal;

- c) absorção de deformações: a argamassa deve apresentar capacidade de absorver pequenas deformações de modo a não comprometer a sua aderência, estanqueidade e durabilidade. Esta propriedade da argamassa está associada ao módulo de elasticidade e à resistência mecânica das argamassas, podendo influenciar na fissuração e na aderência dos revestimentos;
- d) resistência à tração na flexão e à compressão: a resistência mecânica das argamassas diz respeito à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos de diversas origens, que são as tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento e podem variar dependendo das diferentes solicitações em que a argamassa está submetida. A argamassa deve ter resistência para suportar as movimentações da base, que podem aparecer por diversos motivos, como recalques, variação dimensional por ciclos de umedecimento e secagem, ou ainda, pela dilatação e contração do revestimento devido às variações de temperatura;
- e) absorção de água: absorção de água por capilaridade é a capacidade que a água tem de percolação na camada de revestimento, tanto no seu estado líquido quanto no vapor, isso é possível pelo fato da argamassa ser um material poroso. É uma propriedade que se relaciona ao conjunto base-revestimento.

3.4 Materiais básicos constituintes das argamassas

São comentados neste item somente aqueles materiais utilizados nas argamassas do desenvolvimento experimental deste estudo.

3.4.1 Cimento Portland

De modo geral, os aglomerantes têm a finalidade, nas argamassas, de fazer a ligação entre os grãos dos agregados e o cimento confere uma maior resistência e aderência por ser um aglomerante hidráulico sendo por isso mais utilizado na forma única ou composto com outros ligantes (DUBAJ, 2000).

Conforme Bauer e Souza (2005) o cimento é um dos principais aglomerantes utilizados na produção das argamassas de revestimento, incorporando importantes propriedades no estado fresco e endurecido. No entanto, maiores quantidades de cimento geram maiores fissuras por retração, que acaba interferindo na durabilidade dos revestimentos argamassados (ABCP, 2002).

Neste sentido, quantidades menores de cimento, podem ocasionar uma maior porosidade na microestrutura, pois haverá “falta” de ligante para encobrir os agregados. A figura 56 mostra, de forma esquemática, desenho de uma seção da microestrutura de um revestimento argamassado com as condições de variações do teor de cimento para mais ou para menos.

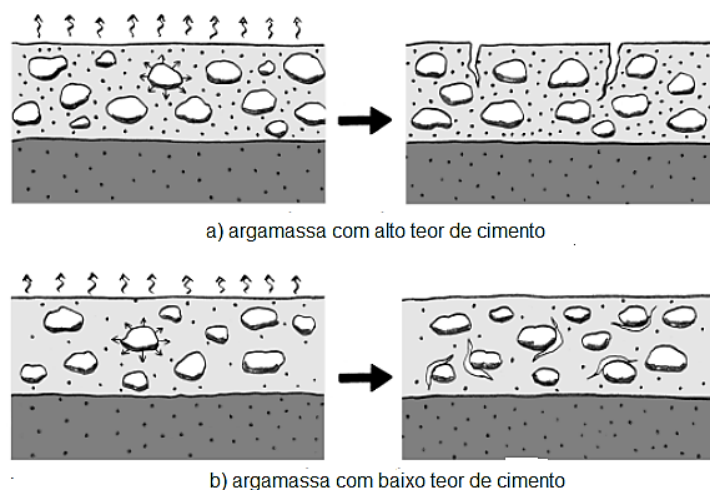


Figura 56 – Desenho esquemático da microestrutura de um revestimento argamassado: a) argamassa com alto teor de cimento provocando fissuras na superfície por retração na secagem; b) argamassa com baixo teor de cimento sem provocar fissuras na superfície, mas com falhas na interface pasta/agregado.

Fonte: ABCP, 2002.

O cimento Portland é composto de clínquer e adições minerais e essas adições possibilitam a produção de diversos tipos de cimentos com diferentes propriedades químicas e mecânicas. As matérias primas básicas utilizadas na composição do

cimento são argila e calcário que após a calcinação deriva o clínquer (BAÍÁ E SABBATINI, 2000).

3.4.2 Água

Conforme Silva Júnior (2014) a água sendo responsável por ativar as reações químicas dos aglomerantes, não podendo conter substâncias nocivas que impeçam ou dificultam o processo químico que se forma quando misturada ao cimento e cal, neste sentido matérias orgânicas e colóides em suspensão são elementos que devem ser eliminados da água de amassamento das argamassas.

3.4.3 Areia

A areia, denominada de agregado, afeta a coesão, consistência e trabalhabilidade no estado fresco e a resistência mecânica, estabilidade dimensional, abrasão e além do aspecto visual no estado endurecido das argamassas (SILVA JÚNIOR, 2014).

Para Carasek (2010) as areias são materiais particulados de origem mineral, geralmente com predomínio do quartzo, que representam cerca de 60 a 80% do consumo dos materiais da argamassa. Conforme Bauer e Souza (2005), pode-se definir o agregado como o formador do “esqueleto” em um sistema de revestimento argamassado, tendo relação explícita em diversas propriedades da argamassa. Para Costa (2016), as principais funções dos agregados nas argamassas são de acrescentar a resistência à compressão da pasta, contribuir para o decréscimo da retração além de contribuir para o menor consumo de aglomerantes.

A tabela 13 exprime algumas características da areia e os efeitos nas propriedades das argamassas

Tabela 13 – Características da areia e efeitos sobre as propriedades das argamassas

Propriedades da argamassa	Menor módulo de finura	Granulometria descontínua	Grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Elasticidade	Pior	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: GUIMARÃES, J., 2002.

3.4.4 Cal Hidratada

A cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação adequada da cal virgem, constituída essencialmente pela mistura de hidróxido de magnésio $(\text{MgOH})_2$ e hidróxido de cálcio $(\text{CaOH})_2$, (PCZIECZEK, 2017).

Recena (2008) define a cal como um aglomerante classificado como aéreo, pois endurece devido à reação de carbonatação que acontece ao entrar em contato como dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, originando assim o carbonato de cálcio (CaCO_3) e que influencia alguma propriedades físico-mecânicas das argamassas.

A norma brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003) - Cal hidratada para argamassas – Requisitos, estabelece os parâmetros para classificação da cal hidratada. Um dos critérios é a quantidade de CO_2 no produto final ao lado do teor de óxido não hidratados, classificando logo, as cales hidratadas em três tipos: CH I, CH II e CH III.

A utilização de cal como aglomerante adjunto, nas argamassas, se justifica no sentido de que, segundo Bauer e Souza (2005), ao utilizar argamassa mista de cal e cimento tem-se a soma das vantagens inerentes de cada um, isto é, a aderência e o endurecimento inicial promovidos principalmente pelo cimento e trabalhabilidade, retenção de água e extensão de aderência aperfeiçoadas pela presença da cal.

3.5 Características gerais dos revestimentos argamassados

De forma geral os sistemas de revestimentos argamassados constituem-se pelo substrato, chapisco e a argamassa ocorrendo em uma ou mais camadas (emboço e reboco). Segundo Araújo Jr. (2004) o substrato pode influenciar o comportamento e as propriedades dos revestimentos argamassados, entre eles a absorção de água

capilar, a porosidade e as movimentações higroscópicas. E essas características, afirma o autor, podem estar deverasmente ligadas às resistências de aderência e nas trocas de materiais, principalmente a água, entre o substrato e o revestimento.

Da mesma forma, avaliando a porosidade do revestimento de argamassas, na região da interface argamassa/concreto, Ferreira (2016) observou que a porosidade é maior quando é utilizado chapisco convencional e que a maior porosidade nessa região possa interferir nas propriedades mecânicas e de transferência de substâncias quando o meio se mostrar aquoso.

Neste contexto, para Martínez e Carro (2005) é necessário levar em conta na seleção da composição da argamassa para um sistema de revestimento são: o sistema construtivo que serão colocados o revestimento e o comportamento frente a água da argamassa componente deste sistema.

3.6 Argamassas situadas em ambiente marítimo - porosidade

Um dos principais mecanismos de deterioração das argamassas situadas em ambiente marítimo e que, devido ao efeito dos ventos, estão sujeitas às ações do aerossol marinho (gotículas de água carregadas de sais como Cl^- e SO_4), é a cristalização dos sais no interior de sua microestrutura na evaporação da água (COSTA, EDUARDO. 2001).

Conforme Veiga e Silva (2019) os íons cloreto e sulfatos dissolvidos em água podem dissolver constituintes dos revestimentos subtraindo sua durabilidade.

No caso específico deste estudo, a relação da porosidade da argamassa e do substrato (concreto) é extremamente relevante pois a penetração das soluções iônicas no concreto será também devida às dimensões, conectividade e tortuosidade do revestimento argamassado. Além disso, tem a zona de interface (argamassa/chapisco/concreto) que irá proporcionar alterações na rede porosa.

Neste sentido, Bauer *et al.* (2015) afirmam que antes da consolidação da argamassa, pode haver uma sucção, pelo substrato, da água de amassamento e proporcionar a redução da porosidade na interface. Os autores complementam ainda que a troca de umidade na superfície do revestimento, o fluxo interno de água e o que acontece na interface gerada são fatores que devem ser analisados para o entendimento da movimentação de água entre materiais distintos e porosos.

Para Bauer e Salomão (2017), relativamente às dimensões dos poros há de se considerar dois aspectos: poros com maior dimensão propiciam uma maior absorção de água, mas na medição de altura da ascensão capilar será maior em argamassas com poros de menor diâmetro.

Silva (2011) afirma que os parâmetros de dosagem das argamassas são fundamentais para a formação da rede porosa, pois os agregados ao conferirem estabilidade volumétrica atuam como formadores do esqueleto da estrutura microporosa e os aglomerantes tem a função, juntamente com a água, de preencher essa estrutura ao formarem a pasta.

Bauer e Salomão (2017) fizeram estudos para avaliar em argamassas mistas de cal a variabilidade da porosidade, relacionando-a com coeficientes obtidos em ensaios de absorção de água e de capilaridade. Para isso confeccionaram CPs de 3 (três) traços de argamassa mista de cal e cimento, variando as relações entre os ligantes e a quantidade de água de amassamento. A figura 57 ilustra gráfico obtido por esses pesquisadores nos ensaios de porosometria por intrusão de mercúrio, que apresenta uma ideia do espectro dos poros da microestrutura.

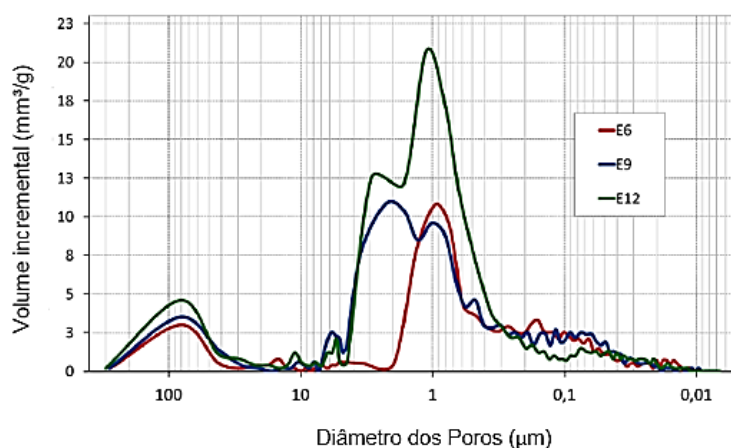


Figura 57 – Gráfico da distribuição de volume dos poros de três argamassas.
Fonte: BAUER E SALOMÃO, 2017.

Na relação da porosidade com a quantidade de aglomerantes os pesquisadores concluíram que há uma relação direta entre o volume de poros e a quantidade de aglomerante, notadamente o cimento. O mesmo aconteceu com relação à absorção de água tanto nos ensaios de absorção por imersão como nos ensaios de absorção por capilaridade. No entanto, relacionando o volume de poros com o transporte de

água, há uma diferença mesmo que os volumes sejam semelhantes, os resultados de absorção de água não o foram. Isso demonstra que somente o volume de poros não é suficiente para caracterizar o transporte de massa pela microestrutura das argamassas, similarmente, o mesmo acontece com o concreto.

Neste contexto, Borges *et al.* (2014) afirmam que o tipo e a extensão da dimensão dos poros cumprem um importante papel no desempenho das argamassas quanto à durabilidade, pois, mesmo que haja uma grande porosidade, a maior absorção de umidade se dará para uma rede conectada de poros.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para o melhor entendimento da sequência do desenvolvimento experimental da pesquisa desta tese, apresenta-se na figura 58 um fluxograma ilustrativo.

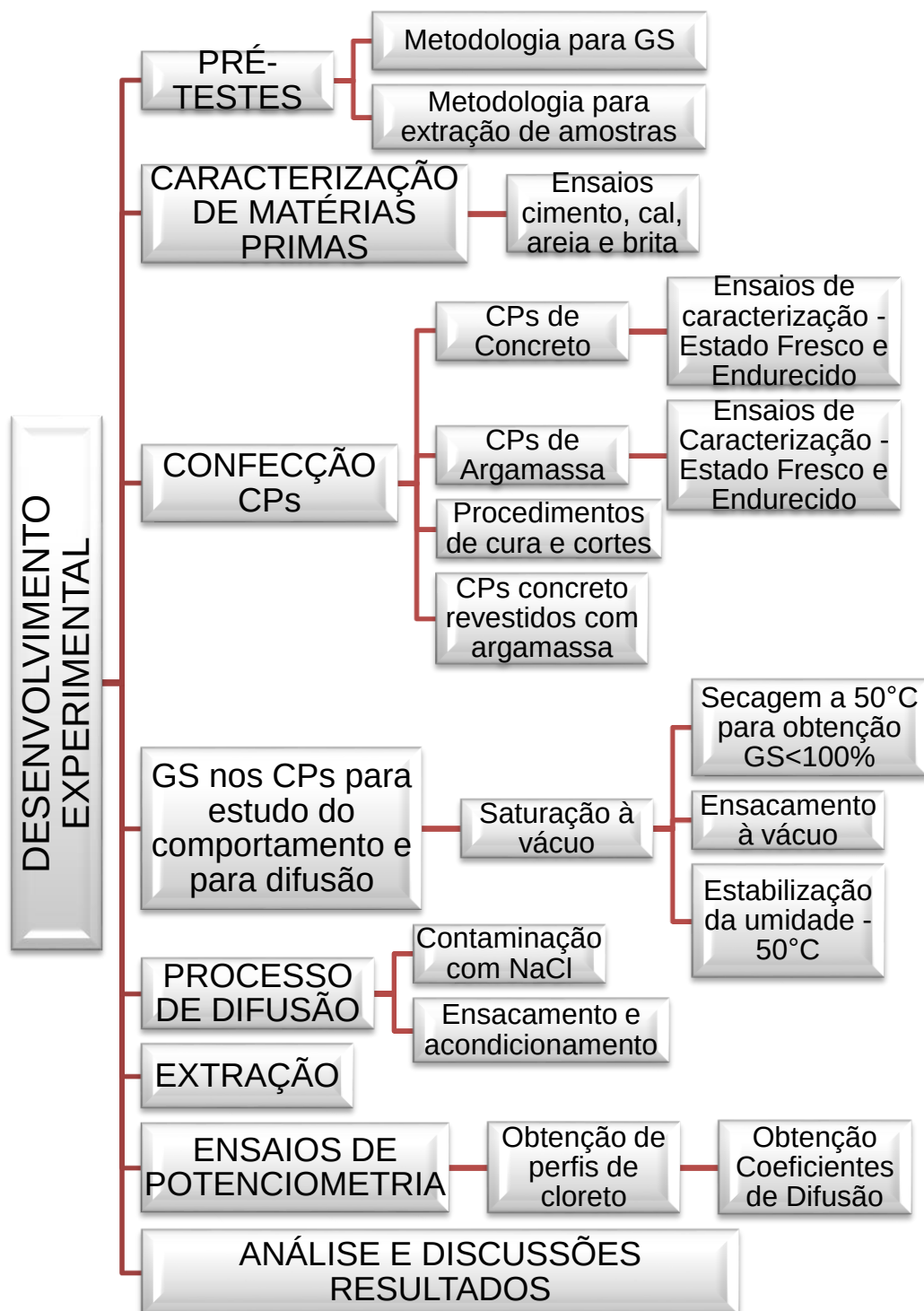


Figura 58 – Fluxograma com etapas do desenvolvimento experimental.
Fonte: Autor.

Todas as etapas que compuseram os experimentos foram executadas no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). A seguir, são detalhados os procedimentos realizados.

4.1 Etapa de Pré-Testes

Em trabalhos anteriores que determinavam perfis de cloreto e coeficiente de difusão para amostras cimentícias saturadas e não saturadas, o material ensaiado era único, isto é, compunha-se de pasta cimentícia, argamassa igualmente cimentícia ou concreto. Dentre esses trabalhos citam-se: Climent *et al.* (2002); Guimarães e Helene (2005); Guimarães *et al.* (2011) e Bandeira *et al.* (2014).

A partir dos processos utilizados nesses trabalhos buscou-se desenvolver uma metodologia adequada para obtenção do GS previamente estabelecido, considerando a presença de dois materiais diferentes (concreto e argamassa) e corpos de prova de concreto revestidos com argamassa em uma de suas superfícies. Buscou-se verificar o comportamento do GS para argamassa e o concreto atuando juntos, comparando-o com o GS de corpos de prova produzidos somente em argamassa e concreto.

Para corpos de prova de concreto revestido com argamassa, na extração de amostra pulverizada do revestimento, é importante um cuidado maior nos limites de cada camada, pois, a argamassa é um material menos resistente e, por isso de fácil remoção. Logo, questões como tipo de broca, velocidade do equipamento extrator e controle das camadas, precisaram ser averiguadas e testadas nessa etapa.

A figura 59 mostra o fluxograma das etapas ocorridas nesta fase.

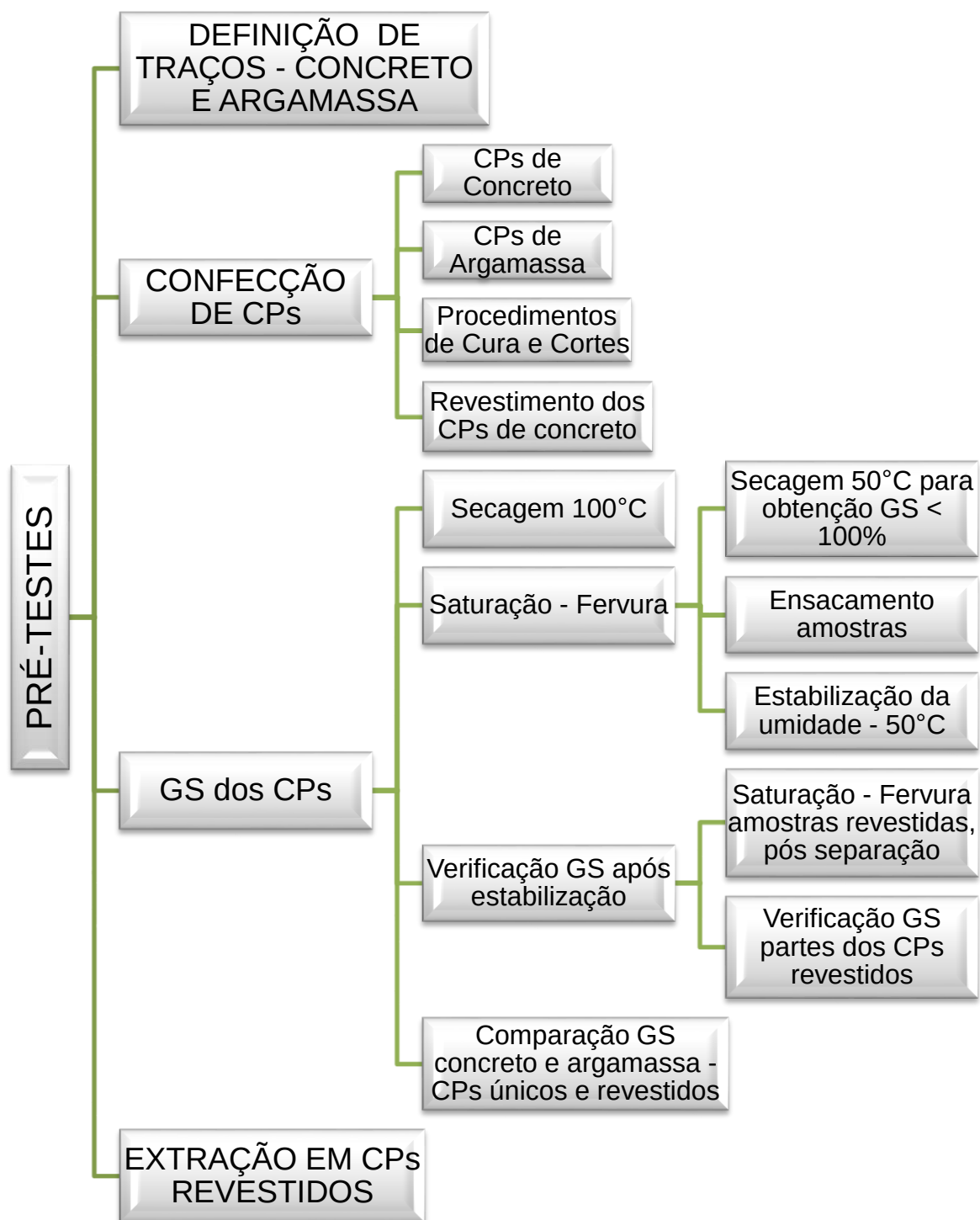


Figura 59 – Fluxograma com etapas do desenvolvimento experimental, fase de Pré-Testes.
Fonte: Autor.

4.1.1 Confeção de CPs

Para a fase de pré-testes não foi relevante as características do concreto e da argamassa quanto a resistência mecânica, consistência e outras propriedades. Por isto, foram adotados traços, comumente, utilizados em obras locais com a utilização do cimento tipo CP-IV-32 (NBR 16697, ABNT, 2018), cal hidratada tipo CH-II (NBR 7175, ABNT, 2003) e areia e pedra britada normalmente, utilizadas na região.

O traço adotado para as amostras de concreto, em massa, foi de 1:2,43:3,30 (cimento, brita e areia, respectivamente), sendo a brita constituída de 50% de brita nº1 e 50% de brita nº 0. A relação a/c da massa foi de 0,6. Para a argamassa foi utilizado um traço, em volume na proporção de, 1:2:8 (cimento, cal hidratada e areia respectivamente) e a relação a/aglom. 1,2.

A moldagem dos corpos de prova (CPs) de concreto seguiu os preceitos das normas: Concreto – Procedimento para moldagem e cura, NBR 5738 (ABNT, 2015) e Concreto – Preparação de concreto em laboratório, NBR 12821 (ABNT, 2018) e estes foram confeccionados com dimensões de 10cm x 20cm (diâmetro e altura, respectivamente). Já, para a moldagem dos CPs de argamassa foram utilizados tubos de PVC nas dimensões de 10cm x 2,5cm (diâmetro e altura, respectivamente).

A figura 60 ilustra as etapas da confecção dos CPs de concreto, de argamassa e de concreto revestido com argamassa.

Na figura 60 a alínea *f* mostra a colocação de um anel de silicone antes do revestimento. A finalidade deste anel é de facilitar a retirada do revestimento após os procedimentos de estabilização do GS, a qual será descrito adiante. Devido ao tamanho das amostras o adensamento da argamassa de revestimento foi feito com um soquete (figura 60 *g*) procedimento diferente da execução de um revestimento em parede, por exemplo. As amostras em concreto que foram após o revestimento ficaram com dimensões de 10cm x 7,5cm (diâmetro e altura, respectivamente).

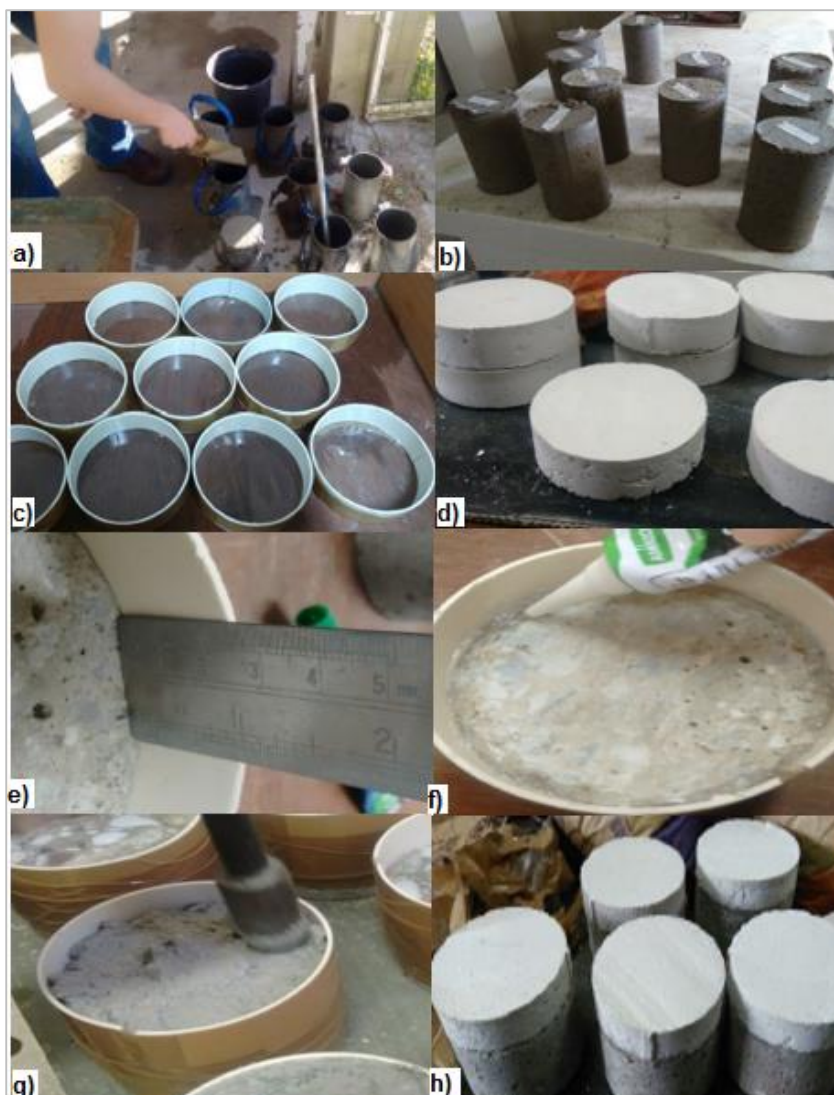


Figura 60 – Fotografias para confecção dos CPs: a) b) CPs de concreto (10x20cm); c) d) CPs de argamassa (10x2,5cm); e) Forma para revestimento de CPs de concreto (revestimento 2,5cm); f) Colocação de anel de silicone antes execução do revestimento; g) Execução de revestimento argamassado; h) CPs de concreto revestido.

Fonte: Autor.

Para testar a facilidade ou não do revestimento ao arranque, além da colocação do anel de silicone, deixou-se alguns CPs sem chapisco, isto é, nestes o revestimento aderiu diretamente ao concreto. O chapisco foi executado com argamassa de cimento e areia no traço de 1:3, em volume.

Todos os CPs mantiveram-se em cura em câmara úmida com temperatura controlada de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa (UR) de 90% por 14 dias. Após este período, os CPs foram colocados em cura ao ar livre até atingir a idade de 28 dias

quando, então, foram cortados em partes iguais (dimensões de 10cm x 50cm), conforme esquema mostrado na figura 61.

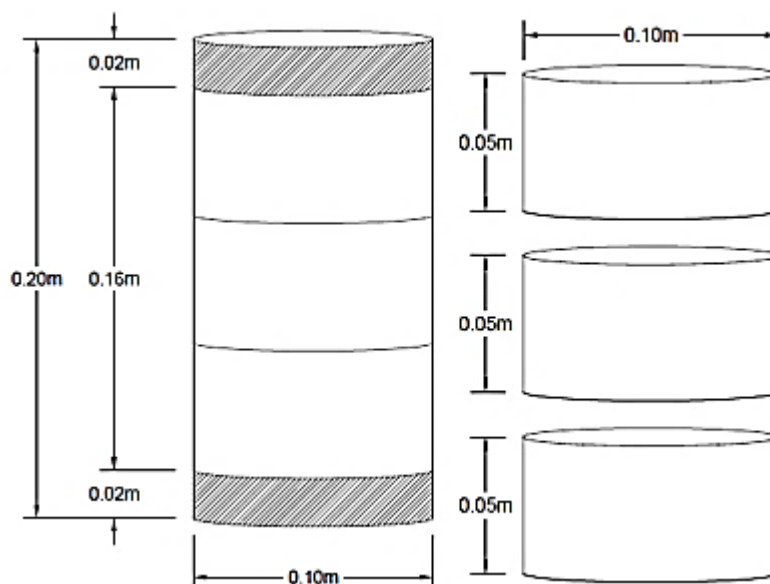


Figura 61 – Desenho esquemático dos cortes nos CPs de concreto.
Fonte: Autor.

Após o corte, as partes inferior e superior dos CPs foram descartadas para evitar a utilização nos ensaios, de corpo de prova sujeitos ao “efeito de pele”. As amostras derivadas dos cortes dos CPs ficaram com dimensões de 10cm x 5cm (diâmetro e altura, respectivamente).

A tabela 14 apresenta as dimensões e tipos dos CPs adotados nesta fase do experimento.

Tabela 14 – Características dos CPs para a fase de pré-testes

Tipo	Características	Dimensões (cm)		Observação
		Diâmetro	Altura	
C	Concreto	10	5,0	
ARG	Argamassa	10	2,5	
CRa	Concreto chapiscado e revestido	10	5,0 + 2,5	Concreto e argamassa, respectivamente
CRb	Concreto sem chapisco revestido	10	5,0 + 2,5	

Fonte: Autor

4.1.2 Grau de Saturação nos CPs

Nesta fase do desenvolvimento experimental para a análise do comportamento do grau de saturação dos CPs foi admitido 85% como GS padrão para todos os CPs.

Inicialmente, todos os CPs foram colocados em imersão para saturação total por 72h, verificada a constância de massa após pesagens sucessivas a cada 24h, foram colocados em recipiente com água e levada à ebulição, mantendo os mesmos neste estado por 5h, conforme estabelecido na norma Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, NBR 9778 (ABNT, 2009).

Após o resfriamento natural, para determinação do valor da absorção total (Abs) dos CPs, foram separadas 3 (três) amostras de cada tipo que foram colocadas em estufa na temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ pelo período de até 72h, conforme o prescrito na norma NBR 9778 (ABNT, 2009). A expressão da equação 25 define o valor da absorção total:

$$\text{Abs} = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \cdot 100 \dots\dots\dots(25)$$

Onde:

Abs = absorção total;

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s = massa seca em estufa.

A partir do valor médio de absorção total obtido com as três amostras representativas estimou-se a massa seca das amostras restantes através da expressão da equação 26:

$$m_{s \text{ est}} = \frac{m_{\text{sat}}}{1 + \text{Abs}/100} \dots\dots\dots(26)$$

Onde:

$m_{s \text{ est}}$ = massa seca estimada para cada amostra.

Com o valor da massa seca estimada para cada amostra de cada tipo e a definição de GS através das expressões (23) e (24), pág.118, definiu-se a massa da amostra com o grau de saturação pré-estabelecido de 85% (m_{85}). A expressão da equação 27 é resultante das expressões acima citadas e define o valor de m_{85} :

$$m_{85} = (m_{\text{sat}} - m_{\text{s est}}) 0,85 + m_{\text{s est}} \dots \dots \dots (27)$$

Onde:

m_{85} = massa das amostras com GS de 85%.

Conhecendo-se os valores de m_{85} para as amostras saturadas de cada tipo, estas foram colocadas em estufa elétrica a 50°C para obter-se a massa de GS 85%. Procedeu-se com pesagens periódicas, verificando a aproximação da massa determinada. Ao se obter o GS estabelecido, ou seja, a massa da amostra com GS 85%, se prosseguiu fazendo o ensacamento das amostras para a uniformização da umidade no seu interior.

4.1.3 Uniformização da umidade

Após o ensacamento das amostras, foram levadas, novamente, à estufa (50°C) para que houvesse a uniformização do GS.

O tempo de uniformização da umidade é variável, ele depende do tempo obtido para que a amostra tenha o GS estabelecido. Se o tempo obtido é menor ou igual a 72h, as amostras devem ficar na estufa no mínimo 72h, caso seja maior de 72h, as amostras ficarão, para a uniformização, o mesmo tempo que obtiveram o GS estabelecido.

Como nesta fase do experimento o objetivo é verificar o comportamento do GS nas amostras de concreto revestido, tornou-se necessário verificar várias possibilidades do procedimento de uniformização, em relação ao disposto em estudos anteriormente já citados.

Por isso, formou-se dois conjuntos com a disposição dos quatro tipos de amostras de forma diferente em cada conjunto, conforme demonstrado na figura 62. No conjunto 1, as amostras foram dispostas duas a duas na posição lado a lado e no conjunto 2, as amostras foram sobrepostas, formando uma “linha”. Para evitar o

contato direto entre as peças, as imagens *a* e *b* da figura 62 mostram que nos conjuntos 1 e 2 (figuras 62a e 62b) foram inseridos separadores de PVC. No conjunto 1 usou-se um separador com 2,5cm de espessura e no conjunto 2 um separador com espessura de 0,1cm.

Cada conjunto foi embalado com 3 unidades de sacos plásticos, vedados de forma hermética através de guilhotina térmica (figura 62c), mas, antes foi retirado de forma manual a maior parte possível de ar do interior. Na sequência, os CPS montados e ensacados foram colocados em uma estufa. Como o tempo necessário para obter a estabilidade do GS em 85% foi menor que 72h, os conjuntos ficaram na estufa a 50°C por 72h para a uniformização da umidade no interior de cada amostra.



Figura 62 – Fotografias com procedimentos para uniformização dos CPs: a) conjunto 1; b) conjunto 2; c) lacramento com guilhotina térmica; d) colocação em estufa 50°C.

Fonte: Autor.

4.1.4 Procedimentos para verificação do GS em cada material dos CPs revestidos

Na sequência, os conjuntos foram retirados da estufa e desensacados. Todos os CPs foram pesados e verificados o GS para cada tipo. Esse procedimento teve a

finalidade de verificar se houve alguma perda de água ou se foi mantido o GS original. Após, as amostras de concreto revestido com argamassa tiveram o revestimento separado do concreto, conforme figura 63. Esta etapa teve o objetivo de verificar a necessidade de execução de chapisco na interface dos dois materiais. Na análise feita foi considerada a facilidade ou não do desprendimento da argamassa e verificado o comportamento do GS para cada componente do CP revestido (concreto e argamassa). A figura 63e mostra que nos CPs com chapisco a argamassa ficou aderida a superfície do concreto.

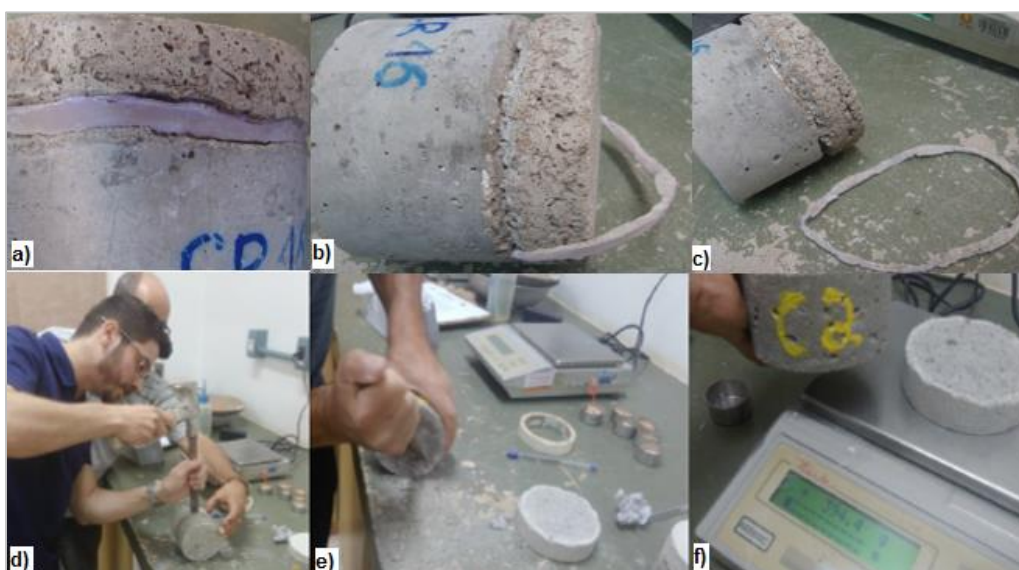


Figura 63 – Procedimentos para separação das partes dos CPs revestidos: a) anel de silicone na interface concreto-argamassa; b) início da retirada do anel; c) anel retirado; d) separação; e) retirada de todo resíduo de argamassa; f) pesagem de cada parte (argamassa e concreto).

Fonte: Autor.

Em seguida da separação, as partes foram pesadas e colocadas em imersão para saturação total por até 72h com pesagens a cada 24h, posteriormente, foram levadas à fervura, de acordo com a norma citada anteriormente (item 4.1.2).

Com a massa saturada de cada parte dos CPs revestidos, e a expressão (26), determinou-se o valor de absorção total do concreto e da argamassa e definiu-se o valor da massa seca (m_s) com o emprego da expressão (28)

$$m_{sec} = \frac{m_{sat}}{1 + Abs/100} \dots\dots\dots(28)$$

Onde:

m_{sec} = massa seca do concreto e argamassa, separados, dos CPs tipo CRa e CRb;

m_{sat} = massa saturada pós processo de fervura das partes separadas dos CPs tipo CRa e CRb;

Abs = absorção total média dos CPs tipo C e ARG, obtida de acordo com expressão (25).

Na sequência, foi obtido o GS do concreto e da argamassa dos CPs revestidos utilizando a fórmula da expressão (29).

$$GS = \frac{\frac{m_d + m_{sec}}{m_{sec}}}{Abs \cdot 100} \dots\dots\dots(29)$$

Onde:

GS = grau de saturação do concreto e da argamassa dos CPs revestidos.

Os valores do GS dos CPs revestidos foram comparados aos valores obtidos para os CPs de concreto (C) e de argamassa (ARG), a fim de verificar o comportamento do GS do conjunto.

4.1.5 Procedimentos para extração de camada e amostras pulverizadas dos CPs revestidos

A última etapa dessa fase de pré-testes teve a finalidade de verificar as condições para a realização de extração de amostras nos CPs revestidos. Nessa etapa a principal preocupação foi com a argamassa do revestimento, por se tratar de um material menos resistente, podendo haver, por ocasião do procedimento, o rompimento do revestimento ou a impossibilidade de controle das camadas.

Para a extração das camadas foi utilizado o mesmo equipamento empregado nos experimentos realizados por Bandeira *et al.* (2014). A figura 64, de forma esquemática, mostra o desenho dos componentes (64a) e a sequência de montagem do equipamento de extração (64b).

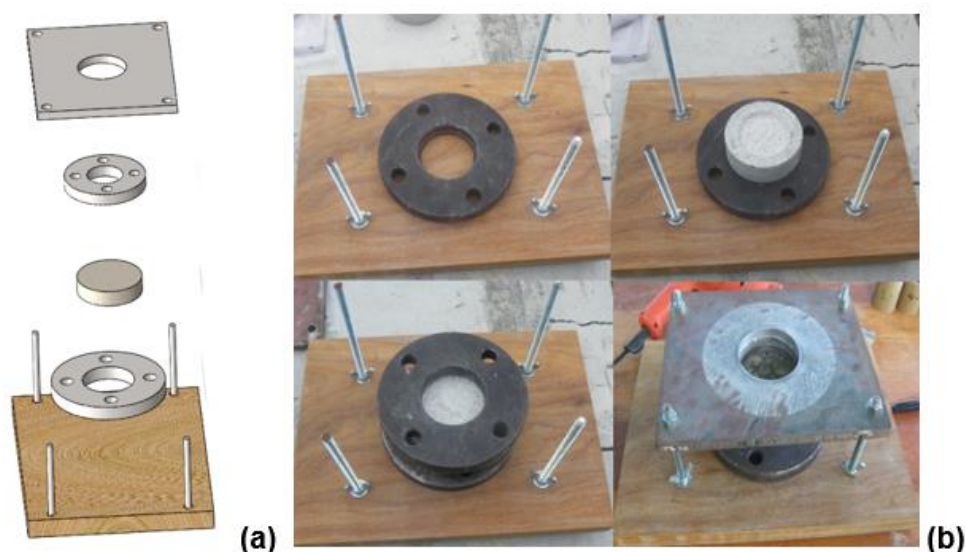


Figura 64 – Equipamento para extração: a) desenho esquemático; b) sequência de montagem do equipamento.

Fonte: Adaptada de Bandeira *et al.*, 2014.

Para um melhor entendimento da interface argamassa-concreto foi definido que as camadas extraídas nessa região teriam menores espessuras. Em função disto, foram feitos testes para verificar as condições de extração, que resultaram na seguinte definição: da argamassa, a partir da borda, 1(uma) camada de 4,0 mm; 3 (três) camadas de 5,0 mm e 4 (quatro) camadas de 1,5 mm, totalizando 25 mm. Para o concreto foram, a partir da interface com a argamassa, 4 camadas de 1,5mm e 7 camadas de 2,0mm, totalizando 20mm. A figura 65 mostra esquematicamente a disposição e dimensões das camadas.

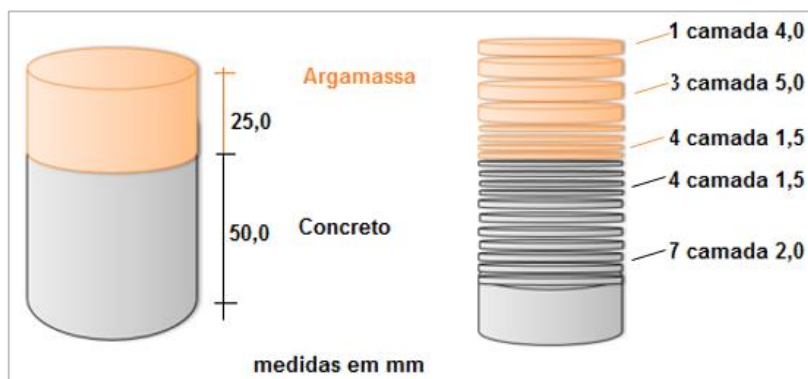


Figura 65 – Desenho esquemático das disposições e dimensões das camadas extraídas dos CPs revestidos.

Fonte: Autor.

Para a extração das amostras em pó foram utilizadas outras ferramentas e utensílios, tais como: furadeira elétrica com controle de velocidade e dotada de broca diamantada; gabaritos de PVC para regular a altura da broca; paquímetro e régua para controle das camadas; colher de alumínio para retirada do material pulverizado; pincéis para limpeza e auxílio na retirada do material a cada extração de camada; lixa e escova de aço para limpeza total da superfície do CP, antes da primeira camada; chave para aperto do equipamento de extração. A figura 66 ilustra os referidos equipamentos e a figura 67 apresenta o processo de extração das amostras em pó.

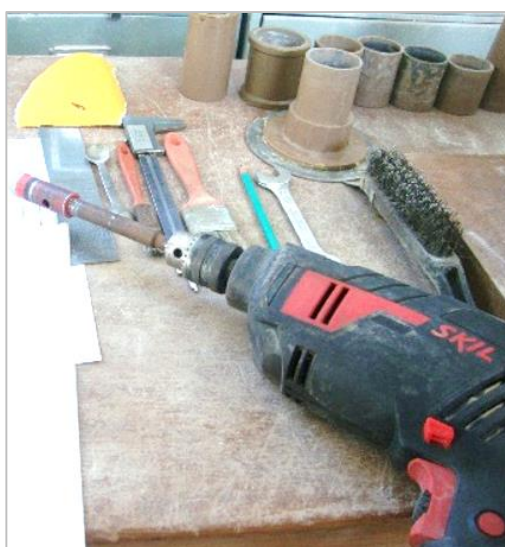


Figura 66 – Fotografia das ferramentas e utensílios utilizados para a extração de amostras pulverizadas dos CPs.

Fonte: Autor.



Figura 67 – Fotografias do processo de extração de amostras pulverizadas dos CPs de concreto revestido: a); b) fixação do CP no equipamento de extração; c); d); e) extração com a furadeira elétrica; f) controle de espessura de camada com paquímetro; g) juntar material em pó para retirar; h) remover material em pó; i); j) revestimento em argamassa com extração pronta.

Fonte: Autor.

Decorrida a fase de pré-testes, passou-se a etapa de confecção dos corpos de prova para a sequência do desenvolvimento experimental. Nesta etapa foram

definidos a quantidade e dimensões dos corpos de provas de cada tipo, o traço a ser adotado para o concreto e para argamassa, bem como os materiais que os compuseram.

4.2 Caracterização de matérias-primas

Para a confecção dos CPs utilizou-se cimento, cal hidratada, areia, brita e água, matérias primas originárias da região que foram e adquiridas comercialmente, excetuando a cal hidratada que foi cedida diretamente pelo fabricante.

O cimento empregado foi o tipo CP-V-ARI-RS (NBR 16697, ABNT, 2018), a cal hidratada o tipo CH-II (NBR 7175, ABNT, 2003), a areia, oriunda da cidade de Pelotas, RS, as britas foram as nº1 e nº0 originárias da cidade de Capão do Leão, RS e a água para amassamento dos concretos e da argamassa foi procedente da rede pública da cidade do Rio Grande.

A figura 68 apresenta amostras dos materiais utilizados na confecção dos CPs de concreto e argamassa.



Figura 68 – Amostras dos materiais constituintes dos CPs: a) cimento Portland; b) brita nº 1 e nº 0; c) areia; d) cal hidratada.

Fonte: Autor.

O Quadro 3 abaixo apresenta os ensaios realizados nas matérias primas e suas respectivas normas técnicas.

Quadro 3 – Ensaaios realizados nas matérias primas utilizadas na obtenção do concreto e da argamassa.

Material	Ensaio	Referência
Cimento Portland	1. Determinação da pasta de consistência normal; Determinação de início e fim de pega;	NBR 16605, ABNT- 2017
	2. Determinação do índice de finura por meio da	NBR 16607, ABNT- 2017
	3. peneira 75µm (nº200);	NBR11579, ABNT – 2013
	4. Determinação da resistência à compressão 3, 7 e 28 dias;	NBR 7215, ABNT – 2019
	5. Determinação da massa específica.	NBR 16605, ABNT - 2017
Cal Hidratada	1. Determinação da massa específica;	NBR 16605, ABNT – 2017
	2. Determinação resistência à compressão 7 e 28 dias.	NBR 7175, ABNT - 2003
Agregado Graúdo e Miúdo	1. Determinação da composição granulométrica;	NBR NM 248, ABNT - 2003
	Determinação da massa unitária;	NBR NM 45, ABNT - 2006
	2. Determinação da massa específica;	NBR NM 52, ABNT - 2009
	3. Determinação de impurezas orgânicas agregado	NBR NM 49, ABNT - 2001
	4. miúdo.	

Fonte: Autor.

Para a realização dos ensaios, a coleta de amostras dos agregados graúdo e miúdo atendeu ao estabelecido na norma Agregados – Amostragem, NM 26 (ABNT, 2009) e na norma Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório, NM 27 (ABNT, 2001).

4.2.1 Cimento Portland

A tabela 15 mostra as características do cimento fornecidas pelo fabricante e as obtidas com os ensaios laboratoriais realizados.

Tabela 15 – Características do Cimento Portland

Características químicas (%)		
Perda ao fogo	3,3	
Resíduo insolúvel	13,5	
CaO	54,3	
SiO ₂	21,0	
Al ₂ O ₃	6,9	
Fe ₂ O ₃	3,1	Fornecido pelo fabricante
MgO	5,8	
K ₂ O	1,0	
Na ₂ O	0,06	
Sulfatos (SO ₃)	3,1	
MgO	5,5	
Características físicas e mecânicas		
Água consistência normal	30%	
Início de pega	3h15min	
Fim de pega	4h26min	
Finura #200	≤ 5,2%	
Resistência média à compressão		Ensaio realizado pelo autor
3 dias	33,5 MPa	
7 dias	39,8 MPa	
28 dias	43,8 MPa	
Massa específica média	3,16g/cm ³	

Fonte: Autor

4.2.2 Cal hidratada

A tabela 16 apresenta as características físicas e químicas da cal hidratada utilizada na confecção dos CPs tipo CR e ARG.

Tabela 16 – Características da cal hidratada

Características químicas (%)		
Perda ao fogo	15,57	
Resíduo insolúvel	10,11	
Sulfatos (SO ₃)	-	Fornecido pelo fabricante
CaO	47,06	
MgO	27,26	
CO ₂	2,05	
Características físicas e mecânicas		
Água consistência normal	-	
Início de pega	-	
Fim de pega	-	
Finura #200	6,35%	
Resistência média à compressão		Ensaio realizado pelo autor
7 dias	1,46 MPa	
28 dias	3,80 MPa	
Massa específica média	3,16g/cm ³	

Fonte: Autor

4.2.3 Agregado Miúdo e Graúdo

A tabela 17 apresenta os dados obtidos no ensaio de composição granulométrica da areia.

Tabela 17 – Composição granulométrica da areia

Abertura (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
4,76	0,007	0,007
2,38	3,477	3,484
1,18	12,196	15,680
0,6	26,660	42,340
0,3	46,113	88,453
0,15	4,144	92,597
0,075	7,080	99,677

Fonte: Autor

A partir dos dados da tabela 17, foi elaborado um gráfico para comparar com as faixas de composição granulométrica da areia a ser utilizada com as faixas padronizadas pela norma Agregados – Determinação da composição granulométrica, NBR NM 248 (ABNT, 2003). A figura 69 apresenta o gráfico obtido.

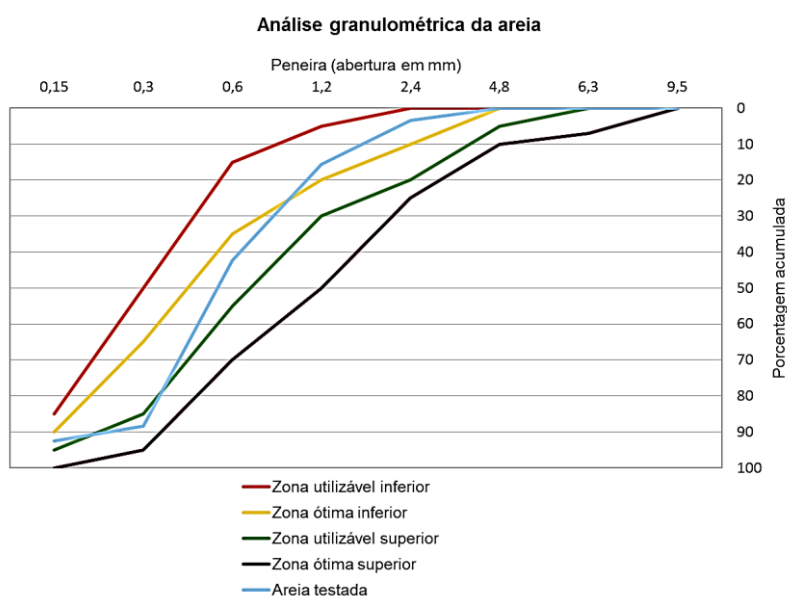


Figura 69 – Gráfico da composição granulométrica da areia utilizada.
Fonte: Autor.

Analisando-se o gráfico da figura 69, verificou-se que com a faixa granulométrica obtida a areia se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A tabela 18 apresenta os dados obtidos no ensaio de composição granulométrica das britas 0 e 1.

Tabela 18 – Composição granulométrica agregado graúdo

Abertura (mm)	Brita 0		Brita 1	
	Retido (%)	Acumulado (%)	Retido (%)	Acumulado (%)
19,1	0,00	0,00	0,15	0,15
12,7	0,09	0,09	61,99	62,15
9,52	0,62	0,07	16,19	78,33
6,3	33,43	34,14	19,83	98,17
4,7	35,78	69,91	0,64	98,81
2,4	21,54	91,46	0,21	99,02
1,2	2,84	94,29	0,14	99,16
0,6	1,63	95,92	0,12	99,28
0,3	1,24	97,16	0,13	99,42
0,15	1,18	98,65	0,03	99,45
0,075	0,17	99,83	0,28	99,74

Fonte: Autor

A figura 70 mostra o gráfico da composição granulométrica dos agregados graúdos, brita nº 0 e nº 1.

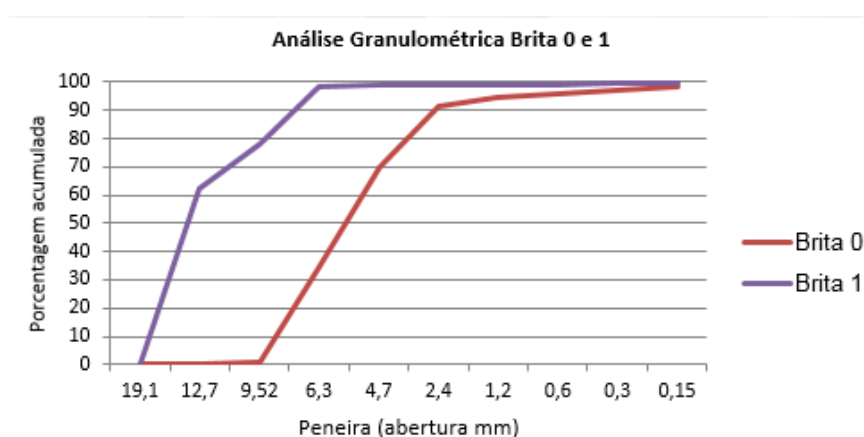


Figura 70 – Gráfico da composição granulométrica do agregado graúdo.
Fonte: Autor.

Na sequência foram feitos ensaios para a obtenção das propriedades físicas dos agregados miúdo e graúdo. A tabela 19 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 19 – Massa específica, Massa unitária, Módulo de finura e Diâmetro máximo agregados miúdo e graúdo

Característica	Brita 0	Brita 1	Areia
Massa Específica (g/cm ³)	2,67	2,68	2,61
Massa Unitária (g/cm ³)	1,37	1,39	1,48
Módulo de Finura	-	-	2,43
Diâmetro máximo (mm)	9,5	19,0	2,40

Fonte: Autor

Como observação em relação aos ensaios de caracterização dos agregados ocorrida com a areia que iria ser utilizada para a confecção dos CPs. Mesmo sendo adquirida no comércio local de fornecedor tradicional no ramo, ela teve de ser trocada, após todos os demais ensaios de caracterização realizados, pois apresentou excessiva carga orgânica no resultado de ensaio pertinente. Logo, a realização de todos ensaios preconizados para a dosagem do concreto e argamassa é deveras importante em qualquer trabalho experimental.

4.3 Confecção de corpos de prova (CPs)

Como este trabalho investiga metodologias para a determinação do GS e obtenção do coeficiente de difusão para cada GS estabelecido em corpos de prova de concreto revestido com argamassa, determinou-se a utilização de um traço utilizado em outros trabalhos com CPs de concreto.

Assim, foi escolhido o traço tipo “H1” de Guimarães *et al.* (2011) o qual utilizou o cimento tipo CP-V-RS (NBR 16697, ABNT, 2018), com dosagem em massa na seguinte relação: 1:2,12:2,88 (cimento, areia e brita), relação a/c de 0,55 e consumo de cimento de 355kg/m³. Os agregados miúdo e graúdo de “H1” tem a mesma procedência dos utilizados nessa tese, sendo, os parâmetros característicos similares.

Para o revestimento dos CPs de concreto foi utilizada uma argamassa com o mesmo traço de argamassa utilizada para a confecção de CPs de argamassa pura. O traço da de argamassa utilizado foi um pouco mais fraco do que o empregado na fase de pré-testes, mas dentro da faixa de traço usualmente aplicado em obras da região sendo o traço, em volume igual a, 1:2:9 (cimento, cal hidratada e areia).

A moldagem dos CPs de concreto seguiu os preceitos das normas: Concreto – Procedimento para moldagem e cura, NBR 5738 (ABNT, 2015) e Concreto – Preparação de concreto em laboratório, NBR 12821 (ABNT, 2018). Todos os procedimentos para confecção dos CPs de concreto e de argamassa foram idênticos aos relatados na fase de pré-testes (item 4.1.1, p. 154). No entanto, o processo de cura foi alterado da seguinte forma: os CPs de concreto ficaram imersos em água por 21 dias e, após até completarem 90 dias, ficaram em câmara úmida com temperatura controlada de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e UR de 90%. Ocorrida a cura, os CPs foram fatiados e aqueles que seriam revestidos foram chapiscados e, somente após 72h, fez-se a execução do revestimento com a argamassa.

Para a confecção da argamassa, inicialmente, misturou-se a cal hidratada e a areia e, após 72h de hidratação, adicionou-se o cimento. Os CPs de argamassa, após secagem de 21 dias, foram colocados em uma câmara úmida, com temperatura de até a realização dos ensaios.

A tabela 20 apresenta as dimensões e tipos dos CPs adotados nesta fase do experimento, A figura 71, apresenta desenho esquemático dos CPs confeccionados e, na sequência, a figura 72 mostra os CPs de concreto, argamassa e concreto revestido, bem como o processo de cura.

Tabela 20 – Características dos CPs

Tipo	Características	Dimensões (cm)		Observação
		Diâmetro	Altura	
C	Concreto	10	5,0	
ARG50	Argamassa	10	5,0	
ARG25	Argamassa	10	2,5	
CR	Concreto revestido	10	5,0 + 2,5	Concreto e argamassa respectivamente

Fonte: Autor

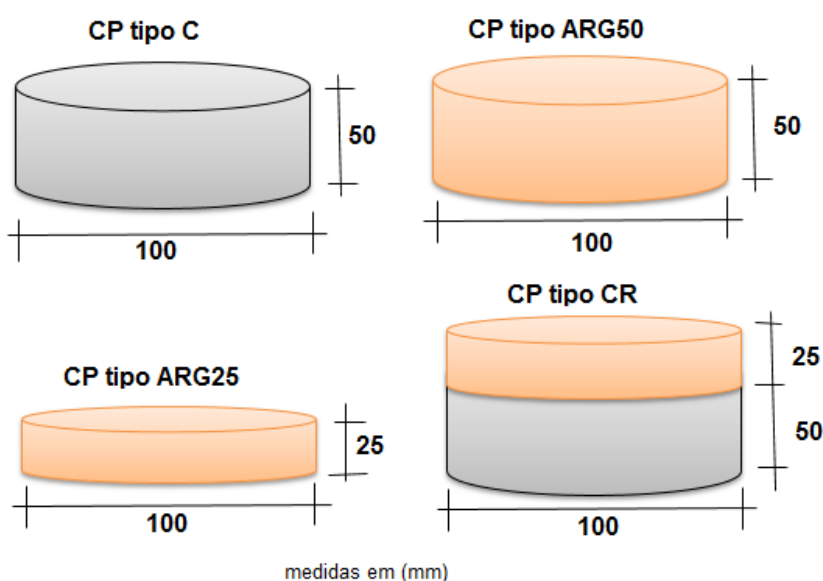


Figura 71 – Desenho esquemático com dimensões e forma dos CPs confeccionados.
Fonte: Autor.



Figura 72 – Fotografia da confecção e cura dos CPs: a) CPs de argamassa e concreto revestido; b) confecção dos CPs de concreto (10x20cm); c) CPs em câmara úmida; d) CPs de concreto em cura por imersão de 21 dias.

Fonte: Autor.

4.3.1 Ensaios de caracterização do concreto, da argamassa e dos CPs de concreto revestido

O Quadro 4, a seguir, apresenta os ensaios de caracterização realizados nas amostras de argamassa e de concreto, no estado fresco e estado endurecido bem

como, os ensaios feitos nos CPs de concreto revestido (CR). A figura 73 mostra a realização de alguns dos ensaios do Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaios de caracterização de amostras de concreto e argamassa e de CPs revestidos.

Material	Ensaio	Referência
Concreto: Estado fresco	1. Determinação do índice e consistência pelo abatimento do cone; 2. Determinação da massa específica.	NBR 16889, ABNT- 2020 NBR 9833, ABNT- 2009
Concreto: Estado endurecido	1. Determinação da absorção de água por imersão, índice e vazios e massa específica; 2. Determinação da absorção de água por capilaridade; 3. Determinação da resistência à compressão: 3, 7 e 28 dias.	NBR 9778, ABNT – 2009 NBR 9779, ABNT – 2012 NBR 5739, ABNT - 2018
Argamassa: Estado fresco	1. Determinação do índice de consistência; 2. Determinação da massa específica.	NBR 13276, ABNT - 2016 NBR 13278, ABNT - 2005
Argamassa: Estado endurecido	1. Determinação da absorção de água por imersão, índice e vazios e massa específica; 2. Determinação da absorção de água por capilaridade; 3. Determinação da resistência à compressão: 28 dias; 4. Determinação da resistência à tração na flexão.	NBR 9778, ABNT – 2009 NBR 9779, ABNT – 2012 NBR 13279, ABNT – 2005 NBR 13279, ABNT – 2005
CPs de concreto revestido (CR)	1. Determinação da absorção de água por imersão, índice e vazios e massa específica	NBR 9778, ABNT – 2009

Fonte: Autor



Figura 73 – Fotografias dos ensaios de caracterização dos materiais: a) consistência do concreto por Slump Test; b) resistência à compressão concreto); c) CPs de argamassa para ensaios de resistência mecânica; d) resistência à compressão em CPs de argamassa; e) resistência à tração na flexão de CPs de argamassa; f) pesagem hidrostática de CPs; g) CP de argamassa após rompimento de flexão; h) ensaio de absorção por capilaridade em CPs de concreto e argamassa.

Fonte: Autor.

4.3.1.1 Características do concreto e argamassa

A tabela 21 apresenta os resultados médios obtidos com os ensaios de caracterização do concreto e argamassa e dos CPs de concreto revestido (CR).

Tabela 21 – Características do concreto e argamassa

Estado	Característica	Valor médio
Concreto: Estado Fresco	Índice e consistência pelo abatimento do cone (mm)	110,0
	Massa específica (kg/m ³)	2284,0
Concreto: Estado Endurecido	Absorção de água por imersão (%)	6,65
	Índice de vazios (%)	14,66
	Massa específica (kg/m ³)	2200,0
	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	1,44
	Resistência à compressão (MPa):	
	3 dias	29,2
	7 dias	35,4
	28 dias	40,9
Argamassa: Estado Fresco	Índice de consistência (mm)	165,0
	Massa específica (kg/m ³)	1880,0
Argamassa: Estado Endurecido	Absorção de água por imersão (%)	10,21
	Índice de vazios (%)	18,78
	Massa específica (kg/m ³)	1840,0
	Absorção de água por capilaridade (g/cm ³)	1,54
	Resistência à compressão (MPa):	
	28 dias	4,46
	Resistência à tração na flexão (MPa); 28 dias	0,55
CPs de concreto revestido (CR)	Absorção de água por imersão (%)	7,79
	Índice de vazios (%)	16,18
	Massa específica (kg/m ³)	2080,0

Fonte: Autor

4.4 Comportamento do Grau de Saturação (GS)

Nesta etapa dos experimentos, em um mesmo ambiente foram realizados ensaios para a determinação da relação do grau de saturação (GS) dos CPS de concreto revestidos com argamassa e, também, de forma individual, em CPs puros de concreto e de argamassa. Para melhor visualização dos procedimentos e da sequência a figura 74 apresenta um fluxograma dessa parte da metodologia.

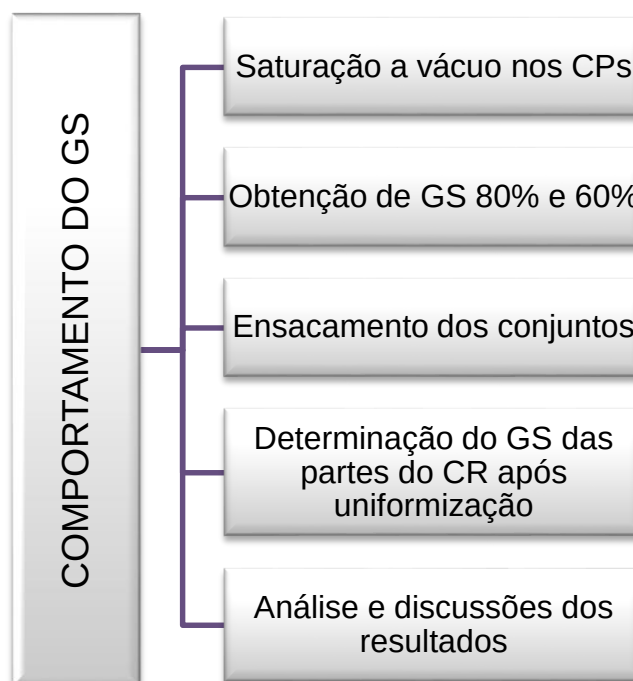


Figura 74 – Fluxograma para a avaliação do comportamento do GS nos CPs de concreto revestido (CR) e em amostras puras de argamassa e concreto.

Fonte: Autor.

4.4.1 Saturação dos CPs

Na fase de pré-testes e em trabalhos anteriores, que adotaram a mesma metodologia para atribuir às amostras um GS pré-determinado, como Guimarães *et al.* (2011) e Bandeira (2014), a saturação dos corpos de prova se deu pelo método prescrito pela norma NBR 9778 (ABNT, 2009), qual seja, de colocar as amostras em recipiente com água em ebulição durante período de 5h.

No entanto, diversos autores como Antón (2009), Bu e Weiss (2014), Norgaard *et al.* (2018) e Magalhães (2019) adotaram técnicas de saturação a vácuo nos ensaios com amostras de concreto e argamassas que, segundo Hearn e Safiuddin (2005) em estudo para compararem as técnicas de saturação: colocação em recipiente com água fria por 72h, colocação em recipiente em água em ebulição por 5h e saturação a vácuo, a técnica de saturação a vácuo é mais eficaz do que da água fervente e de água fria, sendo que ela aumenta entre 5 a 10% a saturação em relação à colocação sobre fervura da água e entre 10 a 20% a saturação com relação às amostras colocadas sobre água fria.

Logo, diferentemente dos trabalhos anteriores, nesse trabalho foi utilizado nas amostras a técnica de saturação a vácuo de acordo com os procedimentos

estabelecidos na norma americana C-1202 (ASTM, 1997) e que foi utilizada por Antón (2009).

O fluxograma da figura 75 relaciona as etapas e apresenta a sequência dos procedimentos para a saturação dos CPs.

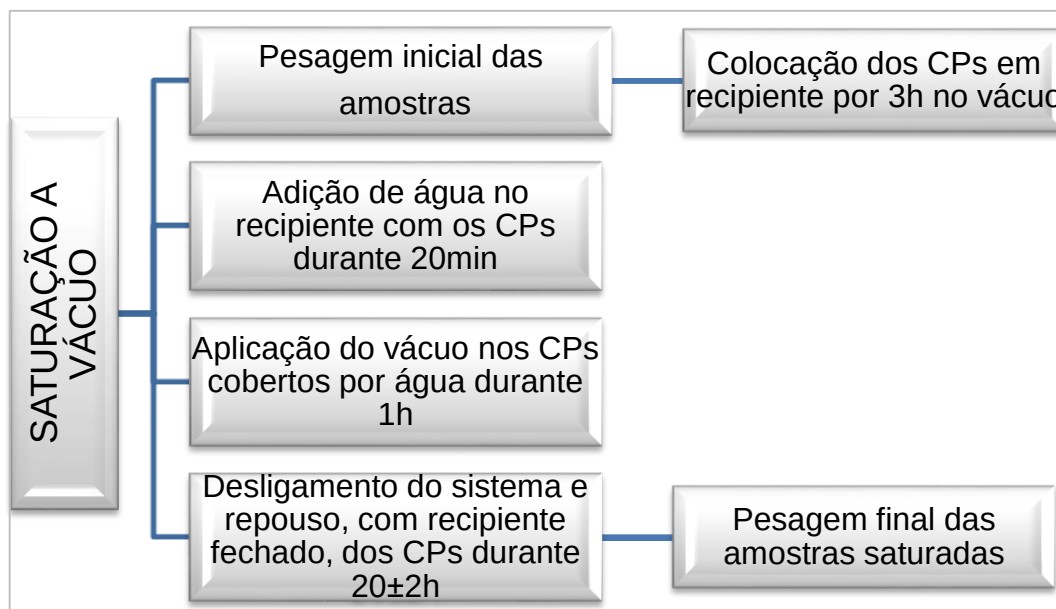


Figura 75 – Fluxograma para a saturação de água dos CPs com o sistema a vácuo.
Fonte: Autor.

Para a realização dos procedimentos de saturação a vácuo, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) recipiente com fechamento hermético para a colocação das amostras e posterior vácuo;
- b) bomba de vácuo, marca compressor Primatec, modelo 131 2VC - Lubrificada a óleo - 38 l/min - 695 mmHg;
- c) depósito graduado para água destilada;
- d) sistema de válvulas para controle da ligação com o depósito de água e da ligação com a bomba de vácuo.

O recipiente que serviu de suporte para receber as amostras a serem saturadas constou na adaptação de uma panela para cozimento de alimentos do tipo “panela de pressão” pelo motivo de que o dessecador que, normalmente, é utilizado nesse tipo de procedimento, apresentava no momento dos ensaios um defeito no local de engate

para entrada do vácuo. O recipiente utilizado foi dotado de bom fechamento hermético e a sua utilização possibilitou a obtenção dos resultados esperados para a saturação total dos CPs. A pressão de vácuo utilizada foi de 54kPa.

Todas as amostras foram pesadas antes e após a saturação e logo após o término do processo de vácuo elas foram colocadas em recipientes com água destilada com adição de cal, para aguardar as demais etapas do experimento. A figura 76 mostra o sistema de saturação a vácuo formado e a figura 77 os procedimentos adotados.



Figura 76 –Sistema de saturação a vácuo: a) recipiente com fechamento hermético e válvulas para controle de fluxo da água e do vácuo; b) depósito graduado para água destilada; c) bomba de vácuo; d) sistema completo.

Fonte: Autor.

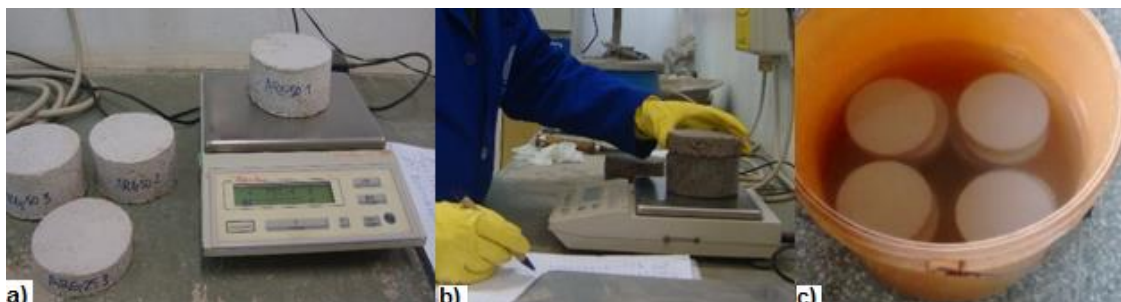


Figura 77 – Procedimentos antes e após aplicação do sistema de saturação a vácuo: a) pesagem inicial das amostras; b) pesagem final; c) imersão em água destilada até novos procedimentos do experimento.

Fonte: Autor.

4.4.2 Obtenção do GS de 80% e 60%

Nessa etapa do trabalho os procedimentos foram similares aos realizados na fase de pré-testes e descritos no item 4.1.2. (p. 157) A diferença está na forma de saturação dos CPs e no grau de saturação alvo.

Foi definido que nesta etapa e na etapa de contaminação dos CPs, o GS das amostras seria de 80% e 60%. Adotou-se esses valores de GS pelo fato de que em trabalhos de determinação do GS, aferidos *in situ* ao longo de tempo determinado, a prevalência do grau de saturação em ambientes costeiros ficou em torno destes dois valores (MEIRA, 2004 e SOUZA, 2005).

O valor médio da absorção total para cada tipo de corpo de prova foi definido conforme aqueles apresentados na tabela 21, (item 4.3.1.1, p. 175). Com este valor estimou-se a massa seca das amostras através da expressão 26 (item 4.1.2, p.157) e a massa para cada GS alvo através da expressão 27 (item 4.1.2)

A figura 78 mostra esta etapa do experimento



Figura 78 – Fotografias da obtenção do GS alvo de 80% e 60% para cada tipo de CPs: a) estufa com controle de temperatura 50°C; b) interior da estufa com os CPs em secagem parcial.

Fonte: Autor.

4.4.3 Ensacamento dos conjuntos de amostras

O grupo de amostras para a realização desta etapa, foi assim composto:

- a) 5 amostras de concreto revestido (CR) para cada GS determinado, isto é, 5 unidades para GS de 80% e 5 (cinco) para GS de 60%;
- b) 5 amostras de concreto sem revestimento (C) para cada GS determinado, de 80% e 60%;
- c) 5 amostras de argamassa (ARG25) para cada GS determinado, de 80% e 60%.

As amostras foram agrupadas em conjuntos com o respectivo grau de saturação, conforme as tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Discriminação dos conjuntos de CPs para GS de 80%

Conjunto	Tipos de CPs
1	CR10 ARG25-1 C10
2	CR11 ARG25-2 C11
3	CR12 ARG25-3 C12
4	CR16 ARG25-7 C16
5	CR17 ARG25-8 C17

Fonte: Autor

Tabela 23 – Discriminação dos conjuntos de CPs para GS de 60%

Conjunto	Tipos de CPs
1	CR13 ARG25-4 C13
2	CR14 ARG25-5 C14
3	CR15 ARG25-6 C15
4	CR18 ARG25-9 C18
5	CR19 ARG25-10 C19

Fonte: Autor

Na etapa de pré-testes foi verificado a insuficiência da vedação no acondicionamento dos CPS com 2 sacos plásticos, pois houve uma acentuada perda de umidade. Outro fato verificado foi de que o saco plástico que fica em contato com o corpo de prova teve pequenas perfurações devido ao manuseio e alguma rugosidade do CP, por isto, como precaução, neste acrescentou-se uma embalagem complementar com a função específica de evitar danos ao primeiro saco plástico a obter um maior fechamento hermético. Logo, nesta fase, foram utilizados 4 sacos plásticos com dimensões de 220mm x 300mm x 0,1mm (largura, comprimento e espessura, respectivamente). A figura 79, a seguir, identifica os materiais utilizados no processo de ensacamento.



Figura 79 – Fotografia do material para ensacamento CPs; sacos plásticos e fita de alta adesão.
Fonte: Autor.

Nos ensaios de pré-testes foram utilizadas duas disposições dos corpos de prova, sendo que a disposição “em linha” foi a que obteve melhores resultados durante o processo de uniformização da umidade, logo neste experimento foi utilizado essa disposição e para evitar o contato direto entre os CPs, foram utilizados espaçadores de borracha, do tipo “atílio”, também conhecidos como “*borrachinhas para dobrar cédulas de dinheiro*”

Uma outra e importante diferença entre a metodologia utilizada nos experimentos de pré-testes a esta foi, o fechamento dos sacos plásticos: além do uso da máquina elétrica de selagem, também foi utilizado “*a posteriori*” um sistema de vácuo para que fosse eliminado o máximo de ar interior, a fim de possibilitar uma melhor uniformização da umidade por entre as peças. As figuras, a seguir, mostram a sequência dessa fase.

Na figura 80 estão identificados os materiais e equipamentos utilizados para o processo de ensacamento dos conjuntos: sacos plásticos, atílios, tesoura, fita de alta adesão, bomba de vácuo e seladora elétrica.



Figura 80 – Fotografias dos materiais e equipamentos utilizados para ensacamento dos conjuntos de CPs.

Fonte: Autor.

A figura 81 mostra a colocação e disposição dos espaçadores de borracha (atílios) nos CPs dos conjuntos.



Figura 81 – Fotografia da colocação dos espaçadores de borracha nos CPs do conjunto.
Fonte: Autor.

Na figura 82 o início do ensacamento dos CPs de acordo com configuração adotada.



Figura 82 – Fotografia do ensacamento de um Conjunto de CPs com os espaçadores e disposição definida.
Fonte: Autor.

A figura 83 mostra o fechamento hermético com uma seladora elétrica dos sacos plásticos que envolvem os CPs de cada conjunto, com seladora elétrica, adotando-se 3 linhas de fechamento para cada saco.

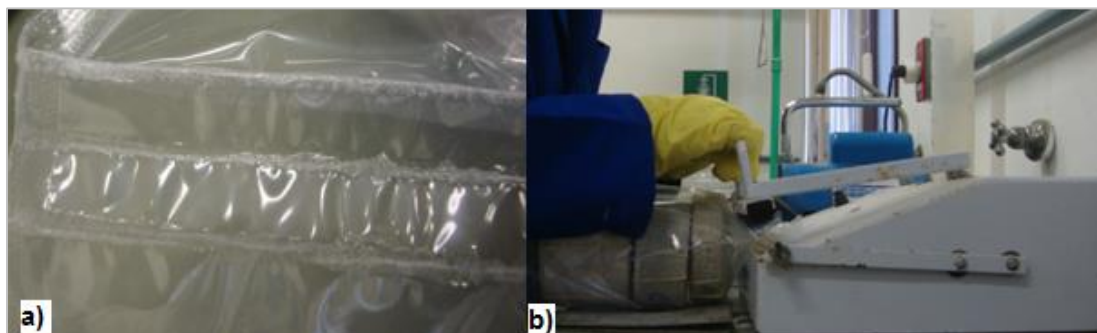


Figura 83 – Fotografia do fechamento hermético com seladora elétrica de um Conjunto de CPs.
Fonte: Autor.

Após o selamento de cada saco plástico, foi feita uma pequena incisão para a introdução do tubo ligado à bomba de vácuo para a retirada de máximo ar interior. Posteriormente, de forma rápida, foi retirado o tubo e vedado o furo com uma fita de alta adesão, garantindo assim o restabelecimento da vedação do saco plástico. A figura 84 ilustra esse procedimento.

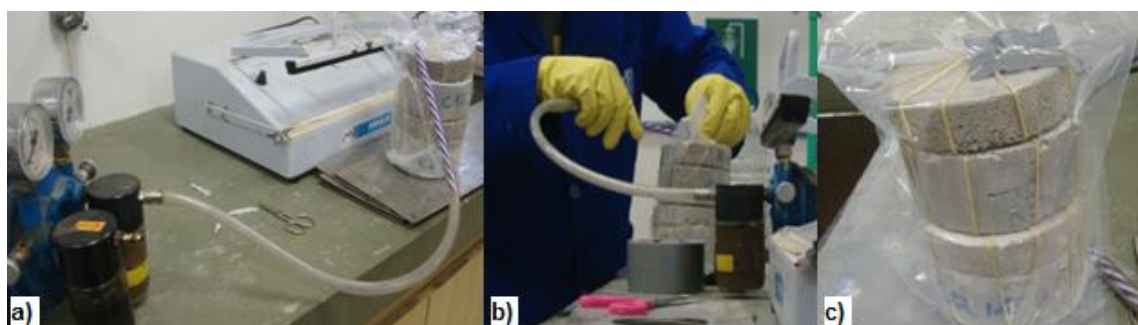


Figura 84 – Fotografias da utilização de vácuo para vedação complementar em conjunto de CPs: a) sistema duto-bomba de vácuo; b) aplicação do vácuo; c) vácuo aplicado.
Fonte: Autor.

Concluída a aplicação do vácuo, os conjuntos foram colocados em estufa a 50°C a fim de que houvesse a uniformização da umidade no interior. Esse processo demanda o mesmo tempo que os CPs levaram para adquirir o GS estipulado ou caso tenha sido menos do que 3 dias, adota-se esse tempo para a uniformização. A figura 85 mostra os conjuntos de CPs na estufa para este procedimento.

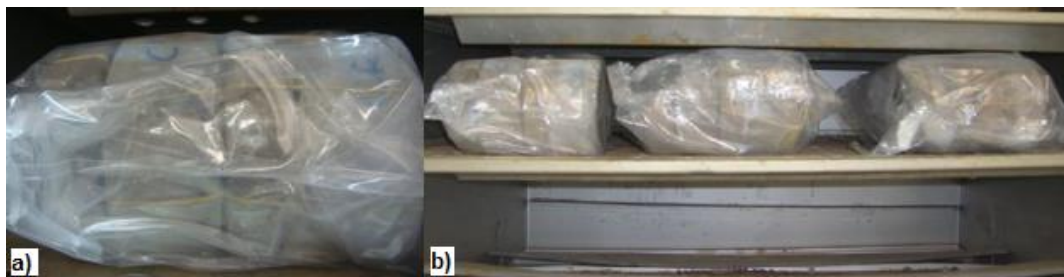


Figura 85 – Fotografias dos CPs em estufa a 50°C para uniformização da umidade: a) detalhe de 1 conjunto; b) vários conjuntos.

Fonte: Autor.

4.4.4 Determinação do GS das partes dos CPs tipo CR após uniformização

Após o processo de uniformização da umidade no interior dos conjuntos de amostras, detalhado no item anterior, foi determinado o GS das amostras bem como a determinação da relação entre o GS da argamassa e do concreto nas amostras revestidas.

Como a argamassa e o concreto são materiais com características diferentes, a distribuição da umidade por entre a rede porosa desses dois componentes das amostras em concreto revestido, tende a ser diferente. Na fase de pré-testes buscou-se estudar uma metodologia para determinar a relação entre o GS do concreto e o GS de seu revestimento. Neste estudo atual, utiliza-se a metodologia estudada com as alterações já descritas.

A seguir são relatados os procedimentos efetuados para obtenção desses dados em cada conjunto, os quais encontram-se apresentados na figura 86:

- a) pesagem para verificação de massa total do conjunto depois da uniformização (figura 86a);
- b) abertura dos sacos envoltórios e pesagem de cada amostra (figura 86b);
- c) separação da argamassa e concreto nas amostras de concreto revestido e pesagem das partes. Nestas amostras, por ocasião da confecção do revestimento foi colocado uma linha de silicone junto a forma, com o objetivo de criar uma reentrância para favorecer a separação com o concreto. Com a utilização de uma talhadeira e um martelo, procedeu-se a separação da argamassa do concreto (figura 86c).

- d) após a separação, todo o resíduo de argamassa é desprendido da amostra de concreto. Por ocasião da fase de pré-testes praticamente a amostra de concreto ficou com pouco resíduo de argamassa, já neste trabalho o resíduo foi um pouco maior. A maior parcela desse resíduo é devido ao chapisco que teve muita adesão ao substrato dificultando sua retirada. Isso, pode fazer com que a zona de interface entre argamassa de revestimento e concreto tenha uma maior resistência ao fluxo de cloretos (figuras 86e, *f*, *g*).
- e) a seguir, pesa-se as partes de concreto e argamassa (figuras 85g, *h*) e para a obtenção do GS de cada as amostras que são novamente submetidas ao processo de saturação (figuras 86i, *j*) a vácuo, com os mesmos procedimentos descritos no item 4.4.1, p.176.
- f) após o período de saturação, as amostras foram pesadas para determinação da massa saturada (figuras 86k, *l*)

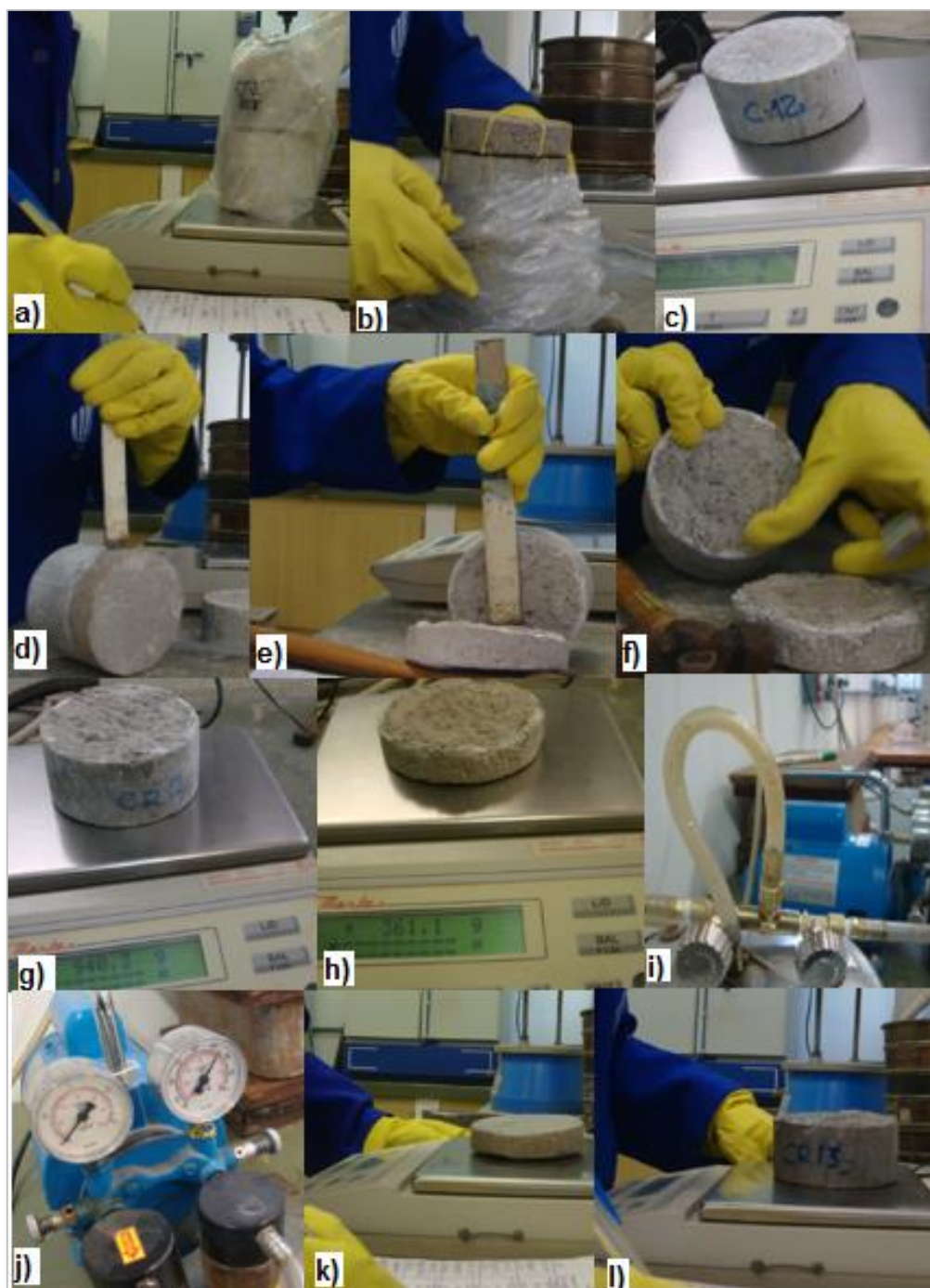


Figura 86 – Fotografia dos procedimentos para determinação GS de cada parte separada dos CPs tipo CR: a) pesagem do conjunto após uniformização da umidade; b) retirada dos invólucros dos CPs; c) pesagem de cada CPs do conjunto; d); e); f); separação da argamassa de revestimento do concreto em CPs tipo CR; g); h) pesagem após separação; i); j) saturação a vácuo; k) l) pesagens das partes após saturação.

Fonte: Autor.

Após os procedimentos acima descritos, foi calculado o GS do concreto, da argamassa e do concreto revestido determinando-se, assim, a relação do GS entre eles.

Para se obter o GS de cada parte, primeiramente, foi necessário calcular a massa seca das amostras. Os valores foram calculados a partir da expressão da equação 30

$$m_{seca} = \frac{m_{sat}}{1 + \frac{abs}{100}} \quad (30)$$

Onde:

m_{sat} = massa das amostras obtidas pela saturação ocorrida após a separação das partes de cada conjunto;

abs = absorção total média obtida nos ensaios realizados de acordo com a norma NBR – 9778 (ABNT, 2009), com resultados apresentados no item 4.3.1.1.

Então, o GS de cada parte foi determinado pela seguinte expressão (31):

$$GS = \frac{\frac{m_d - m_{seca}}{m_{seca}}}{abs} \times 100 \quad (31)$$

Onde:

m_d = massa das amostras após abertura dos sacos plásticos com o término do tempo de uniformização da umidade em cada conjunto;

m_{seca} = massa seca determinada conforme a equação (30).

Com os resultados obtidos comparou-se os valores do GS das amostras de concreto, de argamassa e do concreto revestido (CR).

4.5 Processo de Difusão

Todos os tipos de CPs foram submetidos ao processo de difusão iônica através da colocação sobre uma das superfícies de todos os tipos de CPs, de uma camada de cloreto de sódio (NaCl) moído. Os procedimentos desta etapa foram similares à metodologia aplicada nas pesquisas de Guimarães e Helene (2007), Guimarães *et al.* (2011) e Bandeira *et al.* (2014).

Antes da contaminação, os CPs foram submetidos aos mesmos procedimentos relatados no item 4.4.1 (p.176) relacionados com a saturação a vácuo das amostras e aos mesmos procedimentos do item 4.4.2 (p.179) relacionados com a obtenção do GS alvo. Em relação aos procedimentos descritos no item 4.4.3 (p.180) que se refere ao ensacamento dos CPs, houve a diferença de que as amostras foram acondicionadas de forma individual. No período deste acondicionamento com o GS alvo, as amostras ficaram em ambiente com temperatura controlada de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ até o momento da contaminação.

4.5.1 Colocação de NaCl sobre os CPs

A contaminação com cloreto de sódio dos corpos de prova de concreto, de argamassa e de concreto revestido ocorreu, através da colocação de 10g de NaCl em uma das faces plana da amostra, deixando cerca de 10mm de espaço entre o sal e a borda. Este espaço tem o objetivo de evitar o escoamento do agente contaminante o que poderia alterar a penetração de cloreto da forma unidirecional proposta.

Antes da aplicação, o cloreto de sódio foi triturado e moído até passar na peneira de abertura igual a 0,149mm. Para a fixação do sal foi colocada uma fita de alta adesão sobre a superfície contaminada. A figura 87 ilustra estes procedimentos.



Figura 87 – Fotografia dos procedimentos para contaminação dos CPs com NaCl: a) recipiente de cloreto de sódio; b) trituração; c) moagem peneira; d) CPs com 10g de sal; e) vedação do contaminante f) CPs contaminado e vedado.

Fonte: Autor.

4.5.2 Ensacamento e acondicionamento dos CPs

Imediatamente após a contaminação, as amostras foram ensacadas tendo por base os procedimentos listados no item 4.4.3 9 (p.180) salientando, outrossim, que os CPs foram embalados de forma individual.

Após o ensacamento os CPs foram acondicionados em recipientes hermeticamente fechados, e expostos a ambientes com temperatura controlada de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Para que se mantenha os níveis de umidade relativa (UR) do ambiente interno dos recipientes e assim manter os níveis de saturação dos CPs, foi colocado até o nível de 2cm abaixo dos CPs volume pré-calculado de água destilada naqueles recipientes contendo CPs com GS de 100%. Para as demais amostras com GS de 80% e 60%, foi colocada na caixa de acondicionamento uma solução composta de água destilada e glicerol em proporções de acordo com o GS das amostras.

O objetivo de se manter as amostras neste ambiente foi para reduzir a diferença de umidade entre o ambiente externo e o interno, e assim manter estáveis os níveis de GS durante o processo de difusão.

As figuras 88 e 89 apresentam os gráficos utilizados para o cálculo das quantidades de glicerol na solução (Antón, 2009).

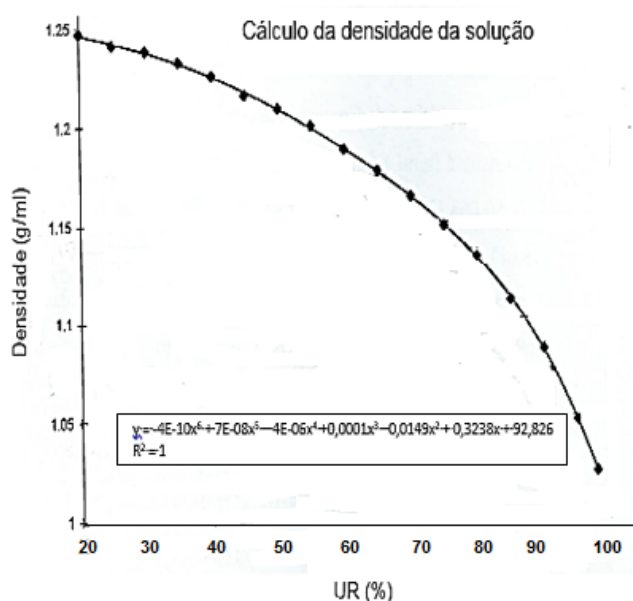


Figura 88 – Gráfico para cálculo da densidade da solução em função da UR.
 Fonte: Autor, Adaptado de ANTÓN, 2009.

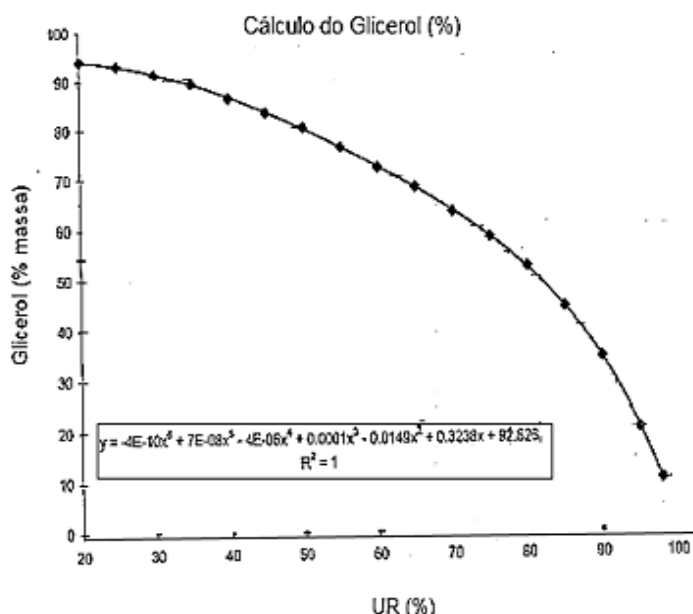


Figura 89 – Gráfico para cálculo do glicerol em função da UR.
 Fonte: Autor, Adaptado de ANTÓN, 2009.

A partir dos gráficos das figuras 88 e 89 procedeu-se com os seguintes cálculos:

- cálculo do volume necessário de solução por caixa;
- determinação do valor de UR em função do GS (ANTÓN, 2009);
- determinação do valor da densidade em função da UR determinada, gráfico figura 87;
- determinação do percentual de glicerol, gráfico da figura 88.

Foram utilizados dois tamanhos de recipientes, uma com capacidade de 3600ml de solução e outra com capacidade de 2900ml. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 24. Para estes cálculos da densidade a água foi considerada igual a 1g/l:

Tabela 24 – Determinação do volume de glicerol

Capacidade de Solução do recipiente (ml)	GS (%)	UR (%)	Densidade Solução (g/ml)	Massa Solução (g)	Glicerol (%massa)	Massa de Glicerol (g)	Volume de água (ml)	Volume de Glicerol (ml)
			(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	
3600,0 (a)	80	91	1,075	3870,0	30,0	1161,00	2709,0	891,0
	60	77	1,137	4093,2	54,0	2210,30	1882,8	1717,2
2900,0 (b)	80	91	1,075	3117,5	30,0	935,25	2182,2	717,8
	60	77	1,137	3297,3	54,0	1780,54	1516,7	1383,3

Fonte: Autor

A sequência de cálculos para a obtenção dos valores apresentados na tabela 23 é dada pelas expressões 32, 33, 34 e 35.

$$\text{Massa da Solução (g)} = a \times c \quad (32)$$

$$\text{Massa de Glicerol (g)} = d \times e \quad (33)$$

$$\text{Volume de Água (ml)} = d - f \quad (34)$$

$$\text{Volume de Glicerol (ml)} = a - g \quad (35)$$

A figura 90 ilustra os procedimentos para o acondicionamento dos CPs para o processo de difusão.

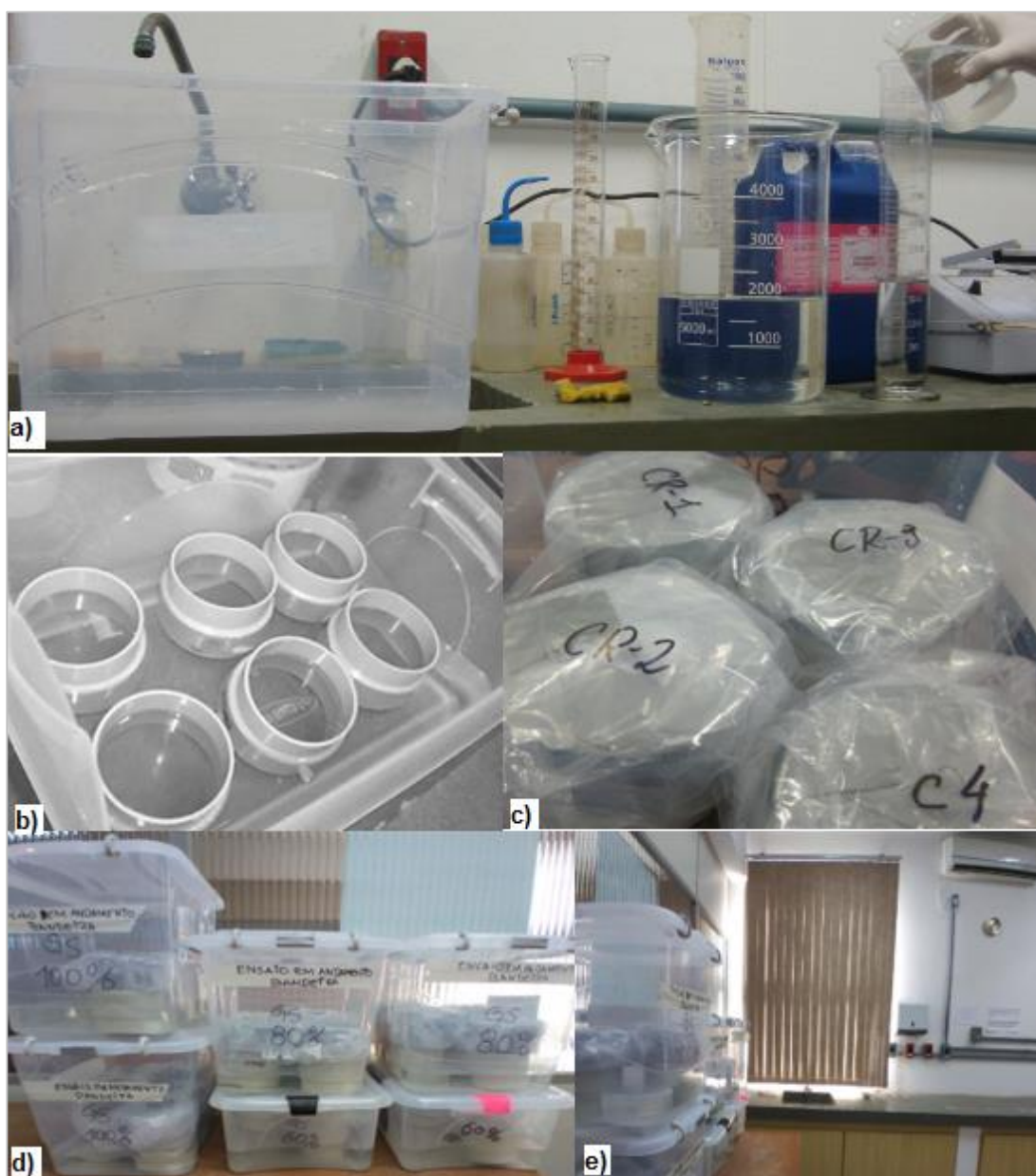


Figura 90 –Fotografias dos procedimentos para acondicionamentos dos CPs para o processo de difusão: a) dosagem glicerol e água destilada; b) apoio em PVC para CPs; c) CPs contaminados e devidamente acondicionados; d) acondicionamento por GS; e) acondicionamento em ambiente com temperatura controlada.

Fonte: Autor

4.6 Extração

Efetivado o tempo de difusão as amostras foram submetidas ao processo de extração em camadas com espessuras pré-definidas. Neste experimento o tempo de difusão foi cerca de 160 dias para todos os CPs, diferentemente do aplicado em Bandeira *et al.* 2014, onde as idades de contaminação variaram de acordo com o GS e com intervalo menor.

No entanto, foi reservado um grupo de CPs de concreto revestido, com GS diferentes, que ficaram sob a difusão por cerca de 280 dias e outros CPs de argamassa pura, que foram submetidos à difusão por 30, 40 e 50 dias, com GS de 100%, 80% e 60%, respectivamente.

O motivo deste procedimento foi o de demonstrar a evolução da difusão com 120 dias a mais, em relação aos do primeiro grupo, extraídos com cerca de 160 dias de contaminação. Para o grupo de CPs de argamassa, o propósito da alteração foi porque após a extração aos 160 dias e análise da potenciometria, os CPs não apresentaram variação nas medidas de cloreto ao longo da profundidade, isto é, o perfil de penetração de cloreto seria uma reta.

A sequência de procedimentos para a execução desta fase foi a seguinte:

- a) as amostras foram retiradas dos recipientes onde ocorreu o processo de difusão e daí é removida a fita juntamente com o excesso de NaCl que permaneceu sobre a face contaminada;
- b) a amostra foi pesada para determinação do GS final, e juntamente com a massa do CPs antes da contaminação, determinado o GS médio durante o ensaio. Durante o período que os CPs ficaram sob o processo de difusão foram feitas pesagens para verificar se houve ou não perda de umidade;
- c) a seguir, a superfície onde foi depositado o agente contaminante, foi limpa através de lixamento seguido da aplicação de limpeza com escova de aço e para consumir a limpeza foi efetuado aplicação de jato de ar comprimido para que na superfície e em alguns poros visíveis não fique nenhum excesso de cloreto de sódio;
- d) o passo seguinte foi a extração, propriamente dita, do material pulverizado em camadas cujas espessuras foram pré-definidas. Os procedimentos e ferramentas necessárias, nessa etapa, são os mesmos expostos na fase de pré-testes (item 4.1.5, p.161). A diferença nessa etapa deu-se pela extração, também, dos CPs de argamassa (ARG50) e de concreto (C), além da coleta do material em pó que, posteriormente, foi submetido aos ensaios de determinação de cloretos;
- e) após a extração de cada camada, o material foi totalmente retirado, devidamente registrado e colocado em saco plástico fechado hermeticamente;

- f) antes da extração da próxima camada é aplicado jato de ar comprimido para não conter resquícios de material da camada anterior.

A figura 91 mostra em desenho esquemático detalhes das camadas obtidas nos CPs de argamassa e de concreto. As camadas dos CPs de concreto revestido já foram detalhadas na figura 65, item 4.1.5, p.161.

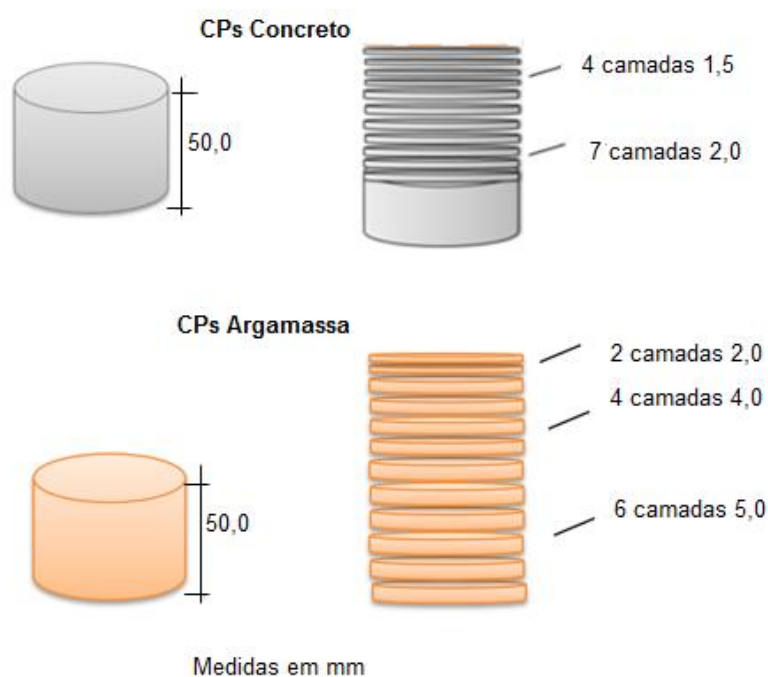


Figura 91 – Desenho esquemático das camadas para extração nos CPs tipo C e tipo ARG50.
Fonte: Autor

A figura 92 complementa a figura 67 (item 4.1.5, p.161) com outras ilustrações da metodologia utilizada para extração das amostras pulverizadas.

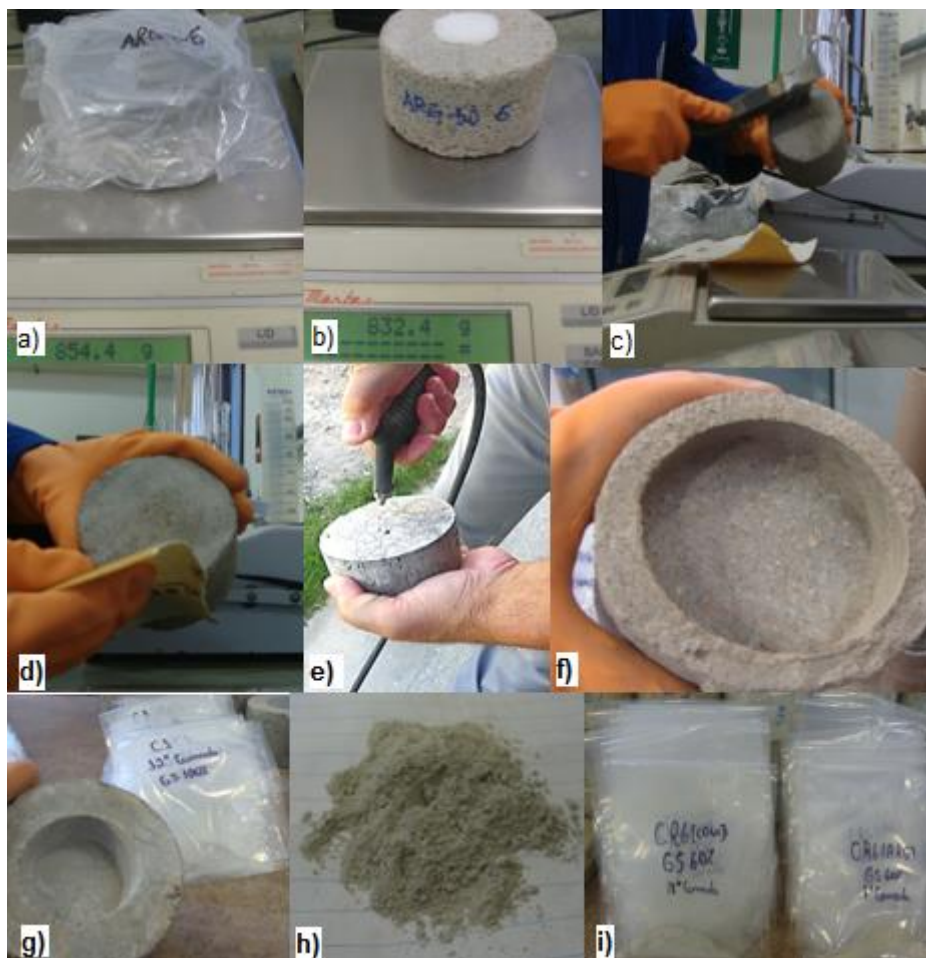


Figura 92 – Fotografias dos procedimentos para extração do material em pó: a); b) pesagem para verificar GS médio; c) retirada de algum resquício de NaCl com escova de aço; d) lixamento da superfície que recebeu o cloreto de sódio; e) aplicação de ar comprimido como última etapa de limpeza superficial; f) amostra tipo CR com extração concluída da parte do revestimento; g) amostra tipo C com extração concluída; h) material em pó proveniente da extração; i) material extraído de cada camada e embalado.

Fonte: Autor

4.7 Ensaios de Potenciometria

Esta foi a etapa derradeira do experimento, na qual buscou-se obter o perfil que relaciona a concentração de cloretos com a profundidade de penetração e determinar o coeficiente de difusão de cada tipo de amostra (concreto, argamassa e concreto revestido), a partir do material pulverizado produzido na fase de extração.

Esta metodologia já foi anteriormente utilizada nos trabalhos já citados de Guimarães (2011), Bandeira (2014) e Fanton (2019) e também proposta por Climent *et al.* (1999). Em resumo, o método consta de um tratamento prévio do material em pó, a potenciometria, propriamente dita, detecção do ponto de equivalência,

determinação do percentual de cloretos para cada camada de cada corpo de prova e elaboração dos perfis de cloreto.

A partir dos perfis, por meio de ajuste da solução da segunda lei de Fick (equação 4, item: 2.2.2.4, p.70) utilizando o método dos mínimos quadrados, foram determinados os valores dos coeficientes de difusão (D) e da concentração superficial (Cs).

4.7.1 Obtenção dos perfis de cloreto

A sequência dos procedimentos para esta fase foram:

- a) Inicialmente foi realizado o tratamento prévio das amostras pulverizadas onde todo o material pulverizado de cada camada foi colocado em vidros tipo Becker, homogeneizado de forma manual e separado cerca de 0,5g a 1,0g para ser ensaiado. O restante foi acondicionado nas mesmas embalagens, que ficaram como reserva. O material a ensaiar foi, colocado em estufa a $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24h;
- b) após a secagem em estufa as amostras foram colocadas em dessecador por 12h;
- c) retiradas do dessecador as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão igual a 0,1mg, e com a finalidade de desfazer a combinação dos cloroaluminatos foram submetidas a 15ml de solução de ácido nítrico (HNO_3) na proporção de 1:2;
- d) na sequência cada recipiente que continha as amostras foi submetido à ebulição com agitação constante. Mas, antes desta ação, foi colocado sobre o recipiente um vidro tipo “relógio” onde na parte superior e convexa foi colocada uma pequena porção d’água destilada com a intenção de permitir a condensação de algum cloreto e impedir que parte do material, em forma de vapor, possa vir a se dispersar no ambiente;
- e) após o resfriamento da solução resultante, as paredes do recipiente e do vidro “relógio” foram lavadas com o intuito de desprender algum íon cloreto fixo nelas;
- f) na sequência adicionou-se 32ml de hidróxido de sódio (NaOH) à solução para estabilizar o pH entre 2 e 3. O pH foi verificado em um pH-metro. Caso

esteja abaixo ou acima desse intervalo, são adicionadas pequenas porções de NaOH ou HNO₃, respectivamente;

- g) no ensaio, para que não se percam amostras que contenham valores muito baixo de cloretos, são adicionados a todas as amostras 1,0ml de solução de cloreto de sódio (NaCl);
- h) além do material pulverizado, e preparado para a potenciometria, foi preparada uma amostra sem contar com material pulverizado. Denominado de “branco”, tem o propósito de constatar algum volume de cloretos na água destilada e demais soluções utilizadas no tratamento prévio das amostras. Após, no cálculo do volume de cloretos totais da amostra, o valor do “branco” e do cloreto de sódio adicionado foram descontados;
- i) a seguir, cada amostra preparada foi submetida ao ensaio de titulação potenciométrica, que consiste em medição de valores de potenciais elétricos em função da variação de volume de uma espécie química em solução com concentração conhecida, neste caso foi utilizada solução de nitrato de prata (AgNO₃), de 0,01mol de concentração, como titulante. Quando a medição, apresentar picos de valores é o momento que o titulado (cloretos da solução ensaiada) foi totalmente consumido pelo titulante (prata), e neste instante, o ensaio é encerrado com mais três medições de confirmação;
- j) após foram efetuados os cálculos para determinar as concentrações de cloretos em cada camada, utilizando-se do método apresentado por CLIMENT *et al.* (2004);
- k) os dados obtidos do teor de cloretos real de cada camada foram relacionados com a profundidade média de extração e foi elaborado o gráfico “teor de cloretos x profundidade”.

A figura 93 ilustra os procedimentos acima relatados e as figuras 94 e 95 apresentam detalhes dos equipamentos utilizados.



Figura 93 – Fotografias dos procedimentos para obtenção dos perfis de cloreto: a); homogeneização das amostras; b) pesagem em balança analítica; c) secagem em estufa; d) esfriamento em dessecador; e) aplicação de solução de ácido nítrico; f) fervura; g) lavagem paredes recipiente pós fervura; h) aplicação de hidróxido de sódio; i) correção de pH; j) amostras prontas para a potenciometria; k); l) potenciometria.

Fonte: Autor

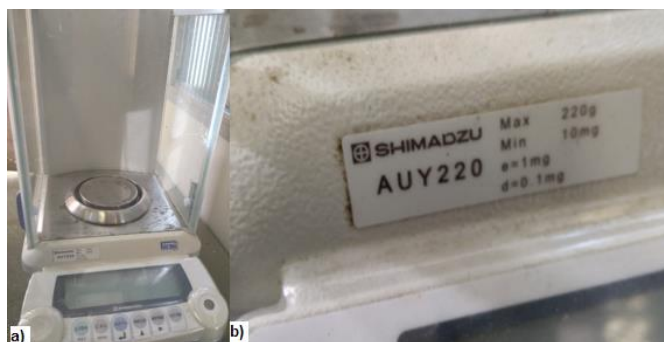


Figura 94 – Fotografia da balança analítica utilizada nas pesagens das amostras: a) balança; b) detalhes técnicos da balança.

Fonte: Autor

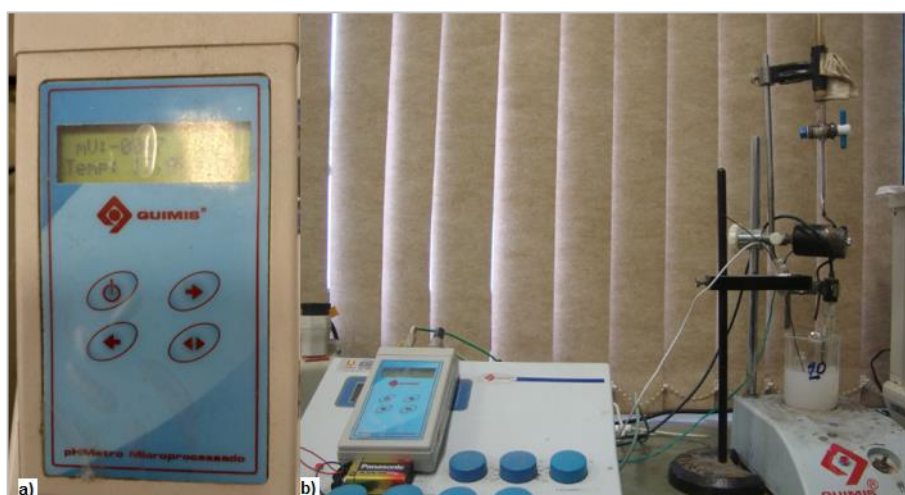


Figura 95 – Fotografia do Titulador potenciométrico modelo Q-799D: a) pHmetro; b) titulador.

Fonte: Autor

4.7.2 Obtenção dos Coeficientes de difusão (D) e da Concentração superficial (C_s) para os de concreto e de argamassa

A partir da obtenção do perfil de penetração de cloretos de CPs de concreto e de argamassa, foram determinados os valores do coeficiente de difusão de cloretos (D) e os valores da concentração superficial de cloretos (C_s).

Esses dados foram obtidos pelo ajuste da curva formada pela solução da segunda lei de Fick (4) aplicando o Método dos Mínimos Quadrados. Para esse ajuste foi utilizado o software MS-Excel, aplicado ponto a ponto visando obter o menor erro entre os pontos do perfil obtido pela investigação experimental e do perfil teórico.

O emprego do Método dos Mínimos Quadrados em estudos matemáticos e estatísticos é muito profuso, pois visa atingir o melhor ajuste para um conjunto de

dados, procurando minorar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados reais.

A figura 96 apresenta um gráfico como modelo do perfil de cloretos, que foi obtido com os dados do desenvolvimento experimental e com o ajustamento da curva.

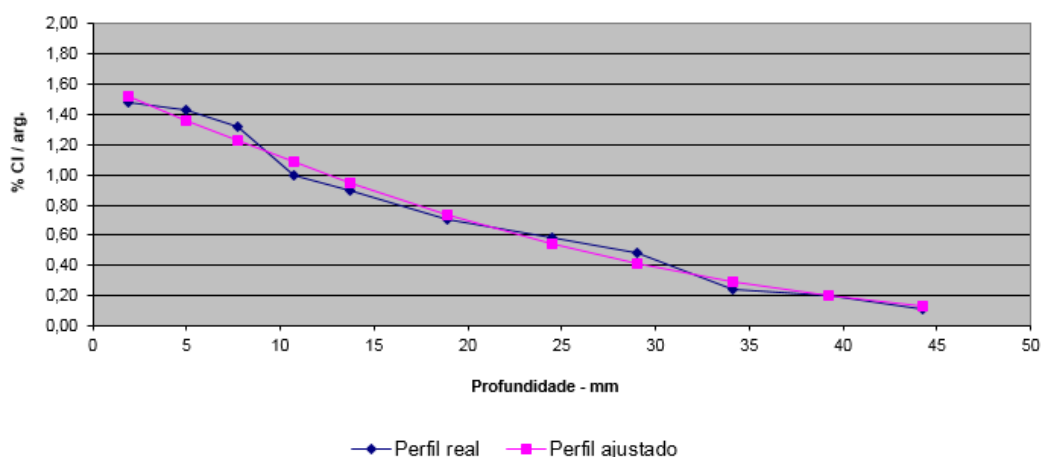


Figura 96 – Gráfico do perfil de penetração de cloretos ajustado.
Fonte: Autor

4.7.3 Obtenção dos Coeficientes de difusão (D) e de Concentração superficial (C_s) para CPs de concreto revestido modelagem numérica

Para a obtenção dos coeficientes de difusão em materiais únicos, como escrito no item anterior, foram utilizados métodos matemáticos através da segunda lei de Fick (4).

No caso de dois materiais atuando juntos, que é o caso do concreto revestido com argamassa houve necessidade de buscar um modelo numérico que apresentasse soluções para a determinação de D e C_s , tendo-se, também, uma projeção para o ciclo de vida das estruturas de concreto armado e protendido frente aos agentes deterioradores como os íons cloreto.

Alguns autores, já citados anteriormente, como Kreijger (1984), tratavam a estrutura de concreto como um sistema duplo ou até triplo, ao estudarem o transporte iônico no concreto. Considera, esse autor, que as camadas superficiais do concreto possuem características diferenciadas em relação à massa maior do material: a primeira camada formada pela pasta de cimento (0,1mm de espessura); a segunda camada formada por argamassa (zona de cobrimento da armadura, espessura da ordem de 20 a 30mm). Andrade *et al.* (1997) também consideraram a existência de

uma camada superficial diferenciada no concreto denominada de “efeito de pele” e, através de modelo matemático, determinaram condições para a determinação da difusão. Presuel-Moreno *et al.* (2018) em seus estudos consideraram o “efeito de pele” como camada diferenciada em relação ao restante do material

Neste contexto, esta pesquisa utilizou o modelo matemático proposto por Carslaw e Jaeger (1959 *apud* Crank, 1975) expressado nas equações a seguir:

$$C_1 = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{(D_1 t)}} - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{(D_1 t)}} \right\} \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+kx}{2\sqrt{(D_1 t)}} \quad (37)$$

$$k = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{1-k}{1+k} \quad (39)$$

Onde:

C_1 = concentração de cloretos no revestimento;

C_2 = concentração de cloretos no concreto;

C_s = concentração na superfície e considerada constante;

D_1 = difusão no revestimento;

D_2 = difusão no concreto;

n = número de pontos;

l = espessura do revestimento;

erfc = função erro de gauss;

t = tempo da difusão;

$x = 0$ na interface, variando de $-l < x < \infty$;

$C_1 = C_2$ em $x = 0$.

Da mesma forma que foi aplicado aos CPs de único material, descritos no item anterior, esse modelo matemático foi calculado utilizando o software MS-Excel, aplicado ponto a ponto, com variações de D_1 , D_2 e C_s

, visando obter o menor erro entre os pontos do perfil de cloretos obtidos pela investigação experimental e os valores obtidos com a aplicação do Método dos mínimos quadrados.

A figura 97 exemplifica o gráfico dessa modelagem. No próximo capítulo serão apresentados e discutidos todos os gráficos obtidos.

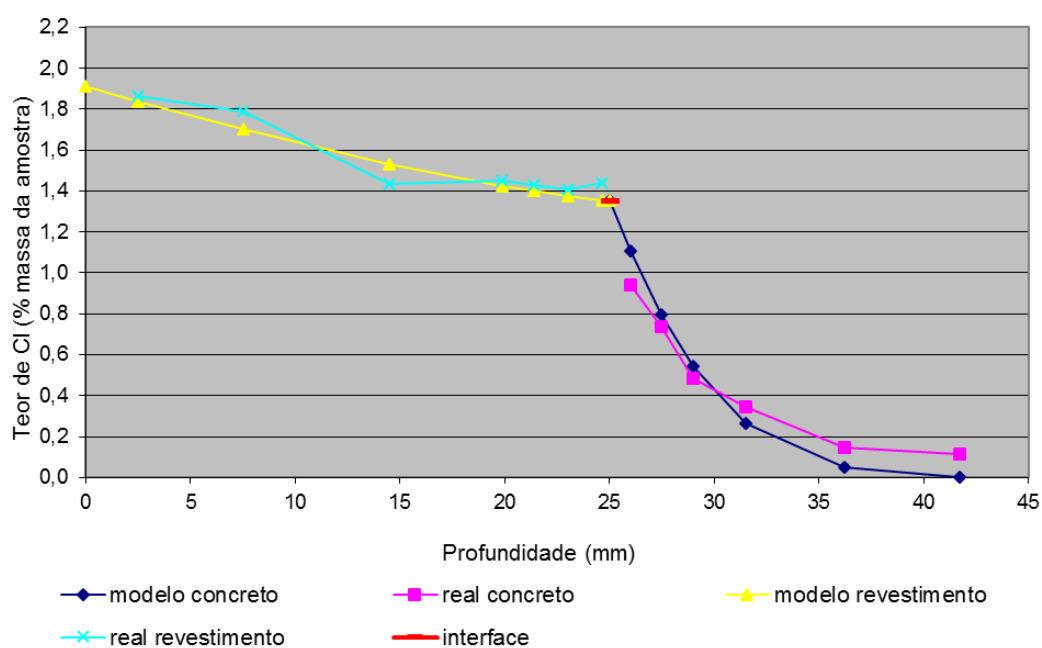


Figura 97 – Gráfico do perfil de penetração de cloretos ajustado para CPs tipo CR.
Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata da apresentação dos resultados obtidos com os ensaios realizados ao longo do desenvolvimento experimental em consonância com os objetivos propostos nesta Tese, bem como, são manifestados comentários a respeito dos desfechos ocorridos nos experimentos. No aspecto do comportamento do grau de saturação (GS) para as amostras de concreto revestidas (CR), localizadas em mesmo ambiente, iniciou-se na fase de pré-testes com resultados não satisfatórios no sentido de averiguar a possibilidade de medição do GS de forma separada sem a necessidade de realizar ensaios com as amostras revestidas. Mas esses resultados ainda eram incipientes eis que a amostragem era pequena, no entanto, obteve-se algumas conclusões importantes para o avanço da pesquisa. Ainda na fase de pré-testes se realizou a extração em camadas de uma amostra CR e obteve-se resultados compatíveis, todavia, haveria necessidade de investigar outras questões mais específicas da metodologia. Na outra parte do desenvolvimento experimental relacionado às questões como a obtenção dos perfis de cloreto, obteve-se resultados esperados, dado a especificidade de um material composto de outros dois com respostas diferentes à penetração dos cloretos. No aspecto da determinação dos coeficientes de difusão a partir da utilização de um modelo matemático, que relaciona dois materiais diferentes, investigou-se alguma vinculação matemática com os valores dos materiais atuando de forma única, do mesmo modo que foi feito nas avaliações do GS. Por fim, foi realizado com o modelo adotado previsões de avanço da frente de cloretos para o concreto revestido ao longo do tempo.

5.1 Comportamento do Grau de Saturação (GS)

Neste item são apresentados e comentados os resultados obtidos nos ensaios de controle do grau de saturação das amostras que compuseram os 5 conjuntos formados (tabelas 22 e 23, item 4.4.3, p.180) com os 3 tipos de amostras: concreto revestido (CR), argamassa (ARG25) e concreto (C), para cada GS definido em 80% e 60%.

Também, são comparados os resultados com os obtidos na fase de pré-testes onde houveram 2 conjuntos formados com 4 tipos de amostras: concreto chapiscado e revestido (CRa); concreto sem chapisco e revestido (CRb), argamassa (ARG) e de concreto (C).

Dos ensaios realizados, que possibilitaram a determinação da relação entre o GS do concreto e da argamassa das amostras de concreto revestido (CR), pôde-se extrair vários outros dados interessantes.

5.1.1 Verificação do (GS) durante processo de uniformização da umidade

5.1.1.1 Fase de Pré-testes

Antes do processo de ensacamento as amostras foram submetidas aos procedimentos para que obtivessem o GS definido para o conjunto, que nesta fase foi de 85%. Como todas as amostras obtiveram o GS estipulado antes de 72 horas, o processo de uniformização em estufa a 50°C foi de 3 dias.

O processo de uniformização da umidade contida em cada amostra do conjunto, consiste em verificar no interior deste, de que forma o GS se comportará, tendo em vista a existência de dois materiais de microestruturas diferentes, isto é, o concreto com uma rede porosa mais fechada e a argamassa com uma rede mais porosa. Nos ensaios de absorção na saturação e de absorção por capilaridade obteve-se valores menores de absorção para o concreto em relação à argamassa, o que ratifica a questão da porosidade entre ambos. No item 4.3.1.1, p.175, foram apresentadas as características desses materiais.

Verificou-se que durante o processo de uniformização da umidade no interior de cada conjunto houve variações do GS de forma geral no conjunto.

O gráfico da figura 98, mostra os dados obtidos para cada conjunto com o GS definido de 85%.

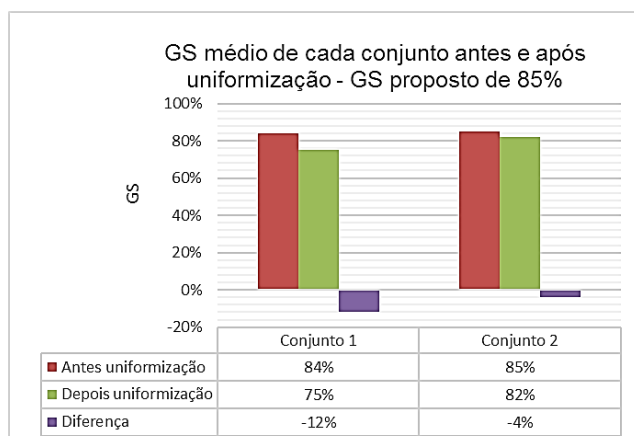


Figura 98 – Gráfico da demonstração da variação do GS em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, na fase de pré-testes.

Fonte: Autor.

Analisando o gráfico da figura 98, observa-se que o conjunto 2 teve menos perda de umidade em relação ao conjunto 1, resultando em 3 (três) vezes a relação entre um e outro. A diferença pode ser considerada pequena no conjunto 2, no entanto, pode ser melhorada pela melhor vedação do conjunto.

Em relação ao conjunto 1, aspectos como, a adoção de uma embalagem maior devido à disposição e à espessura dos separadores e assim tornar difícil a retirada de todo ar presente por ocasião da selagem, e a própria selagem ser dificultada pelo grande volume criado, contribuíram para uma diferença maior do GS do conjunto.

No que se refere à variação da umidade de cada amostra em cada conjunto, tem-se no gráfico da figura 99 os resultados obtidos.

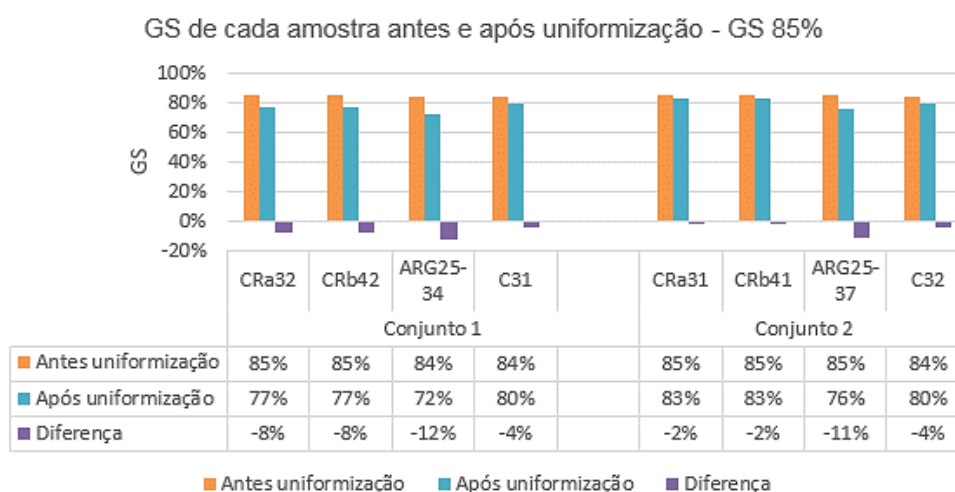


Figura 99 – Gráfico da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, na fase de pré-testes.

Fonte: Autor.

O gráfico da figura 99 expõe os resultados dos 4 tipos de amostras analisados, demonstrando que os elementos do conjunto 2, de forma individual perderam menos umidade do que aqueles do conjunto 1. Sendo que os CPs revestidos e de argamassa foram aqueles que contribuíram para essa diferença entre os conjuntos. Isso se justifica devido à diferença da estrutura interna entre a argamassa e o concreto, pois a argamassa para valores iguais de umidade, deverá ter menor GS (GUIMARÃES 2000 e 2005).

5.1.1.2 Segunda Fase

Esta fase do desenvolvimento experimental aproveitou os resultados da fase de pré-testes para corrigir os problemas levantados e obter assim menos perda do GS. Como foi detalhado no capítulo anterior, nesta etapa foram utilizados cinco conjuntos de CPs trazendo, assim, uma maior amostragem e mais segurança nas conclusões.

O gráfico da figura 100 expõe os resultados obtidos com os procedimentos, para o grau de saturação de 80%.

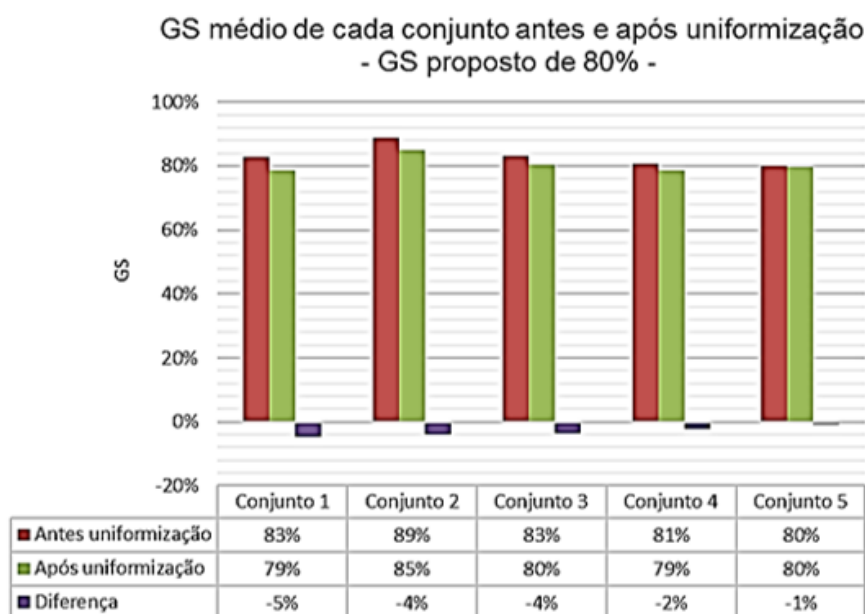


Figura 100 – Gráfico da demonstração da variação do GS (80%) em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C.

Fonte: Autor.

Pelo apresentado na figura 100, com exceção do conjunto 1, que teve 5% de perda de GS, os conjuntos 2 e 3 tiveram os mesmos valores da fase de pré-testes e

os seguintes, 4 e 5, perdas insignificantes (2% e 1%). Na análise desses dados, pode-se concluir que:

- a) as perdas resultantes são inerentes ao processo, mesmo que tenham sido utilizado três invólucros com fechamento de três linhas de vedação térmica e aplicação do vácuo;
- b) no entanto, pode-se definir como perdas plausíveis àquelas dos conjuntos 4 e 5, às quais sugerem, pela sequência dos ensaios, que tiveram uma melhor atenção aos procedimentos de vedação e retirada do ar pela aplicação do vácuo.

O gráfico da figura 101 apresenta o comportamento do GS proposto de 60%, por conjunto.

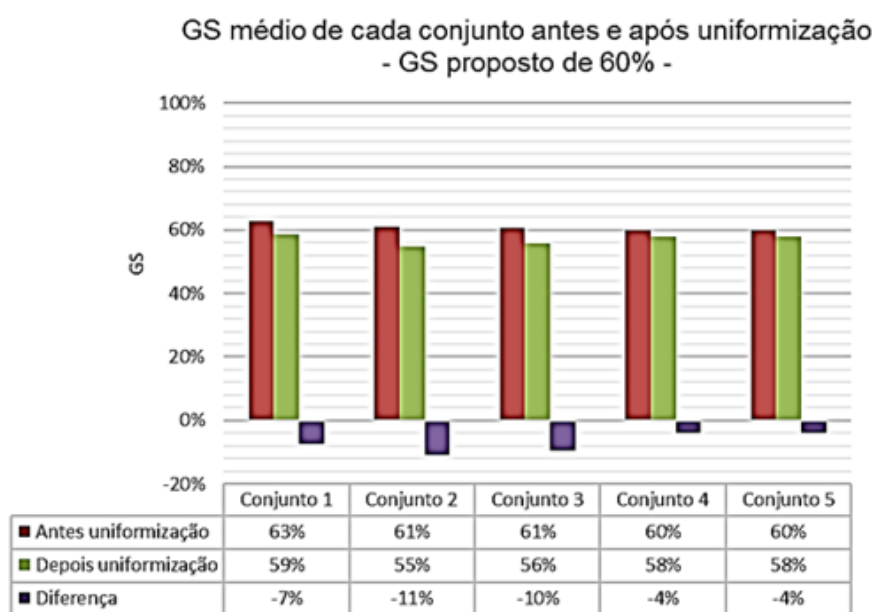


Figura 101 – Gráfico da demonstração da variação do GS (60%) em cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C.

Fonte: Autor.

A análise dos dados da figura 101 mostra que, comparativamente aos GS maiores analisados até aqui (85% e 80%), nos conjuntos com GS 60% se obtiveram valores superiores de perdas. Neste caso, também houve diminuição da diferença nos dois últimos conjuntos, o que pode sugerir um maior cuidado por ocasião da metodologia de envase e vedação dos CPs.

Da mesma forma que naqueles conjuntos com GS de 80%, pode-se deduzir que as perdas obtidas nos conjuntos 4 e 5 (4%) podem ser contabilizadas como inerentes ao processo, eis que existem muitas variáveis influenciando neste cenário podendo haver alguma diferença.

As figuras 102 e 103, contém gráficos demonstrando a variação do GS em cada amostra de cada conjunto, para GS de 80% e 60%, respectivamente.

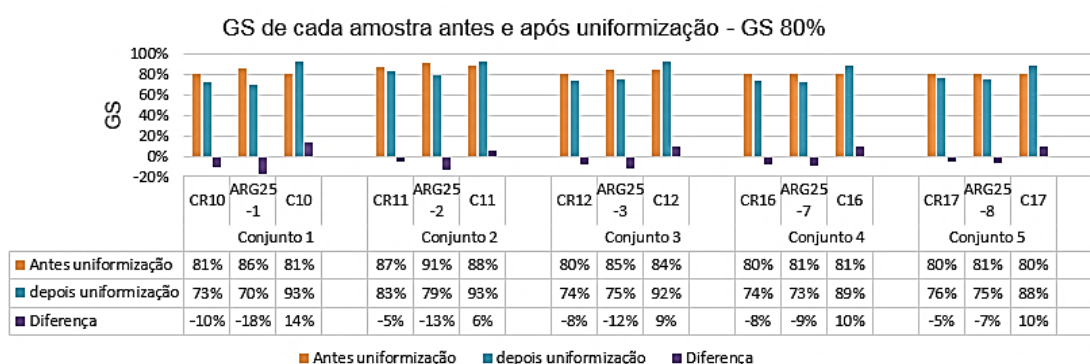


Figura 102 – Gráficos da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, GS proposto de 80%.

Fonte: Autor.

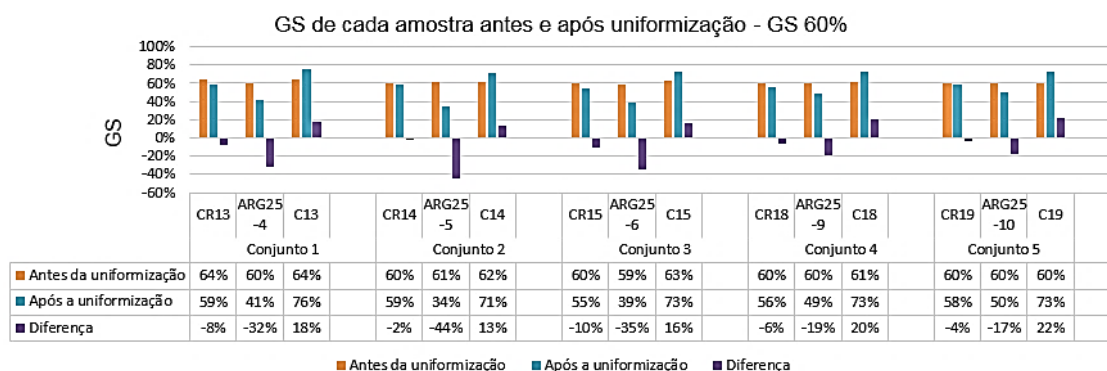


Figura 103 – Gráfico da demonstração da variação do GS em amostras de cada conjunto, antes e após a uniformização em estufa a 50°C, GS proposto de 60%.

Fonte: Autor.

Analisando os gráficos das figuras 102 e 103, observa-se que todas as amostras de concreto tiveram variações no GS, entretanto, essa diferença foi positiva, ou seja, as amostras adquiriram mais umidade, maior grau de saturação naquelas de menor porosidade. O mesmo aconteceu na fase de pré-testes, embora com variação negativa. A variação média nas peças de concreto foi de 12% e 20%, para GS de 80% e de 60%, respectivamente.

Para as amostras de concreto revestido com argamassa e de argamassa houveram diferenças negativas significativas e muito variáveis entre os conjuntos. As amostras de argamassa tiveram as maiores variações negativas em relação às de concreto revestidas. Essas variações maiores do GS nas amostras com argamassa se deve a sua porosidade maior em relação ao concreto, fazendo com que perca maior umidade, ou seja a tendência é que tenham menor GS quando atuando no mesmo ambiente do concreto.

5.1.2 Determinação do (GS) após separação das partes dos CPs tipo CR

Dentre os objetivos deste trabalho se definiu o de desenvolver um método para a determinação do GS em cada uma das partes dos concretos revestidos com argamassa, cuja metodologia proposta está descrita nos itens 4.1.4, p.159, na fase de pré-testes e 4.4.4, p.185, na segunda fase. Neste item são apresentados os resultados obtidos.

5.1.2.1 Fase de Pré-testes

As figuras 104 e 105, apresentam os valores obtidos do GS medido, após separação das partes dos CPs de concreto revestido (CR).

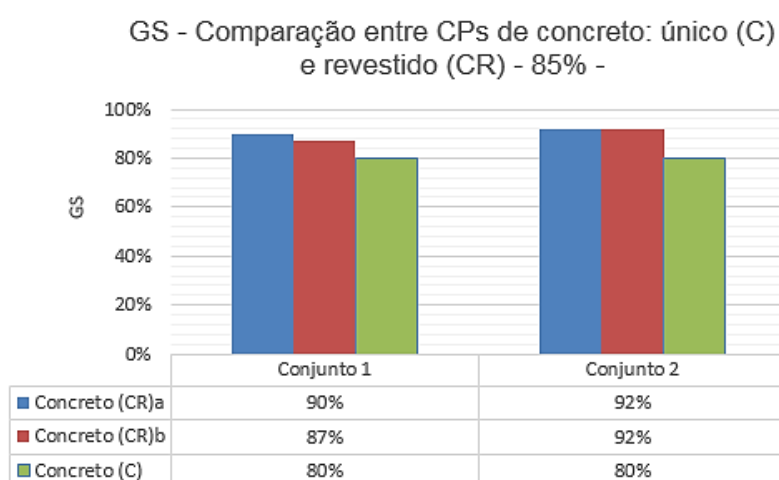


Figura 104 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de concreto: após separação do revestimento e na forma única.

Fonte: Autor.

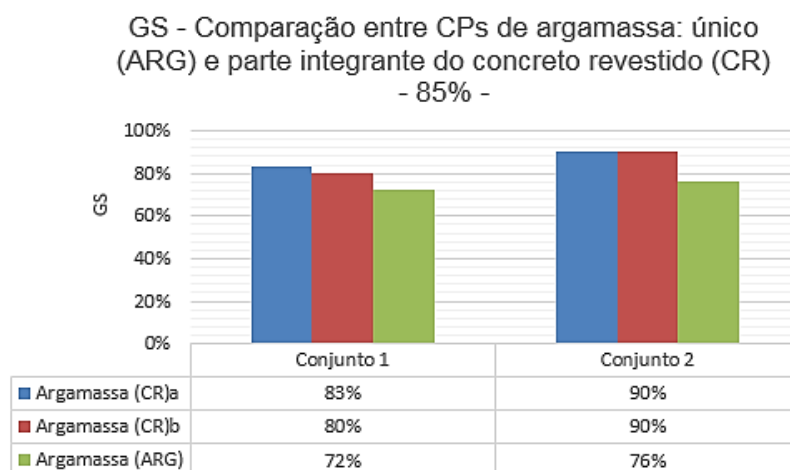


Figura 105 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única.

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados pelos gráficos das figuras 104 e 105 remetem as seguintes observações:

- a) na avaliação do GS de cada parte do corpo de prova revestido, para o conjunto 1 o GS médio (somando as partes e dividindo por 2) obteve-se cerca de 86% e 83% (corpo de prova CRa e CRb, respectivamente). Para o conjunto 2 esse valor foi de 91% para ambos. Já, verificando o GS do corpo de prova (CR) como todo (figura 98, item 5.1.1.1, p. 205), obteve-se GS de 75% para o conjunto 1 e 82%, para o conjunto 2. Houve acréscimos de umidade, mostrando uma não conformidade no resultado, pois a soma do GS de cada parte não poderia ser maior do que o todo;
- b) assim, não se pode-se considerar esses resultados pois diferem do esperado, principalmente, no caso das amostras do revestimento, a qual deveriam apresentar um GS menor pela sua condição microestrutural;
- c) como nesta fase a amostragem foi pequena, com diversas variáveis como disposição das amostras no processo de uniformização da umidade, embalagem, vedação e espaçadores entre CPs, pode-se considerar que foi válida no sentido de solucionar melhorando as condições dessas variáveis e promovendo maior amostragem.

5.1.2.2 Segunda Fase

As figuras 106 e 107 mostram gráficos dos resultados dos experimentos nos cinco conjuntos criados para se verificar o GS das amostras do revestimento e do concreto remanescentes após o desprendimento, dos CPs de concreto revestido para o GS definido em 80%.

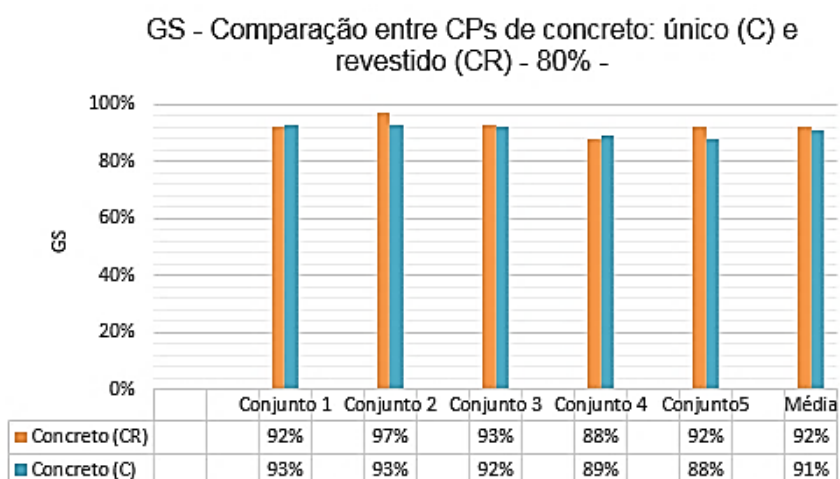


Figura 106 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de concreto: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 80%.

Fonte: Autor.

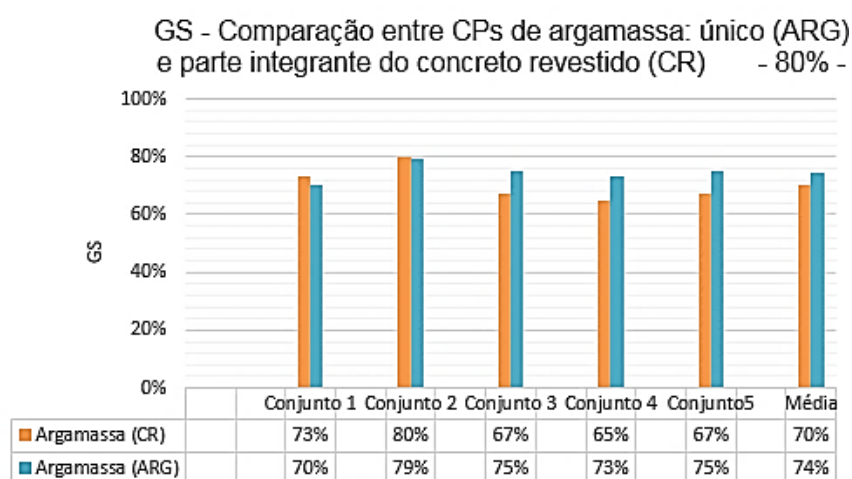


Figura 107 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 80%.

Fonte: Autor.

Analisando o gráfico da figura 106, verifica-se que tal como ocorreu no processo de uniformização, as amostras em concreto obtiveram o maior GS com

valores na ordem de 90% em todos os conjuntos com média de 92%, sendo este valor similar às amostras de concreto individual (tipo C).

Para as amostras de argamassa (tipo pura e concreto revestido com argamassa), como demonstrado no gráfico da figura 107, em relação ao processo de uniformização, mantiveram a mesma ordem de grandeza do GS, ou seja, com média de 70% para as amostras que compunham as amostras tipo concreto revestido e 74% em média para as amostras de argamassa pura, uma diferença de 6%. Neste caso, diferentemente do concreto, o GS da argamassa atuando como revestimento tem valor diferenciado ao da argamassa na sua forma única.

Para o GS proposto de 60%, as figuras 108 e 109 mostram gráficos com os valores obtidos nos cinco conjuntos formados.

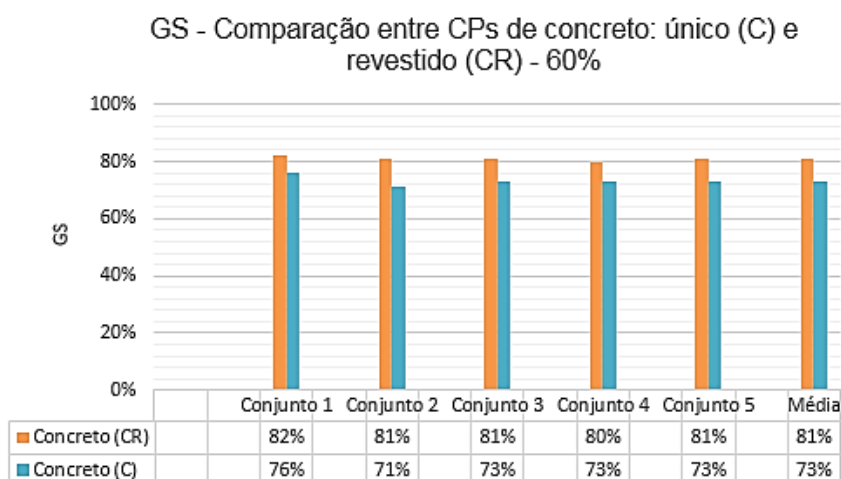


Figura 108 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de concreto: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 60%.

Fonte: Autor.

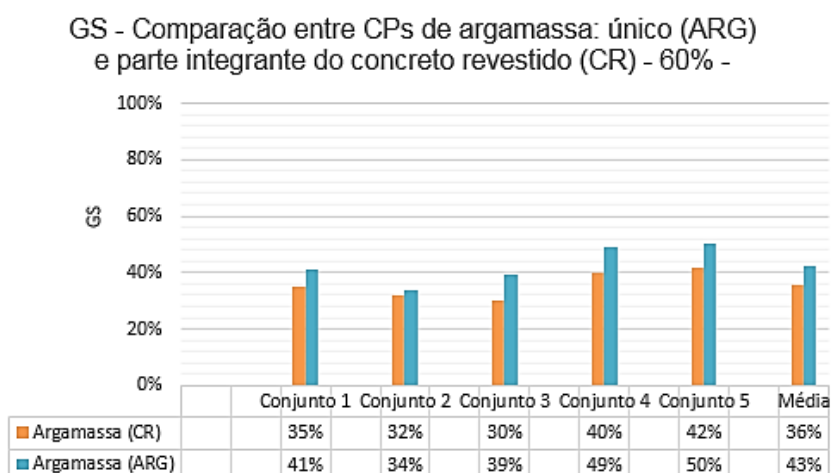


Figura 109 – Gráfico dos valores de GS nas amostras de argamassa: após separação do concreto e na forma única, GS proposto de 60%.

Fonte: Autor.

Analisando os gráficos das figuras 108 e 109, verifica-se que, tal como ocorreu no processo de uniformização, as amostras em concreto obtiveram o maior GS com valores médios de 81% em todo os conjuntos com valores superiores às amostras de concreto individual (tipo C), diferença de cerca de 10%. As amostras de argamassa (tipo ARG25 e CR) mantiveram, em relação ao processo de uniformização, a mesma ordem de grandeza do GS, ou seja, média de 43% para as amostras de argamassa pura e pouco abaixo, na média em 36% para as amostras de argamassa que compunham os CPs de concreto revestido, sendo que houve uma diferença de aproximadamente 15% de GS entre a amostra individual (ARG) e a amostra de argamassa do conjunto (CR).

Analisando estes resultados (gráficos das figuras 106 a 109), leva-se a crer que o que está sendo medido dentro de um mesmo conjunto de CPs (sacos plásticos), é o GS do concreto sem revestimento e da argamassa sem o concreto em um mesmo ambiente (mesma UR), ou seja, para se obter o GS dos componentes dos CPs tipo CR é necessário medir de cada parte após a separação. O valor que se obtém do GS na forma separada do concreto (C) pode servir para obter o GS do concreto sem revestimento para um mesmo ambiente (mesma UR). Pois, como os conjuntos formados de CPs tem massa proporcional em relação quando acondicionados de forma individual os corpos de prova tipo (C), ARG e CR, pode-se admitir que ambos ambientes possuem a mesma UR.

Este valor de GS pode ser usado no modelo D x GS do concreto das amostras tipo (C) que será mostrado em item posterior, bem como o mesmo modelo para a argamassa, amostras tipo (ARG).

Importante afirmar que a UR de equilíbrio do concreto sem revestimento, após ser colocado em estufa a 50°C, deve ser diferente de quando colocado no mesmo conjunto com CPs tipo CR, ARG. Isso pode ser comprovado em ensaios futuros onde seja medido a UR de cada conjunto, conforme metodologia aplicada por ANTÓN (2009).

5.2 Perfis de Cloretos

Os perfis de cloretos de todos os tipos de CPs foram obtidos a partir da metodologia descrita no Capítulo anterior a qual culmina com o cálculo da concentração de íons cloreto em cada camada do corpo de prova e juntamente com a profundidade de penetração, elabora-se os gráficos que delineiam as curvas de teores.

A unidade escolhida para os valores de concentração de cloretos foi em relação à massa da amostra, pois no momento do ajuste do perfil no modelo matemático para os CPs de concreto revestido, foi a que se obteve melhor condição de trabalho no modelo.

5.2.1 Perfis de Cloretos – CPs de concreto

Foram determinados perfis de duas amostras para cada GS. O concreto utilizado neste estudo foi confeccionado com o mesmo traço, denominado de H1 da pesquisa de Rodrigues (2009), portanto se compara os perfis obtidos por estes pesquisadores com os perfis obtidos.

A figura 110 expõe os gráficos dos perfis de concentração de cloretos.

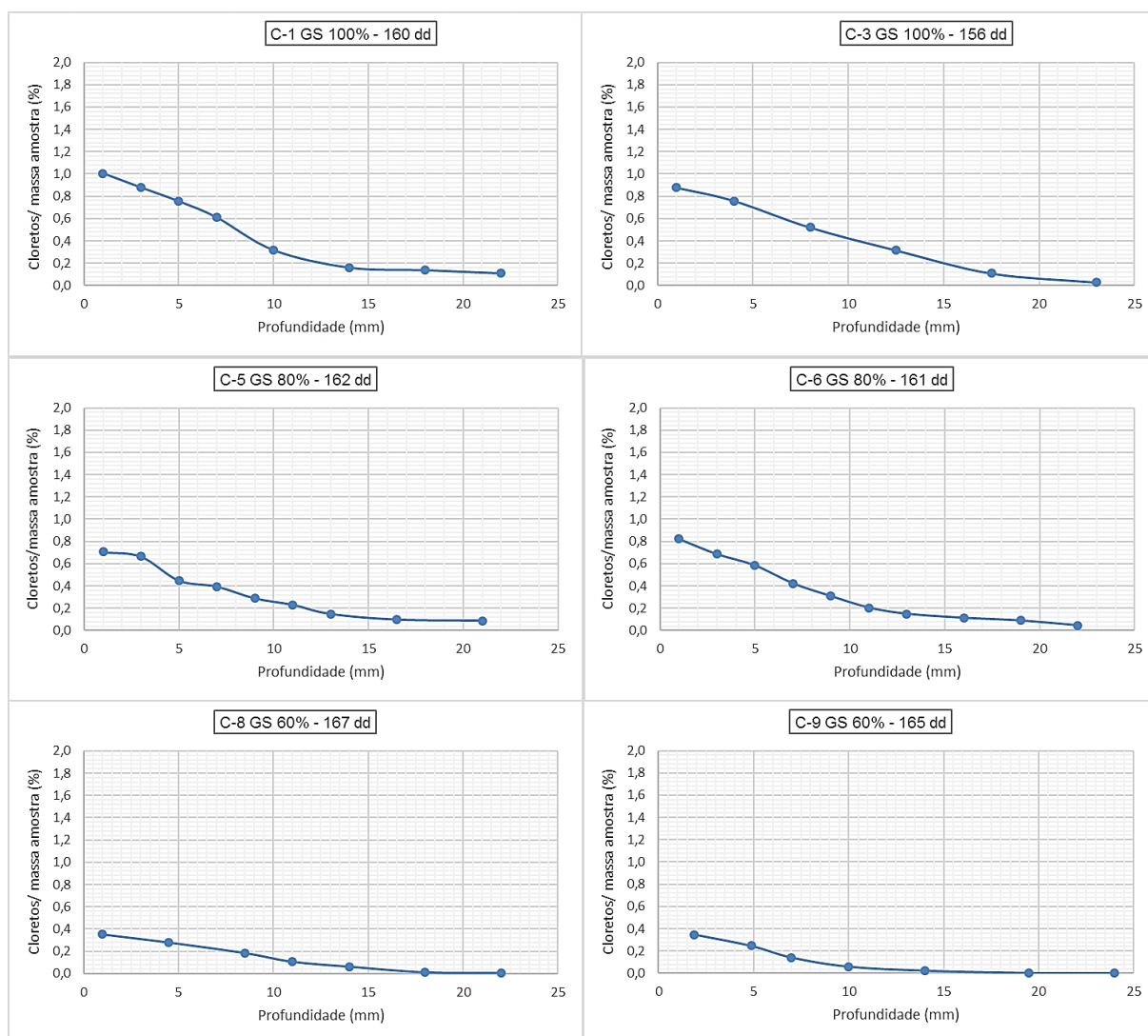


Figura 110 – Gráfico dos perfis de Cloretos CPs tipo C, para vários valores de GS.
Fonte: Autor.

Rodrigues (2009) utilizou em sua pesquisa graus de saturação de 100%, 90%, 75% e 50% e empregou tempos de difusão bem menores do que este trabalho, com exceção para GS 50% que foi aproximado a 130 dias.

Portanto, a comparação é aproximada, mas analisando os perfis de Rodrigues (2009) verifica-se que para GS de 75% a concentração superficial (C_s) foi similar a deste trabalho para GS igual a 100%. A justificar para tal resultado pode estar na qualidade do cimento pois, embora sejam do mesmo tipo (CP-V-ARI-RS) as características físicas foram diferentes e isso pode incorporar melhor qualidade ao concreto.

Neste sentido, uma verificação interessante é que os valores da resistência à compressão aos 28 dias, neste trabalho e o de Rodrigues (2009), são praticamente

idênticos, mas no aspecto da durabilidade apresentaram comportamentos diferentes. Na pesquisa de Bandeira (2015) onde utilizou cimento tipo ARI-RS de resistência mecânica maior, na comparação com o utilizado na pesquisa de Rodrigues (2009), os concretos tiveram comportamentos idênticos à durabilidade, portanto esta pesquisa constata também, que somente a melhora da resistência mecânica não é fator único para avaliação dos concretos à durabilidade.

A influência do grau de difusão na penetração de cloretos, também se evidenciou nesta pesquisa assim como nas diversas outras pesquisas já citadas em capítulos anteriores, que o GS do concreto é um importante fator na difusão dos íons cloreto, sendo relevante para os modelos de vida útil das estruturas de concreto armado e protendido.

5.2.2 Perfis de Cloretos – CPs de argamassa

No desenvolvimento experimental foram sujeitos ao ensaio de difusão três amostras para cada GS, em duas das amostras foram elaborados os perfis de concentração dos cloretos e a terceira ficou como reserva. Os CPs de argamassa (ARG50), apresentaram para todos os GS um perfil retilíneo, configurando que o tempo de difusão havia sido excessivo para este material. Logo, foi aplicada toda a metodologia para contaminação, difusão e extração de outros CPs do mesmo tipo, porém neste caso teve-se uma amostra para cada GS. A figura 111 mostra os perfis efetuados para este tipo de corpo de prova.

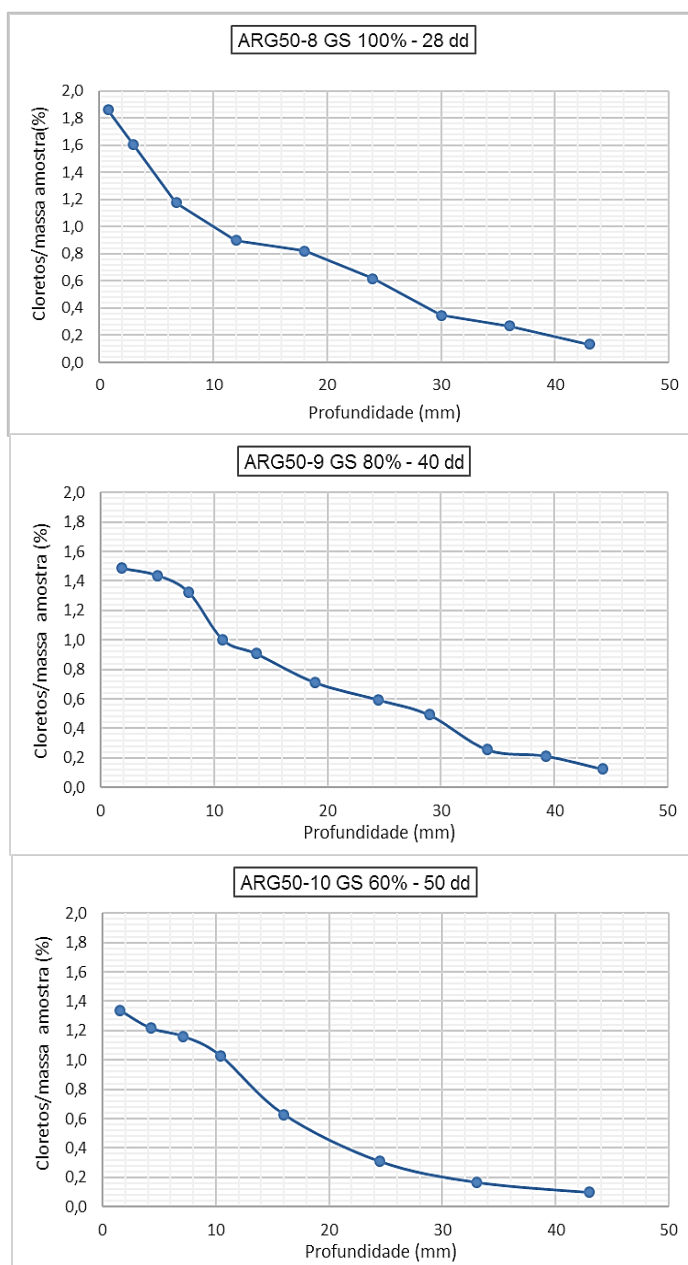


Figura 111 – Gráfico dos perfis de cloretos CPs tipo ARG50, para vários valores de GS.
Fonte: Autor.

Na análise desses perfis, pode-se verificar que os níveis de concentrações de cloretos, comparando-se com os perfis obtidos para os CPs de concreto, estão compatíveis com o material, que tem uma maior porosidade interligada, visto isso nos ensaios de absorção onde apresentou valores bem maiores do que o concreto como, também, nos ensaios para GS e em estudos de outros pesquisadores como LIMA COSTA (2001) e QUARCIONI *et al.* (2011).

Os valores obtidos para absorção na imersão como também na absorção por capilaridade se mostraram compatíveis quando se compara com traços similares em

vários outros estudos, como os de ARAÚJO JÚNIOR (2004); COUTINHO *et al.* (2013); JAMARIM, (2015); FERREIRA (2016); SALOMÃO e BAUER (2017) e PCZIECZEK (2017).

5.2.3 Perfis de Cloretos – CPs de concreto revestido

Como foram utilizados somente os perfis cujas concentrações foram relacionadas com a massa da amostra, nesta seção se expõe somente estes. Os perfis estão apresentados pela figura 112.

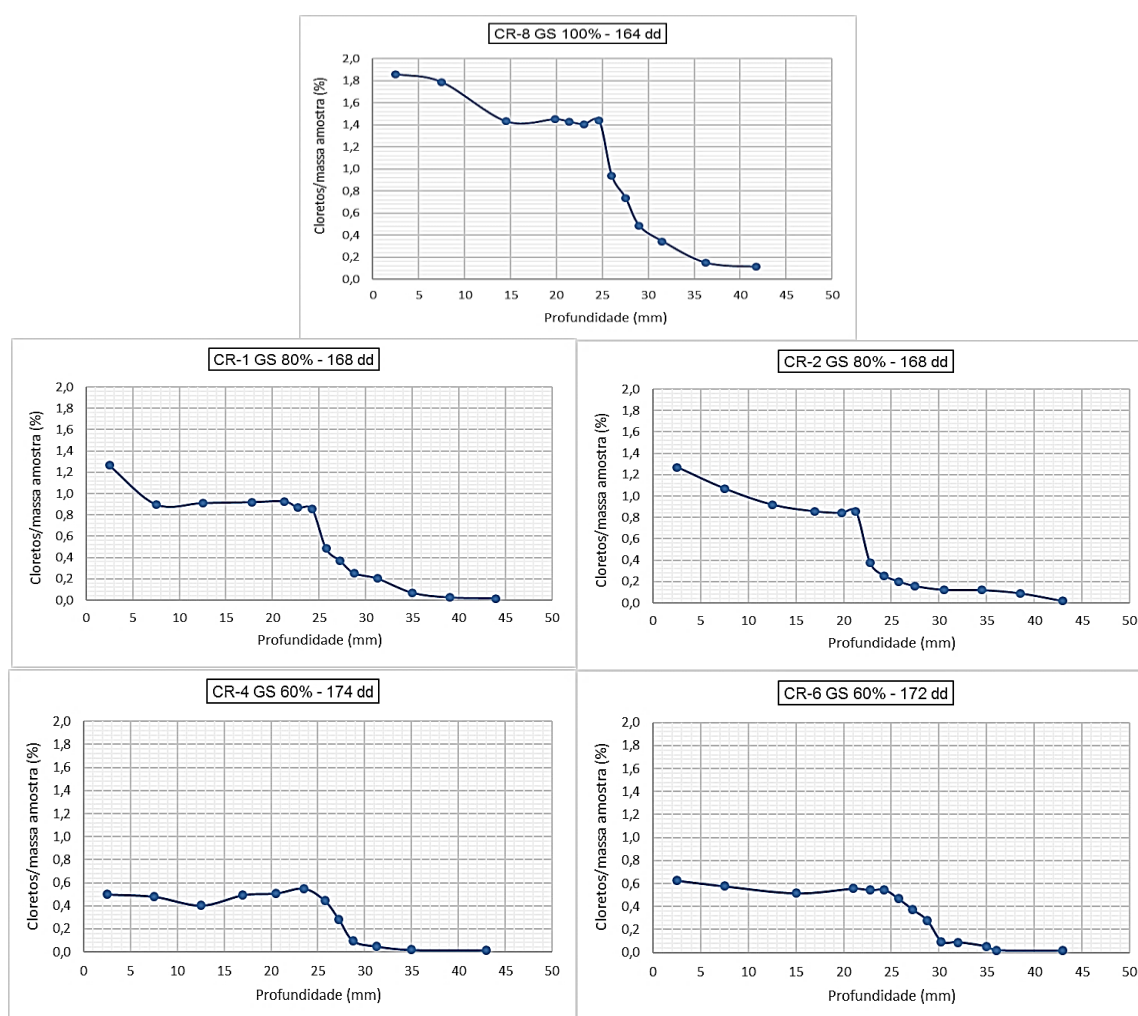


Figura 112 – Gráfico dos perfis de cloretos CPs tipo CR, para vários valores de GS.
Fonte: Autor.

Na análise dos perfis apresentados na figura 112, verifica-se as seguintes situações:

- a) as concentrações de cloretos na parte do revestimento são maiores em relação aos CPs tipo ARG50, pois o concreto tendo uma porosidade menor do que a argamassa faz com que os cloretos ao chegarem no concreto tendem a penetrar com menor velocidade, ocasionando um certo “entupimento” na zona de interface entre a argamassa e o concreto. E por isso nas últimas camadas antes da interface há uma certa variação para maior dos teores. Malheiros *et al.*, (2011) em pesquisa utilizando ensaios acelerados de difusão com variação do traço da argamassa e dentre eles, traço similar a esse estudo e com a mesma espessura de revestimento, obteve perfis similares onde enfatizou o acúmulo de íons cloreto na região anterior à interface entre os dois materiais e que após essa interface ocorria uma redução na concentração de cloretos;
- b) o perfil no lado do revestimento mostra-se mais “horizontal”, ou seja há alguma variação nos teores, e essa variação vai diminuindo a medida que decresce o GS e isso é compatível pois há menos umidade menos difusão;
- c) comparando esses perfis com os perfis obtidos para os CPs de concreto (figura 109), verifica-se que há uma diminuição da concentração de cloretos para o concreto, sugerindo assim, que pode haver um retardo no transporte de cloretos no concreto. Embora, isso deve ser verificado com outras argamassas, onde varia tipos de aglomerantes, traço e espessura. No Capítulo 2, item 2.1.2.2.3, p.52, é citada a Norma Espanhola EHE-08 (AENOR, 2008) onde preconiza que pode haver uma diminuição no cobrimento da armadura quando, em concreto revestido com argamassa, esta conter algumas características especificadas em norma. A figura 113, mostra um gráfico elaborado por Malheiro *et al.*, (2011) que relaciona o perfil de cloretos para concreto revestido e não revestido após a interface com a argamassa (lado do concreto). E, a figura 114 mostra gráfico similar, com os dados desta pesquisa, com as variações do GS.

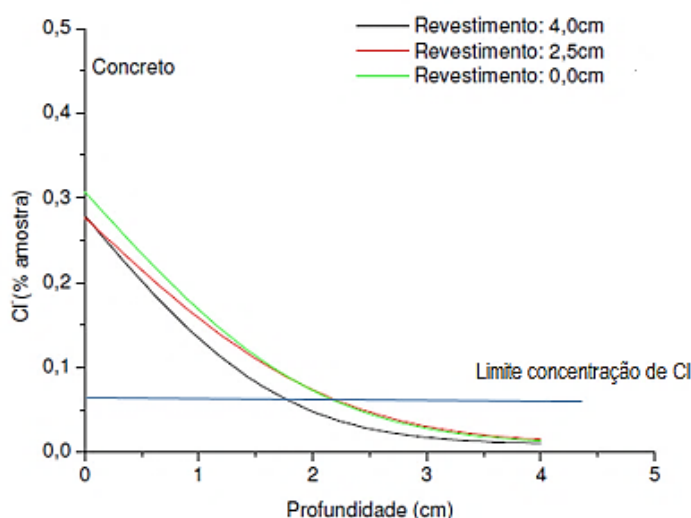


Figura 113 – Gráfico dos perfis de cloretos no concreto para corpos de prova com revestimento de espessuras de diferentes e sem revestimento.
Fonte: Malheiro *et al.* (2011).

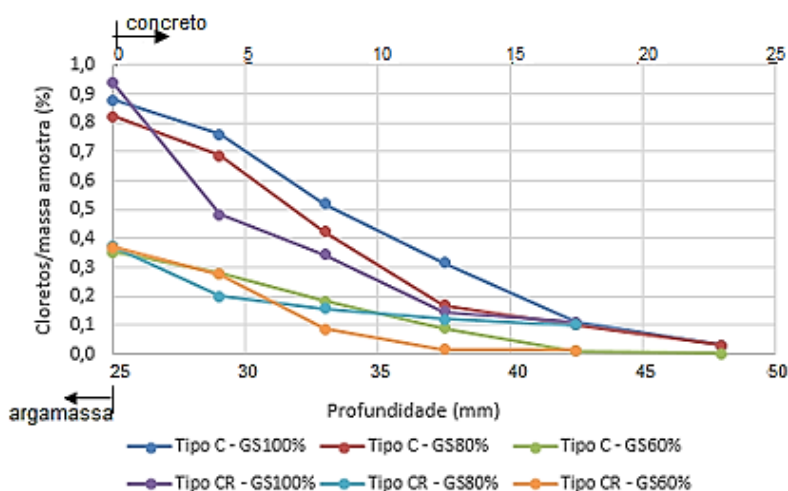


Figura 114 – Gráfico dos perfis de cloretos no concreto para corpos de prova com revestimento e sem revestimento, com variação do GS.
Fonte: Autor.

No gráfico da figura 114 evidencia-se a contribuição do revestimento de argamassa na redução da concentração de íons cloreto no concreto. Os concretos sem revestimentos, com exceção do concreto com GS de 60%, tiveram maiores concentrações. Naqueles revestidos, com exceção do CR – GS100%, obtiveram concentrações menores de todos os demais exceto o concreto de 60% de GS. Uma das causas mais prováveis da amostra de concreto revestido, com GS de 100%,

apresentar maior concentração do que seus pares com menor GS, foi de que a fonte de NaCl esgotou-se durante todo o processo de difusão.

Logo, este gráfico, além de mostrar a influência do grau de saturação, também, demonstra que o revestimento de argamassa pode influenciar nos teores de concentração dos íons cloreto.

A figura 115 a seguir, exhibe os perfis de teores de cloreto para os CPs tipo CR com idade superior àqueles apresentados na figura 112. Estes CPs ficaram acondicionados em processo de difusão por cerca de 280 dias com o propósito de verificar a evolução das concentrações dos cloretos ao longo do tempo.

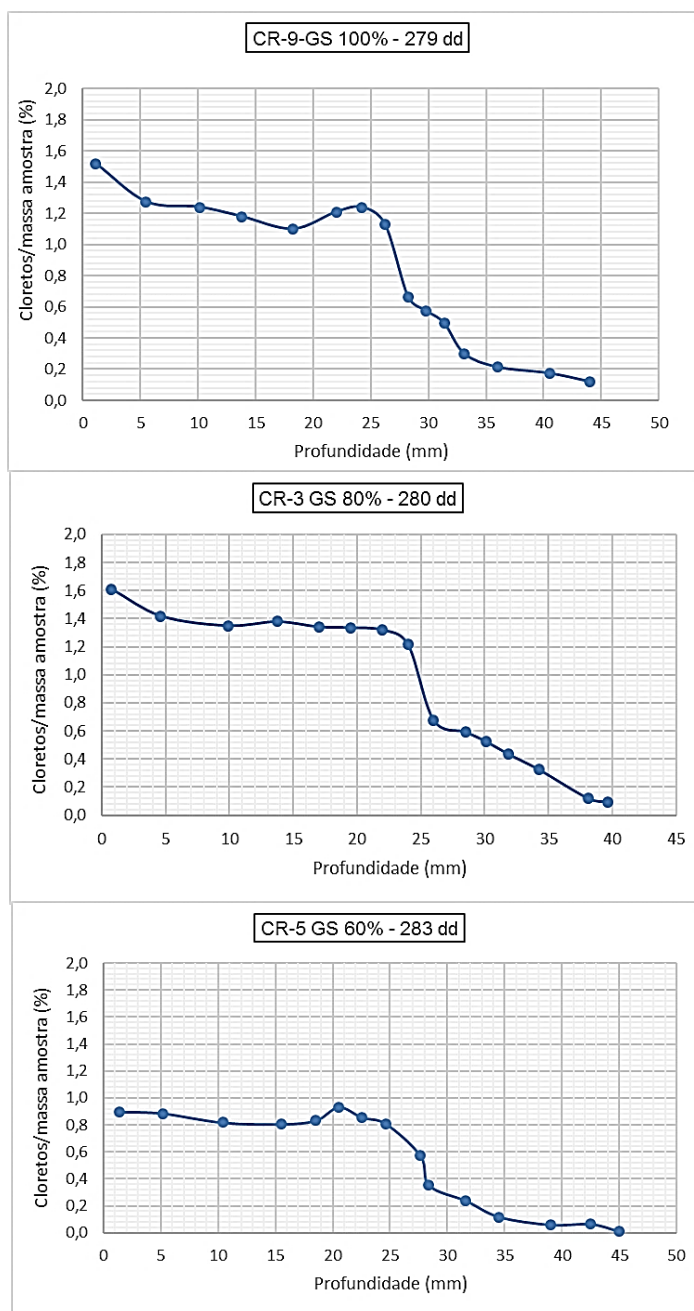


Figura 115 – Gráfico dos perfis de cloritos CPs tipo CR, para vários valores de GS, com 280 dias de difusão.

Fonte: Autor

Para uma melhor análise dos efeitos dessa diferença de idade da difusão a figura 116 mostra em um mesmo gráfico as concentrações de cloritos nos CPs com idades diferentes, na parte do concreto.

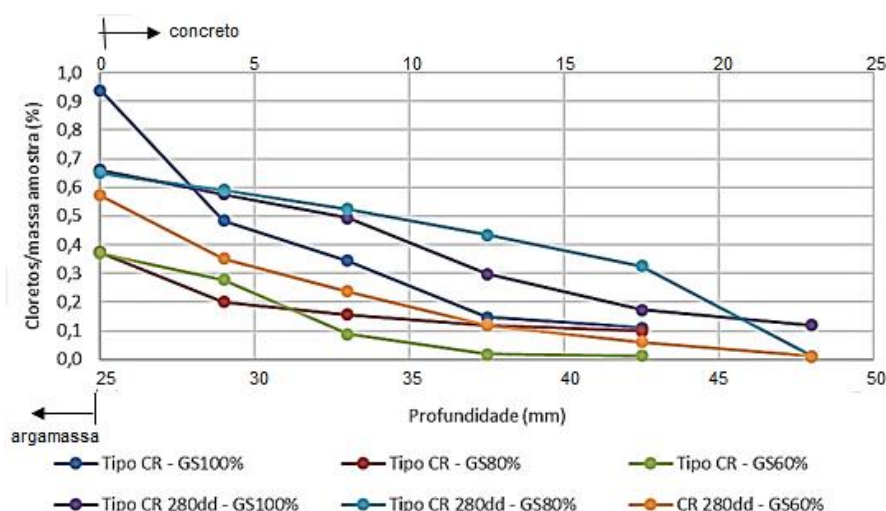


Figura 116 – Gráfico dos perfis de Cloretos no concreto para CPs tipo CR de idades diferentes, com variação do GS.

Fonte: Autor.

No gráfico da figura 116, observa-se que todas as amostras obtiveram acréscimos de valores nas concentrações, em relação à idade menor. Para o GS de 100% houve decréscimo na interface com a argamassa, isso pode ser devido ao esgotamento da fonte de cloreto de sódio, ao término do período de difusão estes CPs não apresentaram nenhum resíduo de sal na superfície.

Pode-se também, ao verificar as informações que este gráfico revela, reafirmar o escrito na alínea “c” (item 5.2.3, p. 219), de que há uma proposta de retardo do fluxo de cloretos no concreto revestido, no entanto, com 280 dias para GS de 100% e 80% a concentração está acima do limite de cloretos (0,07 % em relação massa amostra) com 20 mm adentro ao concreto.

Porém, como esta pesquisa adotou traços de argamassa e concreto relativamente permeáveis, tendo com propósito principal de investigar a metodologia de pesquisa na composição com dois materiais diferentes, essas considerações não invalidam a evidência de que há alguma mudança para melhor quando se tem as estruturas de concreto revestidas com argamassa.

5.3 Coeficientes de Difusão (D) e Concentração Superficial (C_s)

5.3.1 Ajustes dos Perfis dos teores de cloretos

As figuras 117, 118, 119 e 120 mostram os gráficos obtidos pela modelagem para ajuste dos perfis de concentração de cloretos e, assim, determinar o coeficiente de difusão (D) e a concentração inicial (C_s).

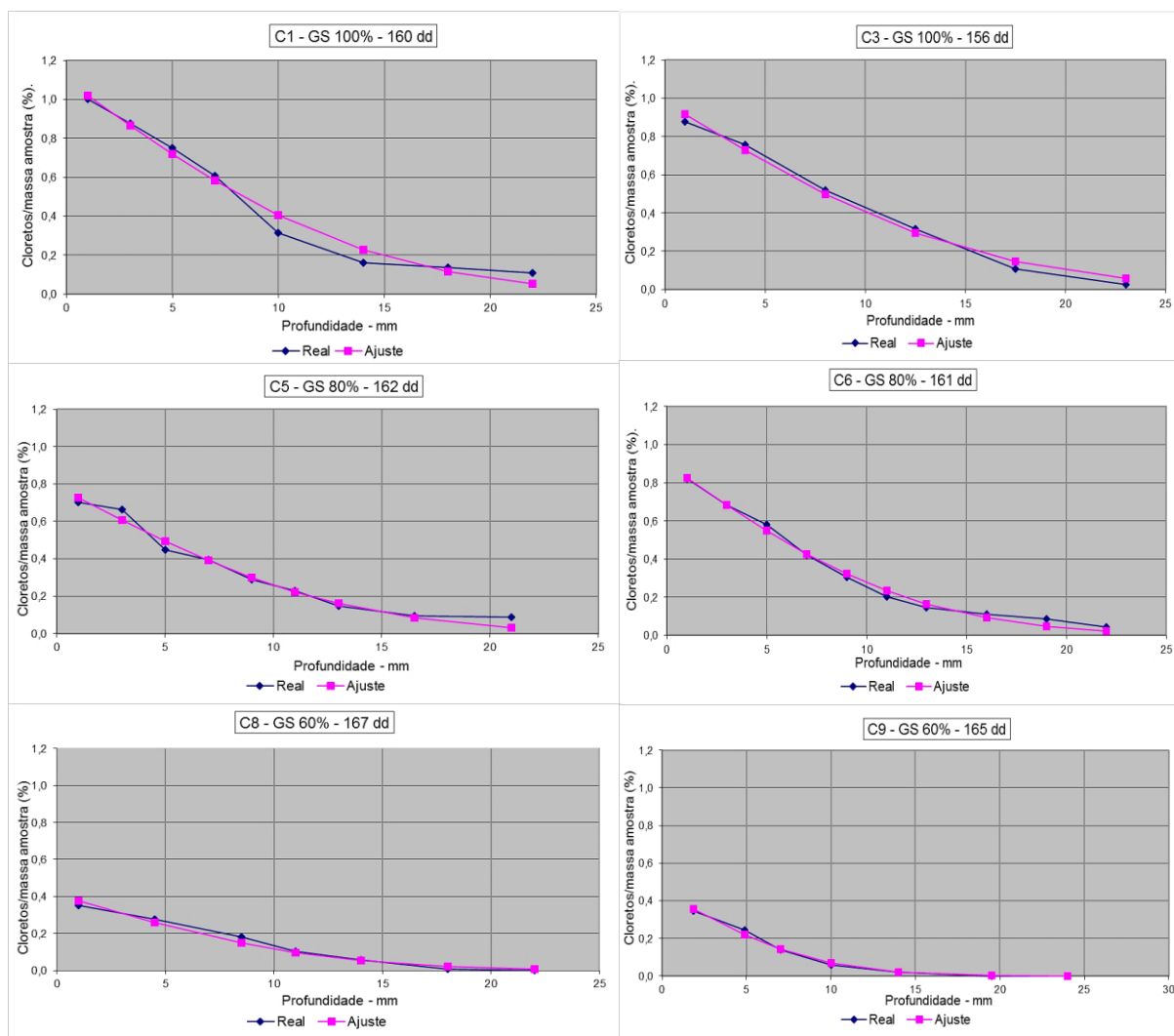


Figura 117 – Gráficos dos perfis de cloretos após ajuste em CPs de concreto.
Fonte: Autor.

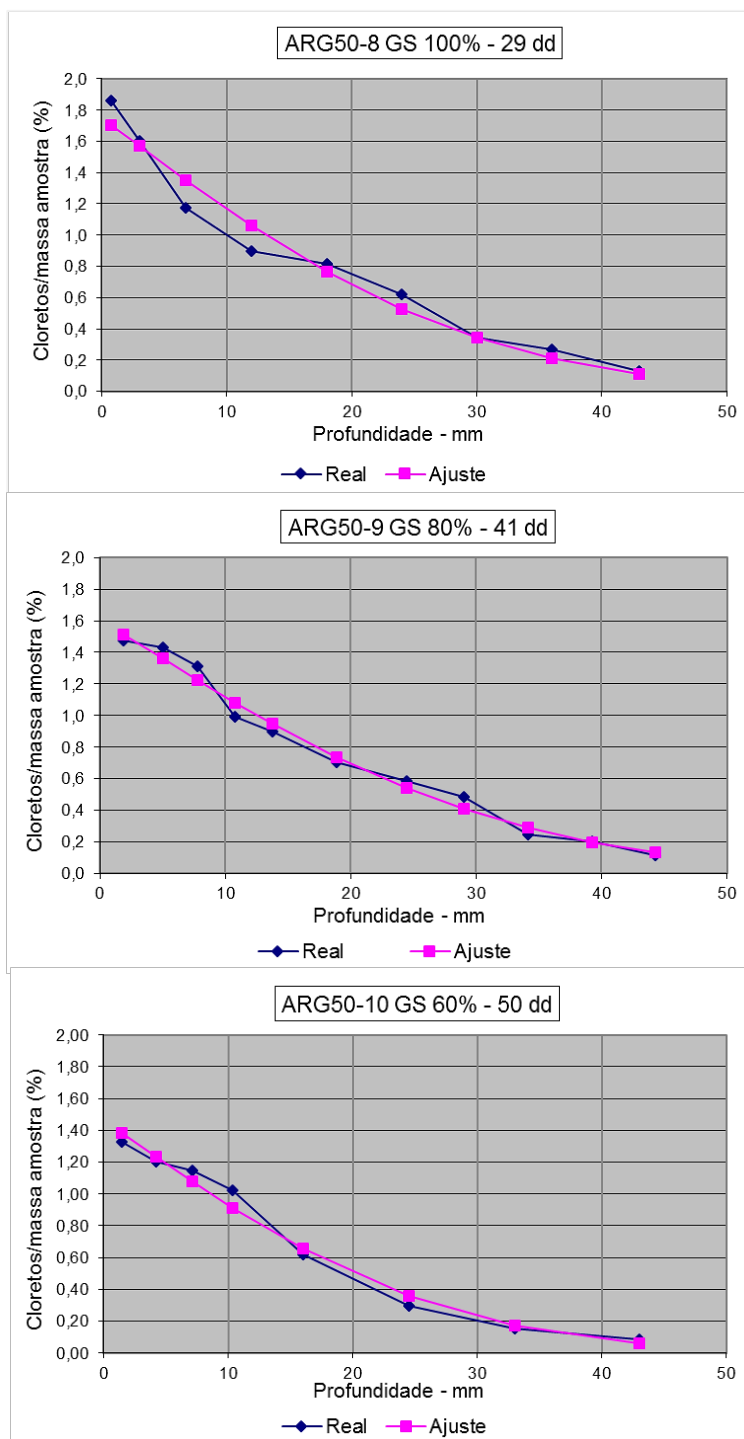


Figura 118 – Gráficos dos perfis de cloretos após ajuste em CPs de argamassa.
Fonte: Autor.

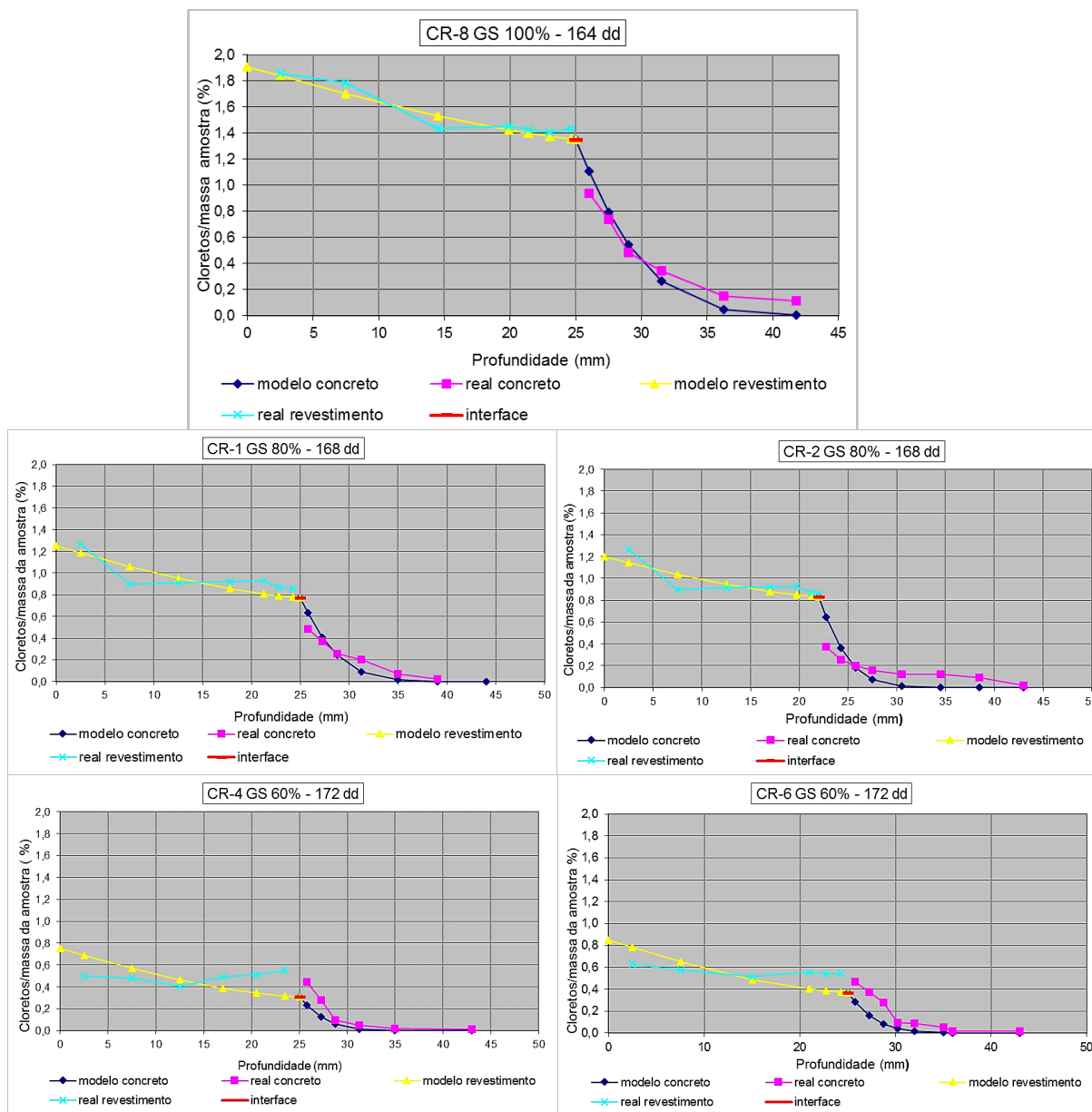


Figura 119 – Gráfico dos perfis de cloretos com aplicação da modelagem em CPs de concreto revestido.

Fonte: Autor.

Na figura 119, acima, para o GS de 100% consta apenas um gráfico pois embora, tenha sido determinado os perfis em outra amostra com o mesmo GS, o perfil foi descartado já que mostrou resultados incompatíveis com as demais amostras.

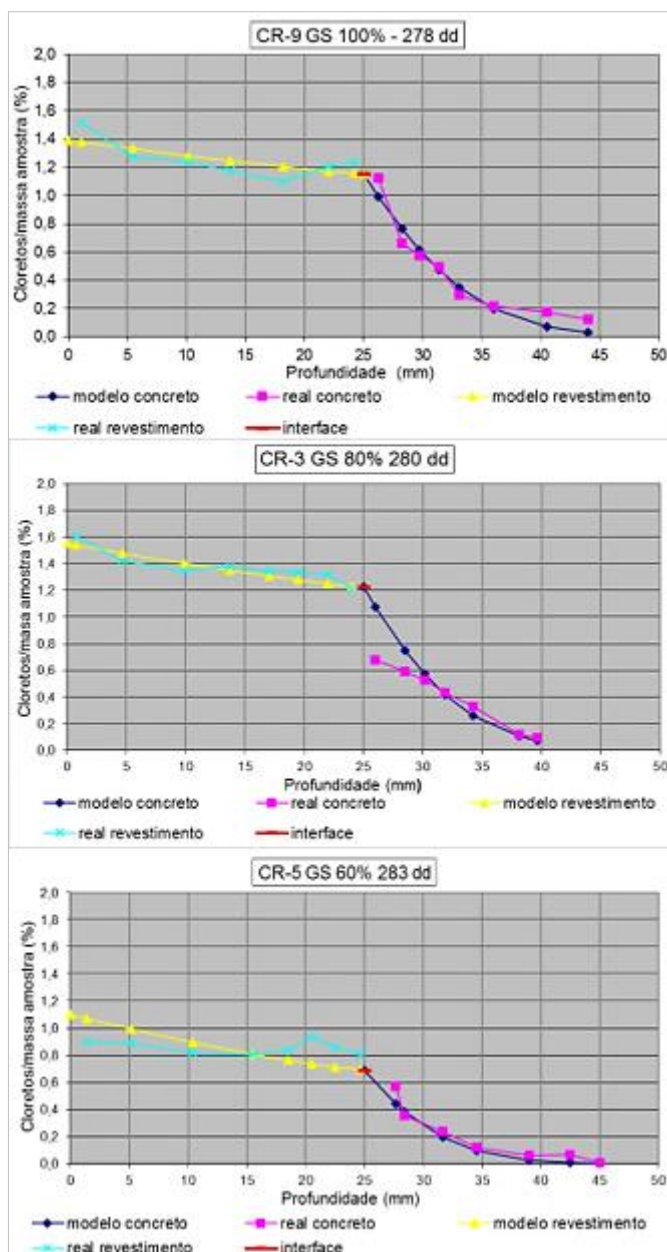


Figura 120 – Gráficos dos perfis de cloretos com aplicação da modelagem em CPs de concreto revestido com idade de difusão de 280 dias.

Fonte: Autor.

5.3.2 Valores de D e C_s para CPs de concreto e CPs de argamassa

A partir dos ajustes nos perfis de concentração de cloretos, são determinados os valores do coeficiente de difusão (D) e da concentração superficial (C_s).

O quadro 5 apresenta os valores obtidos de D e C_s para os CPs de concreto e CPs de argamassa.

Quadro 5 - Valores de D, C_s, D_m médio; D/D_{máx} e G_s médio em CPs tipo ARG e C.

Tipo CP	Tempo (dd)	C _s	D (10 ⁻⁶ mm ² /s)		D (mm ² /ano)		D/D _{máx}	G _s médio (%)
		(%mas amost)	D	D _m	D	D _m		
ARG50-8	28	1,75	111,35	111,35	3513,71	3513,71	1	100
ARG50-9	40	1,61	93,62	93,62	2954,52	2954,52	0,84	82
ARG50-10	50	1,47	50,89	50,89	1606,06	1606,06	0,46	63
C-3	156	0,98	5,46	4,97	172,45	156,69	1	100
C-1	160	1,10	4,47		140,93			
C-5	162	0,79	3,75	3,59	118,23	113,41	0,72	83
C-6	161	0,90	3,44		108,58			
C-9	167	0,45	1,79	2,39	56,37	75,63	0,48	61
C-8	162	0,41	3,00		94,89			

Fonte: Autor.

No quadro 5 as grandezas que constam são:

- tempo: tempo de duração da difusão dos cloretos pela amostra;
- C_s: concentração inicial;
- D: coeficiente de difusão;
- D_m: média dos valores do coeficiente de difusão de cada amostra;
- D/D_{máx}: relação entre o coeficiente de difusão médio de cada GS e o coeficiente de difusão para GS de 100%;
- G_s médio: grau de saturação durante processo de difusão, dado pela média entre o GS do início do processo e o GS do fim.

Observa-se no quadro 5 uma ampla diferença nos coeficientes de difusão dos CPs de argamassa para os CPs de concreto. Nas amostras saturadas tem-se uma diferença de cerca de 22 vezes maior, para GS de 80% tem-se 26 vezes e GS de 60% cerca de 21 vezes maior. Demonstra essas relações a diferença microporosa entre os materiais, já verificado nos ensaios com o GS, o que comprova a eficácia dos ensaios.

Os valores obtidos para o coeficiente de difusão das amostras de concreto (C) são melhores aos obtidos por Rodrigues (2009) no concreto, cujo traço e tipo de cimento são os mesmos desta pesquisa, embora o cimento utilizado neste estudo tenha apresentado algumas propriedades físicas melhores. Isto leva-se a crer, pelos resultados, que é um cimento de melhor qualidade. O mesmo se deu com os resultados obtidos por Bandeira (2015), que utilizou cimento tipo ARI-RS, de

fabricação espanhola, com resistência superior ao cimento brasileiro, utilizado nesta pesquisa. No quadro 6 é apresentado quadro comparativo entre esta pesquisa e as citadas acima.

Quadro 6 - Resultados dos ensaios de difusão desta e de outras pesquisas.

Pesquisa	Tempo (dd)	Cs	D ($10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$)	D/Dmáx	GS médio (%)
		(%mas amost)	Dm		
M1	31	1,20	23,9	1	100
M1	65	0,69	8,73	0,37	71,4
M1	107	0,55	2,56	0,11	54,6
H1	8	0,60	13,39	1	100
H1	16	1,03	7,52	0,56	92,0
H1	21	1,02	5,36	0,40	75,0
C	158	1,00	4,97	1,00	100
C	161	0,85	3,59	0,72	83
C	165	0,44	2,39	0,48	61

Fonte: Autor.

No quadro 6, M1 representa as amostras do estudo de Bandeira (2015), H1 as amostras do estudo de Rodrigues (2009) e C, as amostras deste estudo.

Comparando as três pesquisas vê-se que, ainda que tenham utilizado o mesmo tipo de cimento, mas com diferenças nas características físicas, verifica-se que para esta pesquisa no GS 100% o coeficiente de difusão é cerca de 2,7 vezes menor do que H1 e cerca de 4,8 vezes menor do que M1. Para GS de 80%, interpolando os valores do GS para as outras pesquisas, também se obtém os seguintes valores: 1,9 vezes menor do que H1 e 3,8 vezes menor do que M1. Em GS igual a 60%, interpolando também, tem-se a seguinte relação: 1,7 vezes menor do que H1 e 1,9 vezes menor do que M1. Ou seja, em todos níveis de saturação o concreto desta pesquisa teve desempenho superior em relação aos demais estudos, fato que pode ser atribuído a uma possível melhora do cimento.

5.3.3 Valores de D e C_s para CPs de concreto revestido

5.3.3.1 Valores de D a partir da correlação com GS

A partir dos valores do coeficiente de difusão médio (D_m) e GS médio dos CPs tipo argamassa pura (ARG) e concreto puro (C), mostrados no quadro 5 (item 5.3.2, p. 229), foi elaborado gráfico da relação $D \times GS$. As figuras 121 e 122 mostram estes gráficos.

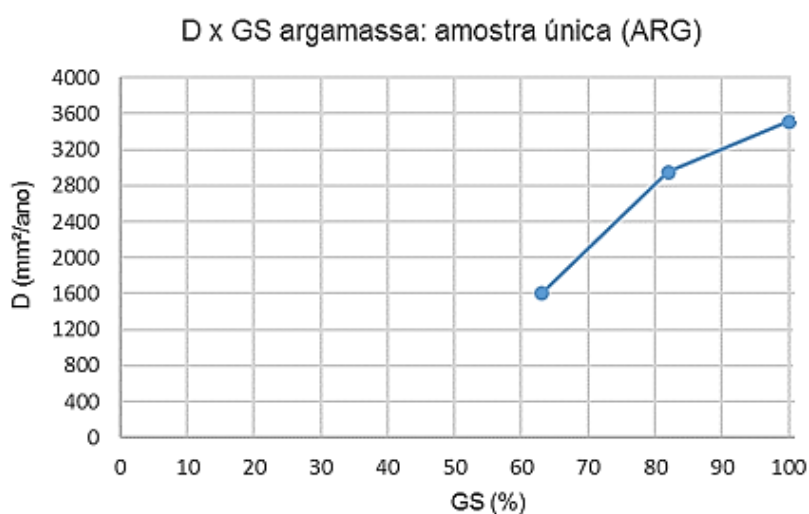


Figura 121 – Gráfico da relação de $D \times GS$ argamassa, amostra pura (ARG).
Fonte: Autor.

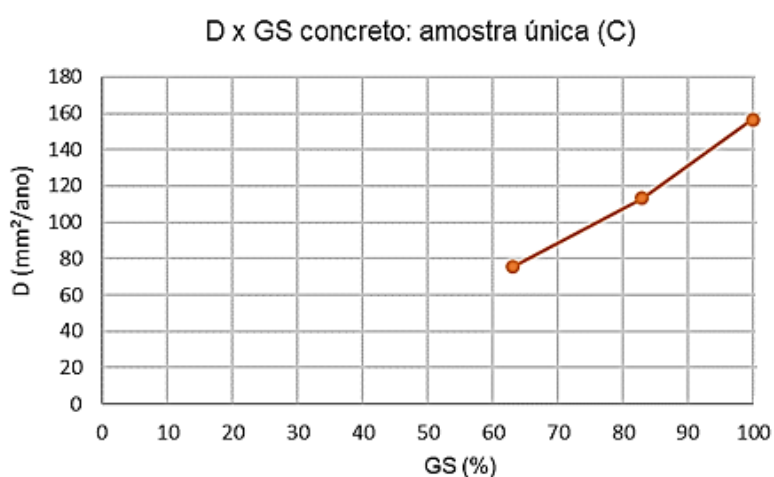


Figura 122 – Gráfico da relação de $D \times GS$ concreto, amostra pura (C).
Fonte: Autor.

No item 5.1.2, p. 210, foram determinados os GS da argamassa e do concreto quando integrantes do sistema revestimento/concreto (CPs tipo CR). Com os valores

de GS obtidos e mostrados nos gráficos das figuras 105 e 106 para GS proposto de 80% e nos gráficos das figuras 107 e 108 para GS proposto de 60%, insere-se, nos gráficos das figuras acima (121 e 122) para cada tipo, obtendo-se por interpolação, o coeficiente de difusão (D) de cada parte integrante do corpo de prova de concreto revestido, considerando o GS.

Os valores inseridos nos gráficos são:

- a) para a argamassa GS obtido de 70%, tem-se interpolando $D = 2100,0 \text{ mm}^2/\text{ano}$;
- b) para o concreto GS obtido de 92%, tem-se na interpolação $D = 136,0 \text{ mm}^2/\text{ano}$ e para GS obtido de 81%, na interpolação $D = 108,0 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

Os gráficos das figuras 123 e 124 mostram esses valores obtidos.

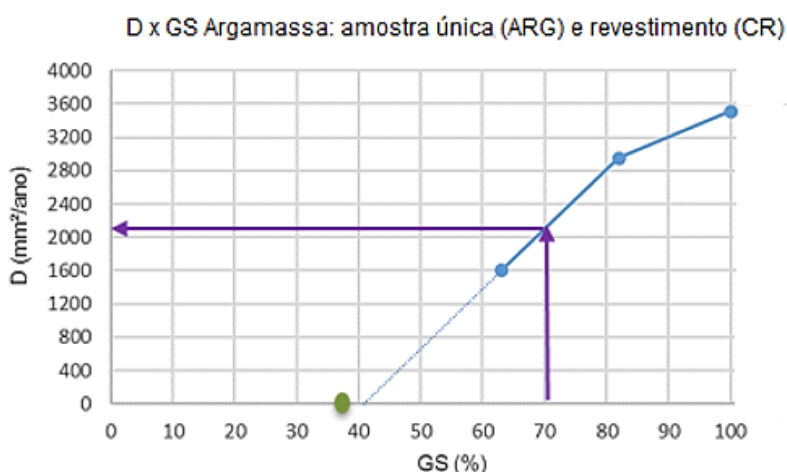


Figura 123 – Gráfico D e GS para amostra de argamassa integrante de (CR).
Fonte: Autor.

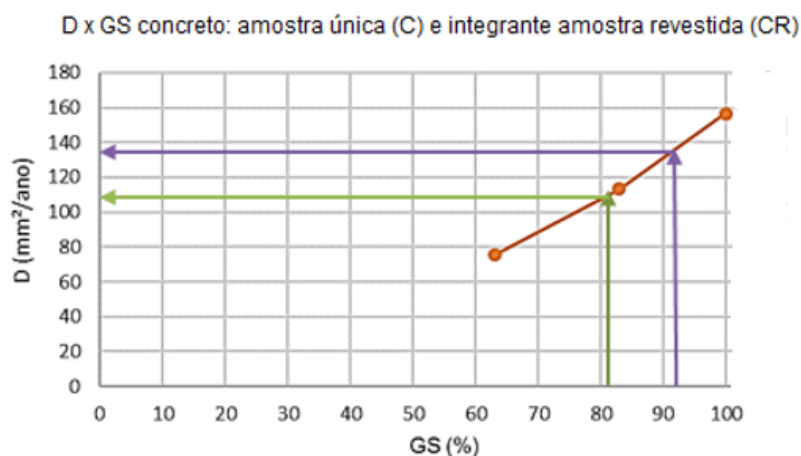


Figura 124 – Gráfico D x GS para amostra de concreto integrante de (CR).
Fonte: Autor.

Verifica-se no gráfico da figura 123 que na condição de GS 60% para corpo de prova de concreto revestido, o GS obtido para a argamassa foi de 36%. Um prolongamento da curva, na forma como está no gráfico não é o mais correto, logo, não se tem como precisar o D da argamassa quando a amostra revestimento/concreto estiver na condição de GS 60%. Neste caso seria necessário estabelecer GS menores para os CPs de argamassa e assim obter a curva mais completa.

5.3.3.2 Valores de D e C_s a partir do modelo matemático

No quadro 7 estão os valores obtidos na aplicação do modelo matemático nos perfis. A partir dos dados desse quadro, pode-se observar várias questões relativas ao coeficiente de difusão da argamassa e do concreto e relações com os materiais atuando de forma única.

Quadro 7 - Valores de D , C_s e demais relações com os coeficientes de difusão em CPs tipo CR.

Tipo CP	Coef. Difusão Modelo (mm ² /ano)		Relações Modelo D1/D2	Coef. Difusão médio		Relaç. Ensaios-modelos		Relações Ensaios (CR) Darg / Dconc CR	Cs Modelo
	D1	D2		Argamassa (CR)	Concreto (CR)	Darg CR / D1	Dconc CR / D2		
CR-8 100%	1210	53	22,8	3513,7	156,7	2,9	3,0	22,4	1,91
CR-9 100% 278 dd	1200	65	18,5			2,9	2,4		1,39
CR-1 80%	900	35	25,7	2100,0	136,0	2,5	4,2	15,4	1,25
CR-2 80%	800	30	26,7						1,20
CR-3 80% 280 dd	1000	58	17,2			2,1	2,3		1,55
CR-4 60%	500	22	22,7	-	108,0	-	4,6	-	0,75
CR-6 60%	530	25	21,2						0,85
CR-5 60% 283 dd	600	50	12,0				2,2		1,10

Fonte: Autor.

São identificadas as conotações a seguir:

- D1 = coeficiente de difusão no revestimento, definido no modelo matemático;
- D2 = coeficiente de difusão no concreto, definido no modelo matemático;
- D arg CR = coeficiente de difusão no revestimento, definido na correlação com GS do conjunto argamassa/concreto;
- D con CR = coeficiente de difusão no concreto, definido na correlação com o GS do conjunto argamassa/concreto;
- C_s modelo = concentração superficial do sistema revestimento/concreto, obtida no modelo matemático.

A partir das relações de D evidenciadas no quadro 7, buscou-se obter alguma conexão com os valores do coeficiente de difusão da argamassa e concreto, obtidos no modelo matemático, com os valores da argamassa e do concreto na forma separada.

Observou-se no quadro 7 que as relações obtidas, como $D1/D2$ no modelo, tem uma certa ordem de grandeza entre elas para os GS, isto é, um valor que fica no redor de duas dezenas, mas que cai para em torno de 1 (uma) dezena nas amostras com tempo maior de difusão.

Para a relação $D \text{ arg CR} / D1$, verificou-se uma certa ordem de grandeza com valores em torno de 3, com GS de 100% e cerca de 2,5 com GS de 80%, ou seja, o coeficiente de difusão da argamassa é aproximadamente o triplo do coeficiente de difusão determinado no modelo matemático, e isto verificou-se nas duas idades, com uma pequena redução na idade maior.

Já, para a relação $D \text{ Con CR} / D2$, os valores se apresentaram próximos a 3 na condição de GS 100%, cerca de 4 para GS 80% e GS 60%, na idade maior as relações para todos os GS foi cerca de 2,3 na média.

A figura 125 mostra gráfico ilustrando essas relações.

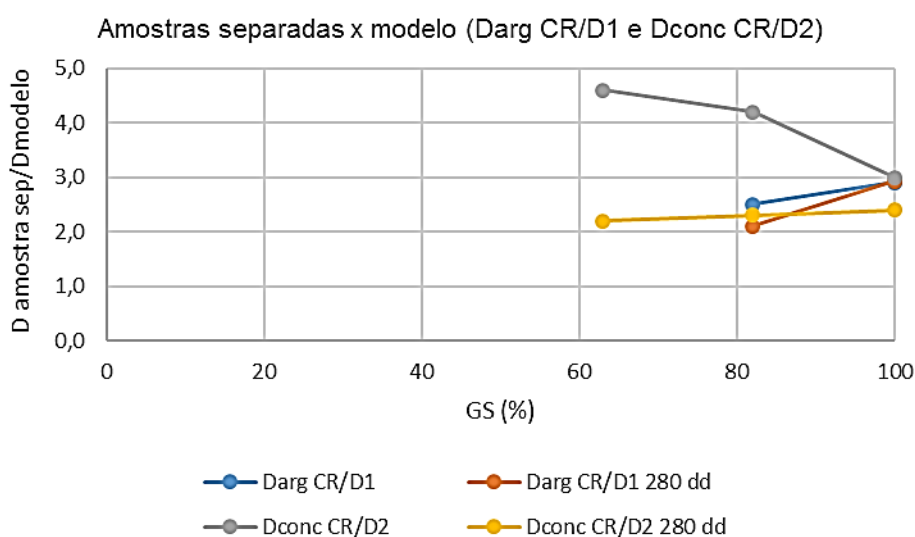


Figura 125 – Gráfico da relação de D1 e D2 do modelo e dos materiais separados.
Fonte: Autor.

Verificando o gráfico da figura 125, identifica-se as relações tendendo a convergir no GS 100%, praticamente nas duas idades avaliadas. Para GS 80%, houve uma certa convergência, com exceção do concreto de menos idade. Mas, um dado interessante pois ficou a relação entre 3 e 2, nas faixas de GS 100 a 80%, exceto o

concreto com menos idade. No GS 60%, pode-se avaliar somente o concreto e as relações não são convergentes nas duas idades.

As figuras 126 e 127 mostram gráficos com os valores do coeficiente de difusão para a argamassa e o concreto, respectivamente, na condição separados do sistema revestimento/concreto e os valores obtidos no modelo para cada material.

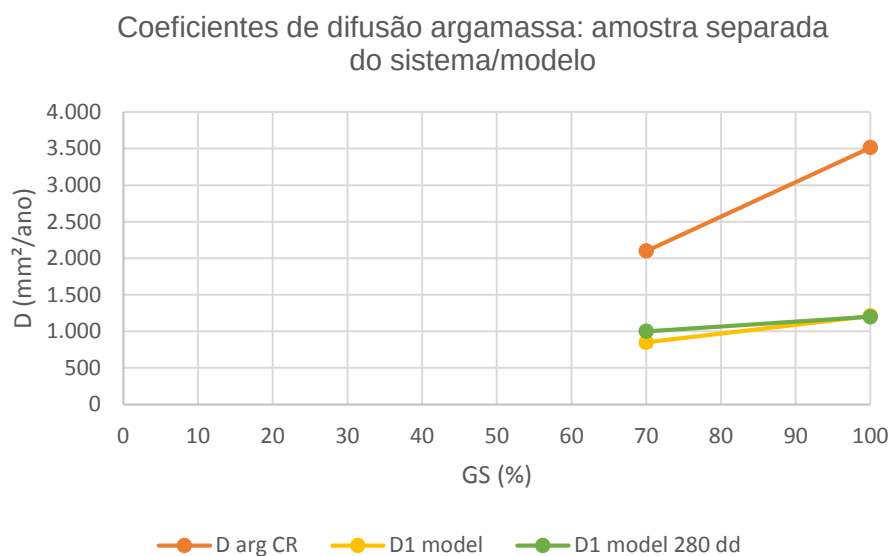


Figura 126 – Gráfico do coeficiente de difusão, em relação ao GS, para a argamassa na condição separada do sistema revestimento/concreto e no modelo (D1).

Fonte: Autor.

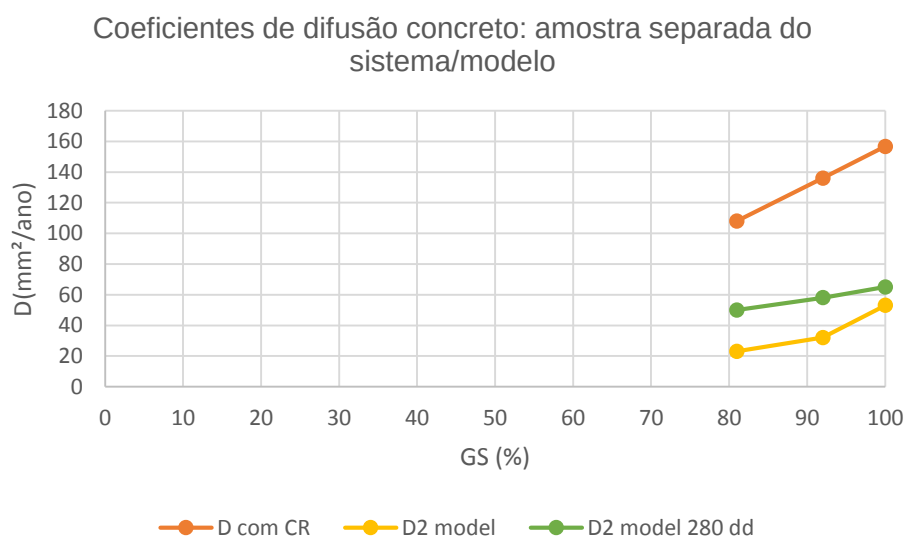


Figura 127 – Gráfico do coeficiente de difusão, em relação ao GS, para o concreto na condição separado do sistema revestimento/concreto e no modelo (D2).

Fonte: Autor.

De outra forma, os gráficos das figuras 126 e 127, mostram as diferenças entre o coeficiente de difusão da amostra separada do sistema revestimento/concreto e o valor na aplicação do modelo e expostas no quadro 7. Na argamassa verificou-se uma certa concordância do modelo para as duas idades, sendo praticamente iguais em GS 100%. Diferentemente do concreto, embora neste, haja uma certa tendência de concordância para GS 100%, ou seja, como mostrado no gráfico da figura 125.

5.4 Previsão da frente de cloretos em tempos variados

O modelo matemático adotado tem como uma das variáveis o tempo de difusão. Portanto, na intenção de verificar o próprio modelo como ferramenta de previsão de vida útil, variou-se o tempo a partir do perfil modelado para as amostras com 280 dias de difusão e obteve-se as previsões de perfil de cloretos para até 50 anos de vida da estrutura de concreto revestido, em função do GS.

A modelagem se deu a partir dessa idade de difusão porque os perfis de ajuste no modelo tiveram melhor refinamento, em todos os valores de GS, comparados aos perfis para tempo de difusão de cerca de 160 dias (figuras 118 e 119, item 5.3.1, p. 225).

O modelo matemático utilizado tem algumas condições de contorno entre as quais a fixação das concentrações superficiais (C_s) ao longo do tempo, considerando nesse caso a fonte inesgotável de cloreto.

Outrossim, as estruturas localizadas em ambientes marítimos, podem em algum momento estarem mais sujeitas aos cloretos do que em outros ambientes. No entanto, Gjrv (2015) em medições de penetração de cloretos em grande número de estruturas ao longo da costa norueguesa, concluiu que o C_s tende a estabilizar após um tempo de exposição em valores bem razoáveis, fazendo com que possa ser utilizado como parâmetro de entrada constante para um dado ambiente. A afirmação do autor converge ao proposto pelo modelo adotado nesse trabalho, que considera C_s constante no tempo.

Para que seja simulado um ambiente real, utilizou-se valores de C_s de acordo com aqueles estabelecidos pela norma japonesa, já citada (item 2.2.3.3, p. 85), Concrete Standard Especifications, (JSCE, 1999) e cujos valores são similares aos obtidos por Nunes (2006) e Guimarães *et al.* (2007) em estruturas existentes.

Simulou-se dois ambientes: um para estruturas de concreto situadas à beira mar (situação de construções junto ao cais) e outro, para construções situadas a 100m da costa. (construções retroportuárias ou prédios em avenidas à beira mar). Para esses dois casos a norma estipula C_s de 0,41 e 0,21 (%cloretos/massa material), respectivamente. O teor máximo de cloretos máximo foi considerado de 0,07 (%cloretos/massa do material) e como cobrimento 40mm, que é o preconizado para este tipo de ambiente na norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

As figuras 128 e 129 mostram os gráficos do modelo, considerando a variação do GS e os posicionamentos do limite máximo de cloretos (0,07) e cobrimento de 40mm.

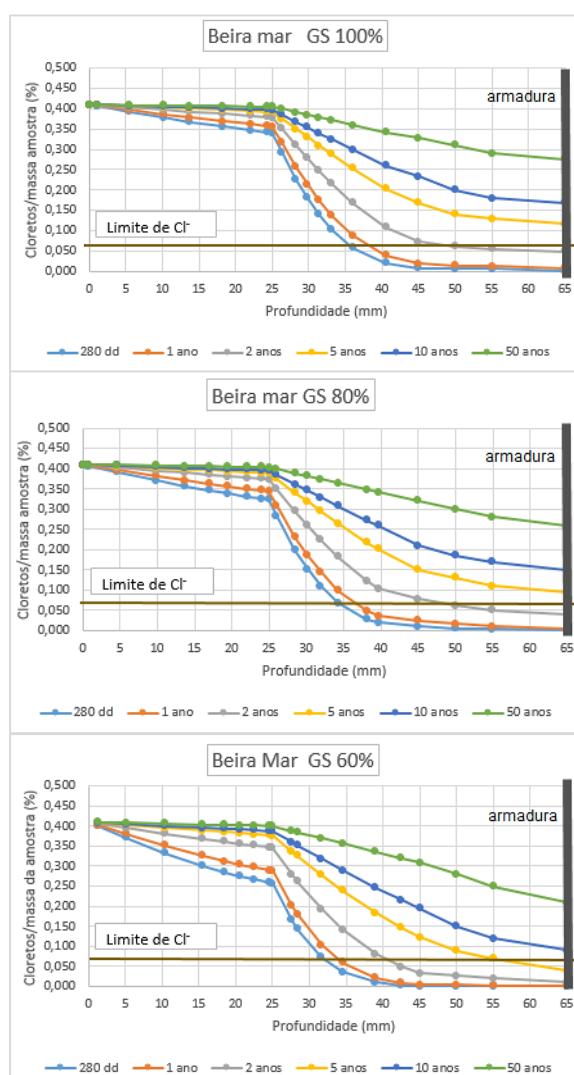


Figura 128 – Gráficos dos modelos de previsão da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto revestido com argamassa, considerando a variação do GS, localizadas à beira mar.

Fonte: Autor.

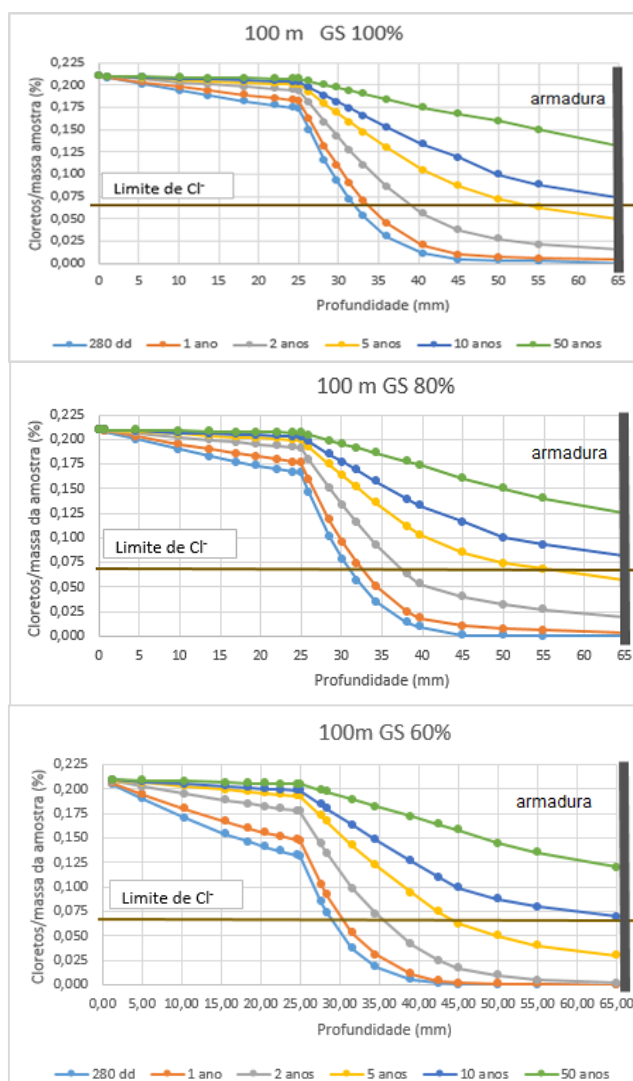


Figura 129 – Gráficos dos modelos de previsão da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto revestido com argamassa, considerando a variação do GS, localizadas a 100m da costa.

Fonte: Autor.

Analisando o gráfico da figura 128, verificou-se que entre 2 e 5 anos o teor de cloretos máximo terá atingido a armadura para GS de 80% e entre 5 e 10 anos na condição de GS 60%.

Na figura 129, para as estruturas situadas a 100m da costa, tem-se que para GS 80%, o teor acima do limite em idade entre 5 anos e 10 anos. Na condição para GS de 60% em idade superior a 10 anos.

A tabela 25 apresenta os valores exatos do tempo que levará para que seja ultrapassado o valor mínimo de cloretos na armadura, para cada GS e nas duas situações de localização das estruturas. Para a elaboração desta tabela foi simulado no modelo matemático adotado neste trabalho a condição da concentração igual a

0,07 na profundidade de 65mm (25mm de revestimento de argamassa e 40mm de concreto) e utilizando o C_s estabelecido na norma japonesa.

Tabela 25 – Previsão de vida útil para concreto armado revestido

GS	Beira mar C_s 0,41	
	Tempo (anos)	Profundidade (mm)
100	2,9	65
80	3,6	65
60	7,8	65
100m – C_s 0,21		
100	9,2	65
80	7,7	65
60	10,0	65

Fonte. Autor

Embora não seja o objetivo desta pesquisa, pelos resultados apresentados na tabela 25, se observa que o concreto utilizado nesta pesquisa não é compatível para ambientes marítimos, tanto em termos de tipo de cimento como na relação a/c. Estes resultados são compatíveis com os resultados obtidos por Rodrigues (2009) para o mesmo traço H1.

A tabela 26 apresenta valores obtidos nos gráficos das figuras 128 e 129, para a concentração de cloretos na interface argamassa e concreto entre 2 e 10 anos.

Tabela 26 – Concentração de cloretos na interface argamassa-concreto

GS (%)	Beira mar – $C_s = 0,41$		
	Concentração Cl^- na interface		
	2 anos	5 anos	10 anos
100	0,38	0,39	0,40
80	0,37	0,39	0,40
60	0,35	0,38	0,39
100m – $C_s = 0,21$			
100	0,19	0,20	0,20
80	0,19	0,20	0,20
60	0,18	0,19	0,20

Fonte. Autor

Com os valores apresentados na tabela 26, observou-se que os valores da concentração de cloretos, na interface com o concreto, se aproximam entre 5 e 10 anos do mesmo valor da concentração na superfície da argamassa, ou seja, o mesmo valor de C_s . Até esse tempo, a argamassa exerceu uma certa resistência aos cloretos, diminuindo as concentrações no concreto. Isto, de outra forma, foi mostrado na figura 113, (item 5.2.3, p.219).

A linha praticamente horizontal formada na argamassa, a partir dos 5 anos, foi verificada durante o desenvolvimento experimental. Na determinação dos perfis de cloreto para as amostras de argamassa pura (ARG) com idade de contaminação de 160 dias, apresentaram essa linha quase que horizontal, ao longo de toda espessura de material extraído.

Neste caso, compondo com o concreto, este se tornou uma barreira, devido a porosidade do concreto ser menor, logo o perfil “mais horizontal” leva mais tempo para acontecer.

A situação de “horizontalidade” do perfil na argamassa de revestimento, observados nos gráficos das figuras 127 e 128 pode ser demonstrado a partir das equações (36), (37), (38) e (39), item 4. 7. 3, p. 202, do modelo matemático.

Para melhor entendimento da demonstração, essas equações são reproduzidas abaixo:

$$C_1 = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{(D_1 t)}} - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{(D_1 t)}} \right\} \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+kx}{2\sqrt{(D_1 t)}} \quad (37)$$

$$k = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{1-k}{1+k} \quad (39)$$

No revestimento, na situação de C_s tendendo ao mesmo valor da concentração na interface, a equação (36), se torna simplesmente:

$$C_1 = C_s$$

Isto porque, considerando a espessura da argamassa como se fosse zero, já que ela não está atuando na difusão, e l sendo a sua espessura, logo $l = 0$.

Isto equivale a considerar a camada da argamassa, neste caso, como um ambiente com valor de C_s e, portanto, a difusão na argamassa D_1 tendo o mesmo valor de D_2 que é a difusão na camada de concreto.

Assim, na equação 38, k se torna igual a 1 e por consequência α (equação 39), se torna igual a zero.

Com essas considerações a equação 37 fica da seguinte forma:

$$C_2 = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2.t}} \quad (40)$$

Onde:

C_2 = concentração na camada de concreto;

C_s = concentração superficial;

x = profundidade do concreto, para $x = 0$, na interface e a concentração C_2 passa a ser igual C_s .

Sendo a equação 40, a solução tradicional referente à segunda lei de Fick.

Logo, pelo que o modelo matemático apresentou (figuras 128 e 129 e tabela 26) pode-se afirmar que depois de um tempo, no revestimento argamassado a difusão se encontra no regime estacionário (condição da primeira lei de Fick), enquanto que o concreto está no regime não permanente, que é a condição da segunda lei de Fick.

E, por fim, pode-se concluir que, se entre 10 e 50 anos o coeficiente de difusão do concreto revestido com argamassa pode ser considerado somente devido ao concreto, assim, pode-se afirmar que determinando o coeficiente do concreto como forma pura, tem-se o D do concreto revestido.

5.5 Resumo da metodologia

Com os resultados apurados torna-se necessário a inclusão de um resumo da metodologia utilizada, como forma de tornar mais fácil o entendimento e verificar as alterações efetuadas:

- a) moldar corpos de prova de concreto, argamassa e concreto revestido com argamassa, nas quantidades requeridas para as análises a serem feitas nas diversas idades e graus de saturação definidos no programa experimental;
- b) definir o GS alvo para os experimentos, além dos trabalhados nesta pesquisa, incluir outro GS menor de 60%;

- c) medir o GS dos CPs de concreto e CPs de argamassa para o modelo $D \times GS$;
- d) medir GS das partes separadas (concreto e argamassa) do sistema revestimento/concreto e aplicar no modelo $D \times GS$ de cada material, a fim de obter o D respectivo;
- e) contaminar os CPs para obter os perfis de cloreto. Para as amostras únicas, ajustes das curvas e pela segunda lei de Fick, determinar C_s , e D . Para as amostras revestidas, utilizar o modelo matemático adotado, com os ajustes das curvas determina-se o C_s , D_1 e D_2 .
- f) no modelo matemático, simular com variação do tempo e verificar a tendência de comportamento das curvas na argamassa e no concreto. Se a tendência, para a curva da argamassa, ser de “horizontalidade” pode-se utilizar o D do concreto sem a necessidade de medição do D da argamassa.

5.6 Exemplo de aplicação da metodologia

A partir dos resultados com relação ao comportamento do GS dos concretos revestidos e das amostras sem revestimento, quando no mesmo ambiente, pode-se obter previsões para o início da corrosão nas armaduras de uma estrutura de concreto sem revestimento.

Por exemplo: uma estrutura localizada a 100m da beira do mar, GS de 60%, C_s de 0,21, cobrimento mínimo $c = 40\text{mm}$ e taxa máxima de cloretos de 0,07% massa de concreto.

No modelo $D \times GS$ (figura 122, p. 231), entra-se com o GS de 73%, (figura 108, p. 213), obtendo-se o coeficiente de difusão de $94,2\text{mm}^2/\text{ano}$.

Utilizando a solução da 2ª lei de Fick (40) com os dados do local da estrutura e o D obtido, tem-se um tempo igual a 9,02 anos. Ou seja, para o concreto desta pesquisa, sem revestimento e atuando no mesmo ambiente de um concreto revestido em 9 anos as armaduras começarão a entrar em processo de corrosão, um ano antes caso fosse revestido.

Salientando, no entanto, que o tipo de cimento do concreto e da argamassa utilizados nesta pesquisa não são recomendados para ambientes com incidências de cloretos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Direcionando-se aos objetivos traçados, com a diligência a inúmeros estudos práticos e teóricos de artigos e livros desta área do conhecimento que possibilitou o enriquecimento do estado da arte para a realização de longo e importante desenvolvimento experimental e por fim com a apresentação dos resultados obtidos, apresenta-se, nesta seção, as seguintes conclusões obtidas:

- a) a saturação das amostras a vácuo é o meio mais eficaz para se obter um nível maior de água pela rede porosa dos materiais. No acompanhamento dos percentuais de variação de massa antes e após a saturação, quando utilizado o vácuo (segunda fase), foram maiores do que na utilização de saturação por ebulição da água (fase de pré-teste);
- b) a utilização do chapisco na interface da argamassa e do concreto se mostrou efetivo no sentido de melhorar as condições de aderência entre o revestimento e o substrato. Na fase de pré-testes se utilizou algumas amostras sem o chapisco (tipo CRb) e durante o processo de saturação em alguns CPs o revestimento se despreendeu. Havia alguma preocupação no sentido de que o chapisco poderia criar alguma zona muito diferenciada na difusão de cloretos, mas o que se pode verificar após, é que se houve alguma interferência esta foi muito pequena. A razão disso pode estar na argamassa do chapisco que é uma argamassa rica, com alto teor de cimento, mas também muito porosa, pois tem uma alta fluidez e sua composição é utilizada areia com granulometria mais grossa, além de que foi executada camada fina e não cobrindo por completo o concreto;

- c) na utilização da metodologia para dotar os CPs com o GS alvo, durante o processo de homogeneização da umidade na microestrutura e na espera para a contaminação, observou-se que: os invólucros utilizados; a forma de vedação destes; a presença de ar no interior bem como o controle da temperatura no ambiente, são fatores preponderantes para se ter menos perda de umidade nas amostras. Isso foi demonstrado na fase de pré-testes quando se utilizou disposição lado a lado das amostras, aumentando o volume ensacado e dificultando assim retirada maior do ar interior. A utilização de vácuo, na segunda fase, para o envase e selagem dos invólucros contribuiu sobre maneira para se ter uma margem satisfatória de perda de umidade, na ordem de 1 a 5%, sendo que essa margem pode ser considerada como inerente ao processo;
- d) com os resultados apresentados na segunda fase do processo de determinação do GS da argamassa e concreto quando atuam de forma combinada, estabelece-se a metodologia utilizada no sentido de que para determinar o GS do concreto e do revestimento, deve ser medido no conjunto, sendo que este valor serve para obter o GS do concreto sem revestimento para um mesmo ambiente, isto é, com a mesma umidade relativa;
- e) no estudo do comportamento do GS para as amostras colocadas em mesmo ambiente e para os ensaios de difusão, onde as amostras estão de modo individual, pode-se admitir a mesma umidade relativa porque há uma proporcionalidade de massa entre os CPs;
- f) outrossim, mesmo afirmando a metodologia para determinação do GS em concretos revestidos, há de se considerar as características dos materiais utilizados nesta pesquisa, pois aspectos como: traço; tipo de cimento; relação a/aglomerante do concreto e da argamassa, podem influenciar nos resultados obtidos;
- g) o processo de extração do material em pó, por camadas, se mostrou eficiente, mas ainda carece de um melhor aparelho extrator para que o controle de espessura das camadas seja menos manual. Mesmo assim, o

processo se mostrou efetivo no sentido de que se corrigiu alguns pontos falhos que foi observado em outra pesquisa deste autor e durante a fase de pré-testes. Fatores como: utilização de aparelho extrator com velocidade variável para o caso da extração na argamassa; adoção de broca tipo serra-copo de diâmetro menor e redução da área de extração, foram importantes para se obter nesse processo uma maior eficácia;

- h) no aspecto da duração dos ensaios de difusão, verificou-se para os CPs de argamassa a difusão se processou de forma muito rápida. Nas condições da argamassa desta pesquisa, o tempo de contaminação foi no máximo de 30, 40 e 50 dias, para GS de 100%, 80% e 60%, respectivamente. Amostras que ficaram mais tempo na difusão, o cloreto de sódio depositado na superfície se esgotou totalmente e o perfil da concentração de cloretos por camada foi uma linha horizontal. Para os demais CPs, o tempo foi da ordem de 160 dias, com resultados satisfatórios para formação do perfil. Em outras pesquisas que utilizaram a metodologia de deposição de NaCl na superfície superior do CP, e citadas neste trabalho, os tempos foram bem menores. Assim, sendo, pode-se afirmar que é viável adotar tempos maiores, desde que as condições de porosidade do material assim permitam. Naqueles CPs de concreto revestido onde a difusão foi em um tempo maior (cerca de 280 dias), observou-se que para GS de 100%, o NaCl penetrou totalmente, logo em ensaios de difusão mais longos deve-se colocar maior quantidade de cloreto de sódio, ou se criam condições para reposição desse contaminante. Nestes CPs, com mais tempo de difusão, também se verificou maior refinamento do ajuste do perfil no modelo matemático possibilitando resultados mais confiáveis. É necessário, pois, a realização de ensaios em tempos maiores, como 2, 4 e até 5 anos.
- i) constatou-se, em consonância com outras pesquisas citadas da bibliografia e deste autor, que para avaliação da durabilidade das estruturas de concreto a resistência mecânica não é o único fator decisório, mas a qualidade do cimento, pois essa pesquisa mesmo utilizando o mesmo tipo de cimento das pesquisas referenciadas, obteve-se melhores resultados para o coeficiente de difusão;

- j) em todos resultados o grau de saturação se mostrou como fator importante na difusão dos íons cloreto, devendo ser um elemento relevante na determinação da vida útil das estruturas de concreto armado e protendido. Em todos os resultados apresentados o maior GS proporciona maior difusão, convergindo com bibliografia pesquisada;
- k) o revestimento argamassado mostrou-se que pode ser um acréscimo de proteção às armaduras nas estruturas de concreto armado e protendido, pois se mostrou influente nos resultados da pesquisa. Logo, o revestimento de argamassa pode ser considerado nos modelos de vida útil, desde que a argamassa tenha características mais eficazes criando condições de inibir a entrada de cloretos. No caso, da argamassa desta pesquisa mesmo sendo uma argamassa mais comum, mostrou alguma proteção. A utilização de cal hidráulica além de um traço com maior teor de cimento pode contribuir para aumentar essa proteção. Pode-se considerar ainda o sistema de pintura, pois as estruturas ao serem revestidas posteriormente são pintadas e isso certamente contribui para a proteção.
- l) para a relação do coeficiente de difusão de cada material e o coeficiente obtido na modelagem se obteve alguns valores. Houve uma convergência na argamassa e no concreto para o GS 100%, com essa relação próxima a 3. Já para GS de 80%, o valor distante da convergência foi o concreto com menos idade. Todas as relações entre os coeficientes de difusão indicaram uma maior convergência nos ensaios com idade maior assim, para se definir um valor que sirva de parâmetro, deve-se proceder ensaios para tempos maiores além dos realizados nesta pesquisa;
- m) o modelo matemático adotado nesta Tese se mostrou eficaz no sentido de que se obteve resultados plausíveis nas condições da pesquisa, inclusive como modelo de previsão, pois os resultados obtidos, para o concreto, se mostraram convergentes em outros trabalhos realizados;
- n) os resultados mostrados na simulação no modelo matemático, podem dar à metodologia uma simplificação, no sentido que em idades maiores o

coeficiente de difusão no revestimento tende-se a estabilizar e a curva do perfil de cloretos tende a ser horizontal, neste momento o D do concreto é o coeficiente de difusão do sistema, no entanto, torna-se necessário mais ensaios para a validação desses resultados;

- o) por fim, pode-se concluir que esta pesquisa proporcionou um acréscimo inédito aos raros estudos que envolvem a durabilidade de estruturas de concreto armado revestido com argamassa, presentes nas regiões costeiras.

7 SUGESTÕES DE ATIVIDADES FUTURAS

Um trabalho de pesquisa dificilmente encerra-se em si, sobretudo tratando-se de estudo inédito. Nas análises dos resultados, várias respostas foram obtidas, no entanto, outros estudos devem ser realizados, observando-se as seguintes questões:

- a) com os mesmos traços adotados de argamassa e cimento, determinar os perfis de cloreto para outras idades, como 1, 2 e 5 anos, e GS alvo menor do que 60%, a fim de verificar as condições do modelo e obter assim respostas melhores;
- b) pesquisar na bibliografia a existência de outros modelos que preveem a atuação conjunta de materiais diferentes quando sobre eles atuar a difusão iônica, no intuito de comparação com o modelo utilizado;
- c) com o modelo adotado ou outro pesquisado, utilizar a metodologia de obtenção do perfil de cloreto para o sistema argamassa/concreto, com variação nos traços, espessuras e tipos de argamassa;
- d) no mesmo contexto, utilizando variações de traços de concreto, tipo de cimento, relação a/c, uso de adições, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M. C.; SANCHEZ, M. Analysis of the variability of chloride threshold values in the literature. **Materials and Corrosion**. v. 60, n. 8, p. 631-637, ago. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/maco.200905296>. Acesso em: 22 jul. 2020.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 2012. 457 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual Americano do Concreto**. ACI, 1977.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 357 R-84**. Guia para projeto e construção de estruturas de concreto em ambiente marítimo. ACI, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-05**. Código de construção e requisitos para concreto estrutural. ACI, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**. Código de construção e requisitos para concreto estrutural. ACI, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318R-14**. Comentários sobre construção e requisitos para concreto estrutural. ACI, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM). **ASTM C-270**. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM). **ASTM C-1202**. Standard Test Method for electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM, 1991.

ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3). Acesso em: maio 2021.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; D'ANDREA, R. Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. **Journal of Nuclear Materials**, v. 412, n.1, p. 209–216, maio, 2011. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002231151001072X>. Acesso em: 22 jul. 2020.

ANDRADE, C.; DÍEZ, J. M.; CRUZ A. Mathematical Modeling of a Concrete Surface “Skin Effect” on Diffusion in Chloride Contaminated Media. **Advanced Cement Based Materials**, v. 6, n. 2, p. 39-44, ago, 1997. Disponível em:

[https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00002-3). Acesso em: 11 ago. 2020.

ANDRADE, C.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1129-1364, ago. 1999. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884699001234?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2020.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001, 256f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANGST, U.; FEMENIAS, Y. S.; MORO, F.; ELSENER, B. Development of a Novel Methodology to Assess the Corrosion Threshold in Concrete Based on Simultaneous Monitoring of pH and Free Chloride Concentration. **MDPI Journal**, v. 18, p. 1-14, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18093101>. Acesso em: jul. 2019.

ANTÓN, C. G. Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre la difusividad del ión cloruro. Madrid, 2009, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Departamento de Química-Física Aplicada da Universidad Autónoma de Madrid, España.

ARAÚJO JÚNIOR, J. M. **Contribuição ao estudo das propriedades físico-mecânicas das argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/>. Acesso em: 11 ago. 2020. ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NB-1: Cálculo e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 26: Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:** Agregados - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215:** Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos— Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos— Determinação da absorção de água, por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833:** Concreto – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579:** Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho, Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **AENOR UNE - EN 197-1**. Cimento. Parte 1. Composição, Especificações e critérios de conformidade dos cimentos comuns. AENOR, A1:2007.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **AENOR UNE - EN 197-4**. Cimento. Parte 4. Composição, Especificações e critérios de conformidade dos cimentos de escórias de alto forno de baixa resistência. AENOR, 2005.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **AENOR EN 206-1**. Execução de estruturas de concreto - Parte 1: Regras Gerais. AENOR, 2007.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. **AFNOR NF EN 206-1**. Concreto, Parte 1: especificações, desempenho, produção e conformidade. AFNOR, 2004.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. 4ª ed. São Paulo: Nome da Rosa, 2008. 82 p.

BALABANIC, G.; BICANIC, N.; DUREKOVIC, A. The influence of w/c ratio, concrete cover thickness and degree of water saturation on the corrosion rate of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26 n. 5, p. 761-769, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85013-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85013-7). Acesso em: 10 jul. 2020.

BANDEIRA, J. L. S. **Desempenho de concreto saturado e não saturado executado com cimento ARI-RS 52,5 MPa, com e sem adições, frente ao ataque de cloretos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande, 2015.

BANDEIRA, J. L. S.; BERNAL, J. M. C.; GUIMARÃES, A. T. C.; TERRADES, A. M. **Coeficiente de difusão em concreto saturado e não saturado utilizando cimento de alta resistência inicial, resistente a sulfatos**. In: 5ª. CONFERÊNCIA SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS – PATORREB 2015, Porto, Portugal, 26 a 28 março de 2015. Livros de atas [...] p. 639-644.

BANDEIRA, J. L. S.; BERNAL, J. M. C.; GUIMARÃES, A. T. C. **Influência do grau de saturação na penetração de cloretos em concretos executados com cimento de alta resistência inicial**. In: 1º ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO – DEGRADA 2014, Salvador, Bahia, Brasil, 06 a 09 de agosto de 2014. Anais [...]. p. 71-85.

BANDEIRA, J. L. S.; GUIMARÃES, A. T. C.; NUNES, J. L. O. **A influência das adições pozolânicas no desempenho do cimento tipo ARI-RS em concretos saturados e não saturados frente ao ataque de cloretos**. In: II Workshop em Ciência e Engenharia de Materiais - UFPel – Pelotas, RS – 07 a 09 de novembro de 2016.

BAO, J.; WANG, L.; Combined effect of water and sustained compressive loading on chloride penetration into concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 708-718, dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.018>. Acesso em: 1 jul. 2020.

BAUER, E.; PEREIRA, C.; CAPUZZO, V. M. S. **Estudo da porosidade de argamassas de revestimento em diferentes condições de aplicação e exposição**. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 28-30 de abril, 2015. Porto Alegre, RS. Atas [...]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279787633>. Acesso em: 11 ago. 2020.

BAUER, E.; SALOMÃO, M. **Study of porous rendering mortars employing capillarity tests and microscopy**. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC 2014, nov. 2014. Maceió, AL. Atas [...]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17012/entac2014.372>. Acesso em: 11 ago. 2020.

BAUER, E. (coord); SOUZA, J. G. G. **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. 1ª. Brasília: LEM-UnB. 2005 v. 2.

BEAUDOIN, J. J.; RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F. Interaction of chloride and C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 875-883, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90049-4). Acesso em 15 ago. 2020.

BEM FRAJ, A.; BONNET, S.; LEKLOU, N.; KHELIDJ, A. Investigating the early-age diffusion of chloride ions in hardening slag-blended mortars on the light of their hydration progress. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 485-495, 20 nov. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819318598?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2020

BERNAL, J. M. C. Evaluación de Parámetros que Influyen en el Transporte de Cloruros em Hormigón Parcialmente Saturado. Madrid 2014. Tesis Doctoral, Escuela Técnica de Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos da Universidad Politécnica de Madrid. España. 374 p.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção**: patologia, reabilitação e prevenção. Tradução de Leda M.M. D. Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 414 p.

BEUSHAUSEN, H.; TORRENT, R.; ALEXANDER, M. G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 11-20, maio, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.003> . Acesso em: 11 jun. 2020.

BICZOK, I. **Corrosion e Protecion del Hormigon**. Trad. Emílio J. D´Ocom Asensi. Bilbao – Espanha: Urmo, 1972. 715 p.

BORGES, C., SILVA, A. S.; VEIGA, R. Durability of ancient lime mortars in humid environment. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 606-620. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.019>. Acesso em: 11 ago. 2020.

BU, Y.; WEISS, J. **Saturation of air entrained voids and its implication on the transport of ionic species in concrete**. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES. Purdue University in West Lafayette, Indiana, from July 24–26, 2014. Proceedings, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5703/1288284315400>. Acesso em: 11 ago. 2020.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CÁNOVAS, M. F. **Hormingón**. 1ª ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos. Madrid 1977.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios da Ciência da Engenharia de Materiais**. Editor: Geraldo C. Isaia, 2ª ed. São Paulo: IBRACON, cap. 26, vol. II.

CARDOSO, F. A.; MENDES, T. M.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, G.; JOHN, V. M. **Caracterização física de argamassas de revestimento do mercado nacional.** In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, maio, 2009, Curitiba, PR. Atas [...] SBTA, 2009.

CASCUDO, O. **Contribuição ao Estudo e Emprego de Técnicas Eletroquímicas no Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto Armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

CASCUDO, O.; FIGUEIREDO, C.; P.; SANTOS, F. B.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, ago. 2014, p. 685-708.

CASTAGNO JÚNIOR, R.; GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Penetração de Cloretos em Estruturas com secagem e Molhagem em Zona de Névoa.** Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENGO. Rio Grande. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. 2004. Anais [...] Rio Grande: FURG, 2004.

CASTRO, P.; DE 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. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00453-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00453-7). Acesso em: jul. 2020.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES. **CIRSOC 201.** Regulamento argentino de estruturas de concreto. CIRSOC, 2005.

CHANG, H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 1-9, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.011>. Acesso em: ago. 2020.

CHATTERJI, S. An explanation for the unsaturated state of water stored concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 75-79, 2004. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016%2FS0958-9465\(02\)00124-5](http://dx.doi.org/10.1016%2FS0958-9465(02)00124-5). Acesso em abr. 2021.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: propriedades, características e métodos de ensaios.** IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1995, 118p.

CLIMENT, M. A.; VIQUEIRA, A.; DE VERA, G. LÓPEZ-ATALAYA, M. M. Analysis of acid-soluble chloride in cement mortar, and concrete by potentiometric titration without filtration steps. **Cement and Concrete Research**, n. 29, p. 893-898, 1999.

CLIMENT, M. A.; ANDRADE, C.; DE VERA, G.; LÓPEZ, J. F.; VIQUEIRA, E. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete, Part I. The instantaneous plane source diffusion case. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1113-1123, 2002. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00750-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00750-0). Acesso em: ago. 2014.

CLIMENT, M. A.; VIQUEIRA, A.; DE VERA, G. LÓPEZ-ATALAYA, M. M. Generalization of the possibility of eliminating the filtration step in the determination of acid soluble chloride content in cement and concrete by potentiometric titration. **Cement and Concrete Research**, n. 34, p. 2291-2295, 2004.

CLIMENT, M. A.; DE VERA, G.; VIQUEIRA, E.; ANTÓN, C.; ANDRADE, C. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through partially saturated concrete. Part II: The instantaneous plane source diffusion case with chloride binding consideration. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 714-724, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.008>. Acesso em: set. 2014.

CLIMENT, M. A.; GIL, C. A.; VILAPLANA, A. M.; GUIMARÃES, A. T. C.; DE VERA, G. **Influencia de la temperatura sobre la difusividad em régimen no estacionario del ión cloruro através del hormigón**. In: 4º CONGRESO DE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS. PATORREB – 12 a 14 de abril de 2012, Santiago de Compostela, 2012, Anais [...], ISBN978-84-96712-49-2, pág.184.

COMITÉ EURO - INTERNATIONAL DU BÉTON. (CEB). **Bulletin D'Information**, **213/214**. Durability of concrete structures—Design Guide. Lausanne, Thomas Telford, 1992. Bulletin D'Information 183. Thomas Telford, 1993.

COSTA, E. A. L. **Determinação do potencial de agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento na região metropolitana de Salvador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2001.

COSTA, I. **Estudo comparativo entre as argamassas de revestimento externo: preparada em obra, industrializada fornecida em sacos, e estabilizada dosada em central**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS. 2016.

COUTINHO, S. M.; PRETTI, S. M.; TRISTÃO, F. A. Argamassa preparada em obra x argamassa industrializada para assentamento de blocos de vedação: Análise do uso em Vitória-ES. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 21, p. 41-48, maio, 2013. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec>. Acesso em: 14 ago. 2020.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2ª ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1975.

DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; MASUERO, J. R.; MENNUCCI, M. M. **Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto**. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C008>. Acesso em: 3 jun. 2020.

DE BELIE, N.; WANG, J.; ERSAN, Y.C.; BOON, N. Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. **Appl Microbiol Biotechnol**, p. 2993-3007, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7370-6>. Acesso em; 11 jun. 2020.

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassas utilizadas em Porto Alegre** - Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2000.

DYER, T. **Durabilidade do concreto**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2015. 515 p.

FANTON, T. **Proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) –Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande, 2017.

FENAUX, M. **Modelling of chloride transport in non-saturated concrete. from microscale to macroscale**. Tese (Doutorado). 2013. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM. Madrid, España.

FERREIRA, K. **Estudo comparativo entre argamassas convencionais e industrializadas**. Monografia (trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, PR. 2016.

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

GALAN, I.; LUCIE PERRON, L.; GLASSER, F. P. Impact of chloride-rich environments on cement paste mineralogy. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 174-183, fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.017>. Acesso em: 4 jul. 2020.

GARBOCZI, J. E.; BENTZ, D. P.; HALAMICKOVA, P.; DETWILER, J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 790-802, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00069-O](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00069-O). Acesso em: 1 ago. 2020.

GHASEMZADEH, F.; RASHETNIA, R.; SMYL, D.; POUR-GHAZ, M. A comparison of methods to evaluate mass transport in damaged mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 119-129, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.007>. Acesso em: 1 jun. 2020.

GJΦRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambiente de severa agressividade**. Rev. técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene; Leda Maria Beck (trad). São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 606 p.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. São Paulo, 2000. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, PCC/USP – Universidade de São Paulo. 2000.

GUIMARÃES, A. T. C. **Grau de saturação**: Sua variação com o tipo de concreto e sua influência na difusão e íons cloreto. São Paulo, 2005. Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de Pós-Doutorado em Engenharia Civil.

GUIMARÃES, A. T. C.; BANDEIRA, J. L. S.; BERNAL, J. M. C. Grau de saturação nos modelos de durabilidade do concreto armado para ataque por cloretos. **Concreto & Construções**. São Paulo, ano 43, n. 79, p.110-115, jul. 2015.

GUIMARÃES, A. T. C.; CLIMENT, M. A.; DE VERA, G.; VICENTE, F.J.; RODRIGUES F. T.; ANDRADE, C. Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure. **Construction and Building Materials**, n. 25, p. 785-790, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.005>. Acesso em: set. 2016.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **The Moisture Effect on the Diffusion of Chloride Ion in Hydrated Cement Paste**. In: Symposium on Marine Corrosion in Tropical Environments, 2000, Orlando. Marine Corrosion in Tropical Environments - ASTM STP 1399. 2000. p. 135-149. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283123830>. Acesso em: ago. 2014.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Models of Variation of chloride ion diffusion as a function of changes in the saturation degree (SD) of concrete mixes prepared with pozzolanic cement**. Proceedings of the International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, 5-6 November 2007, Guimarães, Portugal, p. 63-70.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia**. 2.ed. São Paulo: Pini, 2002.

GUO, B.; HONG, Y.; QIAO, G.; OU, J.; LI, Z. Thermodynamic modeling of the essential physicochemical interactions between the pore solution and the cement hydrates in chloride-contaminated cement-based materials. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 531, p. 56-63, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.005>. Acesso em: 30 jul. 2020.

HANSSON, C. M. Concrete: The Advanced Industrial Material of the 21st Century. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 26A, p.1321-1341, jun. 1995. DOI: 10.1007/BF02647584. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/253851837>. Acesso em: 1 jul. 2020.

HEDENBLAND, G. Influence of moisture and carbonation on the transport of chlorides in concrete – some ideas. *In*: Corrosion of Reinforcement – Field and Laboratory Studies for Modelling and Service Life. Fev. 1995. Proceedings. Lund, Kyösti Tuutti, 1995. p. 227-237

HELENE, P. R. L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª. Ed. São Paulo: Pini, 1986.

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. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000738379>. Acesso em: 4 ago. 2020.

HELENE, P. R. L. **Contribuição à normalização**: a resistência sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica; durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado. São Paulo, 1994. (Monografias. EPUSP).

HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto**. *In*: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E IV CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE. Anais [...] Porto Alegre, 1997. v. 1. p. 1 – 30.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4a. Ed. São Paulo: Pini, 1999. 47 p.

HELENE, P. **Hormigón de altas prestaciones**. Dosificación, diseño, construcción y record mundial de resistencia a la compresión. Edificio e-tower São Paulo, Brasil, Fev. 2002. *In*: VII CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y IX CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD CONPAT2003, 2003, Telchac, Yucatán, México. Memórias CONPAT2003. Madrid: ALCONPAT, 2003. v. I. p. 149-174. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/biblioteca-phd/publicacoes/em-congressos/15>. Acesso em: 22 dez. 2020.

HELENE, P.; GUIGNONE G.; VIEIRA, G.; RONCETTI, L.; MORONI, F. Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 3, p. 544-563, jun. 2018.

HONGLEI, C.; ZUQUAN, J.; TIEJUN, Z.; BENZHEN, W.; ZHE, L.; JIAN, L. Capillary suction induced water absorption and chloride transport in non-saturated concrete: The influence of humidity, mineral admixtures and sulfate ions. **Construction and Building Materials**, v. 236, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117581>. Acesso em: 27 jun. 2020.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1504-2**. Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de concreto. Definições, requisitos, controle de qualidade e avaliação da conformidade. IPQ, 2006.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1992-1-1**. Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de concreto. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. IPQ, 2010.

ISAIA, G. C. Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das estruturas de concreto. Santa Maria, 2000. Projeto de pesquisa, UFSM – Universidade Federal de Santa Maria.

JAMARIM, V. M. **Estudo comparativo de propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com cal virgem, hidratada e líquida**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, PR. 2015.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE nº 15**. Standard Specifications for Concrete Structures – 2007. JSCE, 2010.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE nº 16**. Standard Specifications for Concrete Structures-2007, “Materials and Construction”. JSCE, 2010.

JIANG, W.; SHEN, X.; LIU, Q.; HU, Z.; LIN, X.; HOU, D.; HAO, P. Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study. **Ocean Engineering**, v. 189, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106350>. Acesso em: 1 jul. 2020.

KHATRI, R. P., SIRIVIVATNANON, V. Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. **Cement & Research**, v. 34, 2004, p. 745-752. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00086-3). Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Steinar-Helland/publication/279897601>. Acesso em: jul. 2019.

KORB, J. P. Microstructure and texture of cementitious porous materials. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 25, p. 466-469, maio, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2007.01.007>. Acesso em: 18 jul 2020.

KREIJGER, P. C. The skin of concrete, composition and properties. **Matériaux et Construction**, v. 17, p. 275-283, jul. 1984. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02479083>. Acesso em: 12 ago. 2020.

KUTZ, M. **Handbook of Environmental Degradation of Materials**. 3^a. ed. Elsevier. eBook ISBN: 9780323524735. Hardcover ISBN: 9780323524728. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-environmental-degradation-of-materials/kutz/978-0-323-52472-8>. Acesso em: 29 jun. 2020.

LACOUR, J.; DRIDI, W. Experimental investigation of solute transport in unsaturated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 63, p. 46-53, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.002>. Acesso em: 8 jul 2020.

LI, K.; ZHANG, Y.; WANG, S.; ZENG, J. Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application. **Materials and Structures**, v. 164, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1295-8>. Acesso: 1 jul. 2020.

LIMA, W. S.; SILVA, M. L.; ZARZAR JÚNIOR, F. C.; OLIVEIRA, R. A. **Estudo teórico e experimental de corrosão de armaduras de concreto armado submetidas às ações de cloretos e de carbonatação**. A aplicação do conhecimento científico nas engenharias (Ebook). Organizadora Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. ISBN 978-85-7247-244-9. DOI 10.22533/at.ed.449190404.

LINTZ, R. C. C.; SILVA, B. C. L.; GACHET, L. A. Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1197>. Acesso em: jul. 2021.

LISBOA, D. C. S.; LIMA, R. F. M.; ROCHA, L. N.; RANGEL, A. N. Análise do concreto armado em relação à agressividade em ambiente marinho: Estudo comportamental quanto à influência de cloretos da água do mar. **Brazilian Journal of Development**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-081>. Acesso em: 11 jun. 2020.

LIU, Y.; SHI, X. Ionic transport in cementitious materials under an externally applied electric field: Finite element modeling. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 450-460, fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.019>. Acesso: 31 jul. 2020.

LIVINGSTON, R. A.; MANGHNANI, M.; PRASAD, M. Characterization of Portland cement concrete microstructure using the scanning acoustic microscope. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 287-291, fev. 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884698002221?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jul. 2020.

MAAGE, M.; HELLAND, S.; POULSEN, E.; VENNESLAND, O.; CARLSEN, J. E. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment. **ACI Materials Journal**.

MAALEJ, S.; LAFHAJ, Z.; BOUASSIDA, M. Micromechanical modelling of dry and saturated cement paste: Porosity assessment using ultrasonic waves. **Mechanics Research Communications**, v. 51, jul. 2013, p. 8-14. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2013.03.002>. Acesso em: 17 jul 2020.

MAGALHÃES, T. A. **Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30121>. Acesso em: 11 jun. 2020.

MALHEIRO, R. L. M. C. **Influência do revestimento de argamassa no transporte de cloretos em estruturas de concreto armado inseridas no meio urbano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2008.

MALHEIRO, R.; CAMÕES, A.; MEIRA, G.; PINTO, J. Durability of Fly Ash Eco-friendly Cement Mortars in Severe Environment. **Procedia Manufacturing**, v. 46, p. 122–130, 2020.

MALHEIRO, R.; MEIRA, G.; LIMA, M.; PERAZZO, N. Influence of mortar rendering on chloride penetration into concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 233-239, fev. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.11.003>. Acesso em: 12 ago. 2020.

MARTÍNEZ, M. C. I.; CARRO, G. A. **Influencia de la composición de los morteros en el funcionamiento de los muros de fábrica tradicionales: Evaluación del uso de la cal y del cemento**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005. Atas [...] SBTA, 2005.

MARTYS, N. S. Diffusion in Partially-Saturated Porous Materials. **Materials and Structures**, v. 32, p. 555-62, 1999.

MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 747-760, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00052-5). Acesso: 27 jun. 2020.

MATSUMURA, T.; SHIRAI, K.; SAEGUSA, T. Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, n. 5, p. 1181-1188, maio, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.03.0032>. Acesso em: 11 ago. 2020.

McCARTER, W. J.; KIM, J.; SURYANTO, B.; NANUKUTTAN, S.; BASHEER, P. A. N.; CHISP, T.M. Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical- and physically- based models. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 133-145, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.002>. Acesso em 30 jun.2020

McCARTER, W. J.; KIM, J.; SURYANTO, B. Performance assessment of reinforced concrete after long-term exposure to a marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 569-583, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.151>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MEDEIROS JÚNIOR, R. A. **Estudo da Resistividade do Concreto Para Proposta de Modelagem de Vida Útil**: corrosão de armaduras devido a penetração por cloretos. São José dos Campos, 2014. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

Disponível em:

http://www.bdata.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=67135.

Acesso em: 28 jul. 2020.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente a ação por cloretos**. São Paulo, 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20072009-174802/pt-br.php>.

Acesso em: 28 jul. 2020.

MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; FIGURA, A. S.; TISSOT, F. M.; ARTIOLI, K. A. Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato. **Revista Matéria**, p. 145-159, mar. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0015>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**.

Florianópolis, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87909>. Acesso em: 28 jul. 2020.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**:

Fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 127 p

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 223-248, out. 2019. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000400353>. Acesso em: 28 jul. 2020.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª Ed. São Paulo: IBRACON 2014. 782 p.

MORADLLO, M. K.; LEY, M. T. Quantitative measurement of the influence of degree of saturation on ion penetration in cement paste by using X-ray imaging.

Construction and Building Materials, v. 141, p. 113-129, 2017.

NEPOMUCENO, A. A; ISAÍIA, G. C. (org). **Concreto** - Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 2 p. 793-827. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. São Paulo: Pini, 2015. 912 p.

NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 133-138, 2003. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.586.2515&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: ago. 2014.

NUNES, J. L. O. **Intensidade de ataques por cloretos ao concreto em relação à distância da água do mar**. Rio Grande (2006). Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande.

OLIVEIRA, I. A.; GADLER, F.; VALDÉS, A. C.; MEDEIROS, M. H. F. **Efeito do grau de hidratação e de saturação do concreto nas leituras de resistividade elétrica**. In: 2º SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, Paraná, 2017. Anais[...] artigo 2SPPS1019, p. 224-236, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2SPPC.2017.019>. Acesso em: 8 jul. 2020.

OLIVEIRA, T. S.; SARAIVA, A. C. Deformação lenta das estruturas de concreto armado e suas manifestações patológicas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 161-171, ago. 2018. ISSN 2176-7270. Disponível em: <https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/about>. Acesso em: 9 jul. 2020.

OLLIVIER, J.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Trad. de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek (coord). São Paulo: IBRACON, 2014.

OLSSON, N.; BAROGHEL-BOUNY, V.; NILSSON, L.; THIERY, M. Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements. **Cement & Concrete Composites**, v. 40, p. 40-47, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001>. Acesso em: 23 jul. 2020.

OSIO-NORGAARD, J.; GEVAUDAN, J. P.; SRUBAR III, W.V. **A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete**. Construction and Building Materials. v. 186, p. 191-206, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119>. Acesso: 1 jun. 2020.

OTIENO, M.; THOMAS, M. Marine exposure environments and marine exposure sites. **Marine Concrete Structures**, p. 171-196, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100081-6.00007-6>. Acesso em: 1 jun. 2020.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**. USA, Pergamon Press, Lt. v.11, p. 395-406, jan. 1981.

PAN, X.; SHI, Z.; SHI, C.; LING, T.; LI, N. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 578-590, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>. Acesso em: 1 jun. 2020.

PARROT, L. J. Influence of cement type and curing on the drying and air permeability of cover concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 47, p. 103-111, 1999. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.1995.47.171.103>. Acesso em: 15 jul. 2020.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

PERAÇA, M. G. T. **Modelos para Estimativa do Grau de Saturação do Concreto Mediante Variáveis Ambientais que Influenciam na sua Variação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009. FURG, 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1973.

PINKOSKI, I. M.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; OLIVEIRA, T. A.; JAREK, J.; GOMES, R. A.; NERI, M. A. T. **Análise comparativa entre os métodos de exposição do Concreto submetido ao ataque combinado de íons Cloretos e sulfatos**. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2018, Foz Do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu, 2018.

PRESUEL-MORENO, F. J.; WU, YU.; SIMMONS, R. Chloride Diffusivity through Partially Saturated, Binary-Blended Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 5, p. 695-705, jan. 2018. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51702346>. Acesso em: 13 ago. 2020.

QUARCIONI, V. A.; ZUQUIM, M. P. S.; MENEZES, P. M.; CHOTOLI, F. F.; OLIVEIRA, M. C. B. **Caracterização microestrutural de argamassas selecionadas de cimento e cales hidratadas cálcica e dolomítica por microscopia óptica**. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, mai. 2011, Belo Horizonte, MG. Atas [...] SBTA, 2011.

RAUPACH, M. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion – an overview. **Materials and Corrosion**, v. 57, p. 605-613, 3 ago. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/maco.200603991>. Acesso em 15 jul 2019.

RIBEIRO, D. V. (organização). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 1ª Ed. Editora EDIPUCRS. Porto Alegre, 2008.

REVISTA CLA – CONSTRUÇÃO LATINO AMERICANA. KHL Editora. Disponível em: https://www.construcaolatinoamericana.com/indicadores_deconcreto/128426.article. Acesso em 9 abr. 2020.

RODRIGUES, F. T. **Medição do grau de saturação e a difusão de íons cloreto em concreto executados com cimento de alta resistência inicial**. Rio Grande (2009). Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, RS, Brasil.

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura**. (2005), Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, RS. Santa Maria, 2005.

SAETTA, A. V.; SCOTTA, R. V.; VITALIANI, R. V. Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 90, n. 5, p. 441-451. jan. 1993. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=3874>. Acesso em: jun. 2021.

SAFIUDDIN, M.; HEARN, N. Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 1008–1013, 2005.

SOUTH AFRICAN BUREAU OF STANDARDS. **SANS 50197e1:2013**. Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. SANS, 2013.

SOUZA, Karen N. **Estudo Experimental e Probabilístico da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Situadas em Ambiente Marítimo: Influência do Grau de Saturação do Concreto sobre a Difusividade de Cloretos**. Rio Grande, RS. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforma de estruturas**. 1ª. ed. – revisada. São Paulo: Pini, 2009. 257 p.

SAVOYE, S.; MACÉ, N.; LEFRÈVRE, S.; SPIR, G.; ROBINET, J.C. Mobility of chloride through cement-based materials under partially saturated conditions. **Applied Geochemistry** v. 96, p. 78-86, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.06.011>. Acesso em: 18 jul. 2020

SCHUTTER DE, G.; WU, K.; LONG, J; XU, L. A study on the chloride diffusion behavior of blended cement concrete in relation to aggregate and ITZ, **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 1063-1073, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.068>. Acesso em: 6 jun. 2020.

SENGUL, Ö.; GJØRV, O. E. **Effect of blast furnace slag for increased concrete sustainability**. In: Proceedings, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABILITY IN THE CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY, OSLO, NORWEGIAN, 2007, p. 248-256.

SHEN, X., JIANG, W.; HOU, D.; HU, Z.; YANG, J.; LIU, Q. Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103402>. Acesso em: 23 jul. 2020.

SILVA, C. A. **Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da barra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio Grande, FURG. Rio Grande, RS, Brasil. FURG, 2010.

SILVA, E. M. P. **Avaliação laboratorial de propriedades hígricas dos materiais de construção**: transferência de água na fase líquida. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, PT. Porto, 2011.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição do resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formação de compósitos cimentícios**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). 2014. Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2014

SMITH, P. E. Design and specification of marine concrete structures. **Marine Concrete Structures**, p. 65-114, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100081-6.00003-9>. Acesso em: 3 ago. 2020.

SOLTANI, F.; GOUEYGOU, M.; LAFHAJ, Z.; PIWAKOWSKI, B. Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content. **NDT & E International**, v. 54, p. 75-83, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.12.003>. Acesso em: 25 jul 2020.

ŠOMODÍKOVÁ, M.; STRAUSS, A.; ZAMBON, I.; TEPLÝ, B. Quantification of parameters for modeling of chloride ion ingress into concrete. **Structural Concrete**, p. 1-18, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201800049>. Acesso em: 11 ago. 2020.

SOUZA, K. N. **Estudo Experimental e Probabilístico da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Situadas em Ambiente Marítimo**: Influência do Grau de Saturação do Concreto sobre a Difusividade de Cloretos. Rio Grande, RS. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 1379**. Specification and supply of concrete council of standard. AS, 2007.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 3600**. Concrete structures council of standards. AS, 2009.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS 4997**. Guidelins for the design of maritime structure of council. AS, 2005.

SUKRIT, A.; MUKHERJEE, A. A multiscale model including the effect of pores, aggregates and their interfaces for moisture diffusion in concrete, **Cement and Concrete Composites**, v. 111, p. 1-77, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103595>. Acesso em: 1 jun. 2020.

TABARELLI, A.; GARCEZ, E.; NUNES, F. M.; CHOLANT, C. M.; SCHEIBLER, S. B.; AVELLANEDA, C. O. Investigating the effect of curing in the chloride diffusion coefficient of conventional concrete. **Materials Research**, v. 22, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0160>. Acesso em: 7 jul. 2020.

THE BRITISH STANDARD INSTITUTION, UNITED KINGDON. **BS 6349-1-4**. Obras Marítimas, Parte 1-4, Código geral da prática de materiais. BSI, 2013.
TONGNING, C.; LIJUAN, Z.; GUOWEN, S.; CAIHUI, W.; YING, Z.; PENGSHUO, W.; AOXUE, X. Simulation of chloride ion transport in concrete under the coupled effects of a bending load and drying–wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 241, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118045>. Acesso em: 29 jul. 2020.

TORRES-LUQUE, M.; BASTIDAS-ARTEAGA, E.; SHOEFS, F.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; OSMA, J. F. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 68-81, out, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.009>. Acesso em: 22 jul. 2020.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Tese (Doutorado), Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo, Suécia, 1982.

VEIGA, M. R., SILVA, A. S. Mortars. National Laboratory for Civil Engineering, Lisboa, Portugal. 2019.

WANG, L.; UEDA, T. Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption. **Ocean Engineering**, v. 38, p. 519-528, mar. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801811000059?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jul 2020.

XIE, D.; CHANG, H.; MU, S.; WANG, P. Influence of pore structure and moisture distribution on chloride “maximum phenomenon” in surface layer of specimens exposed to cyclic drying-wetting condition. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 16-30, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.071>. Acesso: 13 jul. 2020.

XINXIN, L.; CHEN, S.; XU, Q.; XU, Y. Modeling the three-dimensional unsaturated water transport in concrete at the mesoscale. **Computers & Structures**, v. 190, p. 61-74, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.005>. Acesso em: 19 jul 2020.

YE, H.; JIN, N.; JIN, X.; FU, C. Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying–wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 259-269, nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.027>. Acesso em: 18 jun. 2020.

YE, H.; JIN, N.; JIN, X.; FU, C.; CHEN, W. Chloride ingress profiles and binding capacity of mortar in cyclic drying-wetting salt fog environments. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 733-742, nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.059>. Acesso em: 1 jul. 2020.

YUNOVICH, M., THOMPSON, N. G., BALVANYOS, T. LAVE, L. **Corrosion cost and preventive strategies in the US-Highway Bridges**. Appendix D. Office of Infrastructure Research and Development, US Federal Highway Administration. 2001. Disponível em: <https://highways.dot.gov/research/turner-fairbank-highway-research-center/offices/office-infrastructure-research-development>. Acesso em: 15 jul. 2019.

YU, Q.; GUO, W.; HU, J.; MA, Y.; HUANG, H.; YIN, S. The application of novel lightweight functional aggregates on the mitigation of acidification damage in the external anode mortar during cathodic protection for reinforced concrete. **Corrosion Science**, v. 165, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108366>. Acesso em: 18 jun. 2020.

ZAJAC, M.; SKOCEK, J.; ADU-AMANKWAH, S.; BLACK, L. M.; BEN HAHA, M. B. Impact of microstructure on the performance of composite cements: why higher total porosity can result in higher strength. **Cement and Concrete Composite**, v. 90, p. 178-192, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.023>. Acesso em: 9 jul 2020.

ZHAI, X.; SUN, C.; YUAN, L.; QU, F.; LI, Y.; HOU, B. Numerical and experimental study of moisture and chloride transport in unsaturated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 1067-1075, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.158>. Acesso em: 10 jul. 2020.

ZHANG, Y.; ZHANG, M. Transport properties in unsaturated cement-based materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 367–379, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.037>. Acesso em: set. 2015.

ZHANG, M.; XU, K.; HE, Y. JIVKOV, A. P. Pore-scale modelling of 3D moisture distribution and critical saturation in cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 222–230, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.conbuildmat.2014.04.080>. Acesso: em set. 2015.

ZHANG, Y.; YANG, Z.; YE, G. New insights into long-term chloride transport in unsaturated cementitious materials: Role of degree of water saturation. **Construction and Building Materials**, v. 238, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117677>. Acesso em: 23 jul. 2020.

ZHANG, Y.; YE, G. Dependence of unsaturated chloride diffusion on the pore structure in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 127, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105919>. Acesso em: 2 jul. 2020.

ZHANG, Y.; YE, G. A model for predicting the relative chloride diffusion coefficient in unsaturated cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 133-144, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.013>. Acesso em: 1 jun. 2020.

APÊNDICES

Apêndice A – Planilhas de Controle de Saturação à Vácuo dos CPs

Universidade Federal de Pelotas											
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM											
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado											
Determinação Massa Saturada à vácuo de CPs (Msat) - Norma ASTM-C-1202-97											
Data	CP	Massa Nat.	Início Vácuo	Colocação Água		Vácuo Final		Massa Pós	Acréscimo		
		(g)	(h)	Início (h)	Fim (h)	Início(h)	Fim (h)	Msat (g)	(%)	Média (%)	Mágua (g)
16/09/2020	CR2	1213,00	8:37	11:37	12:00	12:00	13:00	1251,70	3,2%		38,20
16/09/2020	CR3	1237,60	"	"	"	"	"	1280,80	3,5%		43,20
17/09/2020	CR1	1283,10	7:48	10:49	11:01	11:01	12:01	1325,60	3,3%		42,50
17/09/2020	CR4	1264,40	"	"	"	"	"	1307,20	3,4%		42,80
18/09/2020	CR5	1319,40	7:32	10:33	10:43	10:43	11:43	1365,60	3,5%		46,20
18/09/2020	CR6	1307,40	"	"	"	"	"	1354,10	3,6%		46,70
19/09/2020	CR7	1235,50	14:00	17:00	17:19	17:19	18:19	1280,80	3,7%		45,30
19/09/2020	CR8	1294,50	"	"	"	"	"	1341,40	3,6%		46,90
21/09/2020	CR9	1243,10	7:37	10:40	10:59	10:59	11:59	1288,80	3,7%		45,70
21/09/2020	CR10*	1304,30	"	"	"	"	"	1347,60	3,3%		43,30
26/09/2020	CR11*	1285,10	14:07	17:11	17:27	17:27	18:27	1334,10	3,8%		49,00
26/09/2020	CR12*	1270,80	"	"	"	"	"	1316,70	3,6%		45,90
01/10/2020	CR13*	1272,90	7:42	10:48	10:59	10:59	11:59	1318,10	3,6%		45,20
01/10/2020	CR14*	1338,30	"	"	"	"	"	1382,30	3,3%		44,00
05/10/2020	CR15*	1285,90	7:49	10:49	11:04	11:04	12:04	1330,90	3,5%		45,00
12/02/2021	CR16	1297,50	7:47	10:47	11:04	11:05	12:05	1349,40	4,0%		51,90
12/02/2021	CR17	1265,40	7:32	10:32	10:37	10:43	11:43	1312,50	3,7%		47,10
22/02/2021	CR18	1297,70	7:20	10:20	10:28	10:30	11:30	1351,00	4,1%		53,30
22/02/2021	CR19	1371,10	"	"	"	"	"	1430,10	4,3%	3,6%	59,00
05/10/2020	CR-A1	1339,50	7:49	10:49	11:04	11:04	12:04	1430,00	6,8%		90,50
07/10/2020	CR-A2	1204,80	7:41	10:41	10:54	10:54	11:54	1285,00	6,7%		80,20
07/10/2020	CR-A3	1279,70	"	"	"	"	"	1366,80	6,8%	6,7%	87,10
08/10/2020	C-A1	842,60	7:52	10:52	11:07	11:07	12:07	891,10	5,8%		48,50
08/10/2020	C-A2	797,30	"	"	"	"	"	842,80	5,7%		45,50
08/10/2020	C-A3	799,70	"	"	"	"	"	846,40	5,8%	5,8%	46,70
08/10/2020	ARG25-A1	374,82	"	"	"	"	"	406,20	8,4%		31,38
08/10/2020	ARG25-A2	354,58	"	"	"	"	"	385,90	8,8%		31,32
09/10/2020	ARG50-A1	751,70	7:47	10:47	11:02	11:02	12:02	824,90	9,7%		73,20
09/10/2020	ARG50-A2	730,00	"	"	"	"	"	800,00	9,6%		70,00
09/10/2020	ARG50-A3	760,20	"	"	"	"	"	834,00	9,7%	9,7%	73,80
09/10/2020	ARG25-A3	350,70	"	"	"	"	"	382,60	9,1%	8,8%	31,90
13/10/2020	C1	889,90	7:39	10:39	10:50	10:50	11:50	912,50	2,5%		22,60
13/10/2020	C2	916,90	"	"	"	"	"	941,30	2,7%		24,40
13/10/2020	C3	950,30	"	"	"	"	"	972,80	2,4%		22,50
13/10/2020	ARG25-1	381,35	"	"	"	"	"	412,20	8,1%		30,85
13/10/2020	ARG25-2	359,51	"	"	"	"	"	388,20	8,0%		28,69
14/10/2020	C4	928,30	7:33	10:33	10:45	10:45	11:45	951,70	2,5%		23,40
14/10/2020	C5	855,00	"	"	"	"	"	888,60	3,9%		33,60
14/10/2020	C6	866,70	"	"	"	"	"	879,00	1,4%		12,30
14/10/2020	ARG25-3	359,50	"	"	"	"	"	388,71	8,1%		29,21
14/10/2020	ARG25-4	400,30	"	"	"	"	"	432,66	8,1%		32,36
15/10/2020	C7	904,80	7:41	10:41	10:53	10:53	11:53	929,30	2,7%		24,50
15/10/2020	C8	793,70	"	"	"	"	"	817,90	3,0%		24,20
15/10/2020	C9	884,30	"	"	"	"	"	906,20	2,5%		21,90
15/10/2020	ARG25-5	380,50	"	"	"	"	"	410,80	8,0%		30,30
15/10/2020	ARG25-6	355,20	"	"	"	"	"	382,75	7,8%		27,55
18/02/2021	ARG25-7	387,88	7:25	10:25	10:35	10:37	11:37	420,91	8,5%		33,03
18/02/2021	ARG25-8	375,40	"	"	"	"	"	410,28	9,3%		34,88
18/02/2021	ARG25-9	379,51	"	"	"	"	"	417,27	9,9%		37,76
18/02/2021	ARG25-10	385,65	"	"	"	"	"	428,20	11,0%	8,7%	42,55
16/10/2020	C10	762,30	7:33	10:33	10:47	10:47	11:47	785,40	3,0%		23,10
16/10/2020	C11	791,80	"	"	"	"	"	814,20	2,8%		22,40
16/10/2020	C12	789,60	"	"	"	"	"	814,60	3,2%		25,00
17/10/2020	C13	747,30	14:01	17:01	17:14	17:14	18:14	771,80	3,3%		24,50
17/10/2020	C14	799,90	"	"	"	"	"	826,30	3,3%		26,40
17/10/2020	C15	834,30	"	"	"	"	"	860,90	3,2%		26,60
18/02/2021	C16	897,50	7:40	10:4	10:48	10:50	11:50	920,80	2,6%		23,30
18/02/2021	C17	935,90	"	"	"	"	"	962,00	2,8%		26,10
18/02/2021	C18	1061,80	"	"	"	"	"	1091,80	2,8%	2,8%	30,00
18/02/2021	C19	894,00	"	"	"	"	"	923,30	3,3%		29,30
19/10/2020	ARG50-1	742,60	7:33	10:33	10:51	10:51	11:51	804,60	8,3%		62,00
19/10/2020	ARG50-2	725,60	"	"	"	"	"	787,80	8,6%		62,20
19/10/2020	ARG50-3	753,20	"	"	"	"	"	818,40	8,7%		65,20
20/10/2020	ARG50-4	739,00	7:40	10:40	10:50	10:50	11:50	800,90	8,4%		61,90
20/10/2020	ARG50-5	760,90	"	"	"	"	"	823,70	8,3%		62,80
21/10/2020	ARG50-6	767,90	7:43	10:43	10:55	10:55	11:55	836,70	9,0%		68,80
21/10/2020	ARG50-7	740,40	"	"	"	"	"	805,00	8,7%	8,6%	64,60

Universidade Federal de Pelotas												
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM												
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado												
Verificação da Saturação dos CPs pós vácuo												
Data	CP	Massa Nat.	Massa Pós	Acréscimo dev. Vácuo			Massa	Tempo		Acréscimo dev. Espera para GS		
		(g)	Msat (g)	(%)	Média (%)	Mágua (g)	Msat (g)	Data	Tempo (dd)	(%)	Média (%)	Mágua (g)
16/09/2020	CR2	1213,00	1251,70	3,2%		38,70	1264,10	4/1/21	110	1,0%		12,40
16/09/2020	CR3	1237,60	1280,80	3,5%		43,20	1292,60	4/1/21	110	0,9%		11,80
17/09/2020	CR1	1283,10	1325,60	3,3%		42,50	1335,30	4/1/21	109	0,7%		9,70
17/09/2020	CR4	1264,40	1307,20	3,4%		42,80	1315,20	4/1/21	109	0,6%		8,00
18/09/2020	CR5	1319,40	1365,60	3,5%		46,20	1373,20	4/1/21	108	0,6%		7,60
18/09/2020	CR6	1307,40	1354,10	3,6%		46,70	1361,70	4/1/21	108	0,6%		7,60
19/09/2020	CR7	1235,50	1280,80	3,7%		45,30	1292,80	17/2/21	151	0,9%		12,00
19/09/2020	CR8	1294,50	1341,40	3,6%		46,90	1352,90	17/2/21	151	0,9%		11,50
21/09/2020	CR9	1243,10	1288,80	3,7%		45,70	1302,40	17/2/21	149	1,1%		13,60
21/09/2020	CR10*	1304,30	1347,60	3,3%		43,30	1362,30	23/11/20	63	1,1%		14,70
26/09/2020	CR11*	1285,10	1334,10	3,8%		49,00	1342,10	23/11/20	58	0,6%		8,00
26/09/2020	CR12*	1270,80	1316,70	3,6%		45,90	1326,60	23/11/20	58	0,8%		9,90
01/10/2020	CR13*	1272,90	1318,10	3,6%		45,20	1349,40	23/11/20	53	2,4%		31,30
01/10/2020	CR14*	1338,30	1382,30	3,3%		44,00	1312,50	23/11/20	53	-5,0%		-69,80
05/10/2020	CR15*	1285,90	1330,90	3,5%		45,00	1324,10	23/11/20	49	-0,5%		-6,80
12/02/2021	CR16*	1297,50	1349,40	4,0%		51,90	1349,40	13/2/21	1	0,0%		0,00
12/02/2021	CR17*	1265,40	1312,50	3,7%		47,10	1312,50	13/2/21	1	0,0%		0,00
22/02/2021	CR18*	1297,70	1351,00	4,1%		53,30	1351,00	27/2/21	5	0,0%		0,00
22/02/2021	CR19*	1371,10	1430,00	4,3%	3,6%	58,90	1430,00	27/2/21	5	0,0%		0,00
05/10/2020	CR-A1	1339,50	1430,00	6,8%		90,50						
07/10/2020	CR-A2	1204,80	1285,00	6,7%		80,20						
07/10/2020	CR-A3	1279,70	1366,80	6,8%	6,7%	87,10						
08/10/2020	C-A1	842,60	891,10	5,8%		48,50						
08/10/2020	C-A2	797,30	842,80	5,7%		45,50						
08/10/2020	C-A3	799,70	846,40	5,8%	5,8%	46,70						
08/10/2020	ARG25-A1	374,82	406,20	8,4%		31,38						
08/10/2020	ARG25-A2	354,58	385,90	8,8%		31,32						
09/10/2020	ARG50-A1	751,70	824,90	9,7%		73,20						
09/10/2020	ARG50-A2	730,00	800,00	9,6%		70,00						
09/10/2020	ARG50-A3	760,20	834,00	9,7%	9,7%	73,80						
09/10/2020	ARG25-A3	350,70	382,60	9,1%	8,8%	31,90						
13/10/2020	C1	889,90	912,50	2,5%		22,60						
13/10/2020	C2	916,90	941,30	2,7%		24,40						
13/10/2020	C3	950,30	972,80	2,4%		22,50						
13/10/2020	ARG25-1	381,35	412,20	8,1%		30,85	1388,70	23/11/20	41	236,9%		976,50
13/10/2020	ARG25-2	359,51	388,20	8,0%		28,69	1339,90	23/11/20	41	245,2%		951,70
14/10/2020	C4	928,30	951,70	2,5%		23,40	957,30	18/1/21	96	0,6%		5,60
14/10/2020	C5	855,00	888,60	3,9%		33,60	883,40	18/1/21	96	-0,6%		-5,20
14/10/2020	C6	866,70	879,00	1,4%		12,30	892,70	18/1/21	96	1,6%		13,70
14/10/2020	ARG25-3	359,50	388,71	8,1%		29,21	1351,00	23/11/20	40	247,6%		962,29
14/10/2020	ARG25-4	400,30	432,66	8,1%		32,36	1430,00	23/11/20	40	230,5%		997,34
15/10/2020	C7	904,80	929,30	2,7%		24,50	934,50	11/1/21	88	0,6%		5,20
15/10/2020	C8	793,70	817,90	3,0%		24,20	820,90	11/1/21	88	0,4%		3,00
15/10/2020	C9	884,30	906,20	2,5%		21,90	910,60	11/1/21	88	0,5%		4,40
15/10/2020	ARG25-5	380,50	410,80	8,0%		30,30	415,21	23/11/20	39	1,1%		4,41
15/10/2020	ARG25-6	355,20	382,75	7,8%	8,0%	27,55	389,60	23/11/20	39	1,8%		6,85
16/10/2020	C10	762,30	785,40	3,0%		23,10	391,10	23/11/20	38	-50,2%		-394,30
16/10/2020	C11	791,80	814,20	2,8%		22,40	420,91	23/11/20	38	-48,3%		-393,29
16/10/2020	C12	789,60	814,60	3,2%		25,00	410,28	23/11/20	38	-49,6%		-404,32
17/10/2020	C13	747,30	771,80	3,3%		24,50	434,10	23/11/20	39	-43,8%		-337,70
17/10/2020	C14	799,90	826,30	3,3%		26,40	413,00	23/11/20	39	-50,0%		-413,30
17/10/2020	C15	834,30	860,90	3,2%	2,8%	26,60	384,25	23/11/20	39	-55,4%		-476,65
19/10/2020	ARG50-1	742,60	804,60	8,3%		62,00	814,20	20/2/21	120	1,2%		9,60
19/10/2020	ARG50-2	725,60	787,80	8,6%		62,20	799,90	20/2/21	120	1,5%		12,10
19/10/2020	ARG50-3	753,20	818,40	8,7%		65,20	827,60	19/1/21	92	1,1%		9,20
20/10/2020	ARG50-4	739,00	800,90	8,4%		61,90	810,40	19/1/21	91	1,2%		9,50
20/10/2020	ARG50-5	760,90	823,70	8,3%		62,80	828,90	19/1/21	91	0,6%		5,20
21/10/2020	ARG50-6	767,90	836,70	9,0%		68,80	844,00	13/1/21	84	0,9%		7,30
21/10/2020	ARG50-7	740,40	805,00	8,7%	8,6%	64,60	809,70	13/1/21	84	0,6%		4,70

Universidade Federal de Pelotas											
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM											
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado											
Determinação Massa Saturada à vácuo de CPs (Msat) - Norma ASTM-C-1202-97 - CPs para Controle de Umid.											
Data	CP	Massa Pós dessac	Início	Colocação Água		Vácuo Final		Massa Pós Msat (g)	Acréscimo		Variação Saturação
			(h)	Início (h)	Fim (h)	Início(h)	Fim (h)		(%)	Mágua (g)	
07/12/2020	CR10*	955,60	15:19	18:19	18:31	18:31	19:31	960,20	0,5%	4,60	0,16%
		380,00	"	"	"	"	"	389,50	2,5%	9,50	
	ARG25-1	404,22	"	"	"	"	"	411,70	1,9%	7,48	-0,12%
	C10	783,80	"	"	"	"	"	786,60	0,4%	2,80	0,15%
09/12/2020	CR11*	920,40	14:17	17:17	17:29	17:29	18:29	922,10	0,2%	1,70	0,03%
		404,90	"	"	"	"	"	412,37	1,8%	7,47	
	ARG25-2	382,40	"	"	"	"	"	387,80	1,4%	5,40	-0,10%
	C11	813,20	"	"	"	"	"	815,70	0,3%	2,50	0,18%
10/12/2020	CR12*	940,40	14:19	17:19	17:29	17:29	18:29	944,60	0,4%	4,20	0,00%
		361,10	"	"	"	"	"	372,10	3,0%	11,00	
	ARG25-3	382,35	"	"	"	"	"	388,00	1,5%	5,65	-0,18%
	C12	812,60	"	"	"	"	"	816,40	0,5%	3,80	0,22%
22/02/2021	CR16*	988,40	7:36	10:36	10:49	10:49	11:49	995,60	0,7%	7,20	-0,56%
		335,40	"	"	"	"	"	346,20	3,2%	10,80	
	ARG25-7	410,94	"	"	"	"	"	421,40	2,5%	10,46	0,12%
	C16	914,50	"	"	"	"	"	919,30	0,5%	4,80	-0,16%
27/02/2021	CR17*	951,40	14:17	17:17	17:27	17:27	18:27	956,10	0,5%	4,70	-0,18%
		338,60						354,01	4,6%	15,41	
	ARG25-8	401,25						409,61	2,1%	8,36	
	C17	955,00						960,50	0,6%	5,50	
21/12/2020	CR13*	921,30	7:38	10:38	10:52	10:52	11:52	931,90	1,2%	10,60	-0,02%
		363,58						385,99	6,2%	22,41	
	ARG25-4	411,16	"	"	"	"	"	431,90	5,0%	20,74	-0,18%
	C13	761,90						771,40	1,2%	9,50	-0,05%
22/12/2020	CR14*	975,80	"	"	"	"	"	987,50	1,2%	11,70	0,05%
		371,30						395,50	6,5%	24,20	
	ARG25-5	388,70	"	"	"	"	"	411,00	5,7%	22,30	0,05%
	C14	813,10						825,70	1,5%	12,60	-0,07%
23/12/2020	CR15*	912,40						923,10	1,2%	10,70	0,09%
		383,50						409,00	6,6%	25,50	
	ARG25-6	363,24	"	"	"	"	"	382,75	5,4%	19,51	0,00%
	C15	848,80	"	"	"	"	"	860,70	1,4%	11,90	-0,02%
11/03/2021	CR18*	957,20	7:47	10:47	10:57	10:57	11:57	969,30	1,3%	12,10	
		351,20	"	"	"	"	"	376,30	7,1%	25,10	
	ARG25-9	398,30	"	"	"	"	"	416,80	4,6%	18,50	
	C18	1070,60	"	"	"	"	"	1089,60	1,8%	19,00	
06/03/2021	CR19*	1036,80	14:21	17:21	17:30	17:30	18:30	1049,00	1,2%	12,20	
		349,65	"	"	"	"	"	372,80	6,6%	23,15	
	ARG25-10	409,00	"	"	"	"	"	428,10	4,7%	19,10	
	C19	903,8	"	"	"	"	"	921,60	0,02	17,8	

Apêndice B – Planilhas para determinação dos índices de caracterização de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009)

Universidade Federal de Pelotas									
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM									
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado									
Determinação Massa Seca em estufa de CPs (Ms) - Norma NBR 9778, item 6.1.1									
Data	CP	Massa Nat. (g)	Massa 24 hs (g)	Diferença (%)	Massa 48 hs (g)	Diferença (%)	Massa 72 hs (g)	Sec Total (%)	Status
18/09/2020	CR-A1	1378,70	1335,70	3,22%	1330,50	0,39%	1327,40	3,72%	ok
18/09/2020	CR-A2	1239,80	1200,30	3,29%	1198,30	0,17%	1192,50	3,82%	ok
18/09/2020	CR-A3	1319,40	1274,40	3,53%	1270,00	0,35%	1267,10	3,96%	ok
21/09/2020	C-A1	868,40	839,50	3,44%	837,10	0,29%	835,50	3,79%	ok
21/09/2020	C-A2	819,10	793,20	3,27%	791,10	0,27%	790,80	3,46%	ok
21/09/2020	C-A3	822,40	796,60	3,24%	795,20	0,18%	793,00	3,57%	ok
25/09/2020	ARG50-A1	760,60	736,00	3,34%	730,90	0,70%	745,20	2,02%	ok
25/09/2020	ARG50-A2	738,90	728,40	1,44%	726,10	0,32%	723,90	2,03%	ok
25/09/2020	ARG50-A3	769,40	759,00	1,37%	755,20	0,50%	753,80	2,03%	ok
25/09/2020	ARG25-A1	377,70	374,20	0,94%	373,50	0,19%	371,39	1,67%	ok
25/09/2020	ARG-25-A2	357,10	354,20	0,82%	352,80	0,40%	351,20	1,65%	ok
25/09/2020	ARG-25-A3	353,00	350,90	0,60%	349,50	0,40%	347,30	1,61%	ok

Universidade Federal de Pelotas						
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM						
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado						
Determinação da Absorção Total (A) - Norma NBR 9778, item 7.1 $A = ((Msat - Msec)/Msec) \times 100$						
Data	CP	Massa Nat. (g)	Massa Seca Estufa (g)	Absorção Total (%)	Absorção Média (%)	Legenda CPs
18/09/2020	CR-A1	1378,70	1327,40	7,73	7,79	CR - Concreto Revestido
18/09/2020	CR-A2	1239,80	1192,50	7,76		
18/09/2020	CR-A3	1319,40	1267,10	7,87		
21/09/2020	C-A1	868,40	835,50	6,65	6,65	Concreto
21/09/2020	C-A2	819,10	790,80	6,58		
21/09/2020	C-A3	822,40	793,00	6,73		
25/09/2020	ARG50-A1	760,60	745,20	10,70	10,62	Argamassa 50 mm
25/09/2020	ARG50-A2	738,90	723,90	10,51		
25/09/2020	ARG50-A3	769,40	753,80	10,64		
25/09/2020	ARG25-A1	377,70	371,39	9,37	9,80	Argamassa 25 mm
25/09/2020	ARG-25-A2	357,10	351,20	9,88		
25/09/2020	ARG-25-A3	353,00	347,30	10,16		

Universidade Federal de Pelotas						
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM						
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado						
Determinação do Índice de Vazios (Iv) - Norma NBR 9778, item 7.2 $Iv = ((Msat - Msec)/(Msat - Mi)) \times 100$						
Data	CP	Massa Balança Hidrosc. (Mi)(g)	Massa Seca Estufa (g)	Índice de Vazios (%)	Índice de Vazios Médio (%)	Legenda CPs
18/09/2020	CR-A1	795,69	1327,40	16,18	16,18	CR - Concreto Revestido
18/09/2020	CR-A2	708,97	1192,50	16,06		
18/09/2020	CR-A3	755,32	1267,10	16,30		
21/09/2020	C-A1	511,46	835,50	14,65	14,66	Concreto
21/09/2020	C-A2	483,72	790,80	14,48		
21/09/2020	C-A3	486,73	793,00	14,85		
25/09/2020	ARG50-A1	414,65	745,20	19,43	19,39	Argamassa 50 mm
25/09/2020	ARG50-A2	405,36	723,90	19,28		
25/09/2020	ARG50-A3	421,79	753,80	19,46		
25/09/2020	ARG25-A1	208,08	371,39	17,57	18,17	Argamassa 25 mm
25/09/2020	ARG-25-A2	195,13	351,20	18,19		
25/09/2020	ARG-25-A3	194,48	347,30	18,76		

Universidade Federal de Pelotas						
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PPGCEM						
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado						
Determinação da Massa Específica da Amostra Seca (ρ_s) - Norma NBR 9778, item 7.3 $\rho_s = M_{sec}/M_{sat}-Mi$						
Data	CP	Massa Balança Hidrostática(g)	Massa Seca Estufa (g)	Massa Espec. A. Sec (ρ_s)	Massa Espec. A. Sec Médio (ρ_s)	Legenda CPs
18/09/2020	CR-A1	795,69	1327,40	2,09	2,08	CR - Concreto Revestido
18/09/2020	CR-A2	708,97	1192,50	2,07		
18/09/2020	CR-A3	755,32	1267,10	2,07		
21/09/2020	C-A1	511,46	835,50	2,20	2,20	Concreto
21/09/2020	C-A2	483,72	790,80	2,20		
21/09/2020	C-A3	486,73	793,00	2,20		
25/09/2020	ARG50-A1	414,65	745,20	1,82	1,83	Argamassa 50 mm
25/09/2020	ARG50-A2	405,36	723,90	1,83		
25/09/2020	ARG50-A3	421,79	753,80	1,83		
25/09/2020	ARG25-A1	208,08	371,39	1,87	1,85	Argamassa 25 mm
25/09/2020	ARG-25-A2	195,13	351,20	1,84		
25/09/2020	ARG-25-A3	194,48	347,30	1,85		

Universidade Federal de Pelotas						
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PPGCEM						
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado						
Determinação da Massa Específica da Amostra Saturada (ρ_{sat}) - Norma NBR 9778, item 7.4 $\rho_{sat} = M_{sat}/M_{sat}-Mi$						
Data	CP	Massa Balança Hidrostática(g)	Massa Seca Estufa (g)	Massa Espec. A. Sat (ρ_{sat}) (g/cm³)	Massa Espec. A. Sat Média (ρ_{sat}) (g/cm³)	Legenda CPs
18/09/2020	CR-A1	795,69	1327,40	2,25	2,24	CR - Concreto Revestido
18/09/2020	CR-A2	708,97	1192,50	2,23		
18/09/2020	CR-A3	755,32	1267,10	2,24		
21/09/2020	C-A1	511,46	835,50	2,35	2,35	Concreto
21/09/2020	C-A2	483,72	790,80	2,35		
21/09/2020	C-A3	486,73	793,00	2,35		
25/09/2020	ARG50-A1	414,65	745,20	2,01	2,02	Argamassa 50 mm
25/09/2020	ARG50-A2	405,36	723,90	2,03		
25/09/2020	ARG50-A3	421,79	753,80	2,02		
25/09/2020	ARG25-A1	208,08	371,39	2,05	2,03	Argamassa 25 mm
25/09/2020	ARG-25-A2	195,13	351,20	2,02		
25/09/2020	ARG-25-A3	194,48	347,30	2,03		

Universidade Federal de Pelotas						
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PPGCEM						
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado						
Determinação da Massa Específica Real (ρ_r) - Norma NBR 9778, item 7.5 $\rho_r = M_{sec}/M_{sec}-Mi$						
Data	CP	Massa Balança Hidrostática(g)	Massa Seca Estufa (g)	Massa Espec. Real (ρ_r) (g/cm³)	Massa Espec. Real Média (ρ_r) (g/cm³)	Legenda CPs
18/09/2020	CR-A1	795,69	1327,40	2,50	2,48	CR - Concreto Revestido
18/09/2020	CR-A2	708,97	1192,50	2,47		
18/09/2020	CR-A3	755,32	1267,10	2,48		
21/09/2020	C-A1	511,46	835,50	2,58	2,58	Concreto
21/09/2020	C-A2	483,72	790,80	2,58		
21/09/2020	C-A3	486,73	793,00	2,59		
25/09/2020	ARG50-A1	414,65	745,20	2,25	2,27	Argamassa 50 mm
25/09/2020	ARG50-A2	405,36	723,90	2,27		
25/09/2020	ARG50-A3	421,79	753,80	2,27		
25/09/2020	ARG25-A1	208,08	371,39	2,27	2,27	Argamassa 25 mm
25/09/2020	ARG-25-A2	195,13	351,20	2,25		
25/09/2020	ARG-25-A3	194,48	347,30	2,27		

Apêndice C – Planilhas de Controle de Umidade para adquirir GS alvo

Universidade Federal de Pelotas				
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM				
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado				
Controle de Umidade p/ GS alvo				
Tipo CP	CR-A	ARG25-A	C-A	ARG50-A
Absorção Total (%)	7,78	9,81	6,65	10,62

$Abs/100 = (Msat - Mseca)/Mseca$

$Mseca = Msat / (1 + Abs/100)$

Massa Saturada com vazio e cálculo da Massa seca (g)				Pesagens para adquirir o GS estipulado					
CP	Massa saturada	Massa Seca Estimada	Massa para obter GS (g)		24/11 09:10 hs	25/11 08:00 hs	15/12 08:30 hs	15/12 15:00 hs	Status
	23/11/2020 08:56		80	60					
CR10*	1362,30	1263,96	1342,63		1312,30	1343,20			Ensacados 25/11
CR11*	1342,10	1245,22	1322,72		1292,60	1329,10			
CR12*	1326,60	1230,84	1307,45		1279,80	1307,90			
CR16	1349,40	1251,99	1329,92	13-12-21	1330,00				
CR17	1312,50	1217,76	1293,55	20-2-21	1293,60				
CR13*	1324,10	1228,52		1285,87			1283,90	1289,60	ensacar as 16:44
CR14*	1388,70	1288,46		1348,60			1350,70	1348,30	ensacar as 16:14
CR15*	1339,90	1243,18		1301,21			1299,10	1301,50	ensacar as 17:50
CR18	1351,00	1253,48		1311,99		2-3-21	1309,30	1312,00	
CR19	1430,00	1326,78		1388,71		27-2-21	1390,00	1388,90	
ARG25-1	415,21	378,12	407,79		380,50	410,10			Ensacados 25/11
ARG25-2	389,60	354,79	382,64		357,80	386,40			
ARG25-3	391,10	356,16	384,11		358,40	385,78			
ARG25-7	420,91	383,31	413,39	13-2-21	413,66				
ARG25-8	410,28	373,63	402,95	20-2-21	403,36				
ARG25-4	434,10	395,32		418,59			402,00	418,52	ensacar as 16:44
ARG25-5	413,00	376,10		398,24			381,00	398,58	ensacar as 16:14
ARG25-6	384,25	349,92		370,52			355,90	370,28	ensacar as 17:50
ARG25-9	417,27	379,99		402,36		2-3-21	394,20	402,51	
ARG25-10	428,20	389,95		412,90		27-2-21	405,14	412,90	
C10	787,30	738,21	777,48		770,50	778,20			Ensacados 25/11
C11	816,70	765,78	806,52		800,00	810,60			
C12	816,80	765,87	806,61		798,80	808,90			
C16	920,80	863,38	909,32	13-2-21	909,80				
C17	962,00	902,02	950,00	20-2-21	950,00				
C13	773,70	725,46		754,40			757,60	756,40	ensacar as 16:44
C14	828,30	776,65		807,64			811,20	808,80	ensacar as 16:14
C15	863,20	809,38		841,67			845,50	843,40	ensacar as 17:50
C18	1091,80	1023,72		1064,57		27/-2-21	1067,90	1065,00	
C19	923,30	865,73		900,27		27-2-21	899,50	900,30	

Universidade Federal de Pelotas							
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM							
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado							
Controle de Umidade - Determinação do GS das partes separadas							
Tipo CP		CR-A	ARG25-A	C-A	ARG50-A		
Absorção Total (%)		7,78	9,81	6,65	10,62		
Definições das Fórmulas		Md = Massa Saturada GS determinado			Msec = Massa seca determinada pós vácuo partes separadas		
		Ms = Massa Seca estimada			Msat = Massa saturada pós vácuo partes separadas		
CPs	Conjunto	GS = (((Md-Ms)/Ms)/Abs)*100		Avaliação GS A/Ensac e D/Dessac	Mseca das partes em Conc Revest. Msec=Msat/(1+abs/100)	GS das partes CR GS=(((Msat(pós dessac) - Msec)/Msec)/Abs)*100	Elemento
		Antes Ensac	Depois Dessac				
CR10*	1 - 80%	81%	73%	-10%	900,33 354,70	92% 73%	concreto argamassa
CR11*	2 - 80%	87%	83%	-5%	864,60 375,53	97% 80%	concreto argamassa
CR12*	3 - 80%	80%	74%	-8%	885,70 338,86	93% 67%	concreto argamassa
CR16	4 - 80%	80%	74%	-8%	933,52 315,27	88% 65%	concreto argamassa
CR17	5 - 80%	80%	76%	-5%	896,48 322,38	92% 67%	concreto argamassa
CR13*	1 - 60%	64%	59%	-8%	873,79 351,51	82% 35%	concreto argamassa
CR14*	2 - 60%	60%	59%	-2%	925,93 360,17	81% 32%	concreto argamassa
CR15*	3 - 60%	60%	55%	-10%	865,54 372,46	81% 30%	concreto argamassa
CR18	4 - 60%	60%	56%	-6%	908,86 342,68	80% 40%	concreto argamassa
CR19	5 - 60%	60%	58%	-4%	983,59 339,50	81% 42%	concreto argamassa

Apêndice D – Planilhas de Controle de Geral dos CPs desde GS alvo até a Extração

Universidade Federal de Pelotas									
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM									
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado									
Controle para Difusão									
Absorção	7,78								

$Abs/100 = (Msat - Mseca)/Mseca$

$Mseca = Msat / (1 + Abs/100)$

CR- Concreto Revestido															
Massa Saturada com vazio e cálculo da Massa Seca (g)				Secagem p/ GS					Estabilização 50°C						
CP	Massa Saturada	Massa Seca Estimada	Massa para obter GS		Data	Hora	Massa	GS Real	Tempo (hs)	Início			Fim		
			80	60						Massa ensac	dia	hora	Massa ensac	dia	hora
CR7	1292,80	1199,48													
CR8	1352,90	1255,24													
CR9	1302,40	1208,39													
CR1	1335,30	1238,91	1316,02		04/01/2021	15:27	1316,00	80,0%	19:30	1333,80	5/1/21	11:00	1332,90	9/1/21	15:10
CR2	1264,10	1172,85	1245,85		04/01/2021	15:27	1248,80	83,2%	19:30	1267,20	5/1/21	11:50	1266,40	9/1/21	15:10
CR3	1292,60	1199,29	1273,94		04/01/2021	15:27	1274,90	81,0%	19:30	1293,00	5/1/21	11:35	1292,20	9/1/21	15:10
CR4	1315,20	1220,26		1277,23	07/01/2021	15:33	1278,60	61,4%	48:30	1298,50	9/1/21	16:10	1298,10	12/1/21	18:00
CR5	1373,20	1274,08		1333,55	07/01/2021	15:33	1335,20	61,7%	48:30	1355,30	9/1/21	15:55	1354,90	12/1/21	18:00
CR6	1361,70	1263,41		1322,38	07/01/2021	15:33	1323,50	61,1%	48:30	1343,40	9/1/21	16:40	1343,10	12/1/21	18:00

Contaminação				Extração				tempo de contaminação					GS médio do ensaio
massa				massa				previsto	real			total seg	
dia	hora	antes	depois	dia	hora	c/contam	s/contam		dias	horas	min		
17/02/21	08:18	1292,80	1329,50	30/07/21	08:40	1333,50	1303,90		163			14083200	100,00
17/02/21	08:32	1352,90	1393,00	31/07/21	14:46	1394,00	1363,10		164			14169600	100,00
17/02/21	09:45	1302,40	1340,40	22/11/21	14:22	1342,00	1312,00		278			24019200	100,00
15/02/21	08:35	1316,20	1357,70	02/08/21	14:24	1358,50	1318,90		168			14515200	81,58
15/02/21	09:50	1247,80	1291,70	02/08/21	08:30	1292,40	1245,50		168			14515200	80,88
15/02/21	09:10	1274,30	1317,70	22/11/21	09:47	1318,00	1277,00		280			24192000	81,83
12/02/21	09:15	1277,90	1319,10	03/08/21	14:34	1320,00	1282,50		172			14860800	63,13
12/02/21	09:40	1334,40	1376,00	22/11/21	08:10	1376,00	1341,00		283			24451200	64,19
12/02/21	10:00	1322,70	1364,50	03/08/21	08:33	1364,90	1328,40		172			14860800	63,22

Universidade Federal de Pelotas									
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM									
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado									
Controle para Difusão									
Absorção	10,62								

$Abs/100 = (Msat - Mseca)/Mseca$

$Mseca = Msat / (1 + Abs/100)$

ARG50- Argamassa h=50 cm															
Massa Saturada com vazio e cálculo da Massa Seca (g)					Secagem para GS					Estabilização 50°C					
CP	Massa Saturada	Massa Seca Estimada	Massa para obter GS		Data	Hora	Massa	GS real	Tempo (hs)	Início			Fim		
			80	60						Massa ensac	dia	hora	Massa ensac	dia	hora
ARG50-1	814,20	736,03													
ARG50-2	799,90	723,11													
ARG50-8	817,10	738,65													
ARG50-3	827,60	748,15	811,71		19/1/21	16:00	811,80	80%	18,00	830,10	20/1/21	10:35	829,80	23/1/21	15:00
ARG50-4	810,40	732,60	794,84		19/1/21	16:00	794,90	80%	18,00	813,40	20/1/21	10:50	813,10	23/1/21	15:00
ARG50-5	828,90	749,32	812,98		19/1/21	16:00	813,00	80%	18,00	831,50	20/1/21	11:00	831,00	23/1/21	15:00
ARG50-9	840,80	760,08	824,66		18/8/21	14:00	824,80	80%	18,00	847,00	19/8/21	10:00	847,00	23/8/21	14:00
ARG50-6	844,00	762,97		811,59	13/1/21	19:00	814,50	64%	40,00	833,00	15/1/21	10:50	832,20	18/1/21	10:00
ARG50-10	852,20	770,39		819,47	18/8/21	14:10	819,60	60%	35,00	837,20	20/8/21	16:00	837,30	23/8/21	15:00
ARG50-7	809,70	731,97		778,61	13/1/21	19:00	778,60	60%	40,00	796,80	15/1/21	10:35	796,20	18/1/21	10:00

Contaminação				Extração				tempo de contaminação				GS médio do ensaio	
massa				massa				previsto	real				total seg
dia	hora	antes	depois	dia	hora	c/contam	s/contam		dias	horas	min		
20/02/21	15:20	814,20	851,70	21/07/21	09:50	853,20	817,00		151			13046400	100,00
20/02/21	15:40	799,90	834,90	22/07/21	09:10	837,50	810,20		152			13132800	100,00
18/08/21	08:00	817,10	855,30	15/09/21	08:59	855,09	819,10		28			2419200	100,00
16/02/21	09:32	810,90	849,30	23/07/21	09:18	850,60	815,60		157			13564800	81,94
16/02/21	09:47	794,50	832,50	24/07/21	14:42	833,00	798,10		158			13651200	81,88
16/02/21	10:04	813,10	850,60						0				
25/08/21	08:00	824,80	857,00	04/10/21	16:00	857,40	828,10		40			3456000	82,22
13/02/21	15:35	813,40	854,50	24/07/2021	16:09	854,40	814,80		161			13910400	63,10
25/08/21	08:40	819,60	853,50	13/10/2021	9:02	854,00	826,10		49			4233600	64,13
13/02/21	15:55	778,80	820,70	26/07/2021	8:47	821,70	783,20		163			14083200	63,08

Universidade Federal de Pelotas	
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais -PPGCEM	
Aluno: Jorge Luiz Saes Bandeira - Doutorado	
Controle para Difusão	
Absorção	6,65

$Abs/100 = (Msat - Mseca)/Mseca$

$Mseca = Msat / (1 + Abs/100)$

C- Concreto															
Massa Saturada com vazio e cálculo da Massa Seca (g)				Secagem p/GS					Estabilização 50°C						
CP	Massa Saturada	Massa Seca Estimada	Massa para obter GS	Data	Hora	Massa	GS Real	Tempo (hs)	Início			Fim			
									Massa ensac	dia	hora	Massa ensac	dia	hora	
C1	918,60	861,32	60												
C2	947,50	888,42													
C3	979,60	918,52													
C4	957,30	897,61	945,36	18/1/21	10:00	945,50	80%	29:45:00	963,40	19/1/21	15:45	963,20	23/1/21	15:00	
C5	883,40	828,32	872,38	18/1/21	10:00	872,60	80%	29:35:00	890,30	19/1/21	15:35	890,90	23/1/21	15:00	
C6	892,70	837,04	881,57	18/1/21	10:00	881,60	80%	29:20:00	899,60	19/1/21	15:15	899,10	23/1/21	15:00	
C7	934,50	876,23	911,19	12/1/21	17:40	911,70	61%	95:00:00	930,00	16/1/21	16:40	929,80	20/1/21	11:00	
C8	820,90	769,71	800,43	12/1/21	17:40	800,40	60%	62:00:00	819,00	15/1/21	10:35	818,60	18/1/21	10:00	
C9	910,60	853,82	887,89	12/1/21	17:40	888,20	61%	166:00:00	906,70	19/1/21	16:00	906,20	26/1/21	15:00	

Contaminação				Extração				tempo de contaminação					GS médio do ensaio
massa				massa				previsto	real			total seg	
dia	hora	antes	depois	dia	hora	c/contam	s/contam		dias	horas	min		
17/02/21	08:58	918,60	954,80	27/07/21	09:15	955,90	922,30		160			13824000	100,00
17/02/21	09:12	947,50	984,30										
20/02/21	16:00	979,60	1019,20	26/07/21	10:25	1020,30	982,10		156			13478400	100,00
15/02/21	09:25	962,80	989,30									0	
16/02/21	08:55	872,70	911,00	28/07/21	09:17	912,30	876,10		162				83,66
16/02/21	09:12	881,70	919,50	27/07/21	14:50	919,80	883,80		161			13910400	82,12
12/02/21	10:25	911,40	952,00									0	
13/02/21	14:53	800,70	843,90	30/07/21	14:34	843,90	801,30		167			14428800	61,12
13/02/21	15:15	898,70	933,00	28/07/21	14:32	933,00	878,00		165			14256000	60,81

Apêndice E – Planilhas dos Teores de Cloretos por camada dos CPs

CR-8 GS 100%					Contamin	17/02/2021	Extração	31/07/2021
		Medidas			Dias exp:	164		
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
		15	13,5				%massa amostra	% massa aglomer
Revestimento	1	20,00	18,50	m1	2,50	0,539	1,861	8,576
	2	25,00	23,50	m2	7,50	0,540	1,788	8,238
	3	34,00	32,50	m3	14,50	0,550	1,432	6,599
	4	35,50	34,50	m4	19,88	0,542	1,451	6,689
	5	37,00	35,50	m5	21,38	0,561	1,427	6,577
	6	38,50	38,00	m6	23,00	0,559	1,407	6,485
	7	40,00	39,00	m8	24,63	0,545	1,438	6,625
Concreto	8	41,50	40,50	m9	26,00	0,569	0,940	15,150
	9	43,00	42,00	m10	27,50	0,567	0,738	11,901
	10	44,50	43,50	m12	29,00	0,588	0,484	7,805
	11	48,00	47,00	m14	31,50	0,561	0,344	5,552
	12	54,00	53,00	m16	36,25	0,586	0,148	2,389
	13	60,00	57,00	m17	41,75	0,579	0,112	1,806

CR-7 GS 100%					Contamin	17/02/2021	Extração	30/07/2021
		Medidas			Dias exp:	163		
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
		15	13,5				%massa amostra	% massa aglomer
Revestimento	1	20,00	18,50	m1	2,50	0,523	1,656	7,633
	2	25,00	23,50	m2	7,50	0,552	0,777	3,583
	3	34,00	32,50	m4	14,50	0,551	0,253	1,167
	4	35,50	34,50	m5	19,88	0,560	1,258	5,798
	5	37,00	35,50	m6	21,38	0,550	1,355	6,245
	6	38,50	38,00	m7	23,00	0,518	1,375	6,336
	7	40,00	39,00	m8	24,63	0,543	1,386	6,385
Concreto	8	41,50	40,50	m9	26,00	0,576	1,096	17,667
	9	43,00	42,00	m10	27,50	0,307	0,605	9,747
	10	44,50	43,50	m11	29,00	0,597	0,547	8,820
	11	46,00	45,00	m12	30,50	0,595	0,476	7,674
	12	50,00	49,00	m14	33,25	0,583	0,294	2,522
	13	56,00	55,00	m17	38,25	0,582	0,105	1,691
	14	58,00	57,00	m18	42,25	0,576	0,065	1,041
	15	60,00	59,00	m19	44,25	0,596	0,063	1,012

CR-9 GS 100%					Contamin	17/02/2021	Extração	22/11/2021
		Medidas			Dias exp:	278		
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
		14	15				%massa amostra	% massa aglomer
Revestimento	1	16,00	17,50	m1	1,13	0,551	1,517	6,991
	2	23,00	23,50	m2	5,50	0,545	1,273	5,866
	3	26,00	26,00	m3	10,13	0,557	1,239	5,709
	4	30,00	31,00	m4	13,75	0,560	1,179	5,435
	5	35,50	34,50	m6	18,25	0,543	1,099	5,063
	6	38,00	38,00	m7	22,00	0,539	1,208	5,566
	7	40,00	39,00	m8	24,25	0,540	1,237	5,702
Concreto	8	42,00	42,00	m9	26,25	0,561	1,127	18,163
	9	43,50	43,50	m10	28,25	0,578	0,663	10,693
	10	45,00	45,00	m11	29,75	0,574	0,576	9,288
	11	47,00	46,50	m12	31,38	0,579	0,495	7,974
	12	49,00	48,00	m14	33,13	0,604	0,299	4,821
	13	53,00	52,00	m17	36,00	0,582	0,213	3,432
	14	58,00	57,00	m18	40,50	0,576	0,174	2,800
	15	60,00	59,00	m19	44,00	0,596	0,121	1,945

CR-1-GS 80%					Contamin	15/02/2021	Extração	02/08/2021
		Medidas			Dias exp:	168		
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
		13	13				%massa amostra	% massa aglomer
Revestimento	1	18,00	18,00	m1	2,50	0,562	1,266	5,834
	2	23,00	23,00	m2	7,50	0,562	0,900	4,147
	3	28,00	28,00	m3	12,50	0,565	0,912	4,204
	4	33,50	33,50	m5	17,75	0,565	0,921	4,245
	5	35,00	35,00	m6	21,25	0,561	0,928	4,277
	6	36,50	36,50	m7	22,75	0,568	0,868	3,998
	7	38,00	38,00	m8	24,25	0,583	0,856	3,947
concreto	8	39,50	39,50	m9	25,75	0,958	0,484	7,805
	9	41,00	41,00	m10	27,25	0,949	0,370	5,971
	10	42,50	42,50	m11	28,75	0,988	0,254	4,091
	11	46,00	46,00	m13	31,25	0,971	0,203	3,273
	12	50,00	50,00	m15	35,00	0,972	0,069	1,117
	13	54,00	54,00	m17	39,00	0,956	0,026	0,412
	14	60,00	60,00	m19	44,00	0,963	0,017	0,271
	15	60,00	60,00	m19				0,123

CR-2-GS 80%					Contamin	15/02/2021	Extração	02/08/2021		
		Medidas			Dias exp:	168				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		13	15				%massa amostra	%volume aglomer	% massa aglomer	
Revestimento	1	18,50	19,50	m1	2,50	0,560	1,270	5,854	6,384	
	2	23,50	24,50	m2	7,50	0,559	1,070	4,930	5,375	
	3	28,50	29,50	m3	12,50	0,561	0,919	4,234	4,617	
	4	32,50	33,50	m4	17,00	0,566	0,857	3,949	4,306	
	5	34,00	35,00	m5	19,75	0,559	0,843	3,883	4,234	
Concreto	6	35,50	36,50	m6	21,25	0,599	0,857	3,950	4,308	
	7	37,00	38,00	m7	22,75	0,940	0,374	6,028	2,741	
	8	38,50	39,50	m8	24,25	0,987	0,254	4,095	1,862	
	9	40,00	41,00	m9	25,75	0,980	0,201	3,243	1,474	
	10	42,00	43,00	m10	27,50	0,970	0,157	2,534	1,152	
	11	46,00	47,00	m12	30,50	0,950	0,123	1,979	0,900	
	12	50,00	51,00	m14	34,50	0,965	0,120	1,929	0,877	
	13	54,00	55,00	m15	38,50	0,968	0,090	1,451	0,660	
	15	60,00	59,00	m16	43,00	0,960	0,017	0,272	0,124	

CR-3-GS 80%					Contamin	15/02/2021	Extração	22/11/2021		
		Medidas			Dias exp:	280				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
	15	15	%massa amostra				% volume aglomer	% massa aglomer		
Revestimento	1	16,00	17,00	m1	0,75	0,560	1,610	7,420	8,091	
	2	22,50	23,00	m2	4,63	0,564	1,419	6,537	7,128	
	3	27,00	27,00	m3	9,88	0,564	1,349	6,218	6,781	
	4	30,00	31,00	m4	13,75	0,564	1,379	6,354	6,928	
	5	33,50	33,50	m5	17,00	0,501	1,341	6,180	6,739	
	6	35,50	35,50	m6	19,50	0,566	1,335	6,153	6,710	
	7	38,50	38,50	m7	22,00	0,580	1,319	11,368	9,668	
	8	39,50	39,50	m8	24,00	0,568	1,215	10,471	8,905	
Concreto	9	44,00	41,00	m9	26,00	0,594	0,678	10,937	4,972	
	10	46,00	43,00	m10	28,50	0,582	0,593	9,558	4,346	
	11	47,50	44,00	m11	30,13	0,589	0,525	8,465	3,849	
	12	50,00	46,00	m12	31,88	0,596	0,436	7,023	3,193	
	13	53,00	48,00	m13	34,25	0,599	0,327	5,264	2,393	
	14	58,00	53,50	m15	38,13	0,582	0,121	1,951	0,887	
	15	61,50	56,00	m16	39,63	0,571	0,096	1,541	0,701	

CR-4 GS 60%					Contamin	12/02/2021	Extração	03/08/2021		
	Medidas				Dias exp:	172				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		13	13				%massa amostra	% volume aglomer	% massa aglomer	
Revestimento	1	18,00	18,00	m1	2,50	0,641	0,501	2,307	2,515	
	2	23,00	23,00	m2	7,50	0,572	0,480	2,214	2,414	
	3	28,00	28,00	m3	12,50	0,572	0,404	1,863	2,032	
	4	32,00	32,00	m4	17,00	0,559	0,495	2,281	2,487	
	5	35,00	35,00	m6	20,50	0,568	0,510	2,348	2,561	
	6	38,00	38,00	m8	23,50	0,565	0,551	2,540	2,770	
Concreto	7	39,50	39,50	m9	25,75	0,999	0,443	7,140	3,246	
	8	41,00	41,00	m10	27,25	0,965	0,279	4,491	2,042	
	9	42,50	42,50	m11	28,75	0,937	0,096	1,543	0,702	
	10	46,00	46,00	m13	31,25	0,977	0,048	0,778	0,354	
	11	50,00	50,00	m15	35,00	0,971	0,018	0,288	0,131	
	12	62,00	62,00	m17	43,00	0,901	0,015	0,245	0,111	

CR-6 GS 60%					Contamin	12/02/2021	Extração	03/08/2021		
	Medidas							Dias exp:	172	
	Camada	1	2	Identif				x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos
		13	13		%massa amostra	% volume aglomer	% massa aglomer			
Revestimento	1	18,00	18,00	m1	2,50	0,580	0,627	2,887	3,148	
	2	23,00	23,00	m2	7,50	0,550	0,577	2,659	2,899	
	3	33,00	33,00	m4	15,00	0,572	0,516	2,377	2,592	
	4	35,00	35,00	m5	21,00	0,548	0,557	2,565	2,797	
	5	36,50	36,50	m6	22,75	0,560	0,542	2,499	2,725	
	6	38,00	38,00	m7	24,25	0,930	0,548	2,523	2,752	
Concreto	7	39,50	39,50	m8	25,75	0,910	0,467	7,526	3,422	
	8	41,00	41,00	m9	27,25	0,999	0,372	5,996	2,726	
	9	42,50	42,50	m10	28,75	0,965	0,279	4,491	2,042	
	10	44,00	44,00	m11	30,25	0,936	0,096	1,545	0,702	
	11	46,00	46,00	m12	32,00	0,930	0,089	1,432	0,651	
	12	50,00	50,00	m14	35,00	0,925	0,051	0,822	0,374	
	13	54,00	54,00	m16	36,00	0,976	0,018	0,287	0,130	
	14	58,00	58,00	m18	43,00	0,921	0,015	0,240	0,109	

CR-5 GS 60%					Contamin	12/02/2021	Extração	22/11/2021		
	Medidas				Dias exp:	283				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		14	14				%massa amostra	% volume aglomer	% massa aglomer	
Revestimento	1	16,50	17,00	m1	1,38	0,588	0,898	4,137	4,511	
	2	21,00	22,00	m2	5,13	0,575	0,886	4,084	4,453	
	3	26,50	28,00	m3	10,38	0,587	0,818	3,769	4,109	
	4	31,50	32,00	m4	15,50	0,583	0,806	3,717	4,053	
	5	33,00	33,50	m5	18,50	0,578	0,834	3,842	4,190	
	6	36,00	35,50	m6	20,50	0,573	0,933	4,298	4,687	
	7	37,50	37,00	m7	22,50	0,569	0,857	3,949	4,307	
	8	40,00	40,00	m8	24,63	0,581	0,808	6,962	5,921	
concreto	9	43,00	43,50	m9	27,63	0,585	0,572	9,223	4,193	
	10	44,00	45,50	m10	28,38	0,580	0,352	5,676	2,580	
	11	46,00	47,00	m11	31,63	0,586	0,237	3,823	1,738	
	12	50,50	50,50	m13	34,50	0,585	0,119	1,915	0,871	
	13	55,00	56,00	m15	39,00	0,580	0,060	0,971	0,441	
	14	57,00	58,00	m16	42,50	0,580	0,066	1,064	0,484	
	15	60,00	61,00	m18	45,00	0,580	0,011	0,174	0,079	

ARG50-8 GS 100%					Contamin	18/08/2021	Extração	15/09/2021		
		Medidas			Dias exp:	28				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		32	32				%massa amostra	% volume aglomerant	% massa aglomerant	
Revestimento	1	33,50	33,50	m1	0,75	0,538	1,861	8,574	9,349	
	2	36,50	36,50	m3	3,00	0,535	1,604	7,390	8,059	
	3	41,00	41,00	m6	6,75	0,539	1,177	5,426	5,916	
	4	47,00	47,00	m8	12,00	0,540	0,899	4,145	4,520	
	5	53,00	53,00	m10	18,00	0,542	0,820	3,780	4,122	
	6	59,00	59,00	m12	24,00	0,540	0,619	2,854	3,112	
	7	65,00	65,00	m14	30,00	0,548	0,348	1,602	1,747	
	8	71,00	71,00	m16	36,00	0,549	0,269	1,240	1,352	
	9	79,00	79,00	m18	43,00	0,542	0,134	0,618	0,674	

ARG50-9 GS 80%					Contamin	25/08/2021	Extração	04/10/2021			
Medidas				Dias exp:				40			
Camada	1	2	Identif	x				massa amostra (g)	Teor de Cloretos		
	32,5	33							%massa amostra	% volume aglomer	% massa aglomer
Revestimento	1	36,50	36,50	m1				1,88	0,538	1,487	6,853
	2	39,00	39,00	m2	5,00	0,542	1,439	6,632	7,231		
	3	42,00	42,00	m3	7,75	0,547	1,324	6,103	6,655		
	4	45,00	45,00	m4	10,75	0,537	1,004	4,624	5,043		
	5	48,00	48,00	m5	13,75	0,536	0,906	4,176	4,554		
	6	55,00	55,50	m7	18,88	0,532	0,713	3,286	3,583		
	7	59,00	59,50	m8	24,50	0,552	0,594	2,738	2,985		
	8	64,00	64,50	m9	29,00	0,534	0,491	2,264	2,469		
	9	69,00	70,00	m10	34,13	0,535	0,256	1,179	1,285		
	10	74,00	75,00	m11	39,25	0,540	0,213	0,983	1,072		
	11	79,00	80,00	m12	44,25	0,513	0,124	0,573	0,625		

ARG50-10 GS 60%					Contamin	25/08/2021	Extração	14/10/2021		
		Medidas			Dias exp:	50				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		32,5	32,5				%massa amostra	%volume aglomer	% massa aglomer	
Revestimento	1	35,50	35,50	m1	1,50	0,725	1,338	6,167	6,725	
	2	38,50	37,50	m2	4,25	0,734	1,216	5,602	6,108	
	3	41,50	41,00	m3	7,13	0,738	1,159	5,343	5,826	
	4	45,00	44,00	m4	10,38	0,727	1,031	4,749	5,179	
	5	53,00	52,00	m6	16,00	0,709	0,628	2,896	3,158	
	6	61,50	61,50	m8	24,50	0,722	0,308	1,418	1,546	
	7	69,50	69,50	m10	33,00	0,732	0,166	0,765	0,834	
	8	81,50	81,50	m12	43,00	0,722	0,097	0,445	0,485	

C-1 GS 100%					Contaminação	17/02/2021	Extração	27/07/2021
		Medidas			Dias exp:	160		
		1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
	Camada	32	32				%massa amostra	% massa aglomer
Concreto	1	34,00	34,00	m1	1,00	0,954	1,004	8,658
	2	36,00	36,00	m2	3,00	0,954	0,878	6,501
	3	38,00	38,00	m3	5,00	0,961	0,754	5,256
	4	40,00	40,00	m4	7,00	0,958	0,610	2,737
	5	44,00	44,00	m6	10,00	0,963	0,318	1,390
	6	48,00	48,00	m8	14,00	0,978	0,161	0,946
	7	52,00	52,00	m10	18,00	0,979	0,139	0,946
	8	56,00	56,00	m12	22,00	0,977	0,110	0,946

C-3 GS 100%					Contaminação	20/02/2021	Extração	26/07/2021
		Medidas			Dias exp:	156		
		1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
	Camada	33	33				%massa amostra	% massa aglomer
Concreto	1	35,00	35,00	m1	1,00	0,954	0,878	7,569
	2	39,00	39,00	m3	4,00	0,954	0,760	6,549
	3	43,00	43,00	m5	8,00	0,958	0,521	4,490
	4	48,00	48,00	m7	12,50	0,963	0,318	2,737
	5	53,00	53,00	m9	17,50	0,978	0,110	0,952
	6	59,00	59,00	m12	23,00	0,979	0,030	0,258

C-5 GS 80%					Contamin	16/02/2021	Extração	28/07/2021
		Medidas			Dias exp:	162		
		1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
	Camada	32	32				%massa amostra	% massa aglomer
Concreto	1	34,00	34,00	m1	1,00	0,956	0,706	6,085
	2	36,00	36,00	m2	3,00	0,957	0,666	5,737
	3	38,00	38,00	m3	5,00	0,948	0,450	3,875
	4	40,00	40,00	m4	7,00	0,952	0,395	3,409
	5	42,00	42,00	m5	9,00	0,961	0,289	2,493
	6	44,00	44,00	m6	11,00	0,963	0,231	1,994
	7	46,00	46,00	m7	13,00	0,963	0,149	1,282
	8	51,00	51,00	m9	16,50	0,971	0,098	0,844
	9	55,00	55,00	m10	21,00	0,980	0,088	0,761

C-6 GS 80%					Contamin	16/02/2021	Extração	27/07/2021
		Medidas			Dias exp:	161		
		1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
	Camada	32	32				%massa amostra	% massa aglomer
Concreto	1	34,00	34,00	m1	1,00	0,950	0,822	7,088
	2	36,00	36,00	m2	3,00	0,980	0,686	5,915
	3	38,00	38,00	m3	5,00	0,959	0,585	5,042
	4	40,00	40,00	m4	7,00	0,974	0,423	3,646
	5	42,00	42,00	m5	9,00	0,970	0,308	2,659
	6	44,00	44,00	m6	11,00	0,949	0,205	1,766
	7	46,00	46,00	m7	13,00	0,961	0,149	1,285
	8	50,00	50,00	m9	16,00	0,971	0,113	0,970
	9	52,00	52,00	m10	19,00	0,977	0,089	0,763
	10	56,00	56,00	m12	22,00	0,977	0,045	0,388

C-8 GS 60%					Contamin	13/02/2021	Extração	30/07/2021		
		Medidas			Dias exp:	167				
	Camada	1	2	Identif	x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos			
		28	28				%massa concreto	% volume aglomer	% massa aglomer	
Concreto	1	30,00	30,00	m1	1,00	0,984	0,353	3,042	2,191	
	2	34,00	36,00	m2	4,50	0,965	0,279	2,405	1,733	
	3	38,00	38,00	m3	8,50	0,960	0,184	1,583	1,141	
	4	40,00	40,00	m4	11,00	0,959	0,105	0,905	0,652	
	5	44,00	44,00	m6	14,00	0,952	0,060	0,518	0,374	
	6	48,00	48,00	m8	18,00	0,959	0,009	0,076	0,055	
	7	52,00	52,00	m10	22,00	0,966	0,003	0,028	0,021	

C-9 GS 60%					Contamin	13/02/2021	Extração	28/07/2021				
		Medidas						Dias exp:	165			
		1	2	Identif					x	massa amostra (g)	Teor de Cloretos	
	Camada	33,5	34,5								%massa concreto	% volume aglomer
Concreto	1	37,00	38,50	m2				1,88	0,978	0,348	2,998	2,160
	2	39,50	40,50	m3				4,88	0,976	0,246	2,121	1,528
	3	41,50	42,50	m4				7,00	0,962	0,142	1,220	0,879
	4	45,50	46,50	m5	10,00	0,956	0,060	0,516	0,372			
	5	49,50	50,50	m6	14,00	0,959	0,024	0,204	0,147			
	6	56,50	57,50	m10	19,50	0,964	0,003	0,029	0,021			
	7	58,50	59,50	m11	24,00	0,964	0,002	0,020	0,021			

Apêndice F – Planilha para ajustes da curva de Teores de Cloretos por regressão para cada CP. (Modelo, software MS-Excel)

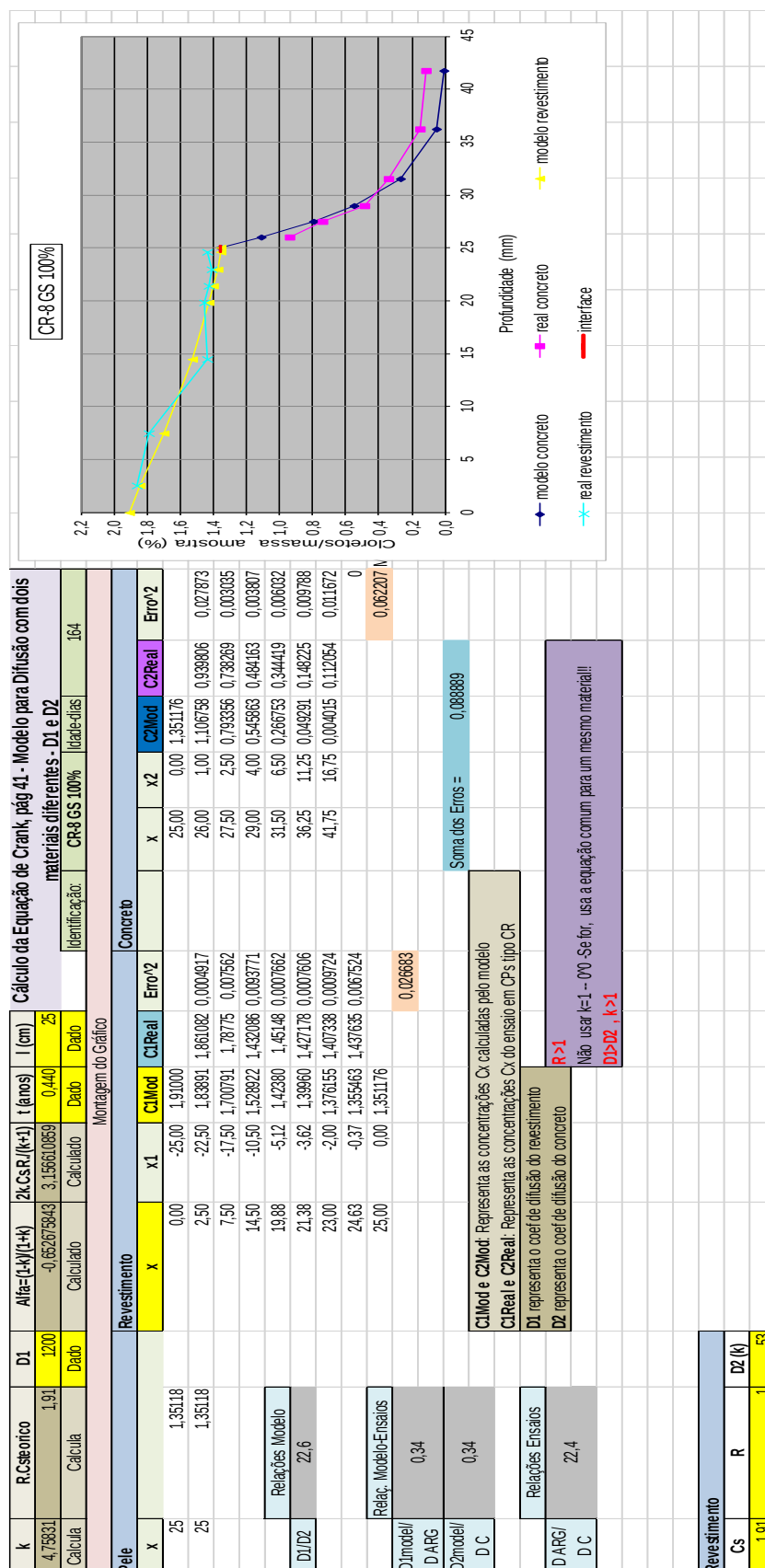
Planilha para Ajuste da curva de teores de cloreto por regressão			PASSO 1 - OBTENHA MELHOR CORRELAÇÃO														
			PASSO 2 - OBTENHA O MENOR ERRO, VARIANDO Cs E (x/2.(Dt) ^{0,5}) DO ÚLTIMO PONTO														
			num. de pontos		8				Cs		Cs						
							1,100				1,150						
x	Cx medido	fundo	Cx medido	x/2.(Dt) ^{0,5}	Cx/Cs	(Dt) ^{0,5}	Cx teórico	Q	Cx teórico	Q							
Profundidade	Concentração % massa concreto	Média Concentração últimos pontos	Concentração x menos o fundo	Parcela da 2ª Lei de Fick								Diferença entre o Teórico e Real					
1,00	1,0043	0,0020	1,0023	0,066	0,9252	7,534	1,018	0,0002382	1,0640	0,0038062							
3,00	0,8780	0,0020	0,8760	0,199	0,7783	7,534	0,856	0,0003941	0,8950	0,0003634							
5,00	0,7541	0,0020	0,7521	0,332	0,6389	7,534	0,703	0,0024363	0,7347	0,0003033							
7,00	0,6097	0,0020	0,6077	0,465	0,5112	7,534	0,562	0,0020587	0,5879	0,0003925							
10,00	0,3175	0,0020	0,3155	0,664	0,3480	7,534	0,383	0,0045215	0,4002	0,0071641							
14,00	0,1612	0,0020	0,1592	0,929	0,1889	7,534	0,208	0,0023545	0,2172	0,0033601							
18,00	0,1385	0,0020	0,1365	1,195	0,0912	7,534	0,100	0,0013139	0,1048	0,0010042							
22,00	0,1098	0,0020	0,1078	1,460	0,0389	7,534	0,043	0,0042158	0,0448	0,0039667							
				0,9908				0,0175329		0,9908		0,0203605					
				CORREL B D						CORREL B J							
								.100				.100					
							Cs		Cs								
							1,100		1,1000								
x	Cx medido		Cx medido	x/2.(Dt) ^{0,5}	Cx/Cs	(Dt) ^{0,5}	Cx teórico	Q	Cx teórico	Q							
1,00	1,0043	0,0020	1,0023	0,066	0,9252	7,534	1,018	0,0002382	1,0177	0,0002382							
3,00	0,8780	0,0020	0,8760	0,199	0,7783	7,534	0,856	0,0003941	0,8561	0,0003941							
5,00	0,7541	0,0020	0,7521	0,332	0,6389	7,534	0,703	0,0024363	0,7028	0,0024363							
7,00	0,6097	0,0020	0,6077	0,465	0,5112	7,534	0,562	0,0020587	0,5623	0,0020587							
10,00	0,3175	0,0020	0,3155	0,664	0,3480	7,534	0,383	0,0045215	0,3828	0,0045215							
14,00	0,1612	0,0020	0,1592	0,929	0,1889	7,534	0,208	0,0023545	0,2078	0,0023545							
18,00	0,1385	0,0020	0,1365	1,195	0,0912	7,534	0,100	0,0013139	0,1003	0,0013139							
22,00	0,1098	0,0020	0,1078	1,460	0,0389	7,534	0,043	0,0042158	0,0428	0,0042158							
				0,9908				0,0175329		0,9908		0,0175329					
				CORREL B D				.100		CORREL B J				.100			
							Cs		Cs								
							1,150		1,1000								
x	Cx medido		Cx medido	x/2.(Dt) ^{0,5}	Cx/Cs	(Dt) ^{0,5}	1,760	Q	Cx teórico	Q							
1,00	1,0043	0,0020	1,0023	0,064	0,9283	7,857	1,068	0,0042535	1,0211	0,0003536							
3,00	0,8780	0,0020	0,8760	0,191	0,7872	7,857	0,905	0,0008575	0,8659	0,0001015							
5,00	0,7541	0,0020	0,7521	0,318	0,6527	7,857	0,751	0,0000022	0,7180	0,0011648							
7,00	0,6097	0,0020	0,6077	0,445	0,5287	7,857	0,608	0,0000001	0,5816	0,0006816							
10,00	0,3175	0,0020	0,3155	0,636	0,3681	7,857	0,423	0,0116285	0,4050	0,0079974							
14,00	0,1612	0,0020	0,1592	0,891	0,2077	7,857	0,239	0,0063384	0,2285	0,0047927							
18,00	0,1385	0,0020	0,1365	1,145	0,1053	7,857	0,121	0,0002396	0,1158	0,0004302							
22,00	0,1098	0,0020	0,1078	1,400	0,0477	7,857	0,055	0,0027962	0,0525	0,0030563							
				0,9897				0,0261180		0,9897		0,0185782					
										CORREL B J							
							CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO										
							t(dias) = 160										
							t (s) = 13824000										
							D (mm²/s) = 0,0000044658		4,47 x 10 ⁻¹² m²/s		D (mm²/ano) = 140,9287309						
							4,47 x 10 ⁻⁶ mm²/s										

C1 - GS 100%

Cloreto/massa amostra (%)

Profundidade - mm

Real



Parte dos cálculos das interações até erro Zero.

Cálculos para fórmula do modelo - Cálculo de C1x		-22,50		-17,50		-10,50		-5,50		0,50		5,50		10,50		15,50		20,50		25,50		30,50		35,50		40,50		45,50		50,50		55,50		60,50		65,50		70,50		75,50		80,50		85,50		90,50		95,50		100,50		105,50		110,50		115,50		120,50		125,50		130,50		135,50		140,50		145,50		150,50		155,50		160,50		165,50		170,50		175,50		180,50		185,50		190,50		195,50		200,50		205,50		210,50		215,50		220,50		225,50		230,50		235,50		240,50		245,50		250,50		255,50		260,50		265,50		270,50		275,50		280,50		285,50		290,50		295,50		300,50		305,50		310,50		315,50		320,50		325,50		330,50		335,50		340,50		345,50		350,50		355,50		360,50		365,50		370,50		375,50		380,50		385,50		390,50		395,50		400,50		405,50		410,50		415,50		420,50		425,50		430,50		435,50		440,50		445,50		450,50		455,50		460,50		465,50		470,50		475,50		480,50		485,50		490,50		495,50		500,50		505,50		510,50		515,50		520,50		525,50		530,50		535,50		540,50		545,50		550,50		555,50		560,50		565,50		570,50		575,50		580,50		585,50		590,50		595,50		600,50		605,50		610,50		615,50		620,50		625,50		630,50		635,50		640,50		645,50		650,50		655,50		660,50		665,50		670,50		675,50		680,50		685,50		690,50		695,50		700,50		705,50		710,50		715,50		720,50		725,50		730,50		735,50		740,50		745,50		750,50		755,50		760,50		765,50		770,50		775,50		780,50		785,50		790,50		795,50		800,50		805,50		810,50		815,50		820,50		825,50		830,50		835,50		840,50		845,50		850,50		855,50		860,50		865,50		870,50		875,50		880,50		885,50		890,50		895,50		900,50		905,50		910,50		915,50		920,50		925,50		930,50		935,50		940,50		945,50		950,50		955,50		960,50		965,50		970,50		975,50		980,50		985,50		990,50		995,50		1000,50		1005,50		1010,50		1015,50		1020,50		1025,50		1030,50		1035,50		1040,50		1045,50		1050,50		1055,50		1060,50		1065,50		1070,50		1075,50		1080,50		1085,50		1090,50		1095,50		1100,50		1105,50		1110,50		1115,50		1120,50		1125,50		1130,50		1135,50		1140,50		1145,50		1150,50		1155,50		1160,50		1165,50		1170,50		1175,50		1180,50		1185,50		1190,50		1195,50		1200,50		1205,50		1210,50		1215,50		1220,50		1225,50		1230,50		1235,50		1240,50		1245,50		1250,50		1255,50		1260,50		1265,50		1270,50		1275,50		1280,50		1285,50		1290,50		1295,50		1300,50		1305,50		1310,50		1315,50		1320,50		1325,50		1330,50		1335,50		1340,50		1345,50		1350,50		1355,50		1360,50		1365,50		1370,50		1375,50		1380,50		1385,50		1390,50		1395,50		1400,50		1405,50		1410,50		1415,50		1420,50		1425,50		1430,50		1435,50		1440,50		1445,50		1450,50		1455,50		1460,50		1465,50		1470,50		1475,50		1480,50		1485,50		1490,50		1495,50		1500,50		1505,50		1510,50		1515,50		1520,50		1525,50		1530,50		1535,50		1540,50		1545,50		1550,50		1555,50		1560,50		1565,50		1570,50		1575,50		1580,50		1585,50		1590,50		1595,50		1600,50		1605,50		1610,50		1615,50		1620,50		1625,50		1630,50		1635,50		1640,50		1645,50		1650,50		1655,50		1660,50		1665,50		1670,50		1675,50		1680,50		1685,50		1690,50		1695,50		1700,50		1705,50		1710,50		1715,50		1720,50		1725,50		1730,50		1735,50		1740,50		1745,50		1750,50		1755,50		1760,50		1765,50		1770,50		1775,50		1780,50		1785,50		1790,50		1795,50		1800,50		1805,50		1810,50		1815,50		1820,50		1825,50		1830,50		1835,50		1840,50		1845,50		1850,50		1855,50		1860,50		1865,50		1870,50		1875,50		1880,50		1885,50		1890,50		1895,50		1900,50		1905,50		1910,50		1915,50		1920,50		1925,50		1930,50		1935,50		1940,50		1945,50		1950,50		1955,50		1960,50		1965,50		1970,50		1975,50		1980,50		1985,50		1990,50		1995,50		2000,50		2005,50		2010,50		2015,50		2020,50		2025,50		2030,50		2035,50		2040,50		2045,50		2050,50		2055,50		2060,50		2065,50		2070,50		2075,50		2080,50		2085,50		2090,50		2095,50		2100,50		2105,50		2110,50		2115,50		2120,50		2125,50		2130,50		2135,50		2140,50		2145,50		2150,50		2155,50		2160,50		2165,50		2170,50		2175,50		2180,50		2185,50		2190,50		2195,50		2200,50		2205,50		2210,50		2215,50		2220,50		2225,50		2230,50		2235,50		2240,50		2245,50		2250,50		2255,50		2260,50		2265,50		2270,50		2275,50		2280,50		2285,50		2290,50		2295,50		2300,50		2305,50		2310,50		2315,50		2320,50		2325,50		2330,50		2335,50		2340,50		2345,50		2350,50		2355,50		2360,50		2365,50		2370,50		2375,50		2380,50		2385,50		2390,50		2395,50		2400,50		2405,50		2410,50		2415,50		2420,50		2425,50		2430,50		2435,50		2440,50		2445,50		2450,50		2455,50		2460,50		2465,50		2470,50		2475,50		2480,50		2485,50		2490,50		2495,50		2500,50		2505,50		2510,50		2515,50		2520,50		2525,50		2530,50		2535,50		2540,50		2545,50		2550,50		2555,50		2560,50		2565,50		2570,50		2575,50		2580,50		2585,50		2590,50		2595,50		2600,50		2605,50		2610,50		2615,50		2620,50		2625,50		2630,50		2635,50		2640,50		2645,50		2650,50		2655,50		2660,50		2665,50		2670,50		2675,50		2680,50		2685,50		2690,50		2695,50		2700,50		2705,50		2710,50		2715,50		2720,50		2725,50		2730,50		2735,50		2740,50		2745,50		2750,50		2755,50		2760,50		2765,50		2770,50		2775,50		2780,50		2785,50		2790,50		2795,50		2800,50		2805,50		2810,50		2815,50		2820,50		2825,50		2830,50		2835,50		2840,50		2845,50		2850,50		2855,50		2860,50		2865,50		2870,50		2875,50		2880,50		2885,50		2890,50		2895,50		2900,50		2905,50		2910,50		2915,50		2920,50		2925,50		2930,50		2935,50		2940,50		2945,50		2950,50		2955,50		2960,50		2965,50		2970,50		2975,50		2980,50		2985,50		2990,50		2995,50		3000,50		3005,50		3010,50		3015,50		3020,50		3025,50		3030,50		3035,50		3040,50		3045,50		3050,50		3055,50		3060,50		3065,50		3070,50		3075,50		3080,50		3085,50		3090,50		3095,50		3100,50		3105,50		3110,50		3115,50		3120,50		3125,50		3130,50		3135,50		3140,50		3145,50		3150,50		3155,50		3160,50		3165,50		3170,50		3175,50		3180,50		3185,50		3190,50		3195,50		3200,50		3205,50		3210,50		3215,50		3220,50		3225,50		3230,50		3235,50		3240,50		3245,50		3250,50		3255,50		3260,50		3265,50		3270,50		3275,50		3280,50		3285,50		3290,50		3295,50		3300,50		3305,50		3310,50		3315,50		3320,50		3325,50		3330,50		3335,50		3340,50		3345,50		3350,50		3355,50		3360,50		3365,50		3370,50		3375,50		3380,50		3385,50		3390,50		3395,50		3400,50		3405,50		3410,50		3415,50		3420,50		3425,50		3430,50		3435,50		3440,50		3445,50		3450,50		3455,50		3460,50		3465,50		3470,50		3475,50		3480,50		3485,50		3490,50		3495,50		3500,50		3505,50		3510,50		3515,50		3520,50		3525,50		3530,50		3535,50		3540,50		3545,50		3550,50		3555,50		3560,50		3565,50		3570,50		3575,50		3580,50		3585,50		3590,50		3595,50		3600,50		3605,50		3610,50		3615,50		3620,50		3625,50		3630,50		3635,50		3640,50		3645,50		3650,50		3655,50		3660,50		3665,50		3670,50		3675,50		3680,50		3685,50		3690,50		3695,50		3700,50		3705,50		3710,50		3715,50		3720,50		3725,50		3730,50		3735,50		3740,50		3745,50		3750,50		3755,50		3760,50		3765,50		3770,50		3775,50		3780,50		3785,50		3790,50		3795,50		3800,50		3805,50		3810,50		3815,50		3820,50		3825,50		3830,50		3835,50		3840,50		3845,50		3850,50		3855,50		3860,50		3865,50		3870,50		3875,50		3880,50		3885,50		3890,50		3895,50		3900,50		3905,50		3910,50		3915,50		3920,50		3925,50		3930,50		3935,50		3940,50		3945,50		3950,50		3955,50		3960,50		3965,50		3970,50		3975,50		3980,50		3985,50		3990,50		3995,50		4000,50		4005,50		4010,50		4015,50		4020,50		4025,50		4030,50		4035,50		4040,50		4045,50		4050,50		4055,50		4060,50		4065,50		4070,50		4075,50		4080,50		4085,50		4090,50		4095,50		4100,50		4105,50		4110,50		4115,50		4120,50		4125,50		4130,50		4135,50		4140,50		4145,50		4150,50		4155,50		4160,50		4165,50		4170,50	
--	--	--------	--	--------	--	--------	--	-------	--	------	--	------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--	---------	--

Apêndice H – Simulação através do modelo para previsão de concentrações de cloreto em CPs tipo CR, para estruturas a 100m da costa e à beira mar.

CR 100% - 100m						
Profund.	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos
0,00	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
1,13	0,208135	0,208637	0,209256	0,209576	0,209708	0,209872
5,50	0,200978	0,203396	0,206386	0,207936	0,20858	0,209378
10,13	0,193646	0,197968	0,203368	0,206203	0,207386	0,208854
13,75	0,188218	0,193876	0,201035	0,204852	0,206454	0,208445
18,25	0,181981	0,189048	0,198184	0,203183	0,205299	0,207936
22,00	0,177306	0,185291	0,195859	0,201801	0,204339	0,207513
24,25	0,174757	0,18317	0,19449	0,200977	0,203765	0,207259
25,00	0,173952	0,182486	0,194039	0,200703	0,203573	0,207174
26,25	0,150197	0,161993	0,180263	0,192303	0,1977	0,204571
28,25	0,115540	0,13116	0,158716	0,178965	0,188338	0,200408
29,75	0,092793	0,110075	0,143136	0,169089	0,18136	0,19729
31,38	0,071516	0,089478	0,12694	0,158525	0,173835	0,193907
33,13	0,052680	0,070239	0,110562	0,147425	0,165839	0,190282
36,00	0,030074	0,045156	0,086306	0,129883	0,15296	0,184357
40,50	0,010742	0,020156	0,055438	0,104418	0,13351	0,175137
45,00	0,004239	0,00976	0,037487	0,08663	0,119152	0,168038
50,00	0,003239	0,00700	0,02749	0,07200	0,10000	0,16000
55,00	0,002239	0,00576	0,02100	0,06300	0,08800	0,15000
65,00	0,000239	0,00376	0,01500	0,05000	0,07400	0,13200
CR 80% - 100m						
Profund	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos
0,00	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
0,75	0,208437	0,208863	0,209417	0,209677	0,209779	0,209904
4,63	0,200407	0,203006	0,206404	0,208007	0,208638	0,209406
9,88	0,189938	0,195292	0,202364	0,205754	0,207095	0,208732
13,75	0,182745	0,189885	0,199435	0,204102	0,205961	0,208236
17,00	0,177177	0,185597	0,19702	0,202721	0,20501	0,207819
19,50	0,17324	0,182485	0,195197	0,201665	0,204281	0,207498
22,00	0,169635	0,179555	0,193408	0,200615	0,203554	0,207178
24,00	0,167006	0,177351	0,192004	0,19978	0,202974	0,206922
25,00	0,16578	0,176297	0,191311	0,199364	0,202684	0,206794
26,00	0,145709	0,158739	0,179493	0,192214	0,197698	0,204588
28,50	0,101279	0,118358	0,150822	0,174514	0,185292	0,199079
30,13	0,077368	0,095374	0,1331	0,16318	0,177273	0,195492
31,88	0,05630	0,07400	0,115183	0,151263	0,168749	0,191649
34,25	0,034886	0,050592	0,093058	0,135641	0,157385	0,186461
38,13	0,014114	0,024742	0,062772	0,111665	0,139352	0,178018
39,63	0,009549	0,018188	0,053101	0,103012	0,132607	0,174
45,00	0,00050	0,01000	0,04000	0,08500	0,11600	0,16000
50,00	0,00040	0,00700	0,03200	0,07400	0,10000	0,15000
55,00	0,00030	0,00600	0,02700	0,06800	0,09300	0,14000

	65,00	0,00010	0,00400	0,01900	0,05700	0,08100	0,12500
	CR 60% - 100m						
Profund.	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos	
0,00	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
1,38	0,204621	0,205895	0,208046	0,209043	0,209363	0,209727	
5,13	0,190075	0,19477	0,202723	0,206426	0,207621	0,208979	
10,38	0,170828	0,179905	0,195421	0,202782	0,205188	0,207933	
15,50	0,154226	0,166785	0,188592	0,199261	0,202822	0,206912	
18,50	0,145872	0,159982	0,184792	0,197229	0,201446	0,206315	
20,50	0,140942	0,15586	0,182353	0,195886	0,200532	0,205917	
22,50	0,136557	0,152092	0,179995	0,194556	0,199623	0,20552	
24,63	0,132517	0,148494	0,177586	0,193156	0,19866	0,205099	
25,00	0,131872	0,147904	0,177171	0,19291	0,19849	0,205024	
27,63	0,084764	0,10313	0,143612	0,172464	0,184299	0,19877	
28,38	0,073716	0,092076	0,134568	0,166728	0,180283	0,196989	
31,63	0,037471	0,05331	0,098801	0,142587	0,163109	0,18929	
34,50	0,018683	0,030497	0,072457	0,122511	0,148362	0,182528	
39,00	0,005185	0,010971	0,041458	0,094038	0,126307	0,172021	
42,50	0,001623	0,004367	0,02524	0,074807	0,110259	0,163952	
45,00	0,000648	0,002111	0,01712	0,06273	0,099475	0,158255	
50,00	0,00050	0,00100	0,01000	0,05000	0,08800	0,14500	
55,00	0,00040	0,00090	0,00500	0,04000	0,08000	0,13500	
65,00	0,00001	0,00001	0,00200	0,03000	0,07000	0,12000	

	CR 100% - beira mar						
Profundid.	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos	
0,00	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	
1,13	0,406358	0,40734	0,408548	0,409172	0,40943	0,40975	
5,50	0,392386	0,397107	0,402944	0,40597	0,407228	0,408785	
10,13	0,37807	0,386508	0,397051	0,402586	0,404896	0,407763	
13,75	0,367472	0,37852	0,392497	0,39995	0,403077	0,406964	
18,25	0,355296	0,369093	0,386931	0,39669	0,400821	0,405971	
22,00	0,346169	0,361759	0,382392	0,393993	0,398947	0,405144	
24,25	0,341192	0,357618	0,379719	0,392384	0,397826	0,404648	
25,00	0,339621	0,356283	0,378838	0,39185	0,397453	0,404483	
26,25	0,293241	0,316272	0,351942	0,375448	0,385987	0,3994	
28,25	0,225579	0,256075	0,309873	0,349408	0,367708	0,391273	
29,75	0,181168	0,214909	0,279455	0,330126	0,354084	0,385185	
31,38	0,139626	0,174695	0,247836	0,309502	0,339392	0,37858	
33,13	0,102850	0,137133	0,21586	0,287829	0,323781	0,371502	
36,00	0,058716	0,088161	0,16850	0,253581	0,298636	0,359936	
40,50	0,020972	0,039352	0,10824	0,203864	0,260662	0,341933	
45,00	0,008276	0,019056	0,07319	0,169134	0,23263	0,328074	
50,00	0,006500	0,01500	0,06100	0,14000	0,20000	0,31000	
55,00	0,006000	0,01200	0,05500	0,13000	0,18000	0,29000	
65,00	0,000600	0,00800	0,04900	0,11700	0,16800	0,27500	

CR 80% - beira mar						
Profundid.	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos
0,00	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
0,75	0,406949	0,407779	0,408861	0,40937	0,409569	0,409812
4,63	0,391271	0,396345	0,402979	0,40611	0,407341	0,40884
9,88	0,370832	0,381284	0,395091	0,401711	0,404329	0,407524
13,75	0,356789	0,370727	0,389373	0,398484	0,402114	0,406555
17,00	0,345917	0,362356	0,384659	0,395789	0,400258	0,405742
19,50	0,33823	0,356281	0,381099	0,393727	0,398835	0,405116
22,00	0,331192	0,35056	0,377606	0,391677	0,397415	0,404491
24,00	0,32606	0,346256	0,374864	0,390046	0,396282	0,403991
25,00	0,323666	0,3442	0,373512	0,389234	0,395717	0,403741
26,00	0,28448	0,309919	0,350438	0,375275	0,385983	0,399434
28,50	0,197736	0,231079	0,294462	0,340717	0,361761	0,388677
30,13	0,151051	0,186207	0,259862	0,318589	0,346104	0,381675
31,88	0,10992	0,14448	0,224881	0,295322	0,329462	0,374172
34,25	0,068111	0,098774	0,181684	0,264824	0,307276	0,364042
38,13	0,027556	0,048306	0,122555	0,218013	0,272068	0,347559
39,63	0,018643	0,035509	0,103674	0,201119	0,2589	0,341227
45,00	0,01000	0,02500	0,07800	0,15000	0,20900	0,32000
50,00	0,00500	0,01600	0,06200	0,13000	0,18500	0,30000
55,00	0,00400	0,01000	0,05000	0,11000	0,17000	0,28000
65,00	0,00100	0,00500	0,04000	0,09500	0,15000	0,26000
CR 60% - beira mar						
Profundid.	280 dd	1 ano	2 anos	5 anos	10 anos	50 anos
0,00	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
1,38	0,399498	0,401985	0,406186	0,408131	0,408757	0,409467
5,13	0,371099	0,380266	0,395792	0,403022	0,405355	0,408007
10,38	0,33352	0,351242	0,381537	0,395908	0,400605	0,405964
15,50	0,301108	0,325627	0,368204	0,389034	0,395985	0,40397
18,50	0,284799	0,312346	0,360785	0,385065	0,393299	0,402805
20,50	0,275173	0,304298	0,356022	0,382445	0,391516	0,402029
22,50	0,266611	0,296941	0,351419	0,379847	0,389739	0,401254
24,63	0,258724	0,289917	0,346715	0,377113	0,38786	0,40043
25,00	0,257464	0,288765	0,345906	0,376634	0,387529	0,400285
27,63	0,165492	0,201349	0,280386	0,336715	0,359822	0,388074
28,38	0,143921	0,179768	0,262728	0,325517	0,35198	0,384597
31,63	0,073159	0,104081	0,192898	0,278384	0,318452	0,369567
34,50	0,036476	0,059541	0,141465	0,239188	0,28966	0,356365
39,00	0,010123	0,02142	0,080943	0,183597	0,2466	0,33585
42,50	0,003169	0,008525	0,049279	0,146051	0,215268	0,320097
45,00	0,001264	0,004122	0,033425	0,122473	0,194212	0,308975
50,00	0,00100	0,00390	0,02600	0,09000	0,15000	0,28000
55,00	0,00050	0,00300	0,02000	0,07000	0,12000	0,25000
65,00	0,00030	0,00200	0,01000	0,04000	0,09000	0,21000