

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

COMPORTAMENTO DOS PERFIS DE CLORETO CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE CS E
A FORMAÇÃO DE PICO NO CONCRETO DOS TETRÁPODES DO MOLHE LESTE DA
BARRA DO RIO GRANDE RS

por

Leandro Gularte Blois

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 31 de julho, 2017

COMPORTAMENTO DOS PERFIS DE CLORETO CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DE CS E
A FORMAÇÃO DE PICO NO CONCRETO DOS TETRÁPODES DO MOLHE LESTE DA
BARRA DO RIO GRANDE RS

Por

Leandro Gularte Blois

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães	IFRS
Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira	PPGEO/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 31 de julho de 2017

Incluir nesta página a folha de rosto assinada pelos membros da banca e o coordenador do Programa. Pode ser utilizada uma fotocópia (xerox) colorida da folha de rosto.

*Ao meu querido irmão
Luciano Gularte Blois (in memoriam)
Mesmo que por tão pouco tempo de carinho, amor e irmandade!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e aos Orixás, pois sem eles nada seria possível.

Ao Professor André Guimarães pela boa vontade, dedicação, compreensão e pela orientação para realização desta dissertação.

A CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de apoio financeiro para realização dessa dissertação.

A Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG por proporcionar o Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica.

Ao meu pai, por toda a dedicação e carinho dados a mim durante todos esses anos de estudo, trabalhando e batalhando de sol a sol para que seus filhos crescessem na vida.

A minha mãe, pelo amor, carinho, dedicação e pelo apoio durante os anos de estudo e principalmente por sempre acreditar na minha capacidade.

As minhas irmãs Jessica Gularte Blois e Larissa Gularte Blois que estão sempre ao meu lado prontas pra me ajudar.

Ao meu vô Sergio Leal Gomes e a minha vó Maria Ferreira Bongalhardo por me proporcionarem momentos de descontração.

Um agradecimento especial a minha namorada Juliana Marques Felix que sempre esteve ao meu lado me incentivando a ir sempre além.

A minha sogra Carla Marquês pelo incentivo e apoio sempre.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização dessa pesquisa, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

O envelhecimento precoce das estruturas de concreto armado em obras de construção civil tem sido alvo de muita preocupação para estudiosos da área. Tendo por objetivo compreender o comportamento dessas estruturas, expostas em ambientes agressivos, foi realizada uma avaliação, considerando a variação da concentração de cloretos na superfície (CS) e a formação de pico, no concreto dos tetrápodes do molhe leste da Barra do Rio Grande RS a fim de observar a dinâmica desse processo aos 5, 9,5 e 15 anos. Com a chegada de uma nova estação do ano, no litoral sul, que faz com que aumente ou diminua o índice pluviométrico de água doce na região, permite a oscilação do comportamento do percentual de cloretos no concreto nesse ambiente. Assim, torna-se viável a análise do comportamento para possível aplicação em estruturas de concreto armado em ambientes similares visando o aumento da durabilidade das estruturas em concreto armado. Os métodos utilizados para elaboração do trabalho foram os dados e informações das pesquisas de Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013), os quais consideraram apenas a variação de CS, incluindo, no entanto a formação de pico nos perfis. O monitoramento da concentração de cloretos no concreto dos tetrápodes do molhe leste da Barra do Rio Grande RS começou aos 5 anos, sendo avaliado após, aos 9,5 anos e posteriormente aos 15 anos. Entretanto, essas avaliações consideraram apenas a variação da concentração de cloretos na superfície do concreto dos tetrápodes. Logo, utilizando esses dados como referências, realizou-se uma nova avaliação levando em consideração, além da concentração superficial de cloretos (CS) no concreto dos tetrápodes do molhe leste, a formação de pico nos perfis de cloretos já existentes. A maioria dos resultados obtidos foram satisfatórios ao estudo mostrando que, além dos modelos de perfis cloretos considerando a variação da concentração superficial de cloretos (CS), a criação de modelos de perfis de cloretos considerando a formação de pico também é viável em ambientes onde há esse processo. Ao fim, concluiu-se que o cimento ARI RS não é recomendável para obras marítimas e que a norma não estabelece percentuais mínimos de adições que devem ser utilizadas em ambientes muito agressivos. Pois seriam mais aconselháveis recomendações específicas para utilização de adições para concretos em ambientes desse tipo. Ou, também, remeter a um concreto com um máximo coeficiente de difusão.

Palavras-chaves: Concreto, ambiente marítimo, cloretos e durabilidade.

ABSTRACT

The early aging of reinforced concrete structures in civil construction has been the subject of much concern for scholars in the area. In order to understand the behavior of these structures, exposed in aggressive environments, an evaluation was made, considering the variation of the chloride concentration in the surface (CS) and the peak formation, in the concrete of the tetrapods of the east jetty of Barra do Rio Grande RS. In order to observe the dynamics of this process at 5, 9, 5 and 15 years. With the arrival of a new season of the year, on the south coast, which increases or decreases the pluviometric freshwater index in the region, allows the oscillation of the behavior of the percentage of chlorides in the concrete in this environment. Thus, it becomes feasible the behavior analysis for possible application in reinforced concrete structures in similar environments aiming at increasing the durability of the structures in reinforced concrete. The methods used to elaborate the work were the data and information from the surveys of Guimarães (2003), Silva (2010) and Oliveira (2013), which considered only the variation of CS, including, however, the peak formation of the Profiles. The monitoring of chloride concentration in the tetrapod concrete of the east jetty of Barra do Rio Grande RS started at 5 years and was evaluated after 9.5 years and after 15 years. However, these evaluations considered only the variation of the concentration of chlorides on the concrete surface of tetrapods. Therefore, using these data as references, a new evaluation was carried out taking into consideration, in addition to the surface chlorides concentration (CS) in the tetrapod concrete of the east jet, the peak formation in the existing chlorine profiles. Most of the results were favorable to the study, showing that, in addition to the chlorine profile models considering the variation of the surface chlorides concentration (CS), the creation of chlorine profile models considering peak formation is also feasible in environments where there is process. Finally, it was concluded that ARI RS cement is not recommended for marine works and that the standard does not establish minimum percentages of additions that should be used in very aggressive environments. Concrete recommendations for the use of concrete additions in such environments would be more advisable. Or, also, refer to a concrete with a maximum diffusion coefficient.

Keywords: Concrete, marine environment, chlorides and durability.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Importância e justificativa do tema	21
1.2. Estudos anteriores na área	23
1.3. Objetivos	24
1.3.3. Objetivo geral	24
1.3.2. Objetivos específicos	25
1.4. Estrutura da dissertação	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Os blocos de concreto	27
2.2. O tetrápode	28
2.3. Mecanismos de deterioração	29
2.3.1. Carbonatação	33
2.3.2. Sulfatos	37
2.3.3. Cloretos	40
2.3.4. Mecanismos de transporte no concreto	44
Difusão	45
Permeabilidade	46
Absorção capilar	47
Fluxo por convecção	48
Migração	48
2.4. Vida útil	51
2.5. Ambiente marítimo	55
2.5.1. As zonas do ambiente marítimo	55
2.5.2. Composição dos estuários e oceanos	58
2.6. Fatores que influenciam na penetração de cloretos	61
2.6.1. Fatores externos	61
Umidade relativa	61
Temperatura	61
Concentração superficial de cloretos	62
2.6.2. Fatores internos	65
Relação água cimento	65
Os tipos de cimento	66

Cobrimento.....	67
O consumo de cimento	67
Grau de saturação	68
Grau de carbonatação	71
Tipo de superfície exposta.....	71
2.7. Os tipos de perfis de cloreto.....	73
2.7.1. O perfil clássico	74
2.7.2. Os modelos de perfis clássicos.....	74
2.7.3. Perfil formando pico	78
2.7.4. Os modelos de perfis formando pico	79
Modelo tradicional usando a segunda Lei de Fick.....	79
Modelo proposto por guimarães e Helene	81
Modelo proposto por Silva (2010) para o microambiente MLLS.....	82
Modelo proposto por Silva (2010) para o microambiente MLLM	86
Resultados da aplicação da pesquisa de Oliveira (2013) no modelo proposto por Silva (2010) para os microambiente MLLS e MLLM.....	88
3. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO	90
3.1 O ambiente da pesquisa.....	90
3.2 informações características dos tetrápodes.	93
3.3 A extração das amostras dos tetrápodes.	93
3.4 Os microambientes da pesquisa	101
3.4.1 O microambiente localizado no molhe leste voltado para leste e em cota superior – MLLS ..	101
3.4.2 O microambiente localizado no molhe leste voltado para leste e em cota média – MLLM..	105
3.4.3 O microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota interna – MLOI ..	109
3.4.4 O microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota média – MLOM ..	112
3.5 O tratamento das amostras	115
3.6 A simplificação dos modelos elaborados por Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2015) considerando a variação de CS no tempo e a formação de pico dos perfis de cloretos	115
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	123
4.1 Passo a passo da análise dos resultados.	123
4.2 Análise do microambiente localizado no molhe leste, voltado para leste e em cota superior - MLLS	126
4.2.1 Comentários sobre MLLS k aos 5 anos	137
4.2.2 Comentários sobre MLLS k aos 9,5 anos	138

4.2.3 Comentários sobre MLLS k aos 15 anos	138
4.2.4 Comentários sobre MLLS keq aos 5 anos.	139
4.2.5 Comentários sobre MLLS keq aos 9,5 anos	139
4.3 Análise do microambiente localizado no molhe leste, voltado para leste e em cota média - MLLM.....	140
4.3.1 Comentários sobre MLLM k aos 5 anos	151
4.3.2 Comentários sobre MLLM k aos 9,5 anos	151
4.3.3 Comentários sobre MLLM k aos 15 anos	152
4.3.4 Comentários sobre MLLM keq aos 5 anos	152
4.3.5 Comentários sobre MLLM keq aos 9,5 anos	153
4.4 Comparação entre os resultados de Silva (2010) e Oliveira (2013) com a pesquisa atual.	154
4.4.1 Comparações gráficas.	154
4.4.2 Cálculo dos erros relativos e comparação numérica.	159
5. CONCLUSÕES	164
5.1 Conclusões	164
5.2 Sugestões de continuidade das pesquisas.....	166
6. Referências.....	168

ANEXOS 1 - Regressão para melhor correlacionar os pontos e obter o valor de Cs para os microclimas.....	177
ANEXOS 2 – Previsão do comportamento dos teores de cloretos em função de k, D e t (Cx) (MLLS)	195
ANEXOS 3 – Determinação do tempo equivalente (teq) considerando o tempo de troca (t_{troca}) e Cs constante (0,600 %) para os microambientes MLLS e MLLM	213
ANEXOS 4 – Comportamento dos perfis de cloretos considerando Cs constante (0,600%) e t_{troca} para a idade de 50 anos k (MLLS).....	215
ANEXOS 5 – Cálculo do keq considerando o mesmo D para cada microambiente e levando em consideração a idade de 5 e 9,5 anos	227
ANEXOS 6 – Previsão do comportamento dos teores de cloretos em função de keq, D e t (Cx)...	228
ANEXOS 7 – Comportamento dos perfis de cloretos considerando Cs constante (0,600%) e t_{troca} para a idade de 50 anos keq (MLLS)	240
ANEXOS 8 – Cálculos dos erros relativos para os microclimas MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para k	248
ANEXOS 9 – Cálculos dos erros relativos para os microclimas MLLS e MLLM, considerando a	

variação de Cs e a formação de pico, para k_{eq}	252
ANEXOS 10 – Recálculo e cálculo dos erros relativos para os microclimas MLLS e MLLM considerando a variação de Cs (Silva, 2010) e Oliveira (2013), para k.....	256

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Blocos de concreto (Fonte: Guimarães, 2005).....	27
Figura 2.2 - Geometria dos tetrápodes localizados no Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fonte: Toukaku, 2007).....	28
Figura 2.3 - Diagrama de Pourbaix com faixas de corrosão/passivação/imunidade (Fonte: Pourbaix apud Baggio, 2011).....	30
Figura 2.4 - Evolução da corrosão numa estrutura (Fonte: Gentil, 2003)	31
Figura 2.5 - Perda de espessura devido à corrosão em diferentes tipos de ambiente (Fonte: Capioto, 2006).....	31
Figura 2.6 - Esquema de corrosão eletrolítica no concreto armado na presença de cloretos (Fonte: Neville, 1997).....	32
Figura 2.7 - Ataque por carbonatação (Fonte: Tula, 2000)	36
Figura 2.8 - Formas de ocorrência dos cloretos no interior do concreto (Fonte: Cascudo (1994)	41
Figura 2.9 - Corrosão localizada devido à ação de íons cloreto livre (Fonte: Meira (2004)).....	42
Figura 2.10 - Concentração de cloretos ao longo do cobrimento (Fonte: Cascudo (1997)).....	50
Figura 2.11 - Modelo de vida útil de corrosão no concreto (Fonte: Tuutti, 1980).....	52
Figura 2.12 - Vida útil das estruturas de concreto armado proposto por Helene (1994) (Fonte: Helene (1994)).....	53
Figura 2.13 - Diferentes formas de degradação das estruturas (Fonte: Ribeiro, 2014)	54
Figura 2.14 - A zonas do ambiente marítimo (Fonte: Helene, 1986).....	56
Figura 2.15 - Laguna dos Patos (A) e sua ligação direta com o Oceano Atlântico (B) (Fonte: (Baptista, 1984 apud Silva, 2010))	60
Figura 2.16 - Teor de cloretos nas camadas mais externas de estruturas de concreto em relação à distância da água do mar em Rio Grande – RS. TECON: CS = 3,1% com distância de zero; EMA: CS = 1,1% com distância de 160 m; Terminal Turístico: CS = 0,6% com distância de 630 m (Fonte: Nunes, 2006)	63
Figura 2.17 - Teores de cloreto em relação à massa de cimento para diversas profundidades e altura de uma coluna da ponte sobre o Lago de Maracaibo (Fonte: Castro et al., 2001)	63
Figura 2.18 - Modelo da influência da altura sobre o valor de CS (Fonte: Guimarães et al. 2007) ..	64
Figura 2.19 - Rede de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes teores de umidade (Fonte: Guimarães, 2000).....	69
Figura 2.20 - Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e o grau de saturação (Fonte: Climent et al., 2002)	70
Figura 2.21 - Posição da extração dos corpos de prova (Fonte: Guimarães et al., 1999).....	72
Figura 2.22 - Perfis com diferentes valores de Cs, D = 1, 48,10-9 cm ² /s e t = 50 anos (Fonte: Silva, 2010).....	75
Figura 2.23 - Perfis com valores de Cs iguais e coeficientes de difusão diferentes (Fonte: Silva, 2010).....	75
Figura 2.24 - Perfil de cloreto formando pico (Fonte: Silva, 2010).....	79
Figura 2.25 - Perfil de cloretos formando pico (Fonte: Andrade et al., 2000).....	80
Figura 2.26 - Esquema do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS com os microambientes pesquisados (Fonte: Guimarães et al., 2003).....	82
Figura 2.27 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS k. (Fonte: Silva (2010))	83
Figura 2.28 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS k. (Fonte: Silva (2010)).....	84
Figura 2.29 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS keq. (Fonte: Silva (2010))	85

Figura 2.30 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS keq. (Fonte: Silva (2010))	85
Figura 2.31 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM k. (Fonte: Silva (2010)).....	86
Figura 2.32 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM k. (Fonte: Silva (2010)).....	87
Figura 2.33 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM keq. (Fonte: Silva (2010)).....	87
Figura 2.34 - Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM keq. (Fonte: Silva (2010)).....	88
Figura 2.35 - Modelo proposto por Silva (2010), utilizado por Oliveira (2013). aos 15 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS k e keq. (Fonte: Oliveira (2013))	89
Figura 2.36 - Modelo proposto por Silva (2010), utilizado por Oliveira (2013). aos 15 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM k e keq. (Fonte: Oliveira (2013))	89
Figura 3.1 - Molhes da Barra do Rio Grande RS. Canal de acesso ao complexo portuário de Rio Grande (Fonte: Google).....	90
Figura 3.2 - Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fonte: Guimarães et al., 2003).....	91
Figura 3.3 - Transporte dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fonte: Guimarães, et al., 2003).....	92
Figura 3.4 - Caminho percorrido para chegar aos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS 24/02/2016	92
Figura 3.5 - Molhes da Barra do Rio Grande RS (A - Molhe oeste e B – Molhe leste com a seta de demarcação do local de extração das amostras) (Fonte: Guimarães et al., 2003)	94
Figura 3.6 - Furadeira utilizada para obtenção das amostras de concreto e os dez furos realizados na pesquisa de Guimarães (2003) (Fonte: Guimarães et al., 2003).....	96
Figura 3.7 - Furadeira especial utilizada na pesquisa de Guimarães (2003) para obtenção das amostras de concreto (Fonte: Guimarães et al., 2003).....	96
Figura 3.8 - Paquímetro utilizado na pesquisa de Guimarães (2003) para medição da distância entre furos (Fonte: Guimarães et al., 2003)	97
Figura 3.9 - Equipamento para aspergir o furo aproveitando todo o material retirado na forma de pó e frasco para coleta do material utilizado na pesquisa de Guimarães (2003) (Fonte: Guimarães et al., 2003).....	97
Figura 3.10 - Furadeira especial utilizada na pesquisa de Oliveira (2013) para obtenção das amostras de concreto dos tetrápodes (Fonte: Oliveira, 2013).....	99
Figura 3.11 - Paquímetro utilizado na pesquisa de Oliveira (2013) para medir a distância entre furos no tetrápode (Fonte: Oliveira, 2013)	99
Figura 3.12 - Caixa de ferramentas manuais com os maquinários essenciais e acessórios para obtenção das amostras de concreto utilizados na pesquisa de Oliveira (2013) (Fonte: Oliveira, 2013).....	100
Figura 3.13 - Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003)	101
Figura 3.14 - Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Silva (2010).....	102
Figura 3.15 - Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).....	102
Figura 3.16 - Extração das amostras do microambiente MLLM, aos 5 e 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003) e Silva (2010)	105
Figura 3.17 - Extração das amostras do microambiente MLLM, aos 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).....	106

Figura 3.18 - Marcação da extração das amostras do microambiente MLLM, aos 5, 9,5 e 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).....	107
Figura 3.19 - Extração das amostras do microambiente MLOI, aos 5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003).....	109
Figura 3.20 - Extração das amostras do microambiente MLOI, aos 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Silva (2010).....	110
Figura 3.21 - Local de extração das amostras do microambiente MLOM, aos 5 e 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS apresentado na pesquisa de Silva (2010).....	103
Figura 3.22 - Perfis de cloretos traçados por Guimarães (2003) aos 5 anos, Silva (2010) aos 9,5 anos e Oliveira (2013) aos 15 anos para o microambiente MLLS.....	116
Figura 3.23 - Transposição do pico para a origem do eixo “x” para o microambiente MLLS.....	116
Figura 3.24 - Perfis de cloretos traçados por Guimarães (2003) aos 5 anos, Silva (2010) aos 9,5 anos e Oliveira (2013) aos 15 anos para o microambiente MLLM.....	119
Figura 3.25 - Transposição do pico para a origem do eixo “x” para o microambiente MLLM.....	119
Figura 3.26 - Perfil de cloretos para qual $CS_{máx}$ atinge valor fixo em relação a massa de concreto na idade de t_{troca}	121
Figura 4.1 - Comportamento de CS ao longo do tempo (Silva, 2010).....	125
Figura 4.2 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 5 anos.....	127
Figura 4.3 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.....	127
Figura 4.4 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.....	128
Figura 4.5 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.....	128
Figura 4.6 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 9,5 anos.....	129
Figura 4.7 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.....	130
Figura 4.8 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.....	130
Figura 4.9 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.....	131
Figura 4.10 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 15 anos.....	132
Figura 4.11 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.....	132
Figura 4.12 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.....	133
Figura 4.13 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 9,5 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.....	133
Figura 4.14 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 5 anos.....	134
Figura 4.15 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.....	135
Figura 4.16 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 9,5 anos.....	136
Figura 4.17 - Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.....	136
Figura 4.18 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5 anos.....	140
Figura 4.19 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 5 anos e previsão do	

comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.....	141
Figura 4.20 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.....	141
Figura 4.21 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.....	142
Figura 4.22 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 9,5 anos.....	143
Figura 4.23 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.....	143
Figura 4.24 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.....	144
Figura 4.25 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.....	144
Figura 4.26 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 15 anos.....	145
Figura 4.27 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.....	146
Figura 4.28 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.....	146
Figura 4.29 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 9,5 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.....	147
Figura 4.30 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (keq) aos 5 anos.....	148
Figura 4.31 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.....	148
Figura 4.32 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (keq) aos 9,5 anos.....	149
Figura 4.33 - Comportamento do % de Cl^- MLLM (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.....	150
Figura 4.34 - Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLS – 5 anos (k)).....	154
Figura 4.35 - Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLS – 9,5 anos (k)).....	155
Figura 4.36 - Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLS – 15 anos 5/15 (k)).....	156
Figura 4.37 - Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLS – 15 anos 9,5/15 (k)).....	156
Figura 4.38 - Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLM – 5 anos (k)).....	157
Figura 4.39 - Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLM – 9,5 anos (k)).....	157
Figura 4.40 - Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLM – 15 anos 5/15 (k)).....	158
Figura 4.41 - Comparação modelo/estimativas 2010, 2013 e atual (MLLM – 15 anos 9,5/15 (k)).....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais íons do Oceano Atlântico – DIN 4030 (1991).....	58
Tabela 2.2 Composição da água do mar (Biczók, 1972).....	59
Tabela 2.3 Relação a/c máxima conforme normas para concreto armado em ambiente marítimo (Guimarães, 2000).....	66
Tabela 2.4 Consumo mínimo de cimento para concreto em ambiente marítimo conforme algumas normas (Guimarães, 2000).....	67
Tabela 2.5 Dados dos ensaios de penetração de íons cloreto – média dos resultados aos 28 dias de idade apresentado por (Guimarães et al., 1999).....	72
Tabela 3.1 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	103
Tabela 3.2 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	104
Tabela 3.3 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 15 anos de idade) apresentado na pesquisa de Oliveira (2013)	104
Tabela 3.4 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 5 anos de idade) apresentado por Guimarães (2003)	107
Tabela 3.5 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	108
Tabela 3.6 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 15 anos de idade) apresentado na pesquisa de Oliveira (2013)	108
Tabela 3.7 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOI aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	111
Tabela 3.8 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOI aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	111
Tabela 3.9 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOM aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010) por Guimarães (2003).....	113
Tabela 3.10 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOM aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010)	114
Tabela 3.11 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	117
Tabela 3.12 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 9,5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	117
Tabela 3.13 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 15 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	118
Tabela 3.14 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	120
Tabela 3.15 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 9,5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	120
Tabela 3.16 Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 15 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”	121
Tabela 4.1 Resultados obtidos a partir da análise do microambiente MLLS dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.....	137
Tabela 4.2 Resultados obtidos a partir da análise do microambiente MLLM dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.....	150
Tabela 4.3 Resultados obtidos a partir da análise do cálculo do erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para k, no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS	160

Tabela 4.4 Resultados obtidos a partir da análise do cálculo do erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de C_s e a formação de pico, para k_{eq} , no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS	161
Tabela 4.5 Resultados obtidos a partir do recálculo e do cálculo do erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de C_s e a formação de pico, para k , no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS de Silva (2010) e Oliveira (2013)	162

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micro metro
mm	Milímetros
m	Metro
mg	Miligramas
g	Gramas
l	Litros
N	Newton
MPa	Mega pascal
Pa	Pascal
h	Horas
a/c	Relação água cimento
CA	Concreto armado
Mg	Íons magnésio
Fe	Ferro
Zn	Zinco
Cl^-	Íons cloretos
ϕ	Diâmetro
ΔV	Diferença de potencial elétrico
e^-	Elétrons livre
O_2	Oxigênio
S_2	Íons sulfetos
$^{\circ}C$	Graus Celsius
pH	Potencial hidrogeniônico
F_{ck}	Resistência a compressão

H_2S	Gás sulfídrico
H_2O	Água
$C(x,t)$	Concentração de íons cloreto em relação a massa de cimento em uma determinada profundidade x a partir da superfície do concreto em um tempo t
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Corpos de prova
CS	Teor de cloretos na superfície
$erf(z)$	Função erro de Gauss
$erfz$	Função complementar erro de Gauss

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEP	Cimento Portland Especial para Pré-Moldados
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
ISO	International Organization for Standardization
IBRACOM	Instituto Brasileiro do Concreto
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
RS	Rio grande do sul
USP	Universidade de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância e justificativa do tema

O concreto, em sua concepção atual, surgiu em 1849 na França e desde então, tem demonstrado ser o material mais adequado para construções (Helene, 1992). Mehta e Monteiro (1994) consideram que um dos motivos pelo qual o concreto seja o material mais usado na engenharia seja pela variedade de formas e tamanhos em que seus elementos podem ser construídos, além da sua disponibilidade e custo inferior, se comparado a outros materiais de engenharia.

As antigas construções eram feitas somente com pedras, por isso a durabilidade era maior, logo, as dimensões físicas também eram maiores proporcionando resistência somente à compressão. Com a necessidade de fabricar um material que resistisse também a tração surgiu-se a ideia do concreto armado.

O concreto, comparado com outros materiais, é considerado o mais versátil e de uso mais difundido devido as suas características. Apresenta diversas vantagens como boa resistência mecânica e boa resistência ao fogo, não exigindo grandes gastos com manutenção (Silva, 2010).

O concreto de cimento Portland é atualmente um dos materiais mais utilizados e manufaturados. Inúmeras construções de diversos portes e tipos (comerciais, residenciais, industriais, costeiras ou imersas em ambientes marítimos) são executadas em concreto. A versatilidade e as vantagens do concreto fazem do material o segundo mais consumido no planeta, sendo ultrapassado somente pela água. Estima-se que em 2010 o consumo aproximado de concreto foi próximo de 3,0 t/hab.ano (Isaia, 2011).

Em consequência, com a adesão do aço ao concreto surgem alguns problemas relacionados à durabilidade desse material. A corrosão é um processo eletroquímico muito difícil de impedir. Porém, com o avanço da tecnologia e novas técnicas de inibir o aparecimento da corrosão é possível compreender o assunto de modo a determinar metodologias de redução, aumentando assim o tempo de vida sem grandes gastos com reparos e reforços.

Com base em um dos maiores problemas da construção civil é interessante ressaltar, alertar e analisar esses problemas o quanto antes, pois as correções serão bem mais duráveis, mais efetivas, mais fáceis de executar e muito mais baratas quanto mais cedo forem executadas, (Helene, 1994).

O problema da corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, utilizados na construção civil, atualmente, está cada vez mais expansivo, principalmente, no Brasil. A corrosão é consequência de agentes degradantes das estruturas de aço do concreto, o qual pode levar a ruína da estrutura.

A corrosão pode ser entendida como o resultado de reações químicas ou eletroquímicas, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação. A degradação do aço, por exemplo, pode ocorrer por corrosão eletroquímica ou por oxidação direta (Helene, 1992).

Na corrosão eletroquímica o fenômeno ocorre pela formação de pilhas nas quais à presença de uma solução aquosa ou umidade (água ou produtos de hidratação do concreto) na superfície do aço pode atuar como um eletrólito. Na oxidação direta ocorre uma reação direta entre o aço e o oxigênio, com a formação de uma película uniforme e contínua de óxido de ferro a qual somente é significativa em altas temperaturas (Helene, 1993).

Gemelli (2001) estima que a corrosão destrua 25% da produção mundial de aço por ano, o que corresponde a varias toneladas por segundos. O custo total da corrosão está avaliado em 4% do produto nacional bruto. Isso demonstra a importância do fenômeno da corrosão, devendo ser uma das principais preocupações das autoridades políticas e científicas para minimizar seus efeitos, sem contar que também são responsáveis por perdas humanas, devido à queda de marquises, viadutos, pontes, edifícios e até mesmo por acidentes aéreos.

No Brasil são constatados casos de corrosão não apenas no sul, e como exemplo disso se pode destacar o caso de uma vistoria realizada na capital de São Paulo por Magalhães et al. (1989) em 145 viadutos e pontes, onde 58% do total apresentavam problemas relacionados à corrosão das armaduras.

Na cidade de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, também há um crescimento elevado e contínuo das obras de infraestrutura relacionadas à região costeira e portuária. Nos dias atuais, como principal destaque, ainda, tem-se o polo naval, que produz plataformas para extração de petróleo em alto mar. Sendo assim, é viável buscar conhecimento e aprendizado de acordo com a demanda apresentada pelo município.

É evidente que todas as estruturas de construções próximas às regiões marítimas ou costeiras sofram algum tipo de impacto decorrente da ação de agentes de deterioração causados por fenômenos ambientais. Seja por um alto grau de agressividade do ambiente em que estão inseridas, por mudanças bruscas de temperatura ou formação de aerossóis com mecanismos propulsores de corrosão.

O cobrimento do concreto que serve de barreira física aos agentes agressivos e para proporcionar alcalinidade elevada ao meio, é aquele que confere ao aço uma passivação contra a

corrosão. Essa camada de proteção de óxidos de ferro protege o aço contra qualquer sinal de corrosão, mas somente se esse concreto mantiver sua boa qualidade e não modificar as suas características mecânicas ou físicas devido à ação de agentes agressivos (Andrade et al., 1986, apud Silva, 2010).

A falta de um cobrimento adequado contribui altamente para o início do processo de corrosão das armaduras que, uma vez iniciada, avança rapidamente pelo aço gerando fissuras e desagregação do concreto.

Sabe-se que, os principais causadores da corrosão em estruturas de concreto armado são o gás carbônico (CO_2), os íons sulfato e os íons cloreto, além da constante influência das propriedades e características dos materiais empregados para execução do material. Esses são responsáveis pela formação de produtos de corrosão que combinados com o ambiente atmosférico deterioram edificações, cais, piers, instalações industriais e fábricas regionais, contribuindo para o envelhecimento precoce dos elementos estruturais e para a diminuição da durabilidade.

Logo, os tetrápodes, alvo da pesquisa, para apresentar uma simplificação de modelos formando pico mais a variação da concentração superficial de cloretos baseado nas pesquisas de Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013) não apresentam problemas quanto à penetração de cloretos, pois eles não possuem armadura estrutural. O estudo do comportamento dos perfis de cloretos e suas estimativas de penetração tem a finalidade de explorar e observar a dinâmica do comportamento em ambientes marítimos considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico, para aplicar em projetos de estruturas marítimas de concreto em estruturas futuras.

Portanto, o estudo do comportamento dos perfis de cloretos e suas estimativas, levando em consideração a durabilidade das estruturas em concreto armado torna-se de suma importância para manter a qualidade desse material através da aplicação de modelos de previsão de vida útil e, com isto, reduzir gastos excessivos com manutenção estrutural.

1.2 Estudos anteriores na área

Guimarães e Helene (2002) desenvolveram e criaram um método de ensaio para obtenção do coeficiente de difusão em concreto não saturado, no entanto, concluíram que nestes ensaios há uma tendência de cessar a difusão quando o grau de saturação (GS) diminui até aproximadamente 40%. Sendo que este método teve o inconveniente de permitir a avaliação da penetração de cloretos tão

somente pela 1ª Lei de Fick. No entanto, Guimarães (2005) modificou o método de ensaio para difusão de cloretos em concretos não saturados, permitindo sua avaliação pela 2ª Lei de Fick.

Nielsen e Geiker (2003) salientaram a criação de um modelo para avaliar a penetração de íons cloreto levando em conta que o coeficiente de difusão deverá ser dependente da quantidade de umidade disponível para a substância difusora.

Climment et al (2002) mediram o coeficiente de difusão de íons cloreto em amostras de concreto não saturado, submetendo a superfície de concreto ao produto de combustão de PVC e concluíram que o coeficiente de difusão decresce cerca de duas ordens de grandeza quando a porcentagem de saturação do concreto diminui entre 80% a 30%, em ensaios com teores de água controlados.

Nunes (2006) analisou estruturas de concreto armado com mais de 15 anos, a influência do teor de cloretos na superfície do concreto, sendo que este diminui com maior distância em relação à água do mar.

Silva (2010) em sua pesquisa para dissertação de Mestrado realizou estudos para elaboração dos perfis de penetração de cloretos obtendo o coeficiente de difusão (D) em tetrápodes com 9,5 anos, e aproveitando os dados de Guimarães (2003) para traçar os perfis também, aos 5 anos de idade dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande, RS.

Guimarães et al. (2011) pesquisaram o comportamento da concentração superficial de cloretos em testes submersos e, assim, chegaram a conclusão de que a concentração superficial de cloretos pode variar pouco com o passar do tempo, nesta condição.

Oliveira (2013) em seu projeto de graduação avaliou e continuou o monitoramento dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS pesquisado por Silva (2010) obtendo perfis de cloreto em modelos considerando a avaliação no tempo do teor de cloretos na superfície, aos 15 anos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

A dissertação tem por objetivo geral a pesquisa da penetração de íons cloreto observando o comportamento de perfis formando pico (CP) mais a concentração superficial de cloretos (Cs)

baseados nos modelos tradicionais e propostos anteriormente, assim como a aplicação de estimativas considerando os estudos de Guimarães (2003) Silva, (2010) e Oliveira (2013) no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande – RS.

1.3.2 Objetivos específicos

- Refazer os perfis de cloretos de Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013) considerando a variação de Cs no tempo e considerando a formação de pico.
- Traçar os novos modelos e estimativas para os perfis de cloretos tentando aprimorar a aplicação dos modelos antigos.
- Comparar e ressaltar os resultados para verificar a funcionalidade dos modelos e obter previsões considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico nos perfis de cloretos

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação é estruturada da seguinte forma:

O primeiro capítulo expõe as considerações iniciais do trabalho, introduzindo referências para o estudo e um breve histórico da utilização do concreto armado no país e no mundo. Salienta, também, o processo de deterioração da corrosão das armaduras. Primeiramente é dado um enfoque geral sobre o problema completando com a importância do estudo, seguido do objetivo geral e principal da dissertação e os objetivos secundários e específicos que se desejam alcançar com a realização da pesquisa.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica da dissertação, ressaltando os principais agentes de deterioração nas estruturas de concreto armado na construção civil (carbonatação, ataque por íons sulfato e ataque por íons cloreto). Ainda são apresentados aspectos gerais referentes ao ambiente marítimo, fatores influentes (externo e interno) que contribuem para deterioração e durabilidade das estruturas de concreto armado, a concentração de cloretos na

superfície e seus modelos e a formação de pico e seus modelos.

O capítulo três aborda a metodologia da pesquisa da dissertação, apresentando o ambiente pesquisado, os microambientes relacionados ao ambiente geral, os materiais e métodos utilizados para elaboração.

O capítulo quatro apresenta as análises dos resultados obtidos através dos novos traçados de perfis de cloretos considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico. Mostra também as novas estimativas para anos anteriores e superiores ao perfil em análise e as comparações entre as pesquisas já existentes.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os blocos de concreto

Os blocos de concreto, denominados por tetrápodes, foram projetados para substituir as pedras de maior tamanho em quebra mares e molhes, com inúmeras vantagens, entre as quais o intertravamento entre si, estabilidade na estrutura da carapaça e agilidade nos serviços de lançamento.

Desde o século XIX, a utilização de arranjos de concreto com a finalidade de dissipar e absorver a energia das ondas em molhes e portos de mar tem sido bastante eficaz. Os blocos são simplesmente justapostos, encaixados e sobrepostos uns aos outros, formando estruturas mais ou menos regulares e relativamente compactadas ao longo de diques portuários e obras costeiras (Fig. 2.1) (Guimarães, 2005).



Figura 2.1 – Blocos de concreto (Fonte: Guimarães, 2005).

Alguns dos blocos mais soltos são movidos pela água que penetra nas vagas alternadas e/ou nos pontos falhos. Assim, com o passar do tempo, o empilhamento vai assentando e tornando-se cada vez mais homogêneo (Migliorini, 2011).

2.2 O tetrápode

Os tetrápodes são blocos de concreto utilizados em zonas marítimas para minimizar os impactos das ondas e abrigar embarcações das fortes ondas presentes em zonas marítimas.

Em 1950, a Sociedade de Genóbia de Estudos e de Aplicações (Sogreah), lançou no mercado a primeira unidade projetada para proteção de molhes e diques (Migliorini & Guimarães, 2011).

Constituído em concreto maciço, o bloco é disposto de um eixo central, no qual são tangentes quatro cones alongados (patas) e arredondados, distribuídos igualmente a 120° no espaço conforme a Fig.2.2 (Migliorini, A. V. & Guimarães, 2011).

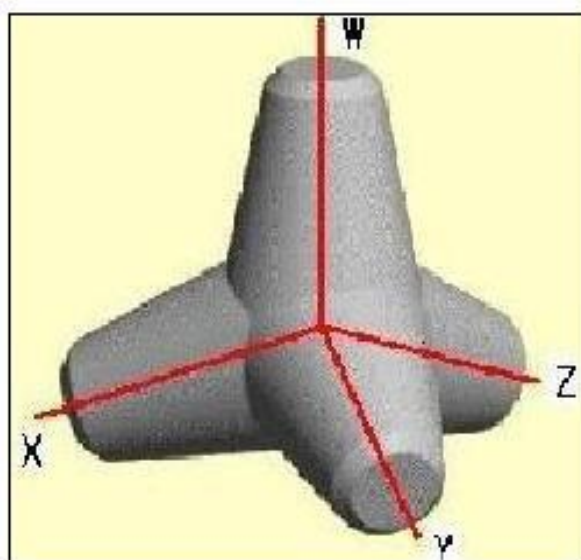


Figura 2.2 – Geometria dos tetrápodes localizados no Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS
(Fonte: Toukaku, 2007).

Estas “patas” facilitam a conexão entre os blocos, tornando a estrutura mais estável. O centro de gravidade do tetrápode encontra-se na união das quatro “patas”, o que dificulta o balanço e o rolamento da carcaça (Migliorini & Guimarães, 2011).

Projetado para ser instalado em camada dupla, a utilização desses blocos diminui consideravelmente a energia das ondas e o nível da água que ultrapassa pelos interstícios (Migliorini & Guimarães, 2011).

Com isso, a agitação das ondas num porto torna-se inferior comparada ao mar aberto (Migliorini & Guimarães, 2011).

2.3 Mecanismos de deterioração

O concreto é o material construtivo mais utilizado pelo homem na atualidade. Combinado com o aço o concreto armado é um elemento estrutural responsável por manter a estabilidade e a integridade das construções. Mas, muitas vezes, esse material é agredido constantemente por mecanismos deteriorantes, desestabilizando a principal função da estrutura.

O concreto de uma estrutura deve ser muito bem elaborado para que seja capaz de suportar e resistir às ações físicas, químicas e mecânicas (Cánovas, 1988).

Os principais agentes encontrados em ambientes marítimos e industriais, que normalmente são a causa de ataque ao concreto armado, são o gás carbônico, os íons sulfato, os íons cloreto, as chuvas ácidas, a fuligem, os fungos e bactérias. Muitas vezes esses ambientes marítimos, industriais e densamente urbanizados podem estar combinados, aumentando o nível de agressividade (Helene, 1993).

A corrosão e a deterioração do aço observadas em estruturas podem ser associadas a fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos, entre os quais são citados como exemplo (Gentil, 2003):

- Mecânico: vibrações e erosão;
- Físicos: variações de temperatura;
- Biológico: bactérias;
- Químico: produtos químicos como ácidos e sais.

Dentre os fatores mecânicos têm-se as vibrações que podem ocorrer por choques, por exemplo, a uma estrutura de concreto armado e a perda do material da estrutura, a erosão. Os ataques físicos que contribuem para o desgaste superficial está associado as variações de temperatura, chuvas ácidas e insolação. As bactérias e fungos também aparecem como agentes degradantes. E, os produtos químicos como ácidos e sais estão como deteriorantes de estruturas de concreto.

O diagrama de Pourbaix representado na Fig. 2.3 exemplifica o comportamento do processo corrosivo no aço em estruturas de concreto armado (Potencial x Ph).

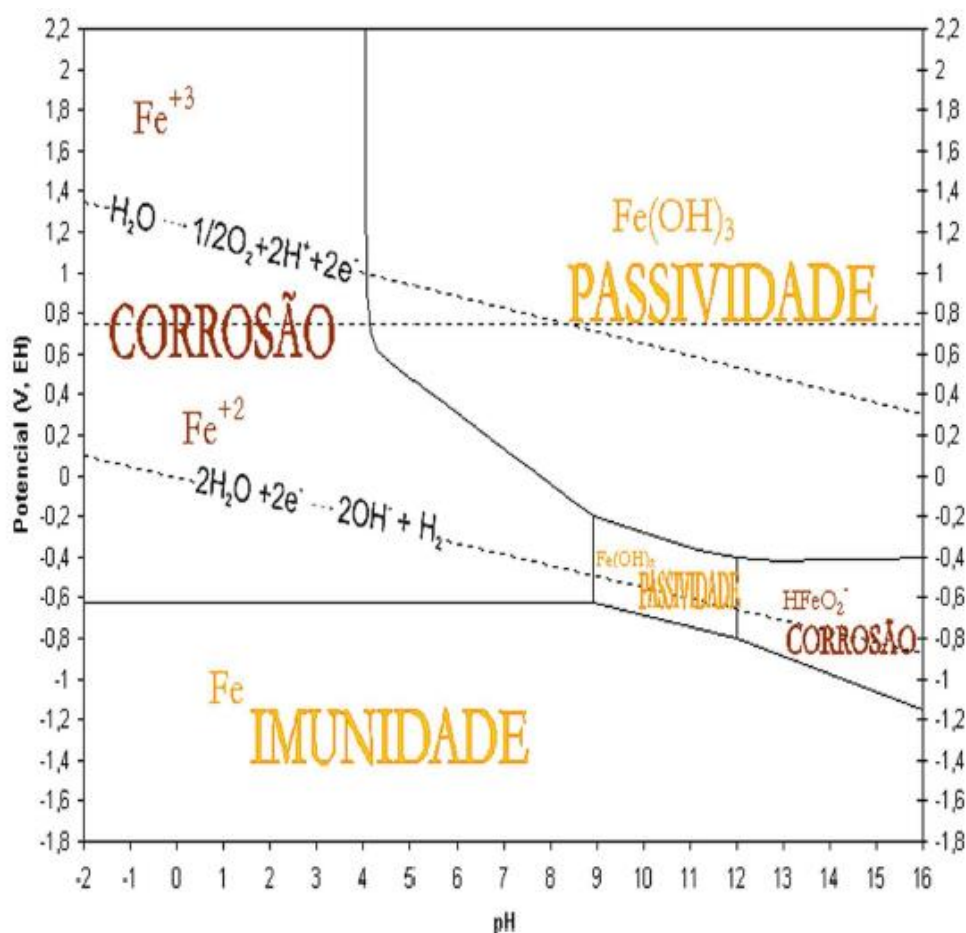


Figura 2.3 – Diagrama de Pourbaix com faixas de corrosão/passivação/imunidade (Fonte: Pourbaix, 1973).

O ferro corrói com a evolução do hidrogênio a menos que as condições sejam tais que ele esteja coberto com um óxido protetor conferindo um estado de passivação. Geralmente isso só é possível na presença de solução com concentração relativamente baixa de cloreto. Essa passivação ocorre na faixa de pH 9 e 12 (Pourbaix, 1973).

Em estruturas, normalmente, o aço é coberto por uma camada de concreto, o que em função do pH, na ordem de 13, promove a formação de uma película passivadora. Entretanto o pH é facilmente alterado por processos como carbonatação, lixiviação, entre outros, o que deixa novamente o aço sem proteção, já que o concreto é um material poroso (Baggio, 2011).

Na corrosão eletroquímica há reações anódicas e catódicas, sendo que a destruição do aço ocorre nas regiões anódicas, enquanto que nas regiões catódicas esse ataque é quase desprezível (Helene, 1993).

Na Figura 2.4 observa-se a evolução do processo corrosivo da superfície para o interior de uma estrutura.

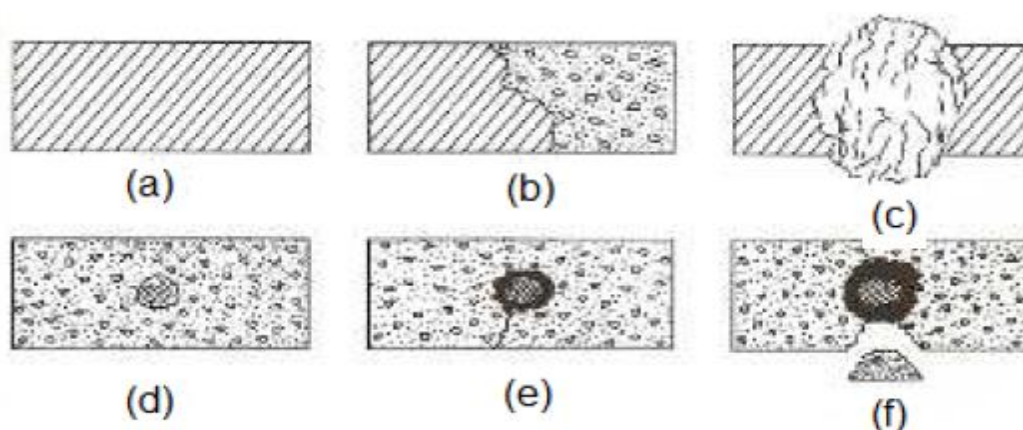


Figura 2.4 – Evolução da corrosão numa estrutura. (a) Estrutura sem deterioração, (b) deterioração superficial, (c) deterioração expansiva, (d) barra de aço sem corrosão, (e) barra de aço com início do processo corrosivo devido à penetração do meio corrosivo pelas trincas, (f) continuidade do processo corrosivo no aço, com grande formação de óxido de ferro e consequente aumento de pressão acarretando a desagregação da estrutura (Fonte: Gentil, 2003).

A agressividade dos ambientes, como, o ambiente urbano, ambiente rural, ambiente marítimo e ambiente industrial a corrosão gera uma expansão da seção transversal do aço. E, para cada um desses tipos de ambientes a massa do produto de corrosão pode variar. A Figura 2.5 mostra a perda de espessura em relação ao tempo nesses quatro tipos de ambientes.

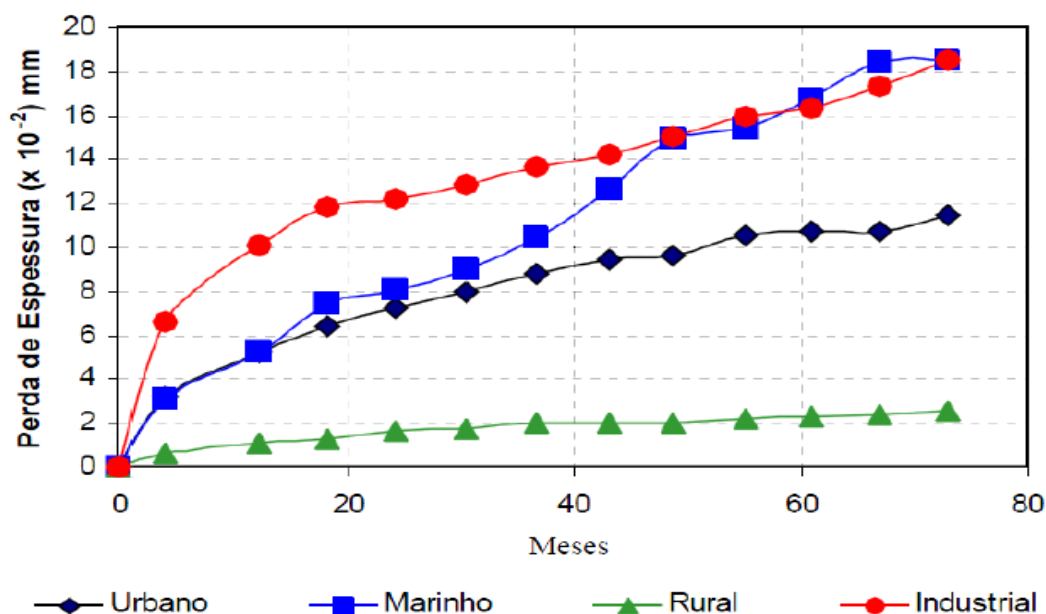


Figura 2.5 – Perda de espessura devido à corrosão em diferentes tipos de ambiente (Fonte: Capioto, 2006).

No entanto, se verifica, na Fig. 2.5, que em ambientes marinhos e ambientes industrializados a corrosão nas armaduras é bem mais intensa com o passar do tempo.

O mecanismo de corrosão pode ocorrer da seguinte maneira: devido a uma diferença de potencial ocorre a formação de duas regiões no aço, o ânodo e o cátodo. Os íons de Fe^{++} passam para o ânodo enquanto os elétrons livres (e^-) para o cátodo, onde se combinam com oxigênio e água e formam $(\text{OH})^-$ (Silva. 2010).

Esses por sua vez se deslocam até encontrar os íons ferrosos formando o hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) que através de outra reação se transformam em hidróxido férrico. Deve-se salientar que os agentes agressivos, como os íons cloreto, aceleram o processo de corrosão. Os íons cloreto quando estão presentes no concreto, mesmo em meio alcalino, podem destruir ou impedir a formação da capa passiva do aço (Fig. 2.6) (Silva. 2010).

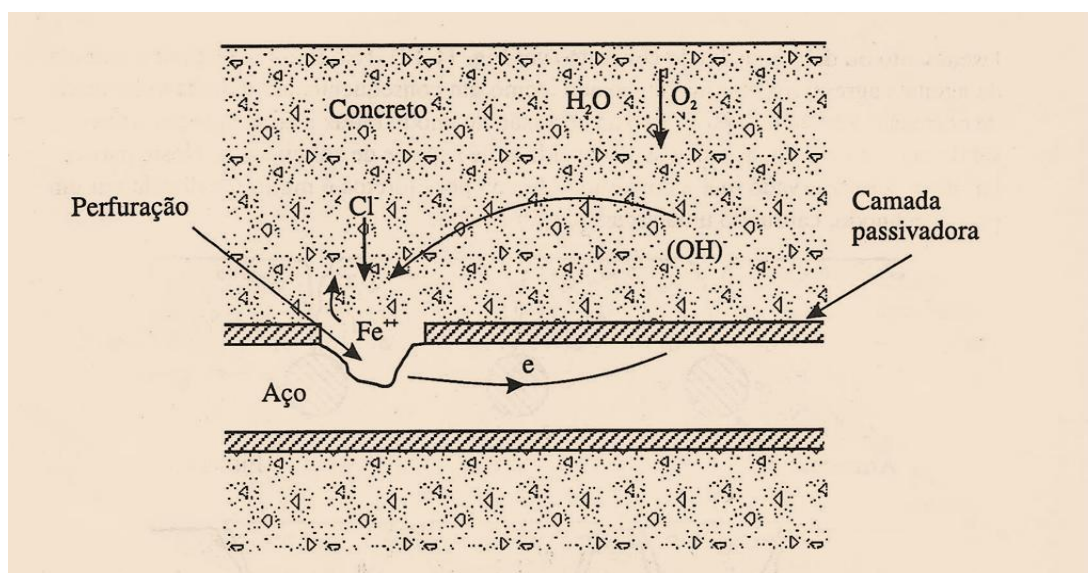


Figura 2.6 – Esquema de corrosão eletrolítica no concreto armado na presença de cloretos (Fonte: Neville, 1997).

O fenômeno da corrosão poderá se apresentar sob várias formas como o de exposição do aço, flambagem de pilares pela perda da aderência entre o aço e o concreto, redução do cobrimento e lascamento do concreto, entre outros (Cascudo, 1994). Após o início da corrosão se pode dizer que a taxa de ataque dessas é determinada pela taxa de reações do ânodo e do cátodo e pelo contato físico entre as áreas da reação (Tuutti, 1982). Enfim, a corrosão eletroquímica pode ser caracterizada por zonas catódicas e anódicas e sua ação pode ser aumentada pela existência de agentes externos, que conforme Helene (1986), são:

- O dióxido de carbono (CO_2);

- Os íons cloreto (Cl^-);
- Os íons sulfetos (S_2^-);
- O gás sulfídrico (H_2S);
- Os nitratos (NO_3^-);
- O cátion amônio (NH_4^+);
- Os óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3), etc.

A busca incessante por estruturas de concreto armado de alta qualidade e com maior durabilidade tem se tornado cada vez mais frequente. Para isso, conhecer os agentes causadores das deteriorações das estruturas de concreto armado torna-se indispensável para implantar e determinar novos métodos de combate e controle dos mecanismos propulsores da corrosão.

2.3.1 Carbonatação

A ação do gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera manifesta-se pelo transporte (por difusão) deste para dentro dos poros úmidos do concreto (isto é, da superfície para o interior), e com a sua subsequente reação com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). O desaparecimento do hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – no interior dos poros da pasta de cimento hidratado e sua transformação em carbonato de cálcio faz baixar o pH do concreto (entre 12,5 e 14) para valores inferiores a 9, resultando na carbonatação do concreto (Souza & Ripper, 1998).

Portanto, a carbonatação é um processo químico que ocorre em estruturas de concreto armado de fora para dentro. Esse processo tende a fechar os poros do concreto à medida que vai evoluindo, e quando chega ao aço, a camada passivadora é rompida aumentando assim a dureza superficial e contribuindo para a corrosão no aço.

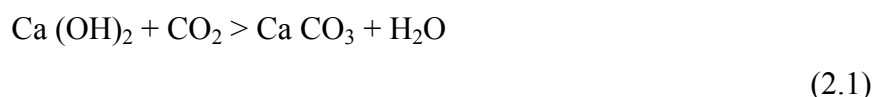
A carbonatação é um processo no qual compostos da atmosfera entram em contato com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente nos poros do concreto (Nepomuceno, 2005) com uma reação de neutralização (Figueiredo e Helene, 1994). Os compostos presentes na atmosfera capazes de produzir essas reações com o concreto são, conforme Helene (1986):

- O gás sulfídrico (H_2S);
- O dióxido de enxofre SO_2 .

- O gás carbônico (CO₂), que é considerado o principal agente causador da carbonatação no concreto podendo resultar na corrosão do aço (Lima, 2005).

O CO₂, H₂S e o SO₂ são gases que por difusão podem penetrar através do concreto. Dessa forma, ocorrerão reações destes compostos da atmosfera com o hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) presente nos poros do concreto, podendo ocasionar uma redução do pH do concreto. Dos compostos existentes na atmosfera capazes de promover esse fenômeno se pode destacar o dióxido de carbono (CO₂) por sua maior abundância na atmosfera (Silva, 2010).

A carbonatação pode ser caracterizada por um processo lento que pode ser demonstrado de forma simplificada pela Eq. 2.1 com uma transformação dos componentes do cimento em carbonatos (carbonatação) (Andrade, 1992) (Helene, 1986):



Segundo Guimarães (2000), o filme passivante que envolve o aço é estável se o pH da solução no interior do concreto endurecido for maior do que 12 e se não houver presença de cloretos. Se a camada de cobrimento que protege o aço por passivação carbonatar ou for neutralizada por solução ácida, reduzindo o pH para um valor menor do que 11,5, a passividade do aço poderá ser desfeita, ficando esse sujeito ao processo de corrosão.

O aço envolvido pela pasta de cimento hidratada forma rapidamente uma fina camada de passivação de óxido que adere fortemente ao aço, protegendo-o completamente contra a reação do oxigênio com a água causadora da corrosão (Neville, 1997).

Conforme Helene (1986), a desp passivação poderá ocorrer se o pH for inferior a 11,5. A velocidade de carbonatação pode ser expressa pela raiz quadrada do tempo (Eq. 2.2), conforme Figueiredo e Helene (1994):

$$e_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2} \sqrt{t} \quad (2.2)$$

Onde:

e_{CO_2} = É a espessura carbonatada dado em mm;

k_{CO_2} = É a constante de proporcionalidade que age de acordo com as características e condições de exposição do concreto dado em mm/ano^{1/2};

t = É o tempo de exposição do elemento dado em anos.

A constante k_{CO_2} depende de todos os fatores que afetam a carbonatação como: a qualidade e resistência do concreto, relação a/c, umidade relativa e materiais empregados na elaboração do elemento (Helene, 1993).

Ainda de acordo com Helene (1993), o valor de k_{CO_2} , tende a aumentar com:

- A redução da umidade relativa do ambiente, até atingir valores entre 65% e 85%. Estando a umidade relativa em torno de 50%, passa a faltar água para a reação de carbonatação. Na presença de umidade relativa maior do que 95%, praticamente não existem carbonatação.
- O aumento da relação água/cimento do concreto.
- A redução do teor de $Ca(OH)_2$ nos poros do concreto.
- O aumento da porosidade e permeabilidade do concreto.
- A ausência ou inadequação do processo de cura, que irá provocar fissuras, facilitando a penetração do CO_2 .

A penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão (Helene, 1993).

A carbonatação favorece a despassivação da armadura com uma consequente destruição da capa passiva do aço e nas zonas de molhagem e secagem é capaz de contribuir para a retração do concreto (Neville, 1997)

A Figura 2.7, apresentada abaixo, mostra o ataque por dióxido de carbono em uma estrutura de concreto armado fissurado (tornando o elemento vulnerável a ação de agentes agressivos penetrantes) com a respectiva despassivação da armadura e consequente corrosão do aço com a despassivação da armadura.

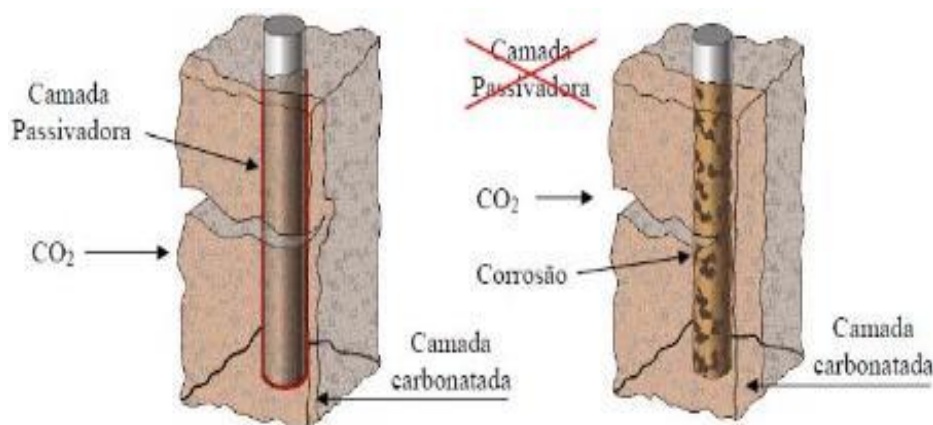


Figura 2.7 – Ataque por carbonatação (Fonte: Tula, 2000).

Após o início da carbonatação, essa é capaz de atingir as primeiras profundidades com grande rapidez, entretanto nos próximos instantes o avanço da frente de ataque ocorre lentamente para o interior do concreto até atingir uma profundidade máxima. O fenômeno da carbonatação estaciona em uma dada profundidade (profundidade máxima) devido à ação da hidratação do cimento que ocorre ao longo do tempo e também à ação de alguns produtos que se desenvolvem na superfície do concreto, e são capazes de impedir a entrada do CO_2 através do elemento (Helene, 1986).

Além do mais, Guimarães (2000) ainda atribui fatores relevantes ao aumento da velocidade de carbonatação. São eles:

- Qualidade de execução;
- Agregados. Para teor de até 50% em volume de agregado, um aumento desse teor irá diminuir a difusão de CO_2 e Cl^- . Já para teores acima de 50%, seu aumento provocará um acréscimo significativo do coeficiente de difusão;
- Aditivos, que podem influenciar, dependendo do tipo e da quantidade utilizada, na permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, na velocidade de penetração da frente de carbonatação;
- Aumento da compacidade;
- Fissuras;
- Umidade Relativa;
- Temperatura;
- Relação a/c (relação água/cimento);
- Cura;

- Cimento.

Na presença de cloretos ou em estruturas com altas relações a/c (água/cimento) à profundidade de carbonatação pode ser reduzida, isso se deve ao fato de haver mais água presente nos poros da estrutura, dificultando a penetração do dióxido de carbono. Portanto, quanto mais água adicionada para fabricação de uma estrutura menor será sua vulnerabilidade a ação de agentes deteriorantes, porém, a probabilidade da resistência mecânica ser menor é alta (Guimarães, 2000).

Em geral a frente de ataque de carbonatação é medida por aspersão de indicadores químicos como a fenolftaleína ou por timolftaleína. Esse método consiste em aspergir esses elementos químicos sobre a superfície recentemente fraturada com o objetivo de determinar a profundidade carbonatada. A fenolftaleína demonstra cor vermelho-carmim se $\text{pH} \geq 10$ e incolor se $\text{pH} \leq 8,3$ (Helene, 1986)

Por sua vez, o indicador de timolftaleína assume a cor azul se $\text{pH} \geq 10,5$ e incolor se $\text{pH} \leq 9,3$. O uso desses indicadores pode demonstrar quais as regiões do concreto são mais alcalinas, o que será diferente de outras regiões que apresentará na aspersão indicador incolor, ou seja, redução de pH devido a ocorrência da carbonatação (Kazmierczak, 1995).

2.3.2 Sulfatos

O sulfato é um elemento que pode ser encontrado na natureza sobre diversas formas (Silva, 2010). No que se refere ao concreto existem duas maneiras sobre as quais o sulfato pode atacar esse elemento e como consequência acarretar problemas para a estrutura (Mehta & Monteiro, 1994):

- A primeira é a perda progressiva de resistência e de massa devido à deterioração dos produtos de hidratação do cimento;
- A segunda é a expansão do concreto, com aumento da permeabilidade e assim o aumento da ação da água agressiva devido ao aparecimento de fissuras.

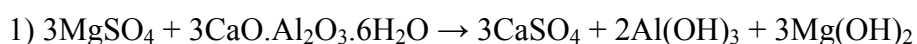
Os sulfatos mais perigosos para o cimento Portland são os de amoníaco, de cálcio, de magnésio e de sódio. Já os sulfatos de potássio, de cobre e de alumínio são menos perigosos. Os sulfatos de bário e os de chumbo são insolúveis, e, portanto, inofensivos ao ambiente (Rincón, et al.,

1998 apud Rodrigues, 2009).

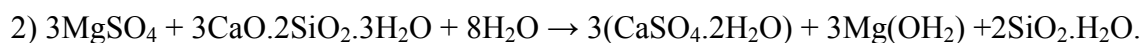
Será predominante o processo conforme a concentração e fonte de íons sulfatos como também, a composição do cimento do concreto. A partir daí o concreto fica suscetível a ataques com profundidades cada vez maiores (Silva, 2010).

No que se refere à ação dos íons sulfato no concreto pode-se destacar o sulfato de magnésio e o sulfato de sódio como os elementos mais reagentes com os compostos hidratados do concreto (Neville, 1997).

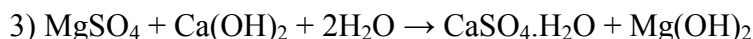
As reações que ocorrem devido à presença de sulfato de magnésio são:



Reação com sulfoaluminato cálcico hidratado conforme Biczók (1972).

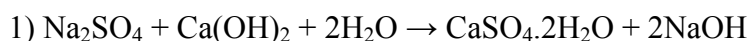


Reação na qual resulta a gipsita conforme Neville (1982).

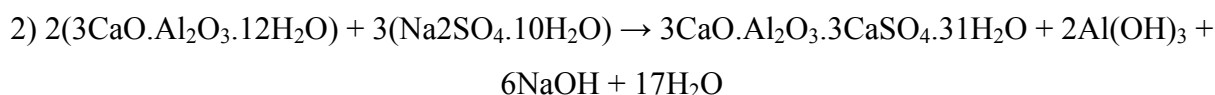


Reação do sulfato de magnésio com o hidróxido de cálcio conforme Mehta e Monteiro (1994).

As reações que ocorrem devido à presença de sulfato de sódio são:



Reação na qual resulta a gipsita e a formação do hidróxido de sódio o qual continua garantindo a alcalinidade do meio (Mehta e Monteiro, 1994).



Reação na qual resulta a etringita, conforme Lea (1970) e vale salientar que os volumes desses elementos finais originados dessas reações são maiores que os elementos que os deram origem.

Segundo Hausmann (1967), altos teores de íons bissulfeto podem causar a corrosão do aço na presença de oxigênio. Rusch (1975) também considera a possibilidade dos sulfetos provocarem a oxidação do aço.

Se o sulfato de magnésio estiver em reação com os compostos do concreto é capaz de tornar o elemento ainda mais propício para o ataque por sulfatos, pois essas reações são capazes de reduzir a alcalinidade do meio devido a formação do hidróxido de magnésio $Mg(OH)_2$, o contrário do que ocorre nas reações com o sulfato de sódio (Mehta & Monteiro, 1994).

Neville (1982) afirma que concretos que em sua composição apresentam quantidades inferiores de C_3A serão os mais resistentes à ação desses agentes agressivos. Uma relação a/c baixa também pode contribuir para um melhor comportamento do concreto frente à ação de sulfatos (Neville, 1982). Biczók (1972) comenta que a carbonatação é capaz de tornar o cimento Portland normal resistente à ação de sulfatos.

Em ambiente marítimo, de acordo com Guimarães (2000) se pode dizer que o ataque por íons cloreto ao concreto é o que ocorre em maior incidência se comparado ao ataque por sulfatos, pois esse é relativamente baixo.

Guimarães (2000) na obra do Tecon em Rio Grande – RS, foram observados que o ataque por sulfatos pode ser considerado desprezível em zona totalmente de névoa (PS–ZTN), sendo mais intenso em zona predominantemente de respingo e maré (EI–ZPRM), mas também desprezível, assim como nas zonas predominantemente de névoa e de respingo, ou seja, (PI–ZPN) e (ES – ZPR) respectivamente.

Biczók (1972), afirma que a quantidade de íons magnésio ($Mg^{+2}O_4^{--}$) existente no oceano atlântico é de 2800 mg/l. Embora este teor de íons na água do mar seja, conforme a classificação da norma DIN 4030 (1991), considerada severa, a presença do $MgCl_2$ contido na água do mar é capaz de reduzir a ação agressiva do $MgSO_4$.

Silva (2010) ainda ressalta que os sulfatos sólidos não atacam o concreto, somente quando estão dissolvidos e tem-se um baixo teor de C_3A em cimento portland, torna esse mais resistente a ação de sulfatos.

Ambientes onde ocorrem ciclos de molhagem e secagem alternados são aqueles em que o ataque por sulfatos ao concreto ocorre de forma muito acelerada (Neville, 1997).

2.3.3 Cloretos

Em Rio Grande, RS, cidade litorânea e portuária a presença de íons cloreto é alta. A maresia do oceano contém cloretos, sendo estes transportados pelos ventos e alcançando estruturas das mais próximas as mais afastadas. A agressividade desse agente químico vai depender de alguns fatores, mas, principalmente, do cobrimento nominal e da qualidade da massa de concreto que protege o aço.

O aço dentro do concreto armado encontra-se devidamente protegido do meio externo se apresentar uma boa espessura de cobrimento. Esse fator é de fundamental importância para que seja garantida a defesa da película passiva do aço contra a corrosão. A espessura de cobrimento dependerá das propriedades do concreto e do ambiente o qual está inserido. Estruturas em ambientes marítimos, por exemplo, deverão apresentar cobrimentos maiores, afim de que haja uma maior proteção da estrutura a esses meios agressivos (Silva, 2010).

Os íons cloreto não atacam o concreto, mas destroem a película passivadora e, em presença de água e oxigênio, inicia o processo de corrosão.

Os íons cloreto são considerados os maiores causadores de corrosão no aço do concreto em ambiente marítimo (Silva, 2010).

A camada protetora de passivação na superfície do aço envolto pelo concreto, que se forma logo após o início da hidratação do cimento, e que consiste de Fe_2O_3 firmemente aderente ao aço, é destruída pelos íons cloreto, havendo corrosão na presença de água e oxigênio (Neville, 1997).

Mas se a alcalinidade estiver elevada, com pH entre 12,7 e 13,8, de acordo com Longuet (1973) apud Figueiredo & Helene (1994), é capaz de garantir a proteção da armadura do concreto, afim de que seja evitada a despassivação do aço e, portanto a corrosão (Helene, 1986);

A presença de cloretos no concreto pode ser originada das seguintes fontes mais comuns (Helene, 1986; Andrade, 1992; Mehta & Monteiro, 1994; Figueiredo & Helene, 1994): aditivos, agregados contaminados por sais, água de amassamento, soluções de sais degelantes, água do mar, atmosfera marinha (maresia), processos industriais.

Segundo Helene (1993) e Neville (1997), os cloretos podem ser encontrados como contaminação de agregados principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas.

A NBR 7211(2009) prescreve teores limites de cloretos em agregados para concreto armado menores que 0,1% da massa do agregado e para concreto protendido de 0,01% da massa do agregado. Entretanto, a NBR 12655 (2006) especifica a quantidade máxima de íons cloreto nas

estruturas de concreto armado sujeitas a exposição de cloretos em 0,15% e a estruturas que não estejam em áreas agressivas (locais secos e protegidos de umidade) em 0,4% com relação ao peso do cimento. No entanto, a Norma Brasileira, ABNT-NBR 6118 (2007), não fala sobre teores críticos de íons cloreto no concreto, apenas limita o teor máximo de cloretos em 500 mg/l em relação à água de amassamento do concreto. Esse conteúdo depende de vários parâmetros encontrados, entre eles são citados: tipo de cimento, quantidade de cimento, relação a/c, conteúdo de umidade, agressividade do meio, adensamento, cura e outros, havendo, portanto, dificuldade de ser estabelecido um limite seguro abaixo do qual não haveria possibilidade de despassivação da armadura de aço (Mota, 2012. et al.).

Quando já se encontram no interior da massa de concreto os íons cloreto podem se apresentar das seguintes formas, segundo Figueiredo & Helene, 1994:

- Quimicamente ligado;
- Adsorvido fisicamente na superfície dos poros;
- Livres na solução contida nos poros.

A Figura 2.8 esquematiza as formas de apresentação dos cloretos no interior da massa de concreto.

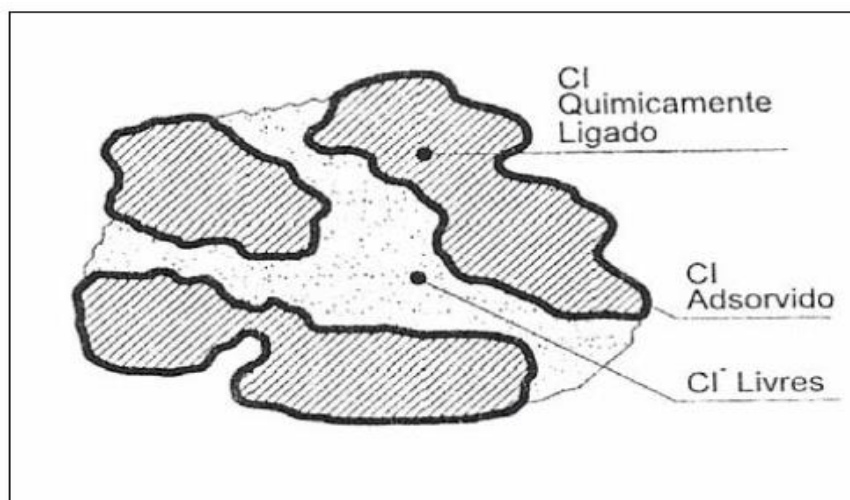


Figura 2.8 – Formas de ocorrência dos cloretos no interior do concreto (Fonte: Cascudo (1994)).

Somente os cloretos livres é que estarão disponíveis para reagir com o aço do concreto e são os que causam a corrosão, conforme Tuutti, 1982 e Cascudo, 1994.

Steopoe apud Biczók (1972) descreve que o cloreto de sódio, contido no concreto, reage formando cloreto de cálcio que é dissolvido, enquanto que os íons sódio se combinam com os silicatos, sendo que para concentrações maiores é formado silicato sódico solúvel, porém de forma lenta. O mesmo ocorre com aluminato de cálcio hidratado, que devido à reação de base com o cloreto de sódio forma aluminato de sódio.

Conforme Treadaway (1988) apud Meira (2004) os cloretos livres penetram nos poros do concreto, juntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, provocam acidificações localizadas que conduzem a desestabilizações pontuais da película de óxidos passivos. Portanto, o concreto, mediante a presença de cloretos fica submetido a corrosões pontuais na armadura, também denominada de corrosão localizada, como mostra a Fig. 2.9.

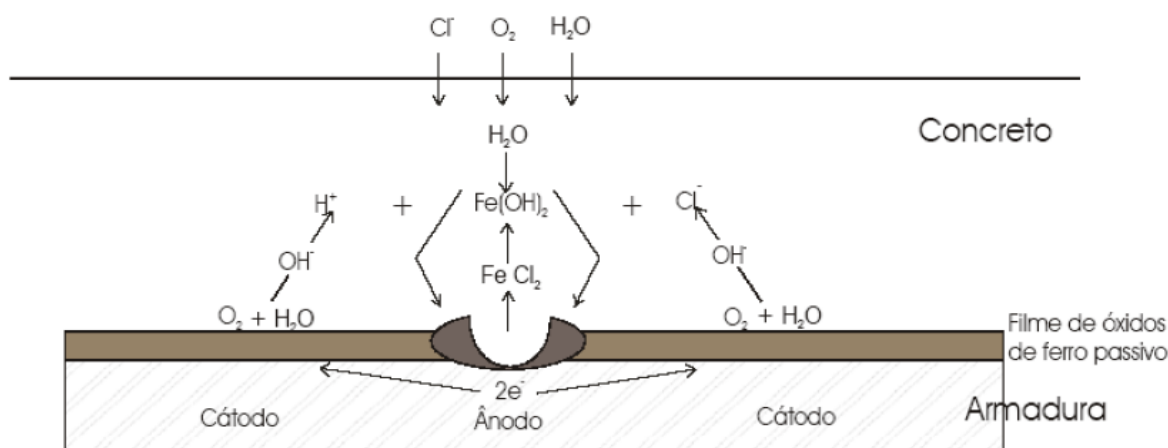


Figura 2.9 – Corrosão localizada devido à ação de íons cloreto livre (Fonte: Meira (2004)).

Malheiro (2008) afirma que, de forma resumida, ocorre que as zonas de ruptura da película atuam como ânodo e as zonas adjacentes a esta ruptura atuam como cátodos. Dada a grande proporção entre as zonas anódicas e catódicas, o ataque processa-se em profundidade.

Apesar de serem cloretos livres aqueles capazes de provocar a corrosão, é conveniente determinar o teor de cloretos totais, uma vez que parte dos cloretos combinados pode ficar disponível devido a efeitos como a carbonatação e a elevação da temperatura (Mohammed & Hamada, 2003).

A corrosão do aço em meio aquoso e à temperatura ambiente é do tipo eletroquímica. No concreto armado, podem-se identificar cinco tipos de células de corrosão (Helene, 1993):

1. Concentrações diferentes de sais no concreto armado. No ataque por cloretos, os teores maiores são alcançados primeiro nas armaduras externas, formando o ânodo que será corroído, enquanto que as armaduras com maior cobrimento e ligadas às externas pelo estribo formam o cátodo, que não sofrerão corrosão;

2. Áreas que são mais carbonatadas que outras, ou seja, com diferentes pH's, devido à diferença na composição do concreto ou na execução desses;

3. Fissuras, que permitem a penetração de agentes agressivos como CO_2 e cloretos, rompendo a capa passivada do aço, formando o ânodo no aço dentro da fissura e o cátodo nas regiões adjacentes, no caso de fissura transversal a armadura, enquanto que em fissura longitudinal a parte superior do aço atua como ânodo e sua parte inferior como cátodo;

4. Pilhas de aeração diferencial resultantes da diferença nos teores de oxigênio ao longo da armadura, sendo que em zonas com maior acesso de oxigênio formará o cátodo, enquanto que em regiões, com menos acesso de oxigênio, tem-se o ânodo, que sofrerá corrosão. Forma-se uma pilha de aeração diferencial, sendo sua formação de menor importância que os outros tipos de célula de corrosão. Essa pilha pode ser formada por diferença de adensamento do concreto ao longo do elemento estrutural ou por diferença de permeabilidade entre um material utilizado para reparo e o concreto inicialmente utilizado na estrutura;

5. Pilhas galvânicas, formadas por contato de diferentes metais, sendo o metal mais ativo o ânodo e o mais nobre o cátodo.

Conforme Guimarães (2000) a célula de corrosão formada pela armadura e o concreto que o envolve, descrita pelo CEB-FIP, BULLETIN 183 (1992), havendo uma pequena diferença de potencial entre a zona catódica e anódica será gerada corrente elétrica. O processo de corrosão será gerado dependendo da magnitude da corrente elétrica e do acesso de oxigênio até a armadura.

Na corrosão eletroquímica há trechos não corroídos, que são as zonas catódicas, e trechos corroídos, que são as zonas anódicas, formando uma série de trechos alternados (Guimarães. 2000).

A penetração do íon cloreto só é possível quando há água nos poros do concreto. Se a água está estagnada, o deslocamento dos íons cloreto se dá por difusão, quando o concreto sofre ciclos de

molhagem e secagem, a penetração desses íons passa a ser por força capilar da água em que estão presentes.

Um exemplo de penetração de íons cloreto por forças capilares é o que ocorre em zonas costeiras de clima quente, onde há névoa salina, que são gotículas de água contendo cloretos. Neste caso é importante conhecer a direção predominante do vento e a insolação, para análise do ataque desse meio ambiente (Andrade, 1992).

O tempo que os cloretos levam para alcançar a armadura do concreto, correspondente ao denominado tempo de iniciação no modelo de Tuutti (1980) depende dos seguintes fatores (Andrade, 1992) (Figueiredo e Helene, 1994 apud Guimarães, 2000):

- Concentração de cloretos no meio externo;
- Natureza do cátion que acompanha o cloreto;
- Se há presença de outro ânion como o sulfato;
- Processo de execução;
- Grau de carbonatação;
- Qualidade do concreto: tipo de cimento, proporção de aluminato tricálcico, relação água/cimento, tipo de cura;
- Temperatura;
- Abertura e quantidade das fissuras.

2.3.4 Mecanismos de transporte no concreto

A penetração de agentes agressivos no concreto armado influencia diretamente na deterioração do elemento estrutural contribuindo para o envelhecimento precoce e a instabilidade da estrutura. Rodrigues (2009) salienta que essas substâncias podem ser do tipo gases, vapores ou líquidos através que penetram através dos poros e/ou fissuras e que podem acarretar na degradação de estruturas de concreto armado.

Nepomuceno (2005) ressalva que as substâncias que podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto armado são a água pura ou com íons dissolvidos, em especial os íons cloreto e sulfato, o dióxido de carbono e o oxigênio.

A durabilidade do concreto irá depender da facilidade ou dificuldade com que os fluidos irão penetrar no concreto e se deslocar no seu interior (Neville, 1997).

Nepomuceno (2005) ainda relata que o transporte de fluidos no concreto, como a porosidade, a distribuição do tamanho dos poros, a conectividade e a tortuosidade, dependem da fração volumétrica de cada material, dos detalhes de hidratação do cimento e do processo de produção do concreto.

Contudo, têm-se os mecanismos de transporte que influenciam na durabilidade do concreto armado, no qual, os principais são:

- Difusão;
- Permeabilidade;
- Absorção capilar;
- Fluxo por convecção;
- Migração.

Difusão

A difusão ocorre quando o deslocamento de um gás ou vapor através do concreto ocorre por meio de um gradiente de concentração, e não com um diferencial de pressão (Neville, 1997). Conforme Neville (1997), em se tratando da difusão de gases, o dióxido de carbono e o oxigênio desempenham um papel importante. O dióxido de carbono é responsável pela carbonatação da pasta de cimento hidratado e o oxigênio é necessário à corrosão da armadura do concreto.

A primeira lei de Fick expressa a função da difusão que se aplica ao vapor de água e ao ar.

A segunda Lei de Fick é uma das expressões matemáticas mais empregadas para efetuar a previsão da velocidade de penetração de cloretos, (Cranck, 1975).

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). Os dados são ajustados

empregando-se o método dos mínimos quadrados na equação 2.4, utilizada para o cálculo da vida útil residual (Rodrigues, 2009).

Permeabilidade

Nepomuceno (2005), explica que a penetração por permeabilidade é um mecanismo de transporte de líquidos ou gases que ocorre em função de uma diferença de pressão.

Neville (1997), diz que o escoamento em poros capilares pode ser expresso através da lei de Darcy para fluxo laminar através de meio poroso.

De acordo com a Lei de Darcy e considerando o fluido presente nos capilares seja água em temperatura ambiente, pode-se escrever e aplicar a lei de Darcy (Eq. 2.3) (Helene, 1993).

$$V = k \cdot \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (2.3)$$

Onde:

V = velocidade de percolação da água, em m/s

k = coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s

H = pressão de água, em m.c.a

x = espessura do concreto percolado pela água, em m

Q = vazão de água percolada, em m³/s

S = área da superfície confinada por onde percola a água, em m².

A Eq. 2.4 ainda pode ser escrita assimilando-a a um processo de difusão acelerada, considerando-se regime estacionário e ausência de evaporação (Rodrigues, 2009 apud Helene, 1993), conforme a seguinte forma:

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V \cdot r \cdot r}{n}} \quad (2.4)$$

Onde:

n = viscosidade da água, em kg.s/m² (13.10⁻⁵)

t = período de tempo para atingir a penetração h , em s.

r = raio do capilar, em m.

Absorção capilar

Conforme Nepomuceno (2005) estando os materiais de construção raramente saturados, a absorção capilar passa a ser um dos principais mecanismos de penetração de líquidos nas estruturas de concreto armado.

A absorção ocorre através da intercomunicabilidade dos poros do concreto. Na grande maioria dos casos, concretos com menores relações a/c tendem a apresentar poros menos interligados e acabam por dificultarem este mecanismo de absorção capilar (Rodrigues, 2009).

De acordo com Helene (1993) em concretos saturados não ocorre absorção. Para que o mecanismo ocorra, deve haver poros secos ou parcialmente secos. Desta forma, no caso de estruturas semi-submersas, onde o risco de absorção é eminente, recomenda-se a utilização de aditivos incorporadores de ar e de aditivos de ação hidrofugante de massa. As bolhas de ar incorporadas ao concreto tendem a diminuir a comunicabilidade entre capilares, diminuindo, assim, a absorção. A ascensão capilar pode ser dada pela lei de Jurin (Eq. 2.5):

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \gamma} \quad (2.5)$$

Onde:

h = altura ou penetração da água no capilar, em m;

σ = tensão superficial da água, em kg/m;

r = raio do capilar, em m;

γ = massa específica da água, em kg/m³.

Há certa dificuldade quanto a aplicação da Lei de Jurin diretamente visto que os diâmetros dos capilares são muito variáveis no tempo, e que dependem de diversos fatores físicos e químicos, tais como composição química e grau de saturação do cimento, uso de adições e aditivos, relação a/c, entre outros.

Fluxo por convecção

De acordo com Rodrigues (2009) a convecção ou o fluxo por convecção trata do fluxo de uma substância que ocorre devido ao movimento do fluido que a contém. O fluxo da substância é dado pela seguinte equação (Eq. 2.6):

$$q_m = C \cdot q(\text{fluido})$$

(2.6)

Onde:

q_m = fluxo da substância;

C = concentração da substância no fluido;

q_{fluido} = volume de fluxo do fluido.

Nepomuceno (2005), afirma que quando as substâncias, como os íons cloreto e sulfato presentes na água, são introduzidas no interior do concreto não saturado por algum mecanismo de penetração de água ocorre o fluxo por convecção.

Migração

Já a migração trata do fenômeno que ocorre devido à ação de um campo elétrico oriundo de uma diferença de potencial que ocasiona fluxo de íons. É muito utilizada para ensaios acelerados de

permeabilidade de íons (Nepomuceno, 2005). A equação que caracteriza a migração é dada pela Eq. 2.7, a seguir:

$$q_m = -D_c \cdot \frac{z \cdot F}{R \cdot T} \frac{dV}{dx} \quad (2.7)$$

Onde:

D_c = coeficiente de difusão;

z = valência do íon;

V = voltagem;

R = constante dos gases;

F = constante de Faraday (96.493 C);

T = temperatura absoluta;

q_m = fluxo de íons.

Também se pode mencionar a 2ª Lei de Fick para estimativa de durabilidade de estruturas em concreto armado. A solução da 2ª lei de Fick para o caso particular de difusão plana semi-infinita (Cranck, 1975 apud Nepomuceno), conforme exemplificada na eq. 2.8.

$$C_{(x,t)} = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \text{erfc} \left(\frac{X}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

$C_{(x,t)}$ - Concentração de íons cloreto em relação a massa de cimento na profundidade x a partir da superfície do concreto em dado tempo t (%);

C_0 - Concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto (%);

C_s - Concentração superficial de cloretos - admitida como sendo constante - (%);

X - Profundidade de penetração de íons cloreto (mm);

D - Coeficiente de difusão de íons cloreto (mm²/ano);

t – Tempo (anos);

erfc – Erro de Gauss.

Helene (1993) indica os fatores que podem influenciar no coeficiente de difusão: a distribuição e dimensão dos poros, a natureza do líquido e do material onde ocorre a difusão.

Os íons cloreto apresentam grande capacidade de combinar-se com os aluminatos resultando nos cloro-aluminatos de cálcio que são compostos capazes de retardar a difusão dos íons cloretos no concreto (Helene, 1993).

Silva (2010) salienta que o ingresso de íons cloreto no concreto muitas vezes será diferente e dependerá do local em que a estrutura estiver inserida, como por exemplo, a água do mar em contato com o concreto, sais descongelantes ou até mesmo pela ação de gotas da água do mar contendo cloretos transportados até ao concreto pela ação dos ventos.

Em zonas de respingo, por exemplo, terá mais influência da secagem e molhagem, o que será mais propício ao ingresso de cloretos, pois poderá formar um maior C_s (Silva, 2010).

Guimarães (1997) afirma que tanto o aço como o concreto pode ser atacado pelos cloretos, mas isso irá depender do íon ligado ao cloreto. A Figura 2.10 mostra o percentual de cloretos em relação à massa de cimento que diminui com o aumento da profundidade do cobrimento (Cascudo, 1997).

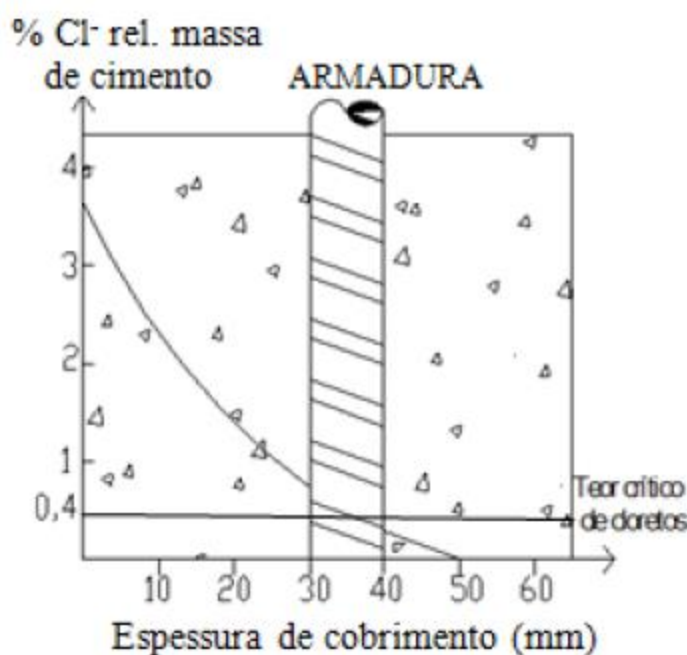


Figura 2.10 – Concentração de cloretos ao longo do cobrimento (Fonte: Cascudo (1997)).

A profundidade de penetração da frente de ataque de cloretos no concreto pode apresentar-se bastante nociva à armadura do concreto, principalmente se a estrutura estiver em ambiente marítimo e é função do tempo conforme a relação da Fig. 2.9 (Andrade, 1992):

$$x = k\sqrt{t} \quad (2.9)$$

Onde:

x = Profundidade atingida pela frente de ataque de cloretos;

t = Tempo para que essa profundidade seja atingida;

k = Constante que depende principalmente da concentração dos íons no meio externo, da qualidade do concreto e da quantidade de fissuras.

O processo de carbonatação pode contribuir para o ataque de cloretos ao concreto, pois sua presença contribui para a liberação de mais cloretos combinados, aumentando, portanto, a possibilidade de corrosão da armadura do concreto armado (Neville, 1995).

O tipo de zona em que se encontra a estrutura, também é outro fator que deve ser levado em conta, pois conforme Helene (1986), a intensidade de ataque de sais ao concreto armado é maior em zonas de respingo e maré do que em zonas de névoa e zonas submersas.

Para profundidades maiores, ou seja de 10 a 30 mm, e considerando uma boa qualidade do concreto, o mecanismo de transporte se dá predominantemente pelo processo de difusão. Já próximo a superfície do concreto o mecanismo de transporte ocorre predominantemente por absorção (secagem e molhagem). Nos modelos tradicionais considera-se apenas o processo de difusão.

2.4 Vida útil

Os modelos de estimativa de vida útil ajudam a entender e compreender um pouco mais sobre a corrosão em estruturas de concreto armado.

O modelo de Tuutti (1980) para estimativa de vida útil de uma estrutura em concreto com aço foi proposto em sua tese de doutorado. Com o modelo consegue-se estimar o início, a propagação e a evolução da corrosão em uma estrutura em concreto armado.

Iniciação é o período de tempo no qual os agentes agressivos (CO_2) ou íons cloreto (Cl^-) penetram no concreto até atingir o aço e desencadear a despassivação. Denominou de propagação como o período de tempo no qual os agentes agressivos são capazes de provocar uma corrosão admissível, que será função da temperatura (T), umidade relativa (UR) e quantidade de oxigênio (O_2) do meio em que se encontra inserida a estrutura.

A soma dos períodos de iniciação e propagação é denominada de vida útil total de uma estrutura de concreto armado que é o período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura (Tuutti, 1980).

A Figura 2.11 representa o modelo de Tuutti para estimativa da vida útil de uma estrutura, desenvolvido em 1982 e utilizado até hoje como referencia para novos estudos.

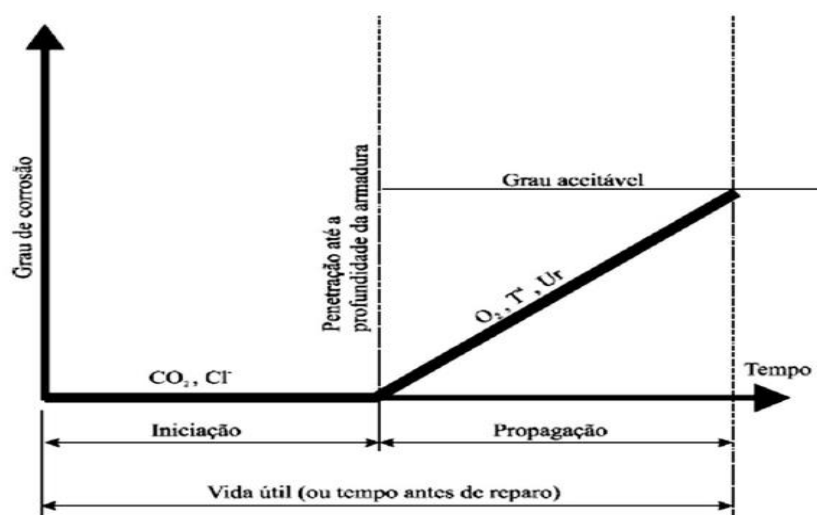


Figura 2.11 – Modelo de vida útil de corrosão no concreto (Fonte: Tuutti, 1980).

Ribeiro, (2014) também salienta que o período de iniciação é definido como o tempo que os agentes agressivos levam para atravessar o cobrimento, atingir o aço e provocar a sua despassivação, e o período de propagação é definido como o tempo em que a deterioração evolui até chegar a uma condição inaceitável.

Os agentes agressivos que fazem com que o período inicial ocorra de acordo com o modelo da Fig. 2.11 são o dióxido de carbono, os íons sulfato e os íons cloreto presentes no ambiente de exposição da estrutura.

Helene (1994) desenvolveu um modelo que se baseia nas duas fases principais de deterioração do concreto de acordo com o modelo de Tuutti. Apresentou em seu modelo o conceito de vida útil residual que corresponde a vida útil estabelecida após vistoria de uma estrutura a uma determinada idade ou após uma intervenção. As duas vidas útil residual mencionada no modelo de Helene (1994) diz respeito a uma mais curta contada até o aparecimento de manchas ou fissuras e outra mais longa contada até a perda significativa da capacidade resistente da estrutura.

O modelo de vida útil proposto e apresentado por Helene (1994) está representado na Fig. 2.12.

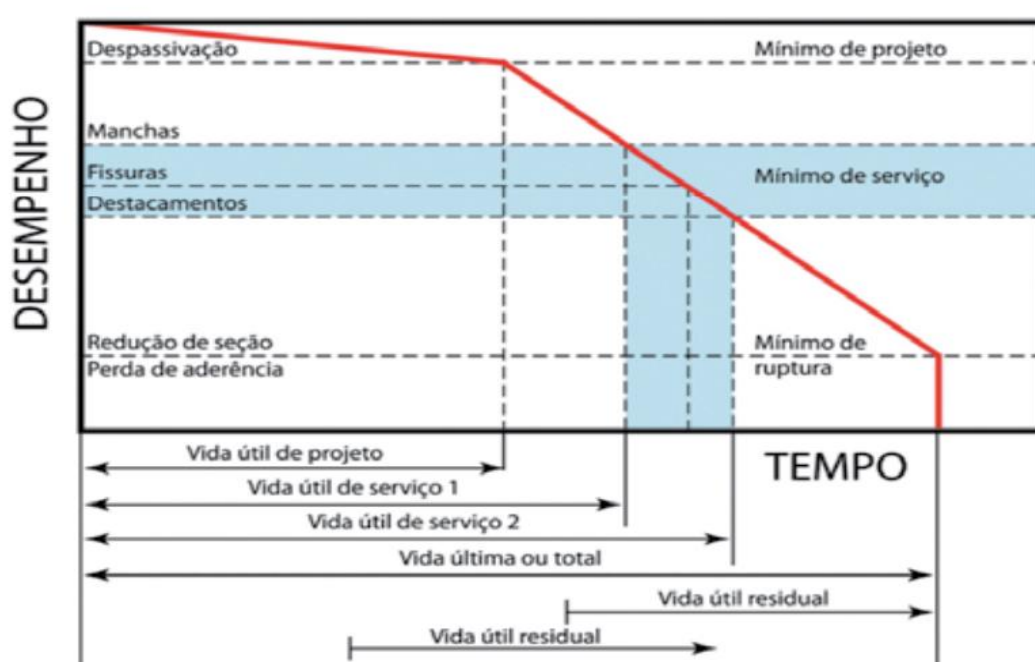


Figura 2.12 – Vida útil das estruturas de concreto armado proposto por Helene (1994) (Fonte: Helene (1994)).

Helene (1994) ainda explica as definições referentes à figura 2.12:

Vida útil de projeto: Período de tempo que vai até a despassivação do aço, normalmente denominado de período de iniciação. Corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. O fato da região carbonatada ou de certo nível de cloretos atingirem a armadura e teoricamente despassivá-la, não significa que necessariamente a partir desse momento haverá corrosão importante, apesar de que em geral ela ocorre. Esse período de tempo, no entanto, é o período que deve ser adotado no projeto da estrutura, a favor da segurança;

Vida útil de serviço: Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento. É muito variável de um caso para outro, pois depende das exigências associadas ao uso da estrutura. Enquanto em certas situações é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão ou fissuras, em outros casos somente o início da queda de pedaços de concreto, colocando em risco a integridade de pessoas e bens, pode definir o momento a partir do qual se deve considerar terminada a vida útil de serviço;

Vida útil última ou total: Período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. Corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura / concreto, podendo acarretar o colapso parcial ou total da estrutura;

Vida útil residual: Corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado nesse caso a partir de uma data qualquer, correspondente a uma vistoria. Essa vistoria e diagnóstico podem ser efetuados a qualquer instante da vida em uso da estrutura. O prazo final, nesse caso, tanto pode ser o limite de projeto, o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura, dando origem a três possíveis vidas úteis residuais; uma mais curta, contada até a despassivação da armadura, outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto e outra longa contada até a perda significativa da capacidade resistente do componente estrutural ou seu eventual colapso.

Van Der Toorn (1992) apud Ribeiro (2014) também apresentou diferentes formas de degradação de uma estrutura sujeita as influências da corrosão nas armaduras, como mostra a Fig. 2.13.

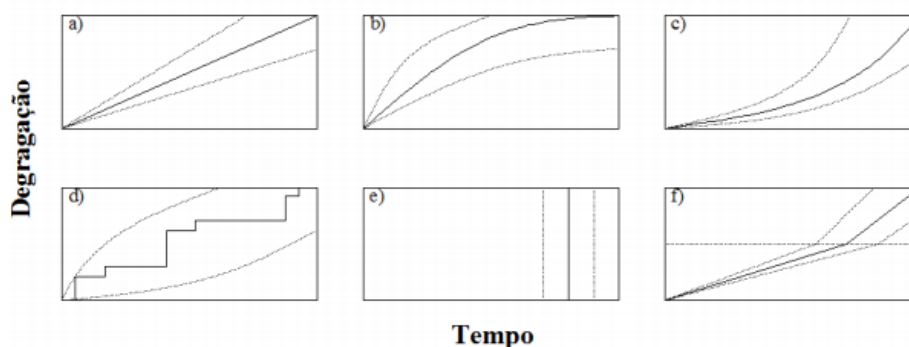


Figura 2.13 – Diferentes formas de degradação das estruturas (Fonte: Ribeiro, 2014).

O primeiro gráfico apresenta um processo linear com relação ao tempo, podendo gerar incertezas.

No segundo caso, Ribeiro (2014) explica que a penetração de cloretos e dióxido de carbono pode ser modelada como a raiz quadrada do tempo com uma função erro.

O terceiro trata da fadiga da estrutura como uma função exponencial, dessa forma o processo de deterioração por fadiga tende a aumentar com o tempo.

O quarto gráfico, segundo Ribeiro (2014) representam um processo descontínuo das colisões representando o efeito das cargas externas.

No quinto caso, Ribeiro (2014) aponta um carregamento excessivo na estrutura, algo não previsto em projeto, na qual pode levar à estrutura a ruína.

E no último gráfico, ainda conforme Ribeiro (2014), processo semelhante ao modelo proposto por Tuutti (1982) caracterizando os estágios de iniciação e propagação.

2.5 Ambiente marítimo

O contato com a água do mar é uma exposição muito agressiva para o concreto, podendo até mesmo ser comparado aos mecanismos de degradação dos ambientes industriais, devido à presença de gás carbônico, íons sulfato, íons cloreto, chuvas ácidas, fuligens, bactérias e fungos. A situação torna-se ainda mais agravante quando esses ambientes marítimos, industriais e densamente urbanizados aparecem combinados (Helene, 1993).

2.5.1 As zonas do ambiente marítimo

Existem diferentes zonas no ambiente marítimo, portanto, são de fundamental importância sua identificação e caracterização quanto a essas zonas de agressividade para compreender o fenômeno da penetração de íons cloreto no concreto dos tetrápodes em estudo. Segundo Helene (1986), o ambiente marítimo pode ser dividido em quatro zonas de agressividade, são elas:

- **ZONA DE RESPINGO:** São os locais onde ocorre o maior ataque por cloretos e, portanto, as zonas de respingo são consideradas as zonas mais atacadas por corrosão, devido à presença de oxigênio e água. Os ambientes sujeitos a respingo são classificados conforme a NBR 6118/2007 como classe de agressividade IV, ou seja, com risco de deterioração de estrutura de concreto armado elevado.
- **ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ:** Esta é caracterizada por sofrer todos os tipos ataques físico e químico;
- **ZONA DE NÉVOA:** Esta zona situa-se acima da área de oscilação do nível de água.
- **ZONA SUBMERSA:** O concreto está localizado abaixo do nível mínimo da água e as reações corrosivas são do tipo químico.

A Figura 2.14 abaixo mostra as zonas do ambiente marítimo em relação a maré baixa e a maré alta.

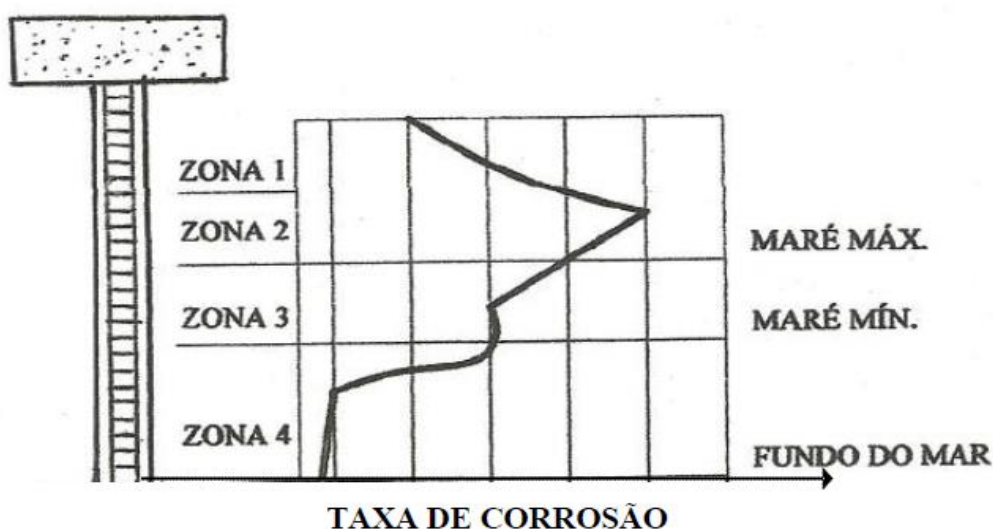


Figura 2.14 – As zonas do ambiente marítimo (Fonte: Helene, 1986).

A intensidade do ataque é aumentada conforme a localização da estrutura de concreto (Guimarães, 2000) e obedece a seguinte ordem (Helene, 1981):

- 1 – Zona de névoa;

- 2 – Zona sujeita a respingos;
- 3 – Zona de variação de maré;
- 4 – Zona submersa.

Conforme a figura, 2.14, Silva (2010) salienta que a maior ou menor quantidade de oxigênio pode contribuir para diferentes graus de corrosão e que irá depender da forma de exposição do elemento estrutural a em relação ao ambiente marítimo. Por este motivo que as zonas de variação de maré e de respingo são as mais críticas no que se refere a problemas de corrosão das armaduras.

Helene (1986) ainda comenta que a corrosão das armaduras é de 30 a 40 vezes maior em ambiente marítimo do que em ambiente industrial.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), os elementos totalmente submersos em água do mar são os menos atacados que os concretos expostos a ciclos constantes de molhagem e secagem.

O concreto sujeito a agentes agressivos do ar ou presente na zona de névoa sofrem um ataque de classe intermediária, em relação à zona de variação de maré (Guimarães, 2000).

Mehta (1980) concluiu que na zona totalmente submersa somente ocorre o ataque químico; na zona atmosférica, ação de congelamento e corrosão da armadura; e, na zona de variação de maré, tem-se todos os tipos de ataques químicos e físicos.

Os íons cloreto podem penetrar pelo concreto até atingir o aço através da sua rede de poros. A medida que o teor de cloretos vai aumentando com o passar do tempo, tem-se uma intensa velocidade de corrosão na armadura (Andrade, 1992).

O tetrápode é considerado um “concreto massa”, ou seja, concreto maciço devido à ausência de barras de aço convencionais, atuando na resistência do concreto destes blocos, em constante exposição ao ambiente marítimo (Migliorini, 2011). Consideramos essa definição para o caso da pesquisa apresentada.

O concreto também pode ser atacado sem estar em contato direto com a água do mar, devido ao ar do ambiente marítimo possuir sais que podem penetrar na pasta de cimento e, quando em contato com estes, o concreto pode sofrer agressão por congelamento, impacto, abrasão da areia transportada pelas ondas e até mesmo agressão do impacto constante destas ao concreto, no qual podem provocar quebras pela fadiga causada nas estruturas (Migliorini, 2011).

2.5.2 Composição dos estuários e oceanos

Os principais agentes que atacam a pasta de cimento em ambiente marítimo são os sais magnésicos e os sulfatos (Mehta & Monteiro, 1994), e o principal agente que ataca o aço no concreto estrutural é o cloreto (Helene, 1986).

A maioria dos oceanos apresentam uma composição química aproximadamente igual (Mehta & Monteiro, 1994). No Oceano Atlântico, o teor total médio de sais é de 3,5% (35 g/l). As quantidades dos principais íons contidos nas águas desse oceano são indicadas na Tab. 2.1, conforme a norma DIN 4030 (1991).

Tabela 2.1 - Principais íons do Oceano Atlântico – DIN 4030 (1991).

Íons	Quantidade de íons (mg/l)
SO_4^{--}	2800
Mg^{++}	1300
Ca^{++}	400
Cl^-	19900
Na^+	11000
K^+	400
pH	≥ 8

Biczók (1972) ainda salienta que os teores de íons médios existentes no oceano Atlântico são:

- Íons magnésio (Mg^{++}) ≈ 1400 mg/l;
- Íons cloreto (Cl^-) ≈ 20000 mg/l;
- Íons sulfato (SO_4) ≈ 2800 mg/l.

Biczók (1972) também apresenta a Tab. 2.2 com a composição da água do mar conforme a quantidade de sais.

Tabela 2.2 - Composição da água do mar (Biczók, 1972).

Sal	g/1000 litros de água	% em relação ao sal total
Cloreto de sódio	26,90	78,32
Cloreto de magnésio	3,20	9,44
Sulfato de magnésio	2,20	6,40
Sulfato de cálcio	1,30	3,94
Cloreto de cálcio	0,6	1,69
Outros (Bicarbonato de cálcio)	-	0,21
TOTAL	34,30	100

Já o estuário pode ser caracterizado como sendo uma zona semifechada que apresenta uma ligação com o oceano, onde a água do mar existente passa a ser diluída pela água doce que venha a provir da drenagem continental (Cameron e Pritchard, 1963).

Como exemplo de estuário se pode destacar a zona de estuário da laguna dos Patos, a qual se comunica através de um canal estreito com o Oceano Atlântico que compreende desde os molhes da barra até a Ilha da Feitoria (Silva, 2010).

Neste estuário, conforme as condições climatológicas existem diversidades de comportamento das águas na zona estuarina, pois no verão existe predominância de águas oceânicas, por outro lado, no inverno as águas doces são as que dominam o ambiente (Silva, 2010).

Existem alguns fatores característicos que modificam o comportamento nesse local, são as chuvas, os ventos, e a profundidade os quais fazem com que o local possa apresentar-se com águas oceânicas no fundo e águas doces em sua superfície (Calliari, 1980).

A Figura 2.15 apresenta o estuário da Laguna dos Patos e sua respectiva conexão pelo canal dos molhes da barra do Rio Grande com o oceano atlântico.

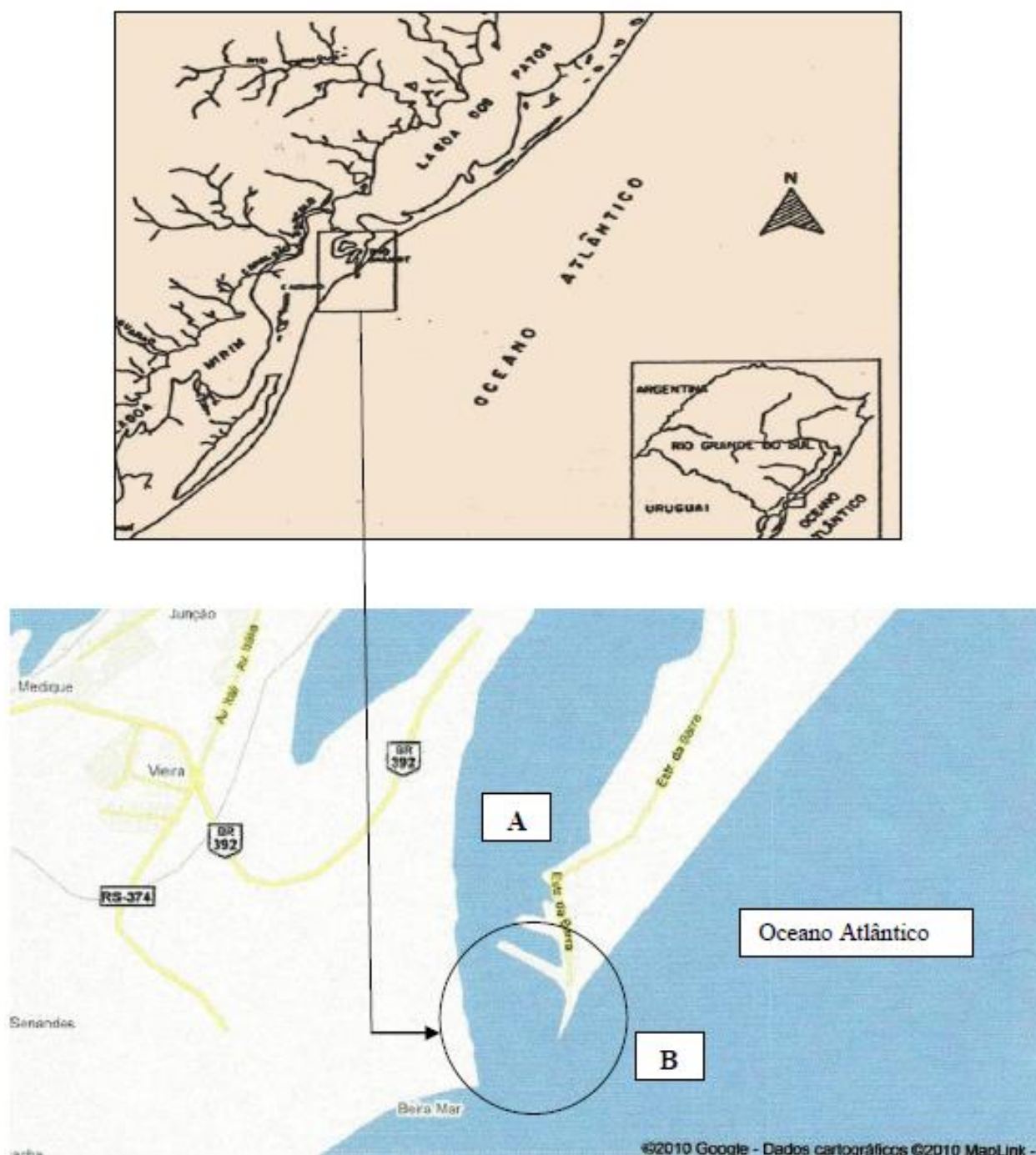


Figura 2.15 – Laguna dos Patos (A) e sua ligação direta com o Oceano Atlântico (B) (Fonte: (Baptista, 1984 apud Silva, 2010)).

No ambiente marítimo torna-se muito importante conhecer o grau de salinidade da água, no que se refere à durabilidade das estruturas inseridas nesses locais, portanto deve-se ressaltar que na entrada de estuários podem ocorrer grandes variabilidades nesse fator devido à ação dos ventos e chuvas (Guimarães, 2000).

A atmosfera marinha também contém agentes agressivos, como cloretos de sódio e de

magnésio, além de sulfatos, tanto nas gotículas de água em suspensão como em forma de cristais (Helene, 1981).

2.6 Fatores que influenciam na penetração de cloretos

2.6.1 Fatores externos

Umidade Relativa

Caso o concreto não esteja saturado, pode-se dizer que a umidade relativa está diretamente relacionada com a quantidade de água no interior desse elemento (Peraça, 2009). Perepérez (et al., 1987 apud Andrade, 2001) afirma que a quantidade de água nos poros do concreto irá interferir diretamente na difusão de gases e íons no concreto pois a difusão de íons no concreto depende da quantidade de água presente nos poros, então, quanto maior a umidade relativa maior será a quantidade de água nos poros do concreto e, conseqüentemente, maior será a difusão de íons através desse elemento.

Desse modo, a umidade relativa irá depender do local em que se encontra inserida a estrutura de concreto armado e a corrosão deverá ser mais intensa em locais mais úmidos do que em locais secos (Helene, 1986).

Temperatura

Um fator que deve ser levado em consideração na durabilidade das estruturas de concreto armado em ambiente marítimo é a temperatura. Essa possui a capacidade de aumentar a velocidade dos processos químicos proporcionando maior mobilidade das moléculas, facilitando o transporte

das substâncias. Todavia, a redução de temperatura poderá produzir um aumento importante no teor de umidade da estrutura (Rincón et al. 1998 apud Silva, 2010).

Segundo Neville (1997), estruturas inseridas em regiões mais quentes deterioram mais rapidamente do que em regiões frias. Por isso a temperatura é um fator determinante também na penetração de cloretos.

Jastrzebski (1987) ressalta que a temperatura pode influir de forma direta na difusão de íons cloreto no concreto, no sentido de que quanto maior a temperatura maior será a penetração de íons cloreto no concreto.

Concentração Superficial de cloretos

Os principais fatores de influência na concentração superficial de cloretos no concreto armado são: 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 (Helene, 1993).

Meira (2004) ao estudar a taxa de deposição de cloretos ao longo de meses, ou seja, de novembro de 2001 a agosto de 2003, constatou o aumento da taxa de deposição de cloretos no concreto com o aumento da velocidade do vento, onde ficou evidente a sobreposição do efeito do vento sobre a umidade relativa. Conforme o autor, o comportamento da concentração superficial de cloreto condiciona-se, em sua maioria, aos tipos de atmosfera marinha, sendo que esse se modifica com a variação do tempo com a tendência de aumento ao longo do tempo.

A concentração superficial (Cs) é um fator importante sobre a velocidade de penetração de íons cloretos para o interior do concreto (Silva, 2010).

Outro fator a ser considerado, embora não tenha sido confirmado, é que com o passar do tempo o valor de Cs deva aumentar numa taxa reduzida até atingir a estabilização de aproximadamente 3,5 % em relação à massa do cimento, supondo estudos realizados em obras com mais de 20 anos de exposição (Silva, 2010).

Nunes (2006) apresentou um gráfico que relaciona o teor de cloretos nas camadas externas de estruturas de concreto localizadas há diferentes distâncias da água do mar (Tecon, Estação Marítima de Aquacultura e Terminal Turístico do Cassino) todos localizados na cidade do Rio Grande, RS – Brasil (Fig. 2.16).

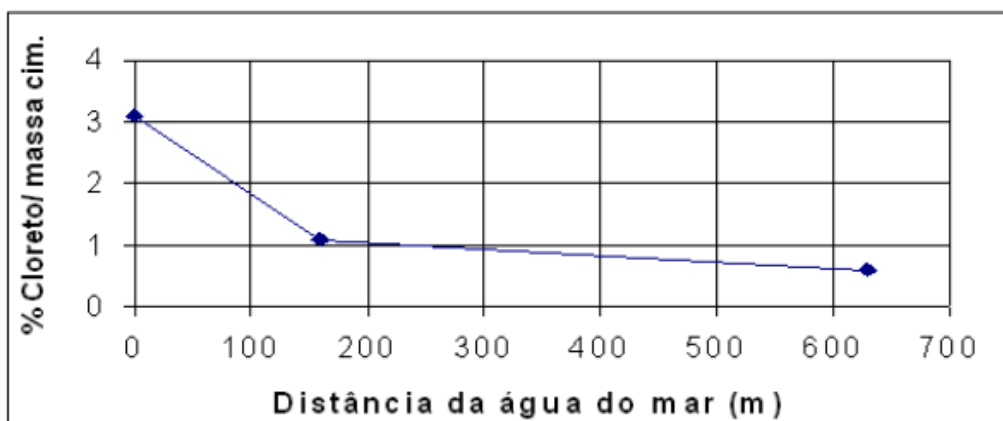


Figura 2.16 – Teor de cloretos nas camadas mais externas de estruturas de concreto em relação à distância da água do mar em Rio Grande – RS. TECON: CS = 3,1% com distância de zero; EMA: CS = 1,1% com distância de 160 m; Terminal Turístico: CS = 0,6% com distância de 630 m (Fonte: Nunes, 2006).

É evidente que, quanto menor a distância ao mar agressivo, maiores são os teores de cloreto na superfície do concreto (Cs) e com a redução da distância do concreto ao mar de 100 para 50 m, o valor de Cs triplicou de 0,5 % para 1,5 % em relação à massa de cimento.

Considerando ainda a influência da distância em relação à água sobre o valor de Cs torna-se importante ressaltar a pesquisa de Castro (et al. 2001) sobre a ponte do Lago de Maracaibo. Foram extraídas amostras de concreto e obtidos os teores de cloreto para diferentes profundidades e alturas de uma coluna da referida ponte (Fig. 2.17).

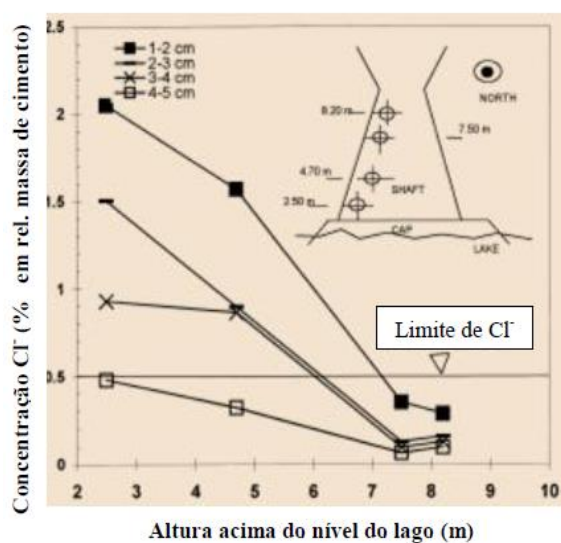


Figura 2.17 – Teores de cloreto em relação à massa de cimento para diversas profundidades e altura de uma coluna da ponte sobre o Lago de Maracaibo (Fonte: Castro et al., 2001).

A altura em relação ao nível médio da água do mar pode ser considerada outra razão de obtermos diferenças nos valores de Cs, ou seja, quanto maior a distância ao nível médio da água menor será o valor de Cs (Silva, 2010). Alguns autores como Barbosa et al., (2004); Castagno et al. (2004) realizaram estudos acerca dessa influência e garantem que a altura do concreto em relação ao nível do mar é um fator muito importante.

De acordo com Barbosa et al. (2004) que estudou o comportamento do teor de cloretos para edifício localizado em Santos, SP – Brasil, a aproximadamente 700 m da água do mar, onde obteve um valor de Cs de 0,5% em relação à massa de cimento para o andar térreo da estrutura. Por outro lado, ao avaliar o mesmo edifício, este autor obteve um Cs de aproximadamente 0,23 % em relação à massa do cimento para o segundo pavimento, enquanto que para os pavimentos mais elevados os percentuais foram ainda menores.

Guimarães et al. (2007) realizou um estudo utilizando dados de Castro et al. (2001), no lago do Maracaibo, através do método de regressão, deixou claro que quanto maior a distância vertical em relação a água menores são os valores encontrados para Cs (Fig. 2.18).

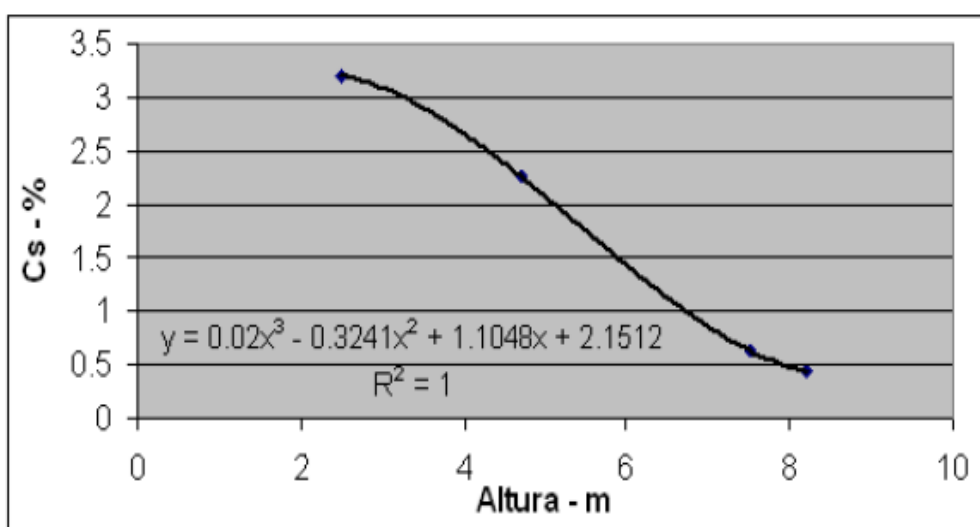


Figura 2.18 – Modelo da influência da altura sobre o valor de CS (Fonte: Guimarães et al. 2007).

Conforme a figura 2.18, os valores de Cs 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 à água do Lago de Maracaibo, demonstrando que com o aumento da altitude do concreto em relação à água menor será o valor de Cs.

2.6.2 Fatores internos

Relação água/cimento

A relação água/cimento (a/c) é um dos fatores determinante na distribuição dos poros da pasta de cimento hidratada. Quanto maior a relação a/c maiores e mais interligados serão os poros da pasta de cimento.

Desse modo, essa relação pode interferir na penetração dos íons cloretos sobre o concreto, relacionado diretamente com a permeabilidade, ou seja, maior será a facilidade no transporte de cloretos (Silva, 2010).

A NBR 6118/2014 especifica os valores da relação a/c para concretos da seguinte maneira:

- Relações a/c de 0,55 e 0,50 máximas em zonas de atmosfera marinhas para concreto armado e protendido, respectivamente;
- Relações a/c de 0,65 e 0,60 máximas em zonas submersas para concreto armado e protendido, respectivamente;
- Relações a/c de 0,45 em zonas de respingo e maré tanto para concreto armado quanto para protendido.

Outras normas são apresentadas na Tab. 2.3 com relação às zonas de agressividades do ambiente marítimo e a relação a/c especificada para concreto armado.

Tabela 2.3 – Relação a/c máxima conforme normas para concreto armado em ambiente marítimo (Guimarães, 2000).

NORMA	ZONA AGRESS.	CONCRETO ARMADO
BS 8110-1997	-	0,45
EURO – Proposta por (Andrade et al., 1999)	Zona Submersa	0,45
	Zona Resp./Maré	0,40
ACI COMMITTEE 318/318 R - 1996	-	0,40

Os tipos de cimento

Uma das fortes influências na penetração de íons cloreto em concreto armado em ambiente marítimo é tipo de cimento empregado na elaboração do concreto.

Bakker (1988) salienta que as adições como escória de alto forno e cinza volante como adicionados ao cimento são capazes de reduzir a intensidade do ataque de íons cloreto no concreto se comparado com o uso do cimento Portland comum.

Page et al. (1981) explica que o cimento com escória de alto forno ou com cinza volante confere melhor desempenho no que tange a durabilidade das estruturas de concreto armado se comparado com a utilização dos outros tipos de cimento.

Com isto percebe-se que com a inserção dessas adições ao cimento proporciona ao concreto uma maior proteção quanto à penetração de íons cloreto comparando com a execução com cimento Portland comum.

Guimarães, (2000) deixa claro que, em ambiente marítimo, se o objetivo for uma maior durabilidade de estruturas de concreto pode-se utilizar cimento adicionado de cinza volante ou cimento Portland Pozolânico, o qual utiliza cinza volante e é capaz de contribuir para a redução da quantidade de clínquer utilizada, contribuindo assim, para uma melhor utilização de suas reservas.

Rodrigues (2009), em sua pesquisa com cimento ARI e cimento Portland comum, percebeu que esses materiais não devem ser utilizados na elaboração de estruturas de concreto próximas a zona de névoa, seguindo-se apenas as características exigidas pela NBR 6118/2014.

Cobrimento

O cobrimento nominal de uma estrutura tem por finalidade a proteção da armadura de aço de concreto contra a ação de agentes (ataque por carbonatação, ataque por íons sulfato e íons cloreto) que possam deteriorar o material.

Para o concreto armado a NBR 6118/2014 determina as seguintes espessuras de cobrimento que devem utilizadas nas zonas do ambiente marítimo:

- Zona de respingo de maré: 45 mm para laje e 50 mm para viga e pilar;
- Zona de atmosfera marinha: 35 mm para laje e 40 mm para viga e pilar;
- Zona submersa: 20 mm para laje e 25 mm para viga e pilar.

O consumo de cimento

O consumo de cimento é a característica do concreto que exerce menor influência sobre a porosidade desse elemento a ação de agentes agressivos, pois nos estudos sobre a previsão de vida útil de estruturas de concreto é a relação a/c que exercerá maior influencia sobre a porosidade do concreto, desde que os espaços entre os agregados sejam totalmente preenchidos pela pasta de cimento (Silva, 2010).

A Tabela 2.4 apresentada na sequencia mostra os valores relacionados ao consumo mínimo de cimento (Kg/m^3) para diferentes normas usuais na elaboração de estruturas em concreto armado.

Tabela 2.4 – Consumo mínimo de cimento para concreto em ambiente marítimo conforme algumas normas (Guimarães, 2000).

NORMA	Consumo Mínimo (Kg/m^3)	
NBR 6118-2003	Não apresenta restrições	
BS 8110-1997	400	
EURO – Proposta por (Andrade et al., 1999)	Zona Submersa	300
	Zona Resp./Maré	325
	Zona aérea	300

Grau de saturação

Conforme a NBR 9778/1987 o grau de saturação (GS) pode ser caracterizado como o percentual de teor de umidade no concreto em relação à absorção de água após imersão e fervura.

De acordo com as respectivas equações (Eq. 2.10 e 2.11) pode se determinar o GS do concreto no dia, pode-se realizar ensaio denominado de GS dia.

$$Abs\ máx = 100 \times \frac{(Peso\ sat - Peso\ seco)}{Peso\ seco} \quad (2.10)$$

$$Abs\ dia = 100 \times \frac{(Peso\ dia - Peso\ seco)}{Peso\ seco} \quad (2.11)$$

Onde:

Abs máx = Absorção máxima da amostra no dia;

Abs dia = Absorção da amostra no dia;

Peso Sat = Peso da amostra saturada;

Peso dia = Peso da amostra no dia da extração do concreto;

Peso seco = Peso da amostra após ser seca em estufa.

$$GS\ dia = 100 \times \frac{(Abs\ dia)}{Abs\ máx} \quad (2.12)$$

Onde:

GS dia = Grau de saturação da amostra no dia da extração.

Quanto ao GS no qual Guimarães (2000) pesquisou a influência do teor de umidade da pasta endurecida de cimento sobre a difusão de íons cloreto em corpos de prova elaborados com cimento ARI, é importante ressaltar as considerações observadas pelo autor:

- Se a pasta de cimento endurecida estiver com GS de 100 %, todos os poros acima do diâmetro crítico estarão cheios de água e isso facilitará a difusão de íons sendo que a seção transversal por onde os íons sofrem a difusão seria a própria seção transversal desses poros (Fig. 2.19);
- Se o GS reduzir de 100% até 85%, para concreto com relação a/c aproximadamente de 0,5, a água na rede de poros com diâmetros maiores que o diâmetro crítico deve diminuir mais acentuadamente (Fig. 2.19) e com isso a seção transversal de difusão dos íons diminuirá rapidamente.
- Se o GS for menor que 85 % o coeficiente de difusão deve diminuir com menor intensidade, isso provavelmente ocorra devido ao início da perda de água nos poros menores que o diâmetro crítico, poros esses com menor influência no transporte de massa. Isso deve ocorrer até o momento em que a espessura de água adsorvida nas paredes dos poros com diâmetro maior que os do diâmetro crítico começar a diminuir. Se a espessura de água adsorvida nas paredes dos poros com diâmetro maior que o diâmetro crítico começar a diminuir, o coeficiente de difusão também deverá diminuir rapidamente.

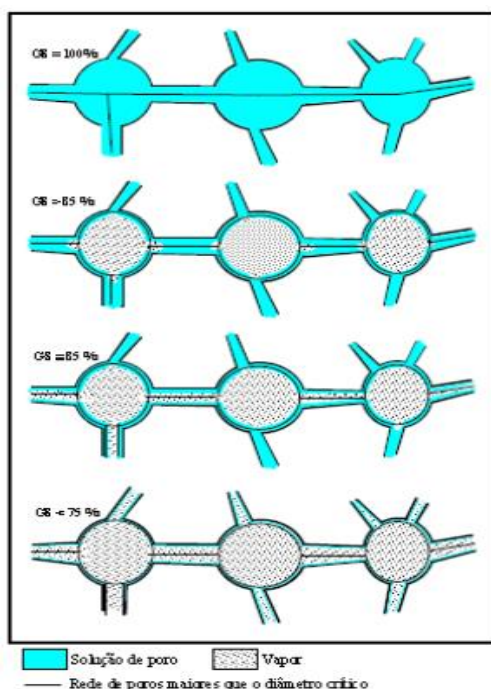


Figura 2.19 – Rede de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes teores de umidade (Fonte: Guimarães, 2000).

O diâmetro crítico é o menor tamanho de poro a partir do qual se estabelece uma rede de poros mais interligada, que permite com mais facilidade o transporte de massa através de um elemento.

Guimarães (2005) alterou este método de ensaio, permitindo calcular o coeficiente de difusão em concreto saturado e concreto não saturado utilizando a 2ª lei de Fick considerando regime não permanente.

Martys (1999) utilizou um programa computacional em sua pesquisa, com o objetivo de avaliar a difusão em poros médios, sendo considerados cheios com dois fluidos, um molhável e outro não molhável como água e ar. Esse autor correlacionou os GS's da rede de poros interligada simulada, com os coeficientes de difusão estimados da pasta de cimento endurecida e os resultados obtidos apresentaram influência significativa de GS sobre a difusão de íons.

A influência de GS sobre a difusão de íons mostrou-se maior nos resultados obtidos por Martys (1999) do que para Guimarães (2000), entretanto Martys (1999) considerou apenas a rede de poros mais interligados, enquanto que na pasta endurecida tem se também a influência dos poros menores.

Climent et al. (2002) também desenvolveram um trabalho propondo que a água nos poros do concreto deveria ser considerada quando se estimasse o coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Nesta pesquisa os autores contaminaram o concreto com gás de PVC que contém cloreto, sendo que a umidade dos CP's foi controlada durante o ensaio (Fig. 2.20).

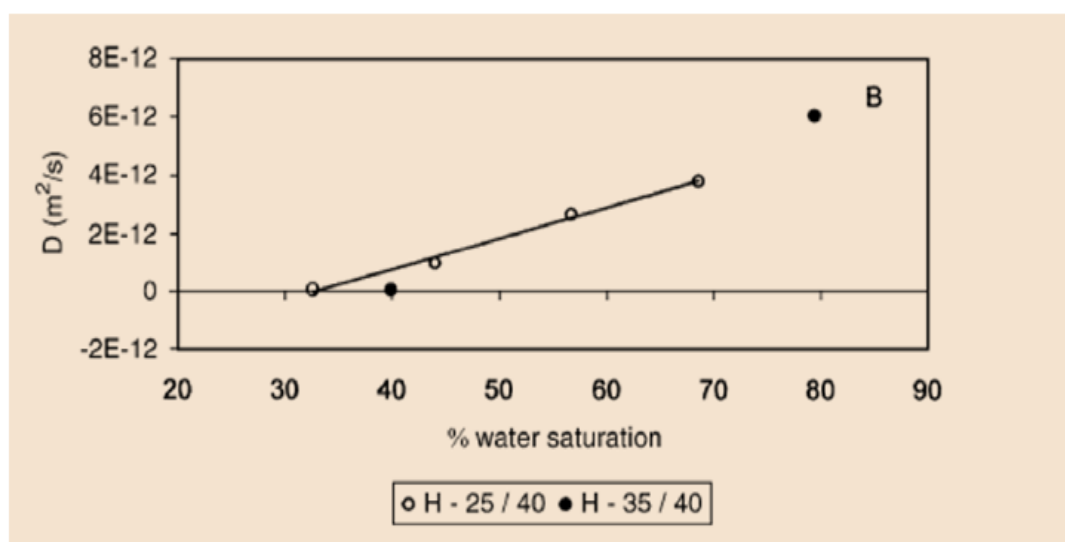


Figura 2.20 – Relação entre o coeficiente de difusão de cloretos e o grau de saturação
(Fonte: Climent et al., 2002).

Ang Tang (1984) salienta que a variabilidade é inerente a qualquer processo natural e, ao considerar o GS nos modelos de previsão de vida útil, traz a necessidade de verificar o quanto à variabilidade desse fator pode afetar a resposta da estrutura.

Já Souza (2005) desenvolveu um modelo probabilístico sobre o comportamento de GS da pasta de cimento endurecida na previsão de vida útil de estruturas de concreto armado a partir da utilização da 2ª lei de Fick. O modelo probabilístico desenvolvido mostrou-se coerente e que uma variação do microambiente onde esteja inserida a estrutura resultará em uma diferença nas médias de GS, sendo que as maiores médias de GS foram registradas no inverno. Portanto, é de extrema importância considerar o GS nos modelos de previsão de vida útil e que o uso de seus valores médios sazonais é satisfatório em tal análise.

Grau de carbonatação

O ataque de cloreto combinado com ataque por carbonatação aumenta a intensidade da ação corrosiva do aço, logo a carbonatação pode liberar íons cloreto (Cl^-) do concreto endurecido elevando o teor desses íons livres, atingindo uma concentração que pode provocar um intenso ataque ao aço (Bakker, 1988).

Tipo de superfície exposta

Um fator muito importante, e que deve ser levado em consideração, na penetração de íons cloreto no concreto armado é o tipo de superfície exposta que pode apresentar resultados variados conforme a condição de exposição da estrutura de concreto armado.

Guimarães et al. (1999) compararam o desempenho de superfícies externas de concreto e de testemunhos retirados do interior de corpos de prova, quanto ao ataque de gás carbônico e íons cloreto. Obtiveram testemunhos a partir das faces verticais e horizontais de quatro traços de concreto com diferentes relações a/c e consistência. Os CP's obtidos foram denominados de VT, VF, HL VC e HC sendo, respectivamente, superfície de topo, fundo, lateral e interna (conforme figura 2.21). Foram realizados ensaios de penetração acelerada de cloretos por diferença de

potencial (migração) e de carbonatação em câmara com 100% de CO₂. Eles constataram que as superfícies externas laterais e de fundo apresentavam um melhor desempenho ao ataque desses agentes do que o topo e as superfícies internas extraídas dos corpos de prova.

A Figura 2.21 traz a posição de extração dos corpos de prova apresentada por Guimarães et al., 1999.

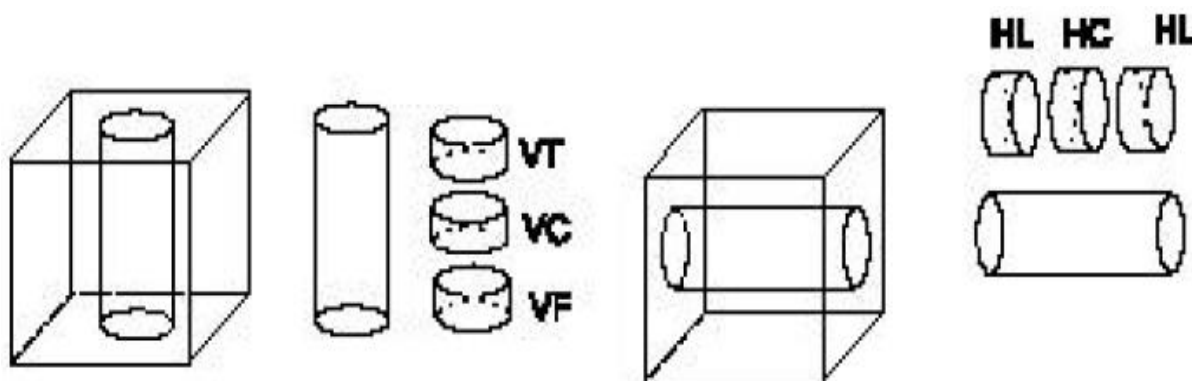


Figura 2.21 – Posição da extração dos corpos de prova (Fonte: Guimarães et al., 1999).

A Tabela 2.5 mostra os valores obtidos pela média dos resultados aos 28 dias de idades apresentado por Guimarães et al. 1999.

Tabela 2.5 – Dados dos ensaios de penetração de íons cloreto – média dos resultados aos 28 dias de idade apresentado por (Guimarães et al., 1999).

TRAÇO	1:6:0,55	1:5:0,55	1:4:0,55	1:4:0,44
	CP (C)	CP (C)	CP (C)	CP (C)
VT	2882,5	3473,0	*	2626,0
VC	2897,0	3299,5	3158,0	2776,5
VF	2233,0	2532,0	2748,5	1533,0
HL	2481,5	2580,0	3021,5	1937,0
HC	2845,0	3366,0	3763,5	2653,0
*Durante o ensaio a solução aqueceu acima de 90 ⁰ .				

Onde:

CP = Carga passante (Coulombs);

VT = Face de topo;

VC = Faces internas;

VF = Face de fundo;

HL = Face lateral;

HC = Face interna.

Segundo (Guimarães, 2000) no estudo realizado no cais do Tecon – Rio Grande, RS, a diferença de comportamento do concreto frente ao ataque de íons cloreto devido à diferença dos tipos de superfície em relação à superfície de concretagem ficou bem clara. Na pesquisa foram analisados dois pontos de estacas pranchas do cais, denominados de ES e ESF os quais representavam as superfícies de topo e de fundo, respectivamente, em relação à superfície de concretagem. A superfície de fundo apresentou um melhor comportamento à penetração de íons cloreto do que a superfície de topo, ambas expostas ao mesmo microambiente.

2.7 Os tipos de perfis de cloretos

Existem dois tipos de perfis de cloretos estudados e que servem de base para o desenvolvimento de modelos de vida útil em estruturas de concreto armado, são eles:

- Perfil clássico;
- Perfil formando pico.

O perfil clássico representa o teor de cloretos na superfície do concreto contido nos primeiros milímetros do elemento valor que tende a diminuir para o interior do concreto. Esse perfil é normalmente considerado nos modelos de vida útil de estruturas localizadas em ambiente marítimo (Guimarães et al., 2007).

É comum em obras reais, ao realizar um estudo sobre o comportamento do concreto frente ao ataque de íons cloreto, obter perfis de cloretos clássicos, sendo que em algumas situações podem-se encontrar perfis formando pico (Silva, 2010).

O perfil formando pico apresenta um teor de cloreto que aumenta da superfície externa do concreto até uma determinada profundidade, diminuindo deste ponto em relação a maiores profundidades.

Os perfis devem ser levados em consideração quando se quer observar a durabilidade de estruturas de concreto armado em relação à penetração de íons cloreto em um determinado ambiente.

2.7.1 O perfil clássico

Meira (2004) salienta que a concentração superficial de cloretos é um parâmetro que apresenta tendência de crescimento ao longo do tempo e irá depender das condições de porosidade do concreto. O fato de essa concentração apresentar maior valor na superfície, possivelmente se deva ao fato de que esteja em contato direto com os agentes agressivos, sendo que o maior ou menor valor de C_s será função da porosidade do material.

Andrade e Alonso, (1997) apud Meira, (2004) ressaltam que existe diferença entre o comportamento das camadas mais superficiais do concreto e as camadas internas, devido a maior ou menor porosidade ou possam estar sujeitas a condições de carbonatação denominado de efeito de pele.

O ambiente também exerce forte influência sobre o valor de teor de cloretos na superfície da estrutura, conforme a salinidade do ambiente, vento, temperatura, insolação e precipitação são fatores importantes (Silva. 2010).

2.7.2 Os modelos de perfis clássicos

O perfil clássico utiliza a 2ª lei de Fick para prever a vida útil do concreto. As medições do teor de cloretos no interior do concreto determinam valores de $C_x(t)$ e, a partir dessa equação a

espessura de cobrimento necessária para que o concreto mantenha suas condições de qualidade mínimas exigíveis.

Silva (2010) analisou a importância do valor de C_s e para tal simularam dois perfis com diferentes valores de C_s , com 3,5% e 1,5% em relação a massa do cimento. Nos dois perfis foram considerados os mesmos valores de coeficiente de difusão e idade, $D = 1,48 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ e $t = 50$ anos, respectivamente (conforme mostra a Fig. 2.22).

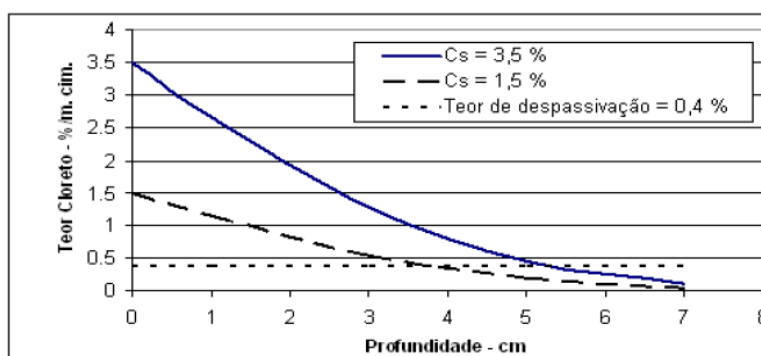


Figura 2.22 – Perfis com diferentes valores de C_s , $D = 1,48 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ e $t = 50$ anos (Fonte: Silva, 2010).

Silva (2010) explica que para $C_s = 3,5\%$ em relação à massa do cimento seria necessário uma profundidade de ataque de 51 mm para que ocorresse a despassivação da armadura e com $C_s = 1,5\%$ em relação à massa do cimento seria necessária uma profundidade de 40 mm para a despassivação.

Silva (2010) utilizando o mesmo perfil de $C_s = 1,5\%$ e verificaram que seria necessário um tempo de 81 anos para que a profundidade de 51 mm fosse atingida, ou seja, uma diferença de 31 anos em relação ao perfil de $C_s = 3,5\%$ em relação a massa do cimento.

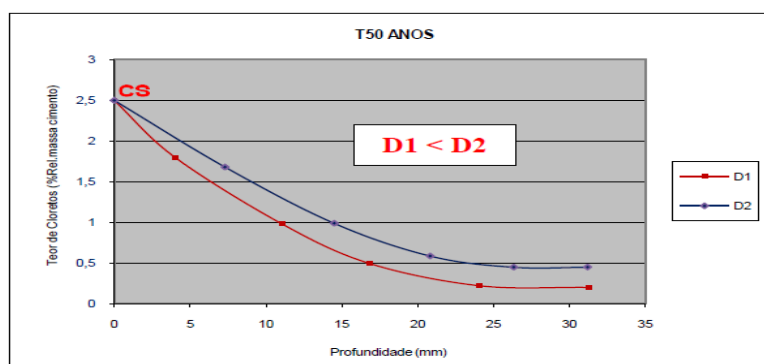


Figura 2.23 – Perfis com valores de C_s iguais e coeficientes de difusão diferentes (Fonte: Silva, 2010).

Silva (2010) ainda fez consideração ao $C_s = 2,5 \%$ em relação à massa do cimento com diferentes coeficientes de difusão, ambos os perfis apresentaram comportamentos distintos no percentual de cloretos.

Portanto, o coeficiente de difusão como o valor de C_s deve ser considerado para previsão de vida útil de estruturas de concreto.

Há influencia direta no comportamento do percentual de cloretos no concreto, portanto deve ser levado em conta nos estudos de durabilidade do concreto armado.

A Eq. 2.13 apresenta uma solução da segunda lei de Fick considerando C_s constante (Crank, 1975).

$$M_t = 2C_s \times \left(\frac{DC_{sconst} \times t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Onde:

M_t = Massa total de cloretos que sofre difusão no tempo t (%.mm);

C_s = Maior teor de cloretos na superfície do concreto (%);

t = É o tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (anos);

DC_{sconst} = Coeficiente de difusão de cloretos no concreto, considerando C_s constante (mm^2/ano).

As Eq. 2.14 a 2.16 consideram a variação C_s em relação ao tempo, (Crank, 1975).

$$C_x = 0 = C_{svar} = kt \quad (2.14)$$

Onde:

C_{svar} = Concentração de cloreto na superfície do concreto, considerado seu aumento com a variação do tempo t (%);

k = Parâmetro que considera a variação de C_s (% /ano);

t = É o tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (anos).

$$\begin{aligned}
C_x &= kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2DCsvar} \right) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{DCsvar}} - \frac{x}{2\sqrt{\pi Csvar}} \exp \left(-\frac{x^2}{4DCsvar} \right) \right\} \\
&= 4kti^2 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{DCsvar}}
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

$$Mt = \frac{4}{3} kt \left(\frac{DCsvar}{\pi} \right)^{1/2}
\tag{2.16}$$

Onde:

DCsvar = Coeficiente de difusão considerando Cs variável no tempo (mm²/ano);

t = É o tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (anos);

Mt = Massa total de cloreto que sofre difusão no tempo t (%.mm);

erf = Função erro de Gauss.

Já a Eq. 2.17 representa a variação de Cs em função da raiz do tempo e as equações 2.18 e 2.19 são a solução da segunda lei de Fick considerando esta condição (Crank, 1975).

$$C(x=0) = Csvar = kt^{1/2}
\tag{2.17}$$

Onde:

k = Parâmetro que considera a variação de Cs (%.ano^{-1/2}).

$$\begin{aligned}
C_x &= kt^{1/2} \left\{ \exp \left(-\frac{x^2}{4DCsvar} \right) - \frac{x\pi^{1/2}}{2\sqrt{DCsvar}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{DCsvar}} \right\} \\
&= k(\pi t)^{1/2} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{DCsvar}}
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

$$Mt = \frac{1}{2} kt (\pi DCsvar)^{1/2}$$

(2.19)

2.7.3 O perfil formando pico

Conforme Silva (2010) o perfil de cloretos formando pico pode ser caracterizado pelo teor de cloretos que aumenta da superfície do concreto até uma determinada profundidade e, a partir daí, tende a diminuir.

O concreto é um material que apresenta uma camada externa de reduzida espessura com características mais porosas em relação às camadas interiores (Meira, 2004). Por esse motivo, convém destacar que as camadas superficiais do concreto são aquelas que sofrem os primeiros efeitos do contato direto com o meio agressivo (Silva, 2010).

O perfil de cloretos que forma pico (Fig. 2.24) poderá ocorrer nas seguintes condições:

- Se o concreto estiver sujeito a condições de molhagem e secagem, que é o principal mecanismo de penetração de cloretos devido a absorção na camada mais externa;
- Quando o concreto estiver submerso e apresentar-se mais poroso na camada externa que por efeito de pele, poderá ocasionar o aparecimento do perfil formando o pico. Isto pode ser explicado pela maior porosidade numa camada próxima a superfície, com um deslocamento de pasta para a superfície do concreto, devido à menor quantidade de agregado existente nesse local.
- Se o concreto estiver localizado em zona de maré onde a tendência será a formação do pico. Em saída de estuário o perfil com pico se forma devido à ocorrência de chuvas onde a água doce sobe e, estando em contato direto com o concreto, faz com que a tendência seja a retirada de cloreto do concreto e que o teor na superfície seja menor que em maiores profundidades junto à camada mais externa.

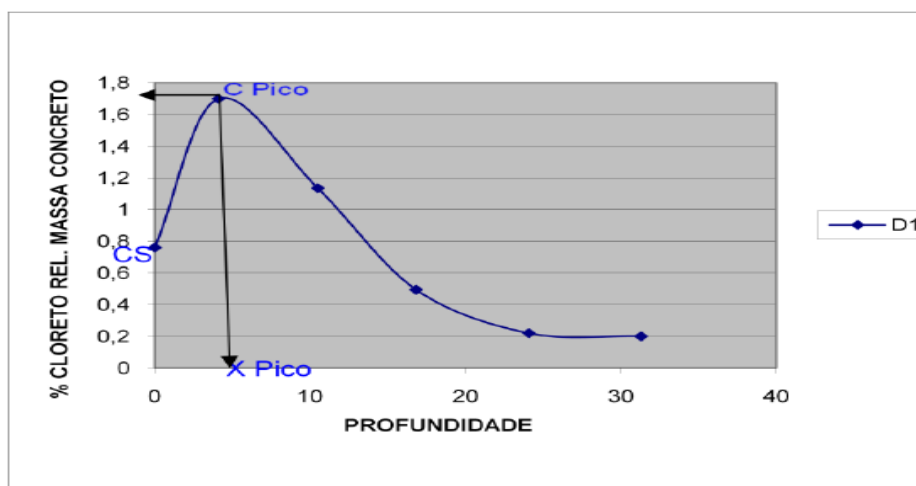


Figura 2.24 – Perfil de cloreto formando pico (Fonte: Silva, 2010).

A partir Figura 2.24 é possível observar que o teor de cloretos na superfície do concreto (variando entre 0,6 e 0,8% em relação a massa de concreto em profundidade zero) é menor que o teor de cloreto há uma certa profundidade (X pico com percentual de cloreto variando entre 1,6 e 1,8% em relação a massa de concreto). A partir de então tende a reduzir o percentual de cloretos com o aumento da profundidade.

2.7.4 Os modelos de perfis formando pico

Modelo tradicional usando a segunda lei de fick

Em amostras de concreto onde o ataque de íons cloreto se manteve presente durante um período considerável de tempo, a concentração no pico de cloreto é constante e o ponto zero do eixo x tem que ser deslocado para a profundidade onde o pico de cloreto aparece (Figura 2.25) (Andrade et al., 2000).

Os autores concluem afirmam que a curva começando no pico e se deslocando para as camadas mais profundas seguirão o comportamento proposto pela solução tradicional da segunda lei de Fick.

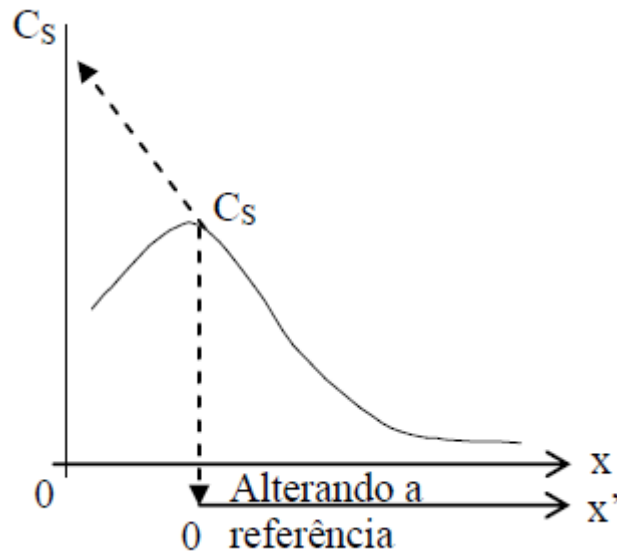


Figura 2.25 – Perfil de cloretos formando pico (Fonte: Andrade et al., 2000).

Logo, a solução tradicional da segunda lei de Fick pode ser usada, se $x = 0$ é usado para a profundidade de pico, conforme a Eq. 2.20.

$$\frac{C_{ccl} - C_o}{C_{seq} - C_o} = \text{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{D \cdot t}} \quad (2.20)$$

Onde:

C_{cCl} = teor de cloretos na posição x' ;

C_o = teor inicial na posição x' ;

C_{Seq} = teor equivalente de cloretos na superfície externa do concreto;

x' = distância entre o pico e a posição do teor C_{cCl} ($x' = 0$ no pico);

t = tempo, considerando $t = \text{zero}$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos;

$\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z)$.

Torna-se bastante usual obter perfis formando pico, não só em zonas de secagem e molhagem, mas também em zonas onde se usa sais de degelo. Um exemplo de perfil de cloretos formando pico é o exemplo da Fig. 2.25 apresentado por Andrade et al. (2000).

Modelo proposto por Guimarães e Helene

Guimarães e Helene (2008) também consideraram o deslocamento do eixo x, no qual, deve ser movido para a profundidade onde o pico de concentração de cloreto é formado (Fig.2.25) e que a partir desse ponto para as camadas mais profundas, o perfil se comportará como previsto pela segunda lei de Fick.

Guimarães e Helene (2008) também acreditam que a forma do pico sugere que um fenômeno semelhante à difusão ocorre à medida que avançamos para as camadas mais profundas.

Guimarães e Helene (2004) adaptaram modelo de Cranck (1975) para perda de material e demonstraram que considerando o teor de cloreto no pico constante pode-se prever o comportamento de uma estrutura de concreto.

$$\frac{C_{ccl} - C_o}{C_{seq} - C_o} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{D \cdot t}} - \exp(hx' + h^2 D \cdot t) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x'}{2\sqrt{D \cdot t}} + h\sqrt{D \cdot t} \right) \quad (2.21)$$

Onde:

C_{cCl} = teor de cloretos na posição x' ;

C_o = teor inicial na posição x' ;

C_{Seq} = teor equivalente de cloretos na superfície externa do concreto;

x' = distância entre o pico e a posição do teor C_{cCl} ($x' = 0$ no pico);

$h = \alpha / D$;

α = constante de proporcionalidade;

t = tempo, considerando $t = \text{zero}$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos;

$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$.

A difusão de cloretos é aquela que ocorre a partir do pico, sendo que anterior a esse, ocorre perda de material no sentido oposto a profundidade do concreto segundo Guimarães e Helene (2004).

Os modelos propostos por Silva (2010) para o microambiente MLLS

Silva (2010) pesquisou o concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS utilizando o modelo de Crank (1975) onde considerou a variação de CS.

No molhe leste da barra do Rio Grande RS foram determinados pontos por Guimarães, et al. (2003) de forma a serem representativos em relação ao comportamento da ação da água do mar e dos ventos naquele local, em uma mesma seção no molhe. Os pontos dos microambientes escolhidos foram denominados de MLLS, MLLM, MLOM e MLOI do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fig. 2.26).

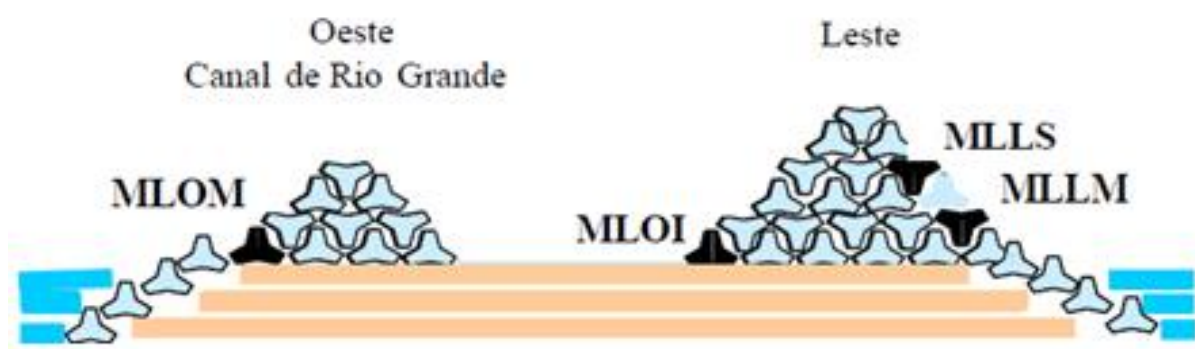


Figura 2.26 – Esquema do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS com os microambientes pesquisados (Fonte: Guimarães et al., 2003).

O significado das siglas utilizadas por Guimarães (et al., 2003) na denominação dos microambientes pesquisados são:

- MLLS – Microambiente localizado no Molhe Leste, voltado para leste e em uma cota superior;
- MLLM – Microambiente localizado no Molhe Leste, voltado para leste e em uma cota média;
- MLOM – Microambiente localizado no Molhe Leste, voltado para oeste e em uma cota média;
- MLOI – Microambiente localizado no Molhe Leste, voltado para oeste e em uma cota inferior.

Para o microambiente MLLS, aos 5 anos, utilizando k , Silva (2010) obteve o seguinte comportamento de perfis de cloretos levando em consideração a variação de C_s no tempo no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS (Fig. 2.26).

Com C_s , Silva (2010) calculou um $k = 0,113 \text{ \%}\cdot\text{ano}^{-1/2}$ e a partir disso encontrou um coeficiente de difusão $D = 179,23 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

Silva (2010) ainda salienta que considerou a idade na qual o teor de cloretos é máximo na superfície do elemento, $C_s = 0,588 \text{ \%}$ em relação à massa do concreto. Pois, para o perfil de 5 anos e $t_{\text{troca}} = 27,08$ anos, sendo que a partir desse valor foi considerado C_s constante. (Figura 2.27).

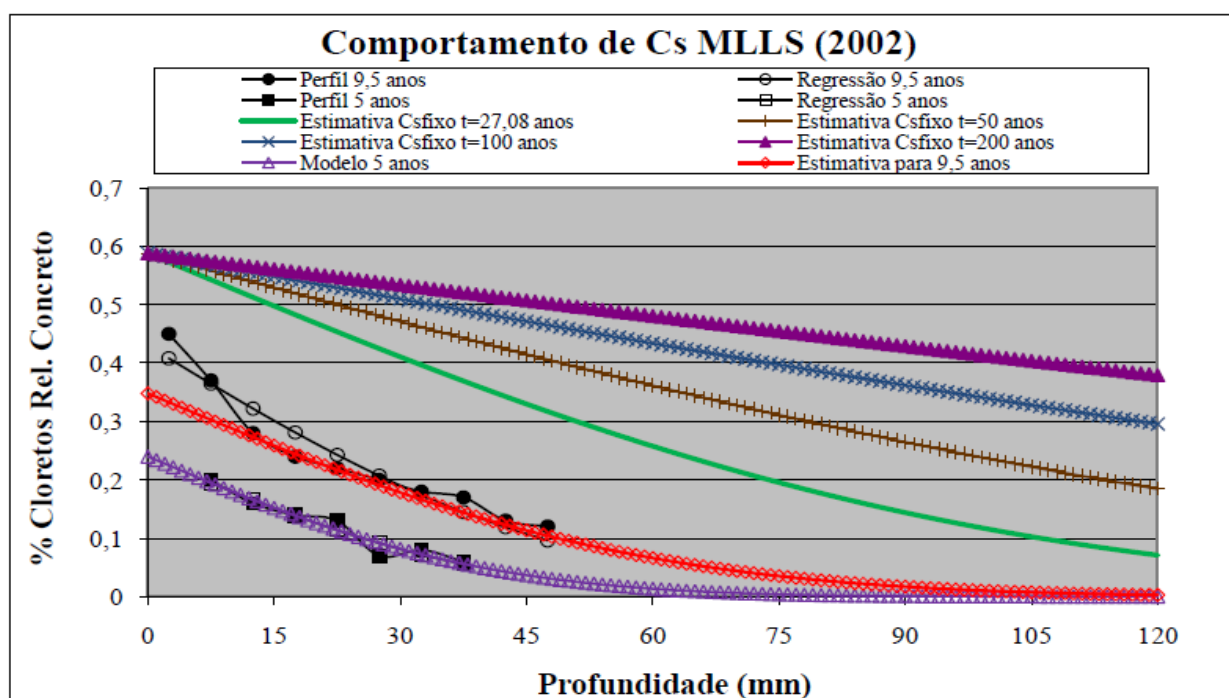


Figura 2.27 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de C_s no tempo para o microambiente MLLS k . (Fonte: Silva (2010)).

Utilizando a mesma metodologia para traçar os perfis de cloretos aos 5 anos, Silva (2010) traçou os perfis aos 9,5 anos (Fig. 2.28).

Aos 9,5 anos, com C_s obtido por regressão, calculou um $k = 0,140 \text{ \%}\cdot\text{ano}^{-1/2}$ e um coeficiente de difusão $D = 129,01 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

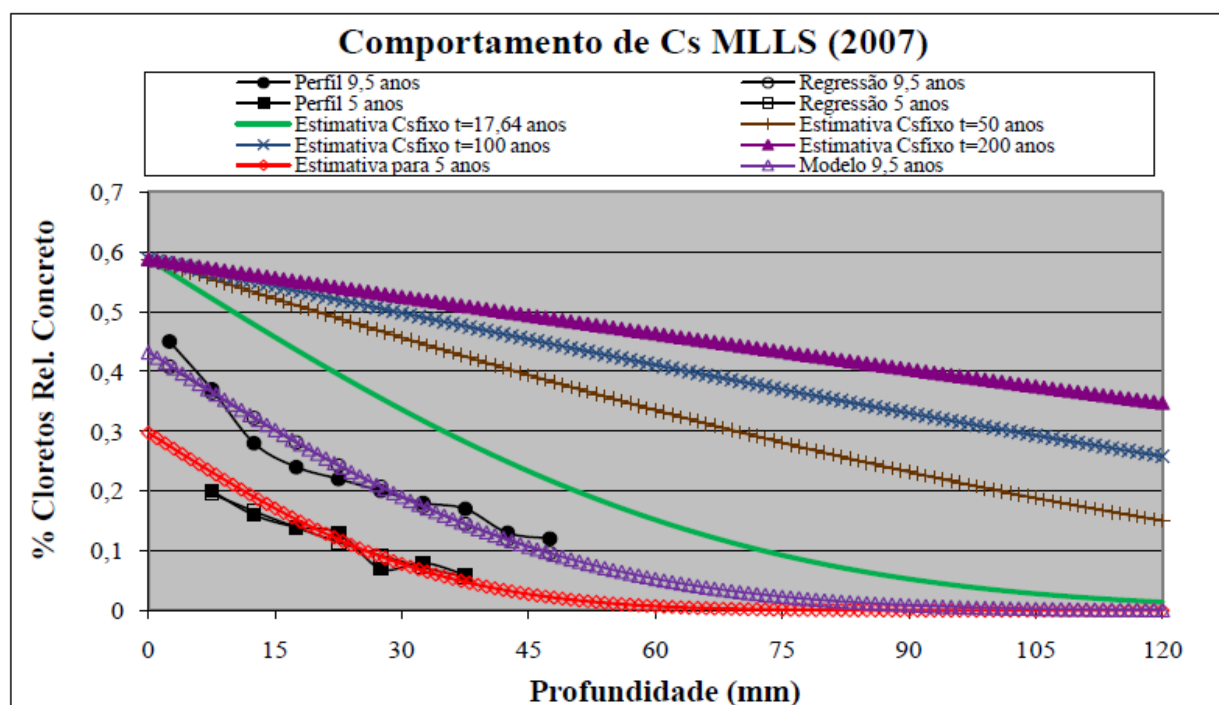


Figura 2.28 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS k. (Fonte: Silva (2010)).

Para Cs máximo igual a 0,588 % em relação à massa do concreto obteve o tempo necessário para que o teor de cloreto na superfície do concreto atinja o seu valor máximo, ou seja, $t_{troca} = 17,64$ anos. Sendo que, a partir desse valor se obteve um $t_{eq} = 10,89$ anos, o tempo no qual Cs não varia mais ao longo do tempo. Logo, considerando t_{eq} e a difusão de cloretos para Cs variável de $129,01 \text{ mm}^2/\text{ano}$ foi possível traçar o perfil no qual Cs atinge o valor máximo de 0,588%.

Já utilizando o k intermediário para as idades que melhor representa a variação de CS pelo método do mínimo erro quadrado, o microambiente MLLS, chegou ao valor de k_{eq} igual a $0,181\% \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Com o valor do k_{eq} foram realizados os mesmos processos para 5 e 9,5 anos (Silva, 2010).

Também considerando o teor máximo de Cs = 0,588 % em relação à massa do concreto obteve-se o tempo necessário para que o teor de cloreto na superfície atinja o seu valor máximo, ou seja, $t_{troca} = 20,15$ anos. (Fig. 2.29) (Silva, 2010).

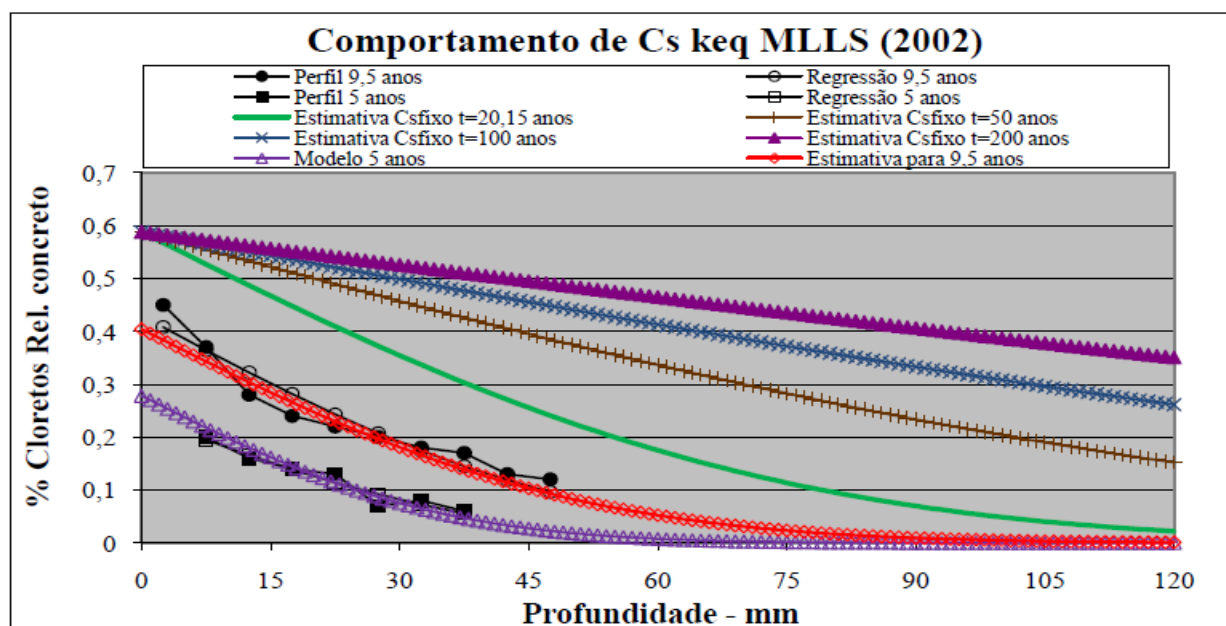


Figura 2.29 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS keq. (Fonte: Silva (2010)).

De acordo com Silva (2010), aos 9,5 anos, para o mesmo keq, o novo valor de D foi de $147,35 \text{ mm}^2/\text{ano}$. Sendo $C_s = 0,588 \%$ em relação à massa do concreto o t_{troca} foi de 20,15 anos. Com $t_{\text{eq}} = 12,44$ anos e a difusão de cloretos para Cs variável de $147,35 \text{ mm}^2/\text{ano}$ traçou o perfil no qual Cs atinge o valor máximo de 0,588%. (Fig. 2.30).

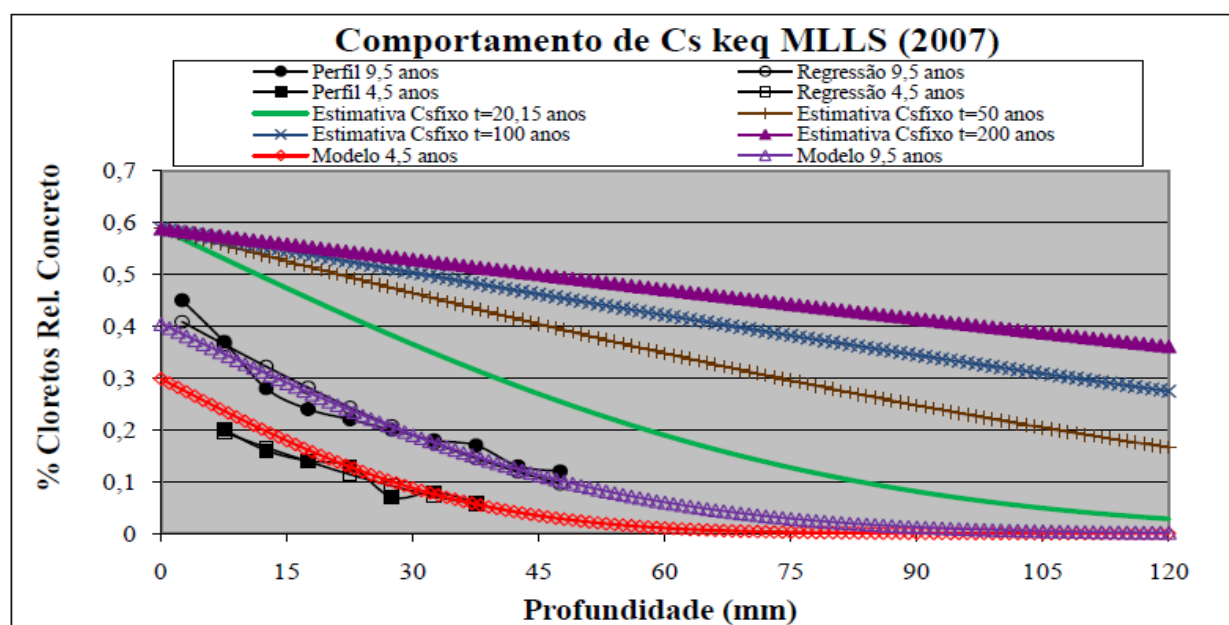


Figura 2.30 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLS keq. (Fonte: Silva (2010)).

Os modelos propostos por Silva (2010) para o microambiente MLLM

Para o MLLM, aos 5 anos, o teor de cloreto na superfície do concreto foi de 0,34 %, sendo $k = 0,160 \text{ \%}\cdot\text{ano}^{-1/2}$ e obtendo um coeficiente de difusão $D = 593,15 \text{ mm}^2/\text{ano}$ (Silva, 2010).

Da mesma forma que para o MLLS, considerando $C_s = 0,588 \text{ \%}$ em relação à massa do concreto obteve-se $t_{\text{troca}} = 13,51$ anos e $t_{\text{eq}} = 8,34$ anos. Para t_{eq} e a difusão de cloretos para C_s variável de $593,15 \text{ mm}^2/\text{ano}$ traçou o perfil no qual C_s atinge o valor máximo fixo de 0,588%. Fazendo novamente para as idades de 50, 100 e 200 anos (Fig. 2.31) (Silva, 2010).

Aos 9,5 anos (2.32), MLLM, para avaliar o comportamento de teor de cloreto utilizando o perfil medido aos 9,5 anos, realizaram-se os mesmos procedimentos utilizados aos 5 anos. O valor de C_s encontrado com a regressão foi de 0,59 % em relação à massa do concreto. A partir de C_s calculou-se $k = 0,191 \text{ \%}\cdot\text{ano}^{-1/2}$ e considerando esses parâmetros obteve um coeficiente de difusão $D = 451,80 \text{ mm}^2/\text{ano}$ (Silva, 2010).

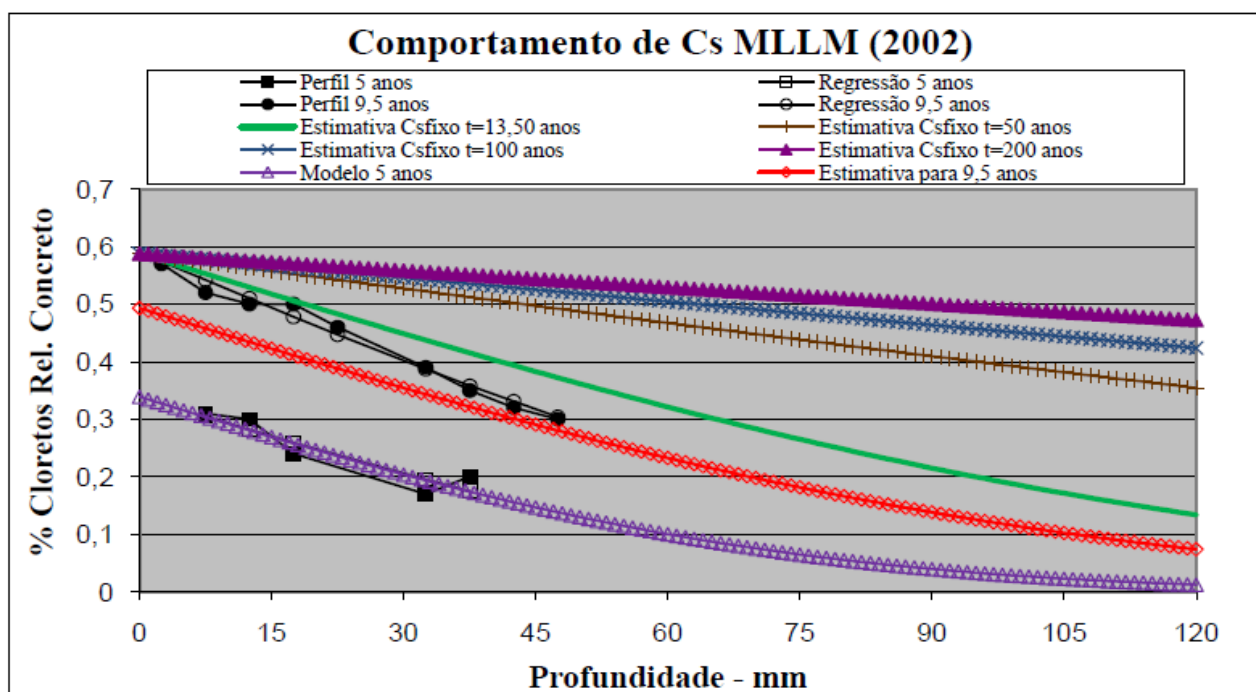


Figura 2.31 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de C_s no tempo para o microambiente MLLM k . (Fonte: Silva (2010)).

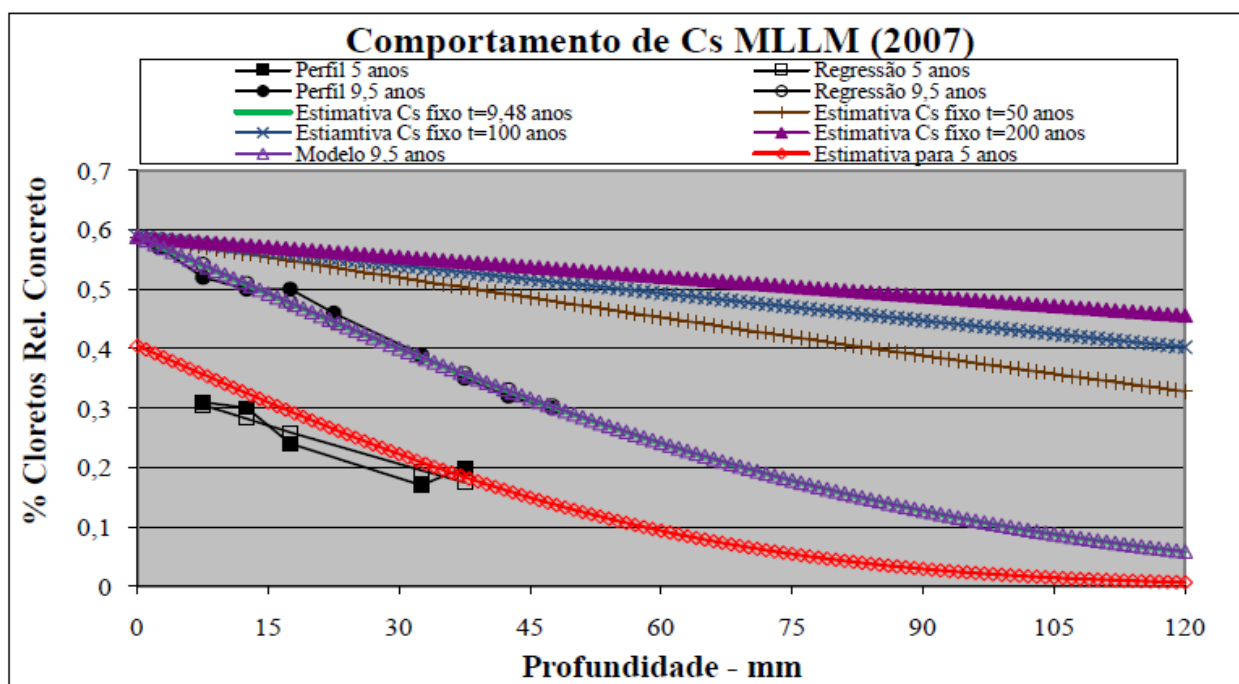


Figura 2.32 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM k. (Fonte: Silva (2010)).

Com o teor máximo de Cs = 0,588 %, aos 9,5 anos, em relação à massa do concreto o tempo necessário para o qual o teor de cloreto na superfície do concreto (Cs) atinge o valor máximo é de $t_{troca} = 9,48$ anos (Silva, 2010).

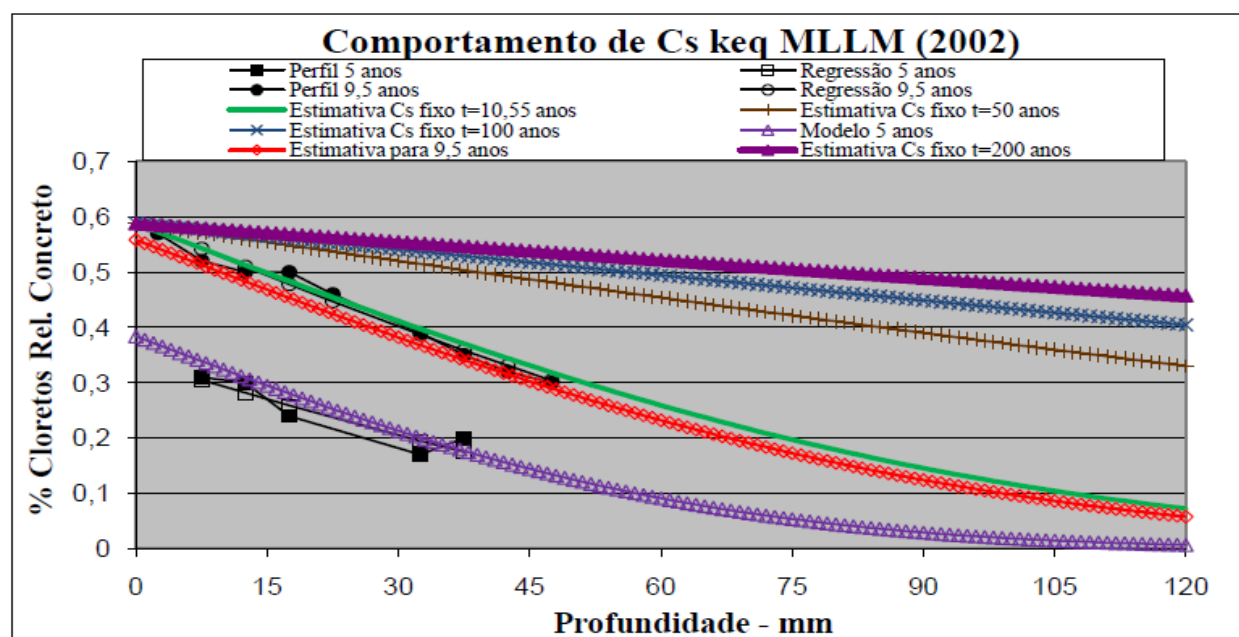


Figura 2.33 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 5 anos, considerando a variação de Cs no tempo para o microambiente MLLM keq. (Fonte: Silva (2010)).

A partir de k_{eq} , o novo valor de D obtido foi $465,11 \text{ mm}^2/\text{ano}$. Na idade de 5 anos, o tempo necessário para a estabilização de C_s também é de $0,588\%$ em relação a massa do concreto e o tempo obtido foi de $t_{troca} = 10,55$ anos. Sendo que a partir desse valor se obteve $t_{eq} = 6,51$ anos. Então se obteve o perfil no qual C_s atinge o valor máximo de $0,588\%$. Todavia, para 50 anos, 100 anos e 200 anos foi recalculado o tempo equivalente (t_{eq}) necessário para a penetração de cloreto os quais foram de 45,96 anos; 95,96 e 195,96 anos, respectivamente (Fig.2.33) (Silva, 2010).

Já para os 9,5 anos considerando k_{eq} o novo valor de D encontrado foi de $503,11 \text{ mm}^2/\text{ano}$ (Fig. 2.34). Para o modelo da curva aos 9,5 anos, k_{eq} , o tempo necessário para a estabilização de C_s de $0,588\%$ em relação a massa do concreto foi de $t_{troca} = 10,55$ anos.

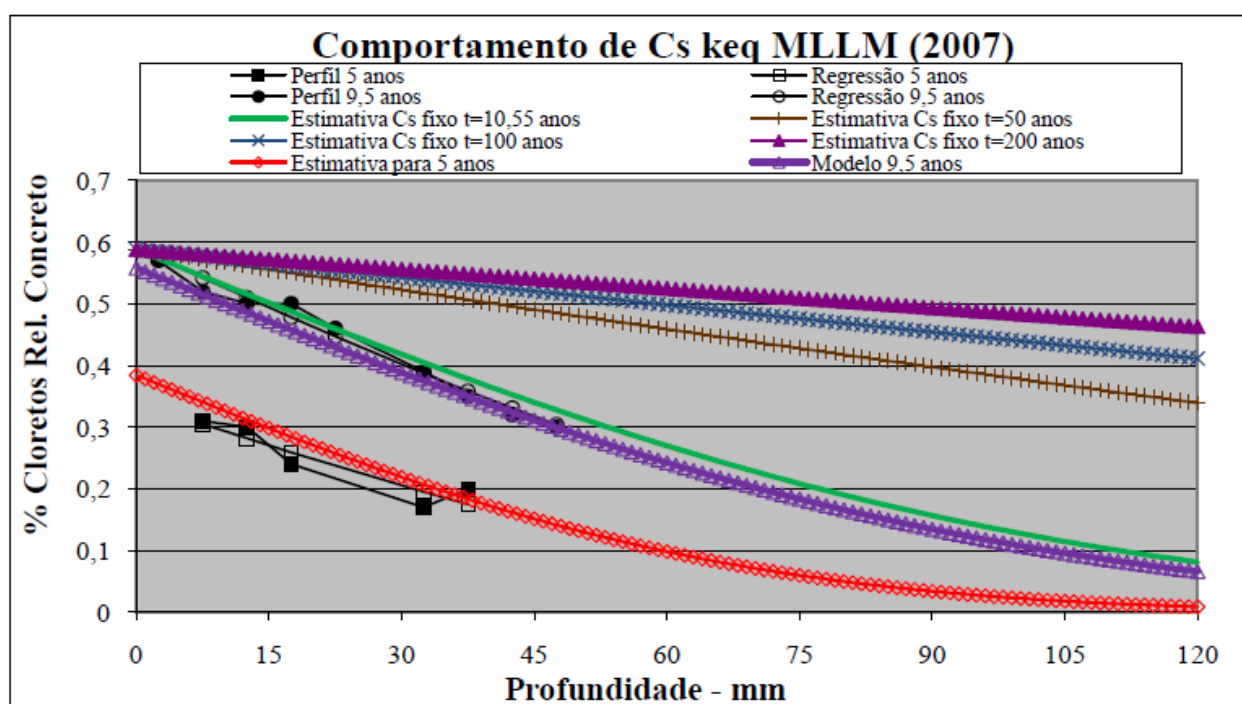


Figura 2.34 – Modelo proposto por Silva (2010), aos 9,5 anos, considerando a variação de C_s no tempo para o microambiente MLLM k_{eq} . (Fonte: Silva (2010)).

Resultados da aplicação da pesquisa de Oliveira (2013) no modelo proposto por Silva (2010) para os microambientes MLLS e MLLM

Oliveira (2013) utilizando os modelos propostos por Silva (2010) elaborou os perfis de cloretos estimando para a idade de sua pesquisa, 15 anos. O autor utilizou o mesmo k , o mesmo

coeficiente de difusão de cloretos D e apenas encontrando um novo valor para C_s , por regressão para a idade de 15 anos.

Desse modo, entrou com os dados no modelo já traçado por Silva (2010) e obteve-se as curvas relativas aos microambientes MLLS e MLM aos 15 anos, conforme Fig. 2.35 e 2.36.

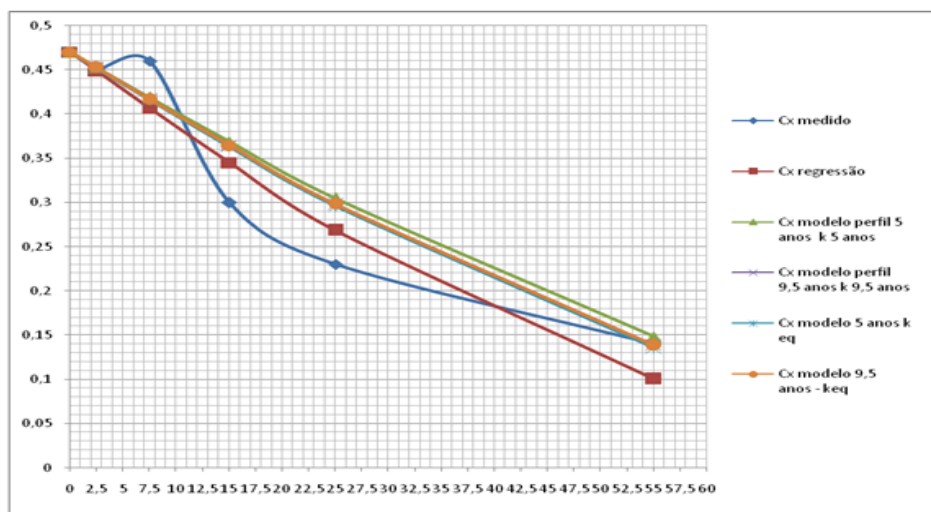


Figura 2.35 – Modelo proposto por Silva (2010), utilizado por Oliveira (2013), aos 15 anos, considerando a variação de C_s no tempo para o microambiente MLLS k e k_{eq} . (Fonte: Oliveira (2013)).

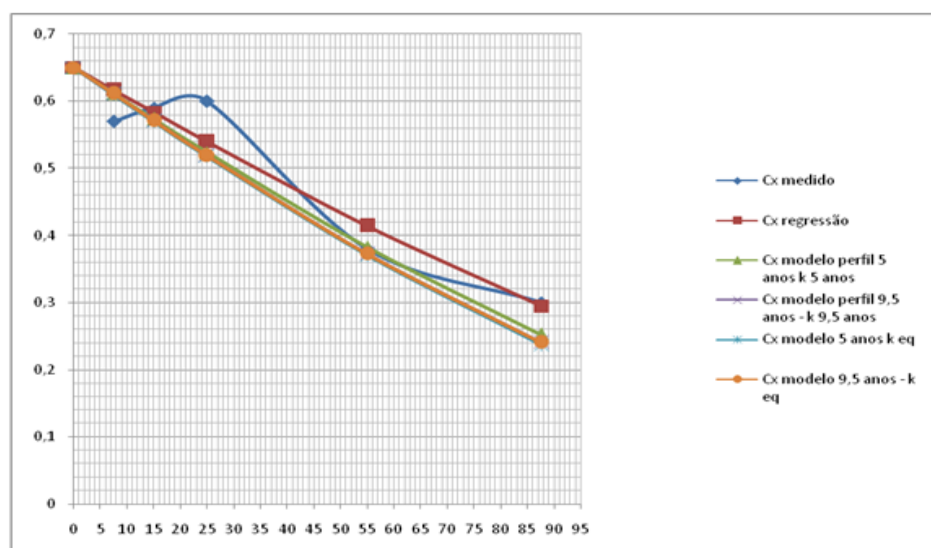


Figura 2.36 – Modelo proposto por Silva (2010), utilizado por Oliveira (2013), aos 15 anos, considerando a variação de C_s no tempo para o microambiente MLM k e k_{eq} . (Fonte: Oliveira (2013)).

3. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

3.1 O ambiente da pesquisa

A obra de Engenharia oceânica utilizada para fins da pesquisa localiza-se no Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS. Esse ambiente foi estudado por Guimarães (2003), obtendo perfis de cloretos para a idade de 5 anos, por Silva (2010) elaborando os perfis de cloretos restantes aos 5 anos e realizando os perfis aos 9,5 anos e por Oliveira (2013) traçando os perfis de cloretos aos 15 anos de idade para os tetrápodes que constituem os molhes da barra do Rio Grande RS. Os molhes da barra têm a finalidade de manter a profundidade do canal de acesso ao complexo portuário da cidade do Rio Grande e dar segurança às embarcações que dele se utilizam. Foram construídos nos anos entre 1910 e 1919, partindo do litoral para o oceano, visto que o Molhe Leste tinha um comprimento de 4220 metros (m) (Fig. 3.1) e o Molhe Oeste com 3160 m (Guimarães et al., 2003).



Figura 3.1 – Molhes da Barra do Rio Grande RS. Canal de acesso ao complexo portuário de Rio Grande (Fonte: Ministério dos Transportes).

Contudo, devido aos ventos fortes naquele ambiente, em 1995 houve a necessidade de obras de recuperação dos molhes, além de um aumento no comprimento do Molhe Oeste de 3160 m para 3800 m (Guimarães et al., 2003).

A Figura 3.2 mostra o Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS onde se manteve a base do estudo.



Figura 3.2 – Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fonte: Guimarães et al., 2003).

No Molhe Leste da barra do Rio Grande RS, onde a força das águas é maior, foi executado um reforço com a colocação de aproximadamente 10.000 tetrápodes. Esses elementos elaborados em concreto massa possuem um peso de aproximadamente 8 toneladas cada. Os tetrápodes também possuem uma barra de aço de 25,4 milímetros (mm) de diâmetro, formando um gancho na “perna” superior do tetrápode.

As barras de aço foram inseridas no concreto, de cada tetrápode, que constituem os molhes da barra, possuem apenas a finalidade de transporte desses, não apresentando nenhum reforço estrutural (Silva, 2010).

A seguir é apresentado, na Fig. 3.3, a finalidade da barra de aço colocada no interior do concreto dos tetrápodes, utilizada para o transporte desses elementos durante o período de extensão dos molhes.



Figura 3.3 – Transporte dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS (Fonte: Guimarães, et al., 2003).

Para chegar ao local demarcado, nos tetrápodes já especificados pelas pesquisas anteriores, para extração das amostras por Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013) foi necessária toda uma preparação e uma logística de mobilização, pois o percurso (Fig. 3.4) é longo e o caminho percorrido muito instável. Oliveira (2013) optou pelo transporte de barco fretado partindo da barra do Rio Grande (molhe oeste).



Figura 3.4 – Caminho percorrido para chegar aos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS 24/02/2016.

3.2 Informações características dos tetrápodes

O cimento utilizado para a execução dos tetrápodes foi o cimento Serrana, cimento Portland especial para pré-moldados (CEP – 32), no qual apresentou finura Blaine entre 390 e 440, conforme ensaios do fabricante, com teor de C_3A inferior a 8% (FURG, 1997-1998 e CIENTEC, 1997 apud Silva, 2010). O ensaio químico realizado no CIENTEC-RS (1997) apresentou os seguintes teores no cimento CEP-32: 55,03% de C_aO , 19,62% de SiO_2 , 4,43% de AL_2O_3 , 3,30% de Fe_2O_3 e 2,8% de SO_3 .

O cimento apresentou 32,45% de C_3S , 31,77% de C_2S , 6,16% de C_3A e 10,04% de C_4AF , conforme a equação de Bogue. O cimento utilizado na elaboração dos tetrápodes era de alta resistência inicial e resistente a sulfato contendo aproximadamente 12 % de cinza volante (CIENTEC, 1997).

Segundo os relatórios da obra, foram utilizadas pedra granítica como agregado graúdo e areia quartzosa como agregado miúdo. Embora a água utilizada na cura do concreto apresentasse teores de sulfato de 100 miligramas por litro (mg/l), pH de 7,3, resíduo sólido de 250 mg/l e matéria orgânica em O_2 consumido de 1,2 mg/l e teores de cloretos de aproximadamente 430 mg/l, essa pôde ser utilizada, pois as quantidades dos seus componentes apresentavam-se permissíveis pela norma NBR 6118 (FURG, 1997-1998). O concreto deveria alcançar 15 Mega Pascal (MPa) para ser considerado propício para desforma, o que era previsto em 24 h, e a resistência à compressão nominal aos 28 dias de projeto era de 26 MPa. Todavia, nos relatórios da obra não era previsto o uso de aditivos na elaboração do concreto. A relação a/c variou bastante, ou seja, de 0,37 a 0,60 (FURG, 1997-1998 apud Silva, A. T., 2010), sendo que a maioria dos valores se apresentou em torno de 0,50. A resistência à compressão aos 28 dias (f_{ck}) apresentou valores entre 27,6 MPa e 53,3MPa, sendo que a média foi de aproximadamente 32MPa (FURG, 1997-1998).

3.3 A extração das amostras dos tetrápodes

Guimarães et al. (2003) com a finalidade de elaborar um modelo de penetração de cloretos em concretos e em ambientes similares aos dos tetrápodes, realizaram um estudo que consistiu na retirada de amostras no molhe leste da barra do Rio Grande RS, em 4 diferentes microambientes (Fig. 2.26), sendo cada um desses representado por 2 tetrápodes. Foram realizados estudos dos

perfis de cloreto, como também exames visuais nessas estruturas. Ficou evidente, embora se tratando de concreto massa, a importância do monitoramento ao longo do tempo desses elementos para um caso de concreto contendo barras de aço, pois com apenas 5 anos de idade já apresentavam altos teores de cloreto (Guimarães, et al., 2003). Embora Guimarães, et al. (2003) tenham obtido amostras dos 4 microclimas, de apenas dois destes foram traçados os perfis de cloreto.

Com tamanha importância para engenharia e a fim de obter um monitoramento do comportamento de uma estrutura de concreto em ambientes similares, aos 9,5 anos de idade, Silva (2010) avaliou os mesmos pontos estudados por Guimarães et al. (2003) e realizou ensaios nas amostras de 5 anos que não haviam sido utilizadas no trabalho de Guimarães et al. (2003).

Na Figura 3.5 é apresentado o Molhe Oeste (A), o Molhe Leste (B) e a seção onde estão localizados, aproximadamente, os tetrápodes (representada pela seta, de acordo com a pesquisa de Silva (2010)).

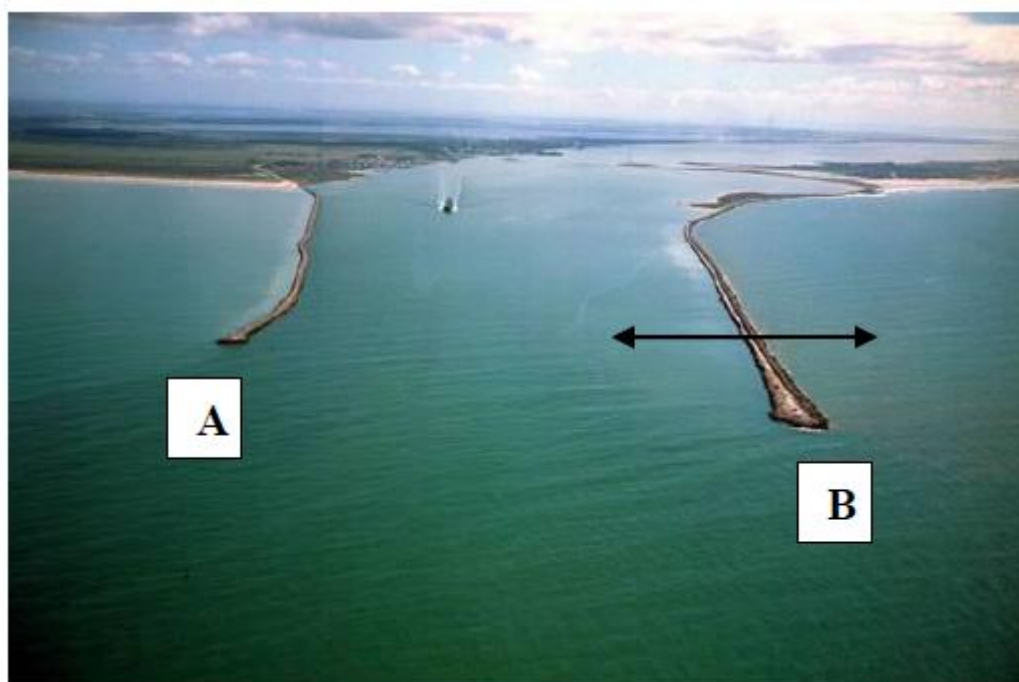


Figura 3.5 – Molhes da Barra do Rio Grande RS (A - Molhe oeste e B – Molhe leste com a seta de demarcação do local de extração das amostras) (Fonte: Guimarães et al., 2003).

Oliveira (2013) em seu trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil Empresarial da Escola da Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG - optou por uma pesquisa relacionada ao trabalho de Silva (2010), dando seguimento ao estudo, porém para a idade de 15 anos, naquela época. Na pesquisa de Oliveira (2013) foram analisados, ao contrario da pesquisa de

Silva (2010), apenas dois microambientes, o MLLS e o MLLM, avaliando modelos de perfis de cloretos considerando a variação no tempo e o teor de cloretos na superfície.

Com a finalidade de dar continuidade ao monitoramento dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS para verificar o comportamento desses elementos após os estudos de Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013) foram mantidas as mesmas nomenclaturas dos diferentes microclimas pesquisados.

A justificativa para o estudo de Oliveira (2013), nos microambientes MLLS e MLLM, aplicando seus dados, aos 15 anos, no modelo de Silva (2010), considerando apenas a variação de CS no tempo é que esses dois microambientes possuem o maior ataque de cloretos por estarem voltados para mar aberto e sofrerem maior influência pelas suas localizações.

A extração das amostras de concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS obtida por Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013) foram realizadas da seguinte forma:

- Segundo Guimarães (2003) as amostras de concreto foram obtidas com furadeira especial, provida de recipiente para coleta de material e controlador de profundidade (Fig. 3.6). O material foi extraído de camadas de 5 mm desde a superfície externa até a profundidade de 50 mm, sendo que os materiais de mesma camada de dois tetrápodes formaram apenas uma amostra, cujo resultado representa um teor médio desses tetrápodes. Portanto, foram extraídos materiais de 10 furos em cada tetrápode, totalizando 20 furos por microambiente.
- Os equipamentos para esse processo utilizados na pesquisa de Guimarães (2003) consistiam em:
 - Furadeira especial – Utilizada para extração das amostras (Fig. 3.7);
 - Paquímetro (Fig. 3.8);
 - Frasco Lavrador (pisseta), sem água – ou qualquer recipiente que possa ser utilizado para aspergir o furo, a fim de aproveitar ao máximo todo o pó de cada furo e a limpeza do furo (Fig. 3.9);
 - Recipiente para armazenar o material extraído – Qualquer recipiente que seja capaz de armazenar o material referente a cada camada, sendo que os materiais da mesma camada de dois tetrápodes formam uma amostra cada.



Figura 3.6 – Furadeira utilizada para obtenção das amostras de concreto e os dez furos realizados na pesquisa de Guimarães (2003) (Fonte: Guimarães et al., 2003).

A Figura 3.7 mostra a furadeira especial utilizada por Guimarães (2003) em sua pesquisa, para obtenção das amostras de concreto dos tetrápodes, do molhe leste da barra do Rio Grande RS, dos diferentes microambientes estudados.



Figura 3.7 – Furadeira especial utilizada na pesquisa de Guimarães (2003) para obtenção das amostras de concreto (Fonte: Guimarães et al., 2003).

A Figura 3.8 demonstra a utilização do paquímetro para medição da distância entre os respectivos furos de extração e para verificar a profundidade dos furos nos tetrápodes.

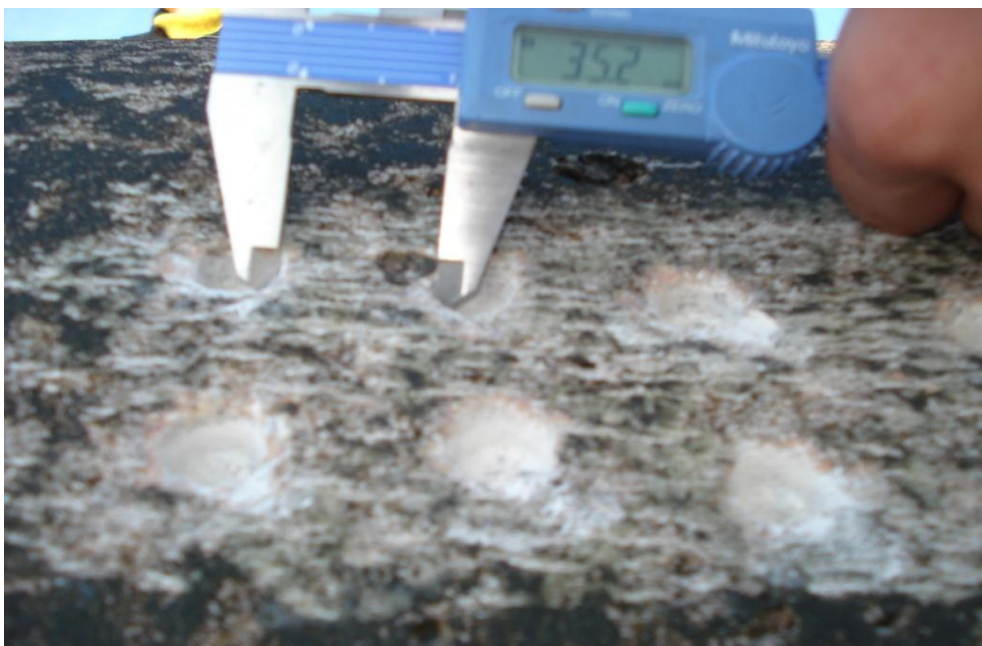


Figura 3.8 – Paquímetro utilizado na pesquisa de Guimarães (2003) para medição da distância entre furos (Fonte: Guimarães et al., 2003).

A Figura 3.9 representa o material de coleta das amostras e o recipiente para aspergir o concreto, na forma de pó.



Figura 3.9 – Equipamento para aspergir o furo aproveitando todo o material retirado na forma de pó e frasco para coleta do material utilizado na pesquisa de Guimarães (2003) (Fonte: Guimarães et al., 2003).

- Silva (2010) utilizou os mesmos recursos e os mesmo equipamentos para extração das amostras de concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS de Guimarães, et al, (2003).

Silva (2010) ainda explica que a retirada das amostras, aproximadamente na idade de cinco anos, foi realizada em janeiro (verão) de 2003 por Guimarães, et al. (2003). Já as amostras de concreto representativas para a idade, de aproximadamente 9,5 anos, foram coletadas em 06/06/2007 (outono). Em ambas as extrações, as amostras foram coletadas conforme os passos mostrados acima, os quais seguiram a norma NBR 9917/1998.

- Oliveira (2013) utilizou outra furadeira para obtenção das amostras, contudo tinham a mesma finalidade. Silva (2010) extraiu amostras até a profundidade de 50 mm, já Oliveira (2013) extraiu da superfície até a profundidade de 95 mm, conforme a seguinte amostragem: 0 a 5 mm; 5 a 10 mm; 10 a 20 mm; 20 a 30 mm; 50 a 60 mm e de 85 a 95 mm.
- As amostras de 0 a 5 mm para MLLM e 85 a 90 mm para MLLS não apresentaram massa suficiente para serem ensaiadas.
- Os equipamentos utilizados por Oliveira (2013) para extração das amostras foram os mesmo utilizados na pesquisa de Silva (2010) e de acordo com a mesma norma NBR 9917/1998:
 - Furadeira especial - para furar e coletar material (Fig. 3.10);
 - Paquímetro – para medir a profundidade do furo e a distância entre a realização dos furos (Fig. 3.11);
 - Pisseta – para aspergir o furo, limpar o furo entre cada extração para coleta do material (Fig.11);
 - Sacos plásticos próprios - para acondicionar o material extraído e transportar até o laboratório de materiais da Universidade Federal do Rio Grande – FURG – para os respectivos ensaios.

A Figura 3.10 apresenta a furadeira utilizada na pesquisa de Oliveira (2013) para extração das amostras de concreto.



Figura 3.10 – Furadeira especial utilizada na pesquisa de Oliveira (2013) para obtenção das amostras de concreto dos tetrápodes (Fonte: Oliveira, 2013).

A Figura 3.11 mencionada a seguir mostra os demais equipamentos utilizados para medição, aspersão e coleta do material extraído.



Figura 3.11 – Paquímetro utilizado na pesquisa de Oliveira (2013) para medir a distância entre furos no tetrápode (Fonte: Oliveira, 2013).

A Figura 3.12 demonstra a caixa de ferramentas com todos os equipamentos e ferramentas que foram levados para o molhe leste da barra do Rio Grande RS para extração das amostras de concreto dos microambientes.



Figura 3.12 – Caixa de ferramentas manuais com os maquinários essenciais e acessórios para obtenção das amostras de concreto utilizados na pesquisa de Oliveira (2013) (Fonte: Oliveira, 2013).

Além desses equipamentos, principais e essenciais na coleta do material extraído, utilizados nas três pesquisas de Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013), os autores ainda levaram para a expedição no molhe leste da barra do Rio Grande RS uma série de outros materiais úteis ao processo, tais como:

- Gerador;
- Gasolina;
- Extensão;
- Baldes;
- Corda; e
- Ferramentas manuais básicas.

3.4 Os microambientes da pesquisa

Os microambientes da pesquisa são detalhados a seguir para o melhor entendimento do assunto tratado. Entre eles, são apresentadas as características de cada microambiente especificado, figuras relativas às pesquisas anteriores mostradas nos estudos de Guimarães (2003), Silva, 2010 e Oliveira, 2013 e os resultados da variação do teor de cloretos na superfície do concreto de cada tetrápode em função da profundidade de extração.

3.4.1 O microambiente localizado no molhe leste voltado para leste e em cota superior – MLLS

O microambiente denominado de MLLS é o microambiente da secção do molhe leste de Rio Grande RS que se encontra acima do nível do mar e em cota mais elevada (Fig. 2.26). A figura 3.13 mostra os dois tetrápodes que compõem esse microambiente (tetrápodes superiores que aparecem destacados com um círculo em vermelho, sendo possível a observação dos furos das extrações anteriores).



Figura 3.13 – Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003).



Figura 3.14 – Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Silva (2010).

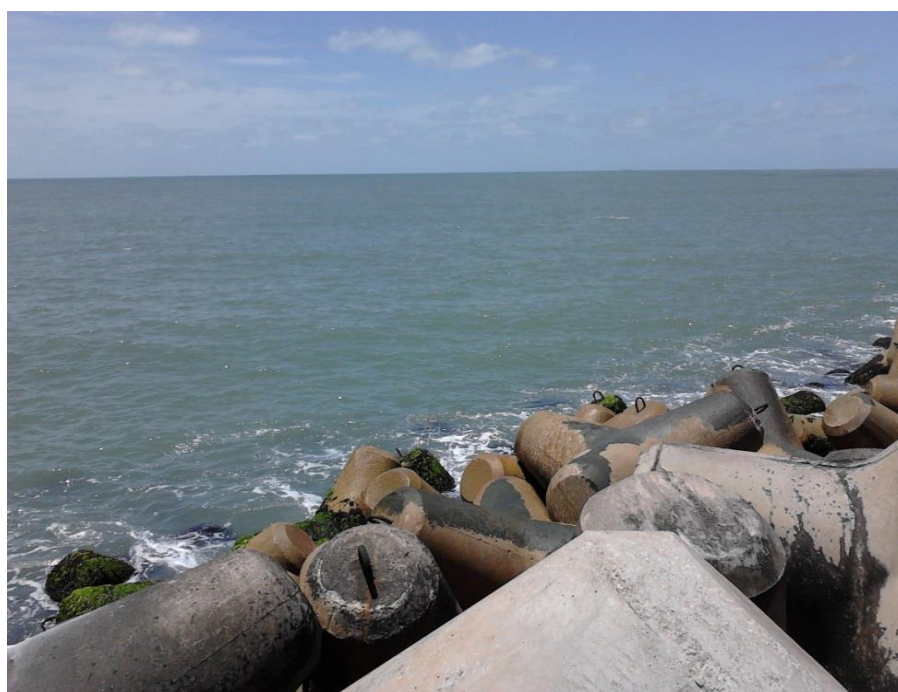


Figura 3.15 – Extração das amostras do microambiente MLLS, aos 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).

Os microambientes MLLS e MLLM, ao contrário dos microambientes MLOI e MLOM, foram estudados por Oliveira (2013), sendo assim, tornou-se possível o acréscimo de fotos e dados de sua pesquisa. Os resultados da análise das amostras anteriores são apresentados nas Tab. 3.1, 3.2 e 3.3 para as idades de 5, 9,5 e 15 anos, respectivamente.

Tabela 3.1. – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
7,5 mm	0,20
12,5 mm	0,16
17,5 mm	0,14
22,5 mm	0,13
27,5 mm	0,07
32,5 mm	0,08
37,5 mm	0,06

Em conformidade com Silva (2010), para a idade de 5 anos, o maior percentual foi de 0,20 % na camada de 7,5 mm, decrescendo para 0,06 % (Tab. 3.1.) em relação à massa do concreto na profundidade de 37,5 mm. Deste modo, como o teor de cloretos só decresce não houve nenhuma formação de pico.

Já na idade de 9,5 anos (Tab. 3.2) o teor de cloreto foi de 0,45 % (representando que o maior teor de cloretos para esse microambiente estava na superfície), na camada de 2,5 mm, reduzindo para 0,12 % em relação à massa do concreto em 47,5 mm de profundidade. Logo, para esse microambiente, não foram constatado nenhuma formação de pico em relação ao aumento da profundidade nas camadas de extração do tetrápode.

O micro ambiente MLLS, pesquisado por Oliveira (2013), aos 15 anos de idade, apresentou um leve acréscimo no teor de cloretos na profundidade de 7,5 mm (Tabela 3.3), passando de 0,45 para 0,46% em relação à massa de concreto. Nas demais profundidades o teor de cloretos diminui com o aumento da profundidade.

Tabela 3.2 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,45
7,5 mm	0,37
12,5 mm	0,28
17,5 mm	0,24
22,5 mm	0,22
27,5 mm	0,20
32,5 mm	0,18
37,5 mm	0,17
42,5 mm	0,13
47,5 mm	0,12

Tabela 3.3. – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 15 anos de idade) apresentado na pesquisa de Oliveira (2013).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,45
7,5 mm	0,46
15 mm	0,30
25 mm	0,23
55 mm	0,14
87,5 mm	-

3.4.2 O microambiente localizado no molhe leste voltado para leste e em cota média – MLLM

O microambiente localizado no molhe leste voltado para leste e em cota média – MLLM - encontra-se logo abaixo do tetrápode localizado no microambiente MLLS e um pouco acima do tetrápode localizado no microambiente MLOI (Fig. 2.26). Por ser um tetrápode de cota média, ele tem mais contato com água do mar do que o tetrápode localizado no microambiente MLLS, que fica mais acima do tetrápode localizado no microambiente MLLM, e que o tetrápode localizado no microambiente MLOI, situado no interior do Molhe Leste.

Os tetrápodes localizados no microambiente MLLM possuem uma cor mais escura dos outros tetrápodes localizados nos outros microambientes devido à ação da água do mar, que é mais intensa nessa local.

Segundo Silva (2010) o microambiente MLLM (Fig. 3.16) apresentou pico aos 7,5 mm de profundidade com um teor de 0,31 % em relação à massa do concreto na idade de 5 anos. Todavia, nas camadas seguintes houve um decréscimo desse percentual até a camada de 32,5 mm com um percentual de 0,17 %.



Figura 3.16 – Extração das amostras do microambiente MLLM, aos 5 e 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003) e Silva (2010).

Leva-se em consideração, no microambiente MLLM, que possivelmente a salinidade alta do verão e poucas chuvas, no verão e outono provocam um acúmulo de cloretos nas primeiras camadas deslocando pico com o início inverno.

Silva (2010) ainda ressalta que nessa idade, em sua pesquisa, optou-se pela retirada de amostras numa camada média entre 90 e 110 mm, ou seja, a 100 mm onde foi verificado um teor de 0,08 % (Guimarães et al., 2003). As amostras de pó de cada tetrápode da camada mais profunda (90 mm a 110 mm) que compõem o microclima foram avaliadas em laboratório separadamente e o valor considerado foi à média de ambos os ensaios, diferente do que foi realizado para as outras camadas, quando as amostras retiradas de dois tetrápodes formavam uma amostra única. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de investigar se nas camadas mais profundas dos tetrápodes os teores de cloreto ainda permaneciam elevados.

Já aos 15 anos de idade (Fig. 3.17) o perfil de Oliveira (2013) mostra que nessa idade o microambiente MLLM apresentou uma pequena formação de pico para a profundidade de 25 mm, assim como na idade de 5 anos, mas na profundidade de 7,5 mm. E, ao contrário das idades de 5 e 15 anos, aos 9,5 anos não teve formação de pico, o maior teor de cloretos encontrou-se na superfície do tetrápode decrescendo com o aumento da profundidade.



Figura 3.17 – Extração das amostras do microambiente MLLM, aos 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).



Figura 3.18 – Marcação da extração das amostras do microambiente MLLM, aos 5, 9,5 e 15 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Oliveira (2013).

As tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os teores de cloretos em relação à profundidade de extração para o microambiente MLLM.

Tabela 3.4 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 5 anos de idade) apresentado por Guimarães (2003).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,24
7,5 mm	0,31
12,5 mm	0,30
17,5 mm	0,24
22,5 mm	-
27,5 mm	-
32,5 mm	0,17
37,5 mm	0,20
100 mm	0,08

Tabela 3.5 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,57
7,5 mm	0,52
12,5 mm	0,50
17,5 mm	0,50
22,5 mm	0,46
27,5 mm	0,37
32,5 mm	0,39
37,5 mm	0,35
42,5 mm	0,32
47,5 mm	0,30

Tabela 3.6 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 15 anos de idade) apresentado na pesquisa de Oliveira (2013).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	-
7,5 mm	0,57
15 mm	0,59
25 mm	0,60
55 mm	0,38
87,5 mm	0,30

3.4.3 O microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota inferior/interna – MLOI

O Microambiente MLOI (Fig. 3.19) situa-se na parte interna do Molhe Leste (Fig. 2.26), aparentemente mais protegido em relação aos demais tetrápodes que ficam em contato quase que direto com a água do mar (Silva, 2010).

Esses monitoramentos de ataque de cloretos e a consequente realização dos traçados dos perfis nos microambientes designados já vinham sendo feitos desde os 5 anos de idade por Guimarães (2003), aos 9,5 anos por Silva (2010) e aos 15 anos por Oliveira (2013).



Figura 3.19 – Extração das amostras do microambiente MLOI, aos 5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Guimarães (2003).

De acordo com dados contidos na pesquisa de Silva (2010), o microambiente MLOI (Fig. 3.20), na idade de 5 anos apresentou pico na camada de 12,5 mm com um teor de 0,34 % em relação a massa do concreto. Logo, após o pico, o teor de cloreto reduziu com o aumento da profundidade da superfície para o interior do concreto.

Oliveira (2013), não estudou e não realizou extração de amostras do microambiente MLOI, aos 15 anos, em sua pesquisa, apenas se deteve aos microambientes MLLS e MLLM, conforme mencionado anteriormente.



Figura 3.20 – Extração das amostras do microambiente MLOI, aos 9,5 anos, dos tetrápodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS por Silva (2010).

Aos 5 anos de idade, o teor de cloretos na superfície do concreto para a profundidade de 2,5mm era de 0,24%, aumentando nas camadas com profundidade de 7,5 e 12,5mm e voltando a decrescer a partir da camada 17,5mm de profundidade com um teor de cloretos de 0,23%, reduzindo ainda mais para maiores profundidades. Nesse modelo, para essa idade, houve a formação de pico do teor de cloretos atingindo o valor percentual de 0,34% aos 12,5mm de profundidade em relação a massa de concreto.

Na idade de 9,5 anos o teor de cloreto reduziu a partir da camada de 2,5 mm, ou seja, de um percentual de 0,47 % até um percentual de 0,24 % em relação à massa do concreto em 47,5 mm (Silva, 2010). Nesse caso, não houve a formação de pico do teor de cloretos em relação à profundidade das camadas.

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os valores dos percentuais de cloretos obtidos a partir da relação com a profundidade das camadas partindo da superfície do elemento estrutural para as idades do microambiente MLOI, respectivamente de 5 e 9,5.

Nesse microambiente, confirma-se o aparecimento de formação de pico do teor de cloretos no início do verão e o seu desaparecimento no início do inverno, formando pico aos 5 anos e não formando aos 9,5 anos.

Tabela 3.7. – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOI aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,24
7,5 mm	0,28
12,5 mm	0,34
17,5 mm	0,23
22,5 mm	0,16
27,5 mm	0,12
32,5 mm	0,11
37,5 mm	0,14
100 mm	0,08

Tabela 3.8 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOI aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,47
7,5 mm	0,40
12,5 mm	0,36
17,5 mm	0,34
22,5 mm	0,30
27,5 mm	0,27
32,5 mm	0,30
37,5 mm	0,24
42,5 mm	0,25
47,5 mm	0,24

É de extrema importância salientar que para a presente pesquisa o microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota inferior/interna – MLOI não foi levado em consideração para fins de análise, visto que não foi estudado por Oliveira (2013) para a idade de 15 anos.

3.4.4 O microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota média – MLOM

O microambiente localizado no molhe leste voltado para oeste e em cota média – MLOM – é o microambiente situado no ponto mais próximo à água, porém localizado no lado oposto dos demais microambientes (lado do canal do porto do Rio Grande RS – Fig. 2.26).

O microambiente MLOM não foi estudado e analisado por Oliveira (2013) aos 15 anos de idade, permanecendo apenas os valores e características desse microambiente relativo as idades de 5 e 9,5 anos.

Silva (2010) diz que, o microambiente MLOM, similarmente aos outros microambientes MLOI, MLLS e MLLM, apresentou percentuais de cloreto ao longo da profundidade mais elevados para a idade de 9,5 anos do que aos 5 anos.

Na idade de 5 anos o microambiente MLOM apresentou oscilação, ou seja, o percentual de cloreto reduziu de 0,22 % na camada de 2,5 mm, para 0,16 % aos 7,5 mm. Entretanto, voltou a crescer para 0,20 % na camada de 12,5 mm, voltando a decrescer nas próximas profundidades até um percentual de 0,09 % aos 37,5 mm (Tab. 3.9 e 3.10) (Silva, 2010). Portanto, apresenta tendência a formação de pico.

A Figura 3.21 mostra o local de extração das amostras da pesquisa de Silva (2010) para a idade de 5 e 9,5 anos.



Figura 3.21 – Local de extração das amostras do microambiente MLOM, aos 5 e 9,5 anos, dos tetrapodes do Molhe Leste da Barra do Rio Grande RS apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Tabela 3.9 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOM aos 5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010) por Guimarães (2003).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,22
7,5 mm	0,16
12,5 mm	0,20
12,5 mm	0,18
22,5 mm	0,14
27,5 mm	0,14
32,5 mm	0,13
37,5 mm	0,09

Tabela 3.10 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLOM aos 9,5 anos de idade) apresentado na pesquisa de Silva (2010).

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
2,5 mm	0,42
7,5 mm	0,41
12,5 mm	0,34
17,5 mm	0,34
22,5 mm	0,31
27,5 mm	0,26
32,5 mm	0,19
37,5 mm	0,18
42,5 mm	0,16
47,5 mm	0,16

Ao fim do detalhamento dos microambientes localizados no molhe leste da barra do Rio Grande RS vale salientar que quando se realizou a expedição para análise do local, no dia 24 de fevereiro de 2016 o professor orientador da pesquisa mediu o nível da água no dia, o qual marcou, para os microambientes:

- MLLS = 3,7 metros;
- MLLM = 2,2 metros;
- MLOI = 1,5 metros;
- MLOM = 1,5 metros.

Também vale ressaltar que a expedição para coletar as amostras de concreto dos microambientes dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande aos 5 anos, por Guimarães (2003) foi realizada no início do verão, aos 9,5 anos, por Silva (2010), foi realizada no início do inverno e já aos 15 anos, por Oliveira (2013), se realizou no início do verão.

3.5 O tratamento das amostras

As amostras de concreto retiradas do local das expedições de Guimarães (2003) e Silva (2010) foram enviadas para o laboratório CIENTEC e somente após foi realizado o traçado dos perfis de cloretos para essas idades.

Após a extração e o acondicionamento das amostras de concreto de cada microambiente no molhe leste da barra do Rio Grande RS essas foram tratadas no Laboratório de Química dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande FURG para obtenção dos perfis de cloretos e suas análises para os 15 anos.

3.6 A simplificação dos modelos elaborados por Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2015) considerando a variação de CS no tempo e a formação de pico dos perfis de cloretos

A simplificação dos modelos considerando a variação de Cs no tempo e levando em consideração, conjuntamente, a formação de pico CP consiste em aproveitar o levantamento de dados recolhidos por Guimarães (2003), Silva (2010) e Oliveira (2013). Os autores realizaram diversas extrações nos tetrápodes, em diferentes microambientes, em diversificadas profundidades e conseguiram obter o teor de cloretos na superfície do concreto no molhe leste da barra do Rio Grande RS para diferentes idades e períodos do ano.

Como já mencionado anteriormente os pesquisadores estudaram todos os microambientes especificados e pré-determinados por Guimarães (2003), que deu origem ao monitoramento do concreto dos tetrápodes nesse ambiente marítimo, MLOI, MLOM, MLLM e MLLS, com exceção de Oliveira (2013) que analisou apenas os microambientes MLLM e MLLS.

Para prover a simplificação dos modelos considerando a variação de CS e levando em consideração a formação de pico, e para considerar as três idades de extração, 5, 9,5 e 15 anos decidiu-se por fazer e aprimorar os modelos dos microambientes MLLM e MLLS que possuem os três perfis já traçados.

Primeiramente, com os perfis estabelecidos pelos três autores, para o microambiente MLLS, que não consideraram a formação de pico em seus estudos, apenas a variação de Cs, foi necessário

fazer a transposição do pico apresentados em seus traçados para a origem do eixo “x” conforme mostrados nas Fig. 3.22 e 3.23.

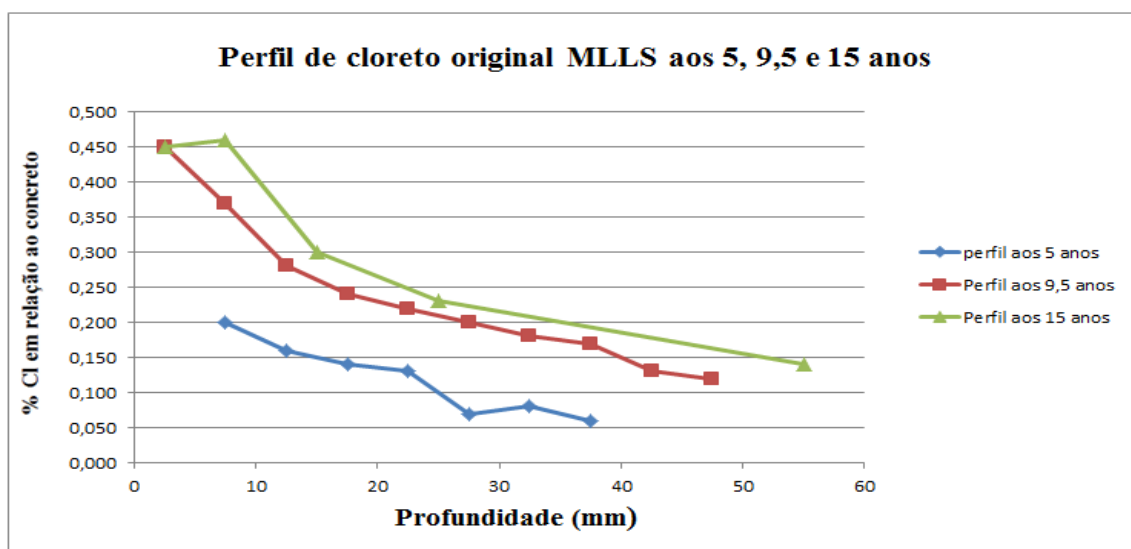


Figura 3.22 – Perfis de cloretos traçados por Guimarães (2003) aos 5 anos, Silva (2010) aos 9,5 anos e Oliveira (2013) aos 15 anos para o microambiente MLLS.

A transposição do pico para a origem, no microambiente MLLS, se deu aos 7,5 mm, considerando igual aos 5 anos, de profundidade para cada perfil. A partir de então, diminuiu-se a camada imediatamente superior de 7,5mm, e assim sucessivamente até a última profundidade conforme mostrados nas Tab. 3.11., 3.12. e 3.13.

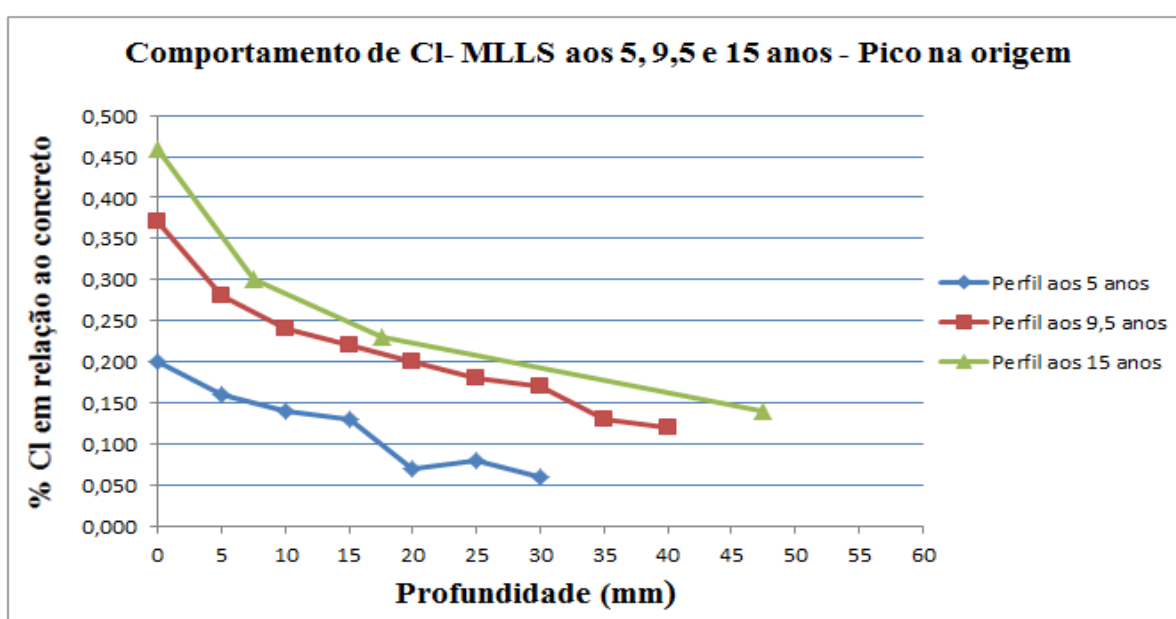


Figura 3.23 – Transposição do pico para a origem do eixo “x” para o microambiente MLLS.

As Tabelas 3.11., 3.12. e 3.13. apresentam os valores percentuais de cloretos em relação a massa de concreto após a transposição do pico para o eixo “x”, para o microambiente MLLS.

Tabela 3.11 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,200
5 mm	0,160
10 mm	0,140
15 mm	0,130
20 mm	0,070
25 mm	0,080
30 mm	0,060

Tabela 3.12 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 9,5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,370
5 mm	0,280
10 mm	0,240
15 mm	0,220
20 mm	0,200
25 mm	0,180
30 mm	0,170
35 mm	0,130
40 mm	0,120

Tabela 3.13 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLS aos 15 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,460
7,5 mm	0,300
17,5 mm	0,230
47,5 mm	0,140
80 mm	-

A transposição do pico para a origem, no microambiente MLLM, se deu aos 7,5 mm de profundidade para o perfil de 5 anos. Para o perfil de 9,5 anos a transposição se deu aos 17,5mm. E, já para os 15 anos aos 25 mm.

O microambiente MLLM é o mais agressivo de todos, conforme Silva (2010), sendo a estabilidade da profundidade obtida em maior idade. Aos 15 anos, segundo Oliveira (2013) também se confirma está agressividade no microambiente MLLM, pois a profundidade e o teor de pico são maiores do que o microambiente MLLS.

Esta simplificação dos modelos obtidos para as três idades, considerando a variação de CS no tempo e ao mesmo a formação de pico nos perfis de cloretos, admite que os perfis de cloretos são “empurrados” pelo efeito de secagem e molhagem no local para o interior da estrutura de concreto. Isso deve acontecer nas profundidades de formação de pico, nas maiores estimativas de teores de cloretos.

As Figuras 3.24 e 3.25 representam os gráficos da transposição para o microambiente MLLM. A partir de então, diminuiu-se a camada imediatamente superior dos respectivos valores de profundidade para cada perfil, 7,5, 17,5 e 25 mm, e assim sucessivamente até a última profundidade para cada perfil.

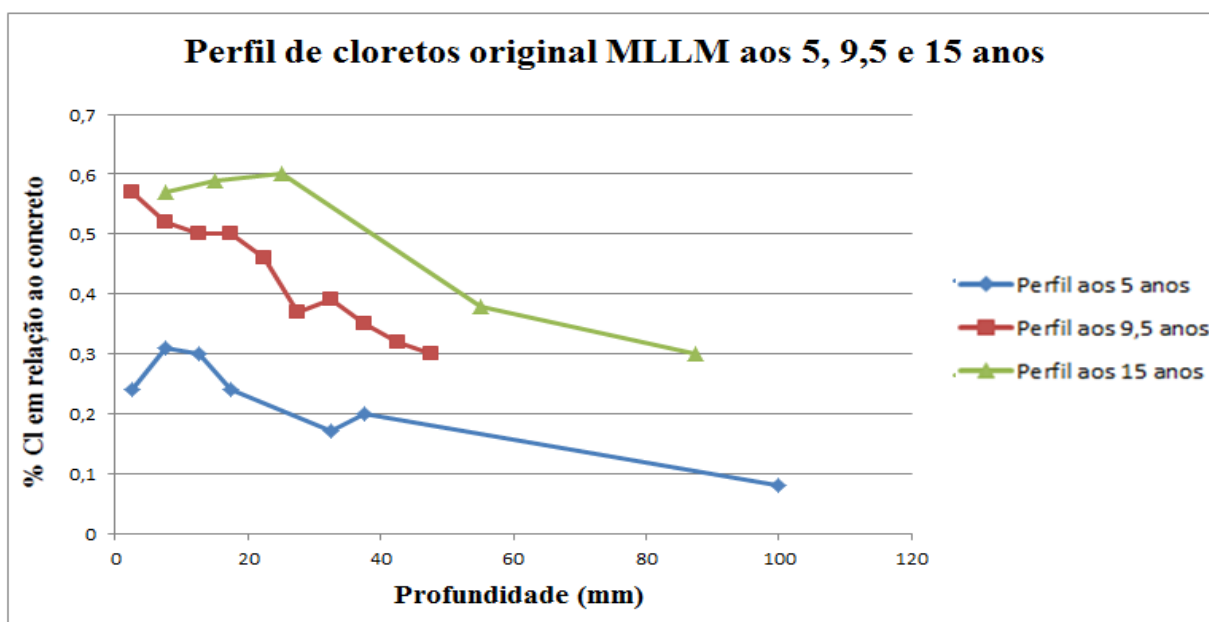


Figura 3.24 – Perfis de cloretos traçados por Guimarães (2003) aos 5 anos, Silva (2010) aos 9,5 anos e Oliveira (2013) aos 15 anos para o microambiente MLLM.

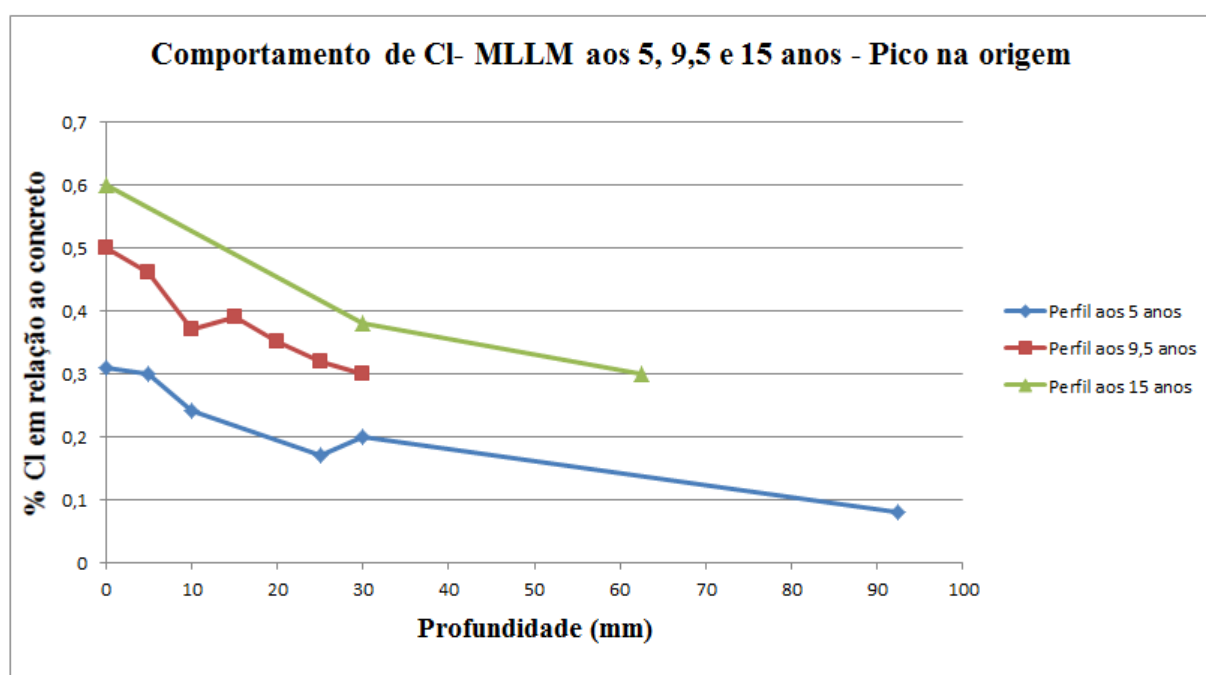


Figura 3.25 – Transposição do pico para a origem do eixo “x” para p microambiente MLLM.

As Tabelas 3.14, 3.15 e 3.16 mostram os valores dos percentuais de cloretos em relação a profundidade após a transposição para o eixo “x”.

Tabela 3.14 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,310
5 mm	0,300
10 mm	0,240
25 mm	0,170
30 mm	0,200
92,5 mm	0,080

Tabela 3.15 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 9,5 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,500
5 mm	0,460
10 mm	0,370
15 mm	0,390
20 mm	0,350
25 mm	0,320
30 mm	0,300

Tabela 3.16 – Percentual de cloretos em relação à massa de concreto (Ponto MLLM aos 15 anos de idade) após a transposição para o eixo “x”.

Camada/Micro amb.	(%de Cloretos)
0 mm	0,600
30 mm	0,380
62,5 mm	0,300

Após a transposição do pico para o eixo “x” calculou-se o “k” em função de CS e a idade do determinado perfil de acordo com a Eq. 2.17. Para cada perfil traçado e para cada idade obteve-se um “k”.

O Mt (massa total de cloretos) é a área do gráfico abaixo do perfil de cloretos traçado em relação ao $CS_{\text{máx}}$ e a profundidade das camadas de extração em um certo t_{troca} . A Figura 3.26 ilustra o Mt quando $CS_{\text{máx}}$ atinge o valor máximo.

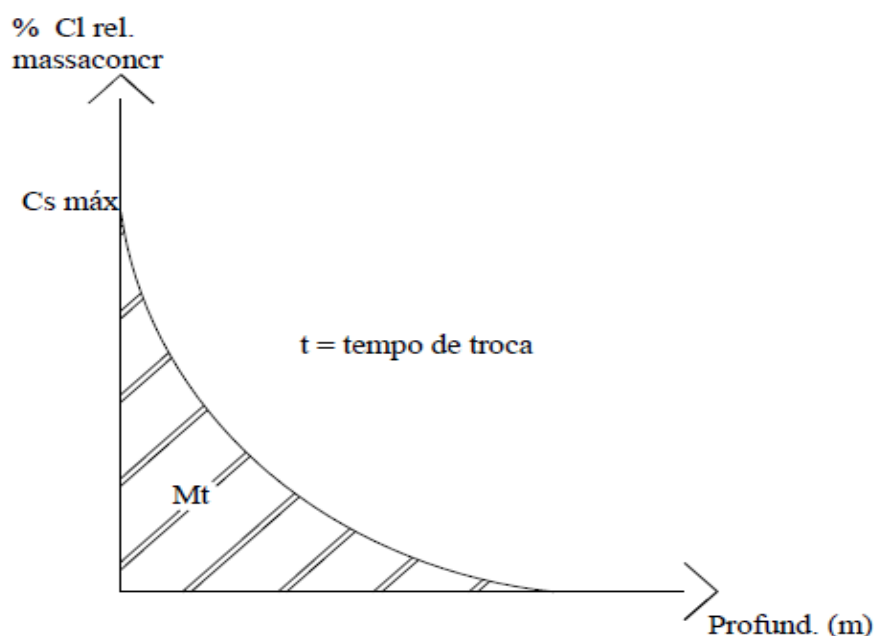


Figura 3.26 – Perfil de cloretos para qual $CS_{\text{máx}}$ atinge valor fixo em relação a massa de concreto na idade de t_{troca} .

O cálculo de D é obtido variando Mt e CS até obter o menor erro quadrado entre eles. O cálculo de “ k ” obtido através da Eq. 2.17 e o de “ Mt ” obtido através da Eq. 2.19 é necessário para estimar o coeficiente de difusão do perfil considerando a transposição do pico para a origem do eixo “ x ”.

Com os resultados das variáveis “ k ”, “ Mt ”, “ D ” e o $CS_{\text{máx}}$ obtido a partir da curva de regressão do perfil, para o determinado ano, pode-se apresentar o modelo e as estimativas dos perfis de cloretos considerando a variação de C_s no tempo e considerando a transposição do pico para a origem do eixo “ x ” através da Eq. 2.18.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o estudo dos traçados dos perfis de medição de cloreto transpondo o pico dos perfis para a origem do eixo x realizou-se a regressão a partir da equação da segunda lei de Fick (Eq. 2.22) (ANEXO 1). A regressão tem por finalidade a obtenção do teor de cloretos na superfície do concreto (C_s) que melhor atende as curvas através do método do mínimo erro quadrado, porém, neste caso, com a transposição do pico para a origem do eixo x, considerando também a formação de pico.

4.1 Passo a passo da análise dos resultados

Com os quatro perfis de cloretos já readaptados após serem traçados pelas pesquisas anteriores e considerando apenas a variação da concentração superficial de cloretos (C_s) aproveitou-se apenas os que possuíam os perfis traçados para os seguintes anos: 5, 9,5 e 15 MLLS e MLLM. O microambiente MLOI e o MLOM não obtiveram perfis traçados para 15 anos. Logo, o passo a passo explica, para melhor entendimento, a análise dos resultados para os microambientes MLLS e MLLM.

Passo 1: Com os perfis dos dois microambientes traçados, considerando somente a variação de C_s , elaborou-se um novo perfil de cloretos para esses microambientes MLLS e MLLM, entretanto, trazendo o pico apresentado no perfil para a origem do eixo x e considerando também a formação de pico, juntamente com a variação de C_s (Fig. 3.23 e 3.25).

Passo 2: A regressão dos perfis foi feita com o objetivo de melhor correlacionar os valores com o menor erro quadrado para os perfis aos 5, 9,5 e 15 anos do microambiente MLLS e para os perfis aos 5, 9,5 e 15 anos do microambiente MLLM (ANEXO 1 – Tab. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6). A regressão pelo método dos mínimos quadrados foi realizada de acordo com Eq. 2.19. Com isso, conseguiu-se chegar aos valores de C_s e M_t , variando-os, até chegar ao menor erro quadrado entre eles.

Passo 3: Com os valores da regressão, que permitem estimar a curva que mais se aproxima da curva característica pelo menor erro quadrado entre os pontos, pôde-se determinar o valor de C_s para cada perfil dos respectivos anos estudados, 5, 9,5 e 15 anos, com o pico na origem, e assim, obter o valor de k pela Eq. 2.17 (ANEXO 1 – Tab. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6).

Passo 4: Através da equação 2.19 e pela regressão pelo menor erro quadrado, encontrando o melhor valor de C_s e M_t , foi possível determinar o coeficiente de difusão de cloretos (D) para a idade estudada (ANEXO 1 – Tab. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6). Importante salientar que o D obtido não é real devido ao deslocamento do pico para a origem do eixo, servindo apenas para estimar os perfis em diferentes idades para a situação de cada microambiente.

Passo 5: Nesta etapa, através da Eq. 2.18 obteve-se os valores pela equação de C_x (ANEXO 2) em função de k , D e t (dos passos anteriores) para determinados valores de x (profundidades). Com os valores de C_x , sabendo que o modelo já existe, pôde-se traçar os modelos de cada ano estudado (5, 9,5 e 15) para cada microambiente (MLLS e MLLM) e as estimativas dos modelos de perfis de cloretos para os anos anteriores e/ou superiores aos em análise com a transposição do pico para origem.

Com a finalidade de traçar um perfil de previsão do comportamento dos teores de cloretos aos 9,5 (ANEXO 2 – Tab. 2.2) e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.3) para o microambiente MLLS foi utilizado o perfil de 5 anos (obtido por regressão) como modelo (ANEXO 2 – Tab. 2.1). Dessa forma, os valores de D e de k obtidos aos 5 anos permanecem os mesmos, modificando apenas o tempo de previsão para o comportamento e apresentando um novo C_s .

Para traçar um perfil de previsão do comportamento dos teores de cloretos aos 5 (ANEXO 2 – Tab. 2.5) e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.6) para o microambiente MLLS foi utilizado o perfil de 9,5 anos (obtido por regressão) como modelo (ANEXO 2 – Tab. 2.4). Assim, os valores de D e de k obtidos aos 9,5 anos permanecem constantes, alterando apenas o tempo de previsão para o comportamento e apresentando também um novo C_s .

O perfil de cloretos aos 15 anos, trazendo os perfis para os anos inferiores, ou seja, aos 9,5 e 5 anos, pode ser usado para determinar, por exemplo, o tempo em que já foi despassivado uma armadura. Então, para traçar um perfil de previsão do comportamento dos teores de cloretos aos 5 (ANEXO 2 – Tab. 2.8) e 9,5 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.9) para o microambiente MLLS foi utilizado o perfil de 15 anos (obtido por regressão) como modelo (ANEXO 2 – Tab. 2.7). Assim, os valores de D e de k obtidos aos 15 anos permanecem constantes, alterando apenas o tempo de previsão para o comportamento e apresentando também um novo C_s .

Para o microambiente MLLM foram feitos os mesmo procedimentos utilizados para o microambiente MLLS, sendo apresentados no ANEXO 2 – Tab. 2.10 até 2.18.

Passo 6: Em um determinado tempo se chega ao teor máximo da concentração superficial de cloretos C_s , considerado de aproximadamente 0,600%, por Guimarães, et al. (2003) e Silva (2010), então tem-se um perfil na idade de troca (t_{troca}). Esse tempo de troca é quando se considera C_{svar} como sendo C_{sfixo} a partir desse tempo (Fig. 4.1).

Desejando a continuidade no perfil em estudo calcula-se o tempo equivalente (t_{eq}) para C_{sconst} no qual se obtém um perfil igual para essa idade. Neste caso para obter um perfil sem alterar o coeficiente de difusão de cloretos D , próprio do concreto, considera-se o tempo equivalente para igualar os perfis.

O tempo equivalente pode ser obtido através da Eq. 4.1.

$$t_{troca} = 1,62 \cdot t_{eq} \quad (4.1)$$

Onde:

t_{eq} = Tempo para qual se obtém o mesmo perfil considerando C_s variável e considerando C_s constante;

t = idade em estudo;

t_{troca} = Tempo para qual C_s atinge se valor máximo.

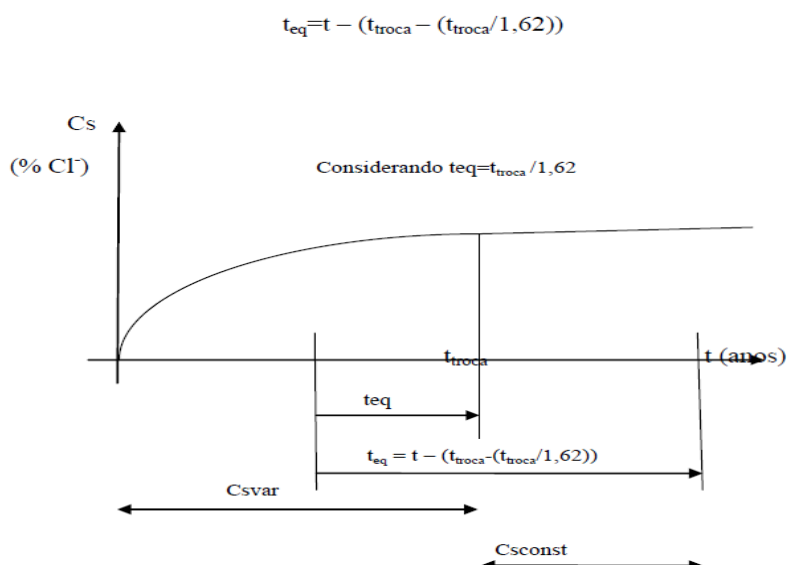


Figura 4.1 – Comportamento de C_s ao longo do tempo (Silva, 2010).

Com o valor do tempo equivalente (t_{eq}) (ANEXO 3) calculado para cada microambiente, MLLS e MLLM, e a partir da Eq. 2.8 foi possível obter o modelo para idades iguais ou superiores ao tempo de troca, considerado de 0,600 %. Com esse modelo pode-se estimar o comportamento dos perfis de cloretos em função da profundidade para ambientes marítimos na idade de 50 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.1 a 4.6).

Passo 7: Todos os procedimentos utilizados para o perfil de cloretos na idade de 5 anos foram realizados também para as idades de 9,5 e 15 anos do valor de $Cs_{máx}$.

Passo 8: Da mesma maneira que todos os procedimentos anteriores foram realizados com o k , também se fez para o k_{eq} (ANEXO 5). O k_{eq} é um k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos obtido por regressão pelo método do menor erro quadrado.

Passo 9: A partir dos resultados obtidos para os perfis de cloretos, traçado dos modelos para cada idade, as estimativas dos perfis para idades inferiores e superiores, para $t = 50$ anos e o respectivo tempo de troca de cada microambiente dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS, considerando além da variação de Cs a formação de pico, comparou-se com as pesquisas anteriores de Silva (2010) e Oliveira (2013) através do cálculo dos erros relativos para verificar a compatibilidades dos perfis em muito bom, bom, regular e ruim.

4.2 Análise do microambiente localizado no molhe leste, voltado para leste e em cota superior - MLLS

A Figura 4.2 apresenta as medições de cloretos em função da profundidade no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS para o microambiente MLLS na idade de 5 anos com a transposição do pico para a origem do eixo x (perfil aos 5 anos ajustado com o pico na origem). Com os valores desse perfil foi possível realizar a regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.1) representada na Fig. 4.2 por modelo aos 5 anos. Com a regressão determinou-se o teor de cloretos na superfície do concreto pelo menor erro quadrado, já que o pico foi deslocado para a origem, chegando ao valor de 0,200 % em relação à massa de concreto. Com o valor de Cs e o respectivo ano de estudo do microambiente MLLS (5, 9,5 ou 15), neste caso 5, obteve um k através da Eq.

2.20 de 0,0894%.ano^{-1/2}. Logo, o coeficiente de difusão de cloretos encontrado foi de $D = 134,7087$ mm²/ano.

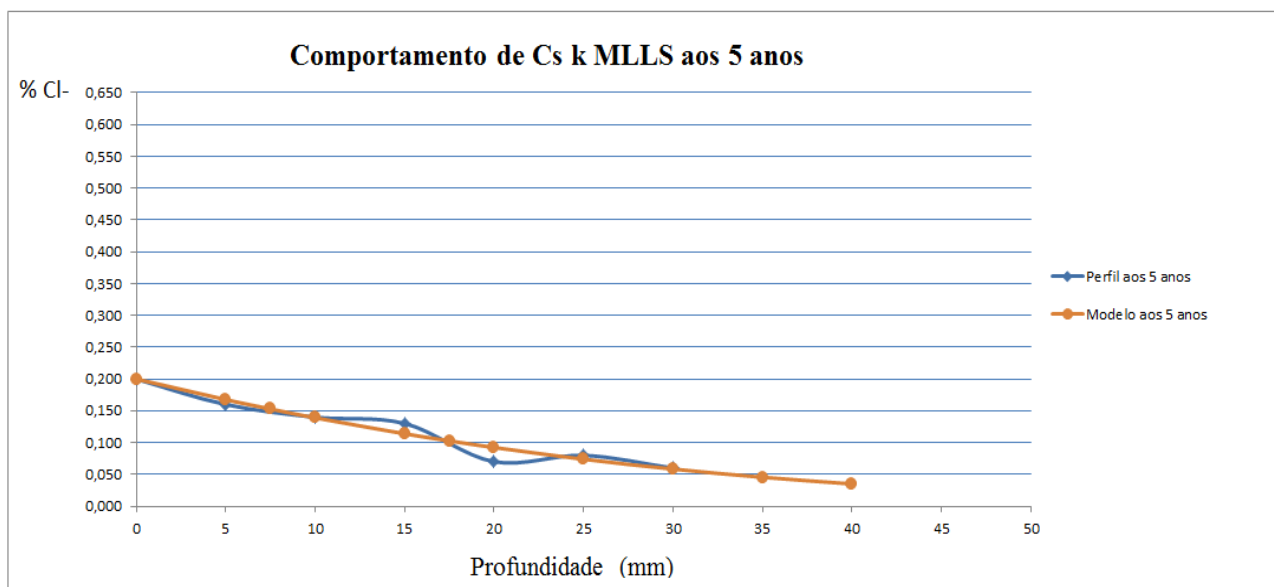


Figura 4.2 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) aos 5 anos.

Tendo por finalidade traçar um perfil de previsão, considerando além da variação de Cs a formação de pico no perfil, do comportamento do percentual de cloretos aos 9,5 e 15 anos, manteve-se os mesmos valores de D e k encontrados aos 5 anos, todavia modificando a idade para 9,5 e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.2 e 2.3). Assim, modificando Cs e Mt e obtendo os perfis de previsão para as respectivas idades (Fig. 4.3, 4.4).

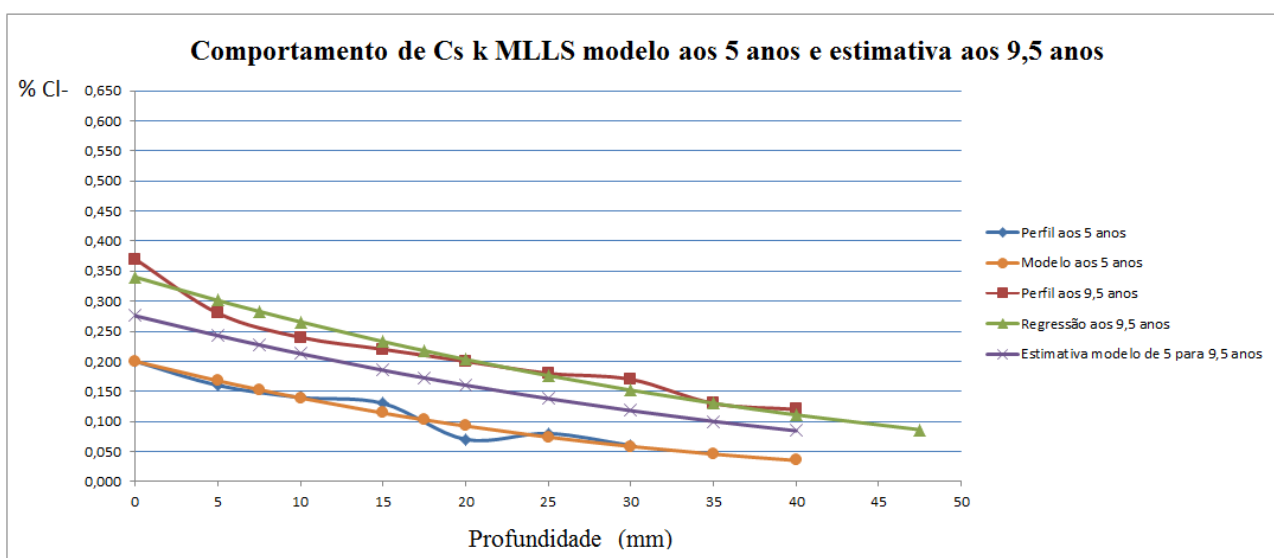


Figura 4.3 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.

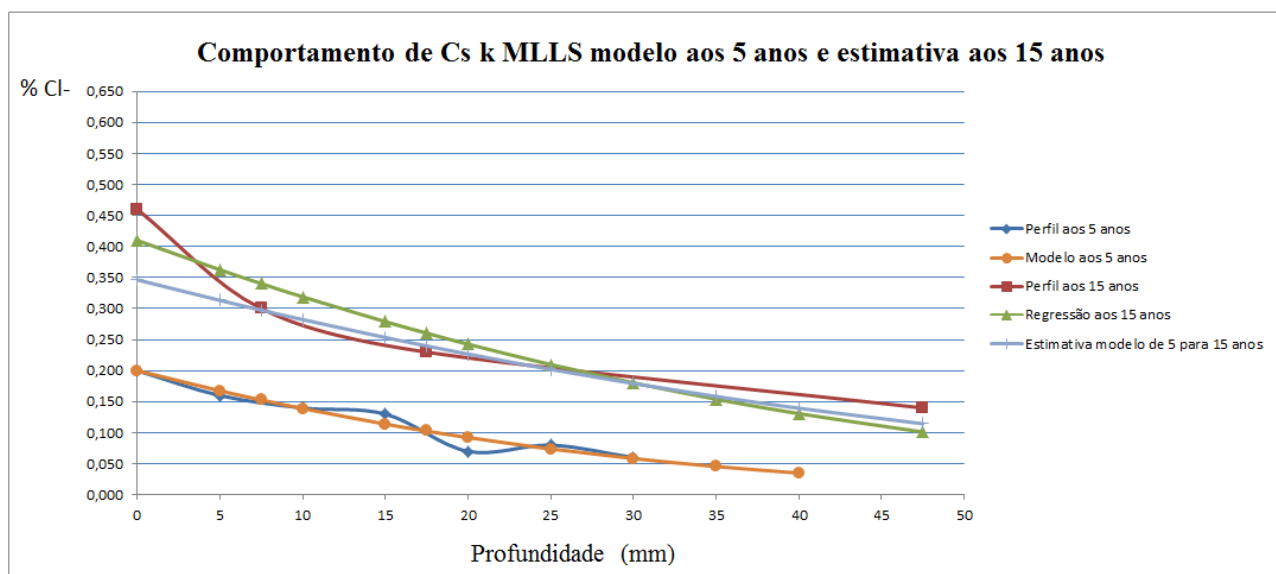


Figura 4.4 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.

A Figura 4.5, com todos os dados, de perfis, regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos e a previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 5 para 9,5 e 15 anos.

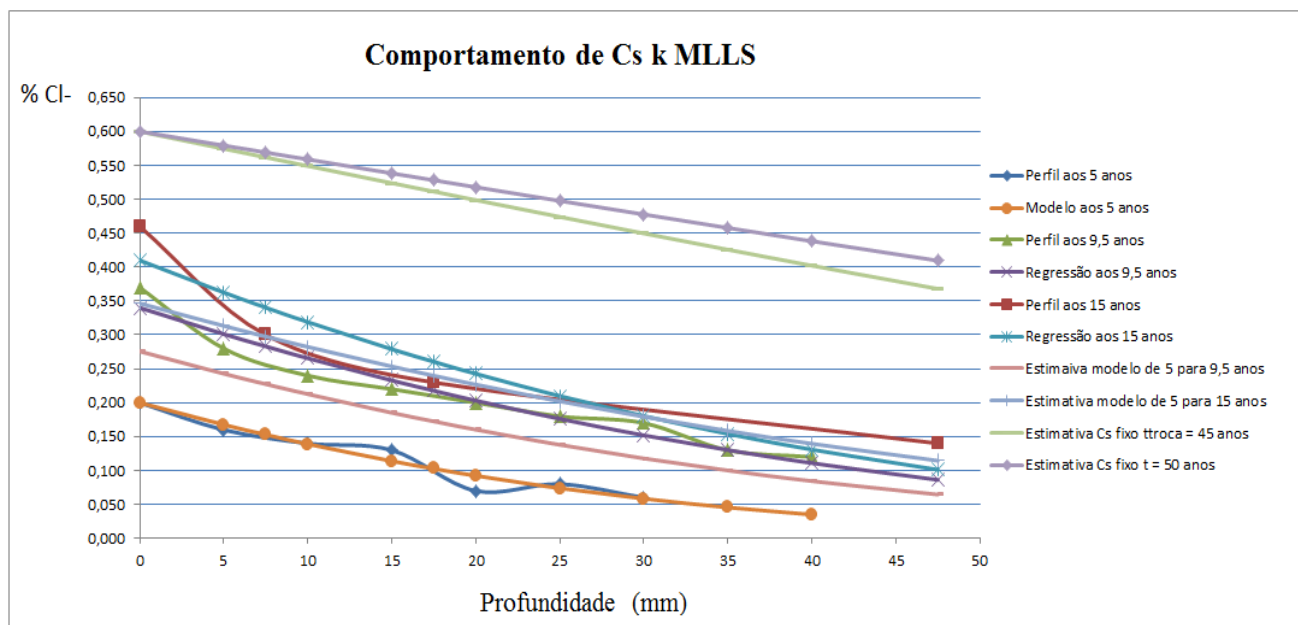


Figura 4.5 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.

Para o tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos considerou-se a idade no qual o teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do tetrápode, $C_s = 0,600\%$, em relação a massa de concreto.

Portanto, para o perfil na idade de 5 anos, obtendo um t_{troca} de 45 anos e calculando um tempo equivalente de 27,77 anos, com Cs constante de 0,600%, através da Eq. 2.4, foi possível traçar o perfil de cloretos para a idade de 50 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.1 e 4.2), representado por estimativa Cs fixo $t = 50$ anos.

Já a Figura 4.6 apresenta as medições de cloretos em função da profundidade no concreto dos tetrápodes para o microambiente MLLS na idade de 9,5 anos com a transposição do pico para a origem do eixo x (perfil aos 9,5 anos ajustado com o pico na origem). Com os valores desse perfil também se realizou a regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.2) representada na fig. 4.6 por modelo aos 9,5 anos. Com a regressão obteve-se o teor de cloretos na superfície do concreto pelo menor erro quadrado, já que o pico foi deslocado para a origem, chegando ao valor de 0,3400 % em relação à massa de concreto. Com o valor de Cs e o respectivo ano de estudo do microambiente MLLS (5, 9,5 ou 15), neste caso 9,5, e com um k obtido através da Eq. 2.20 de $0,1103\% \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Tem-se o coeficiente de difusão de cloretos foi de $D = 148,0422\text{ mm}^2/\text{ano}$.

Da mesma forma que o perfil aos 5 anos e com o objetivo de traçar um perfil de previsão, considerando além da variação de Cs a formação de pico no perfil, do comportamento do percentual de cloretos aos 5 e 15 anos, manteve-se os mesmos valores de D e k encontrados aos 9,5 anos, porém alterando a idade para 5 e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.5 e 2.6). Com isso, Cs e Mt variam e apresentam os perfis de previsão para as idades (Figuras 4.7, 4.8).

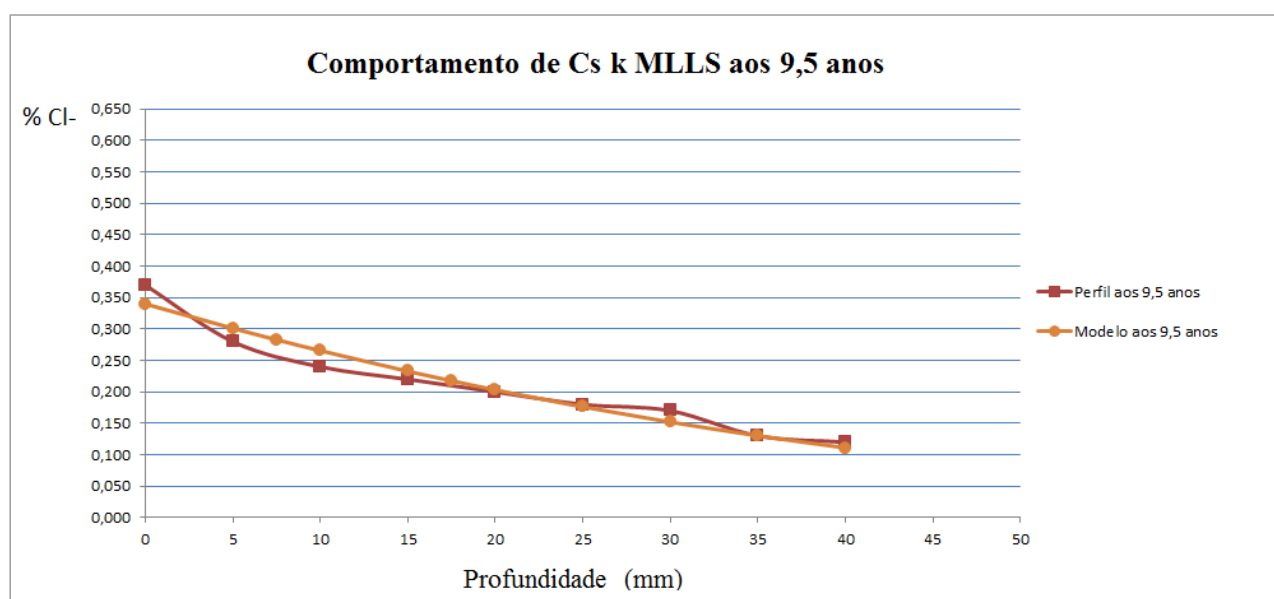


Figura 4.6 – Comportamento do % de Cl^- MLLS (k) aos 9,5 anos.

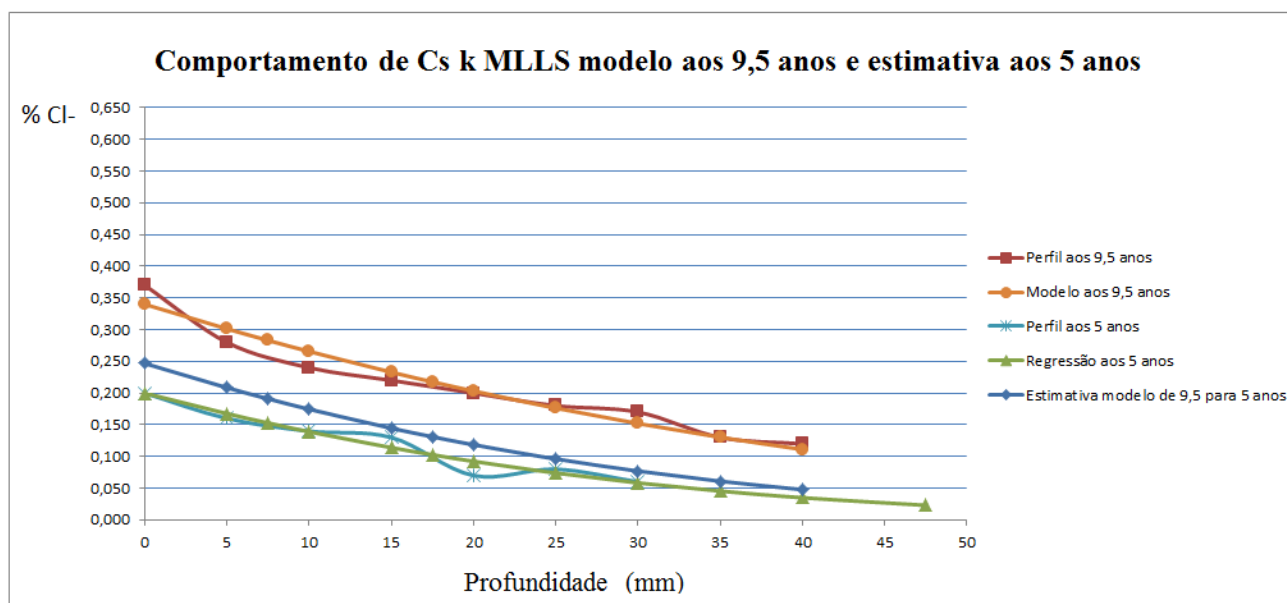


Figura 4.7 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.

A Figura 4.9 ilustra todos os perfis, as regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos e a previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 9,5 para 5 e 15 anos.

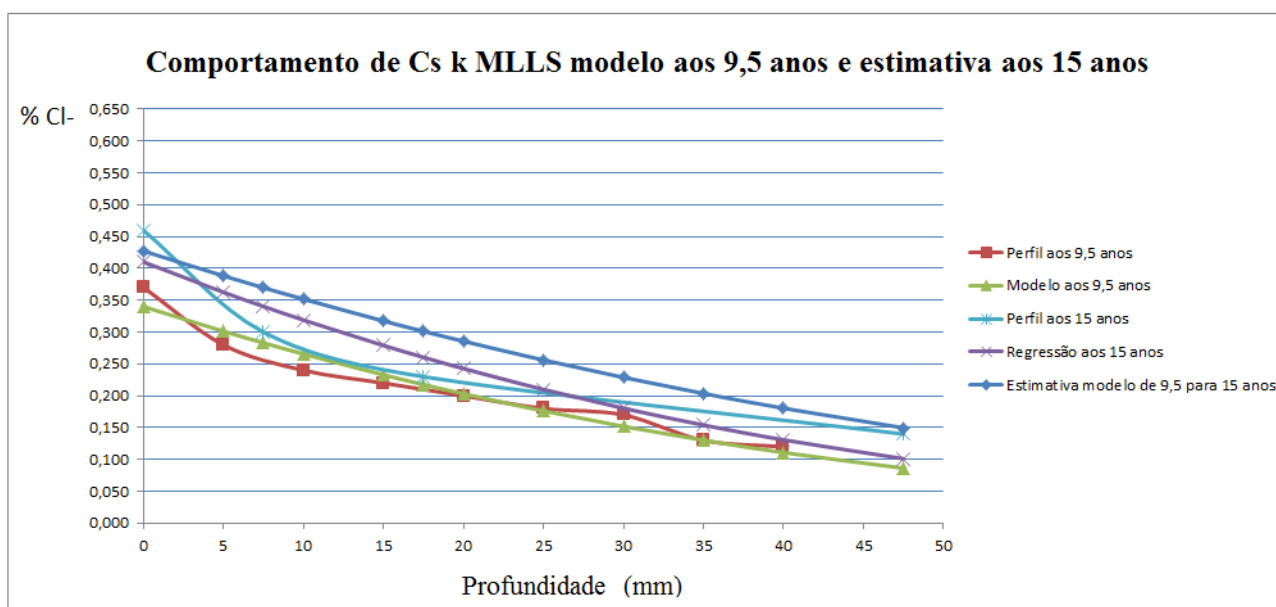


Figura 4.8 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.

Também se considerou a idade no qual o teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do tetrápode, Cs = 0,600 %, em relação à massa de concreto.

Portanto, para o perfil na idade de 9,5 anos, obtendo um t_{troca} de 29,58 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.4) e calculando um tempo equivalente de 18,26 anos, com C_s constante de 0,600%, através da Eq. 2.4, traçou-se o perfil de cloretos para a idade de 50 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.3), representado por estimativa C_s fixo $t = 50$ anos.

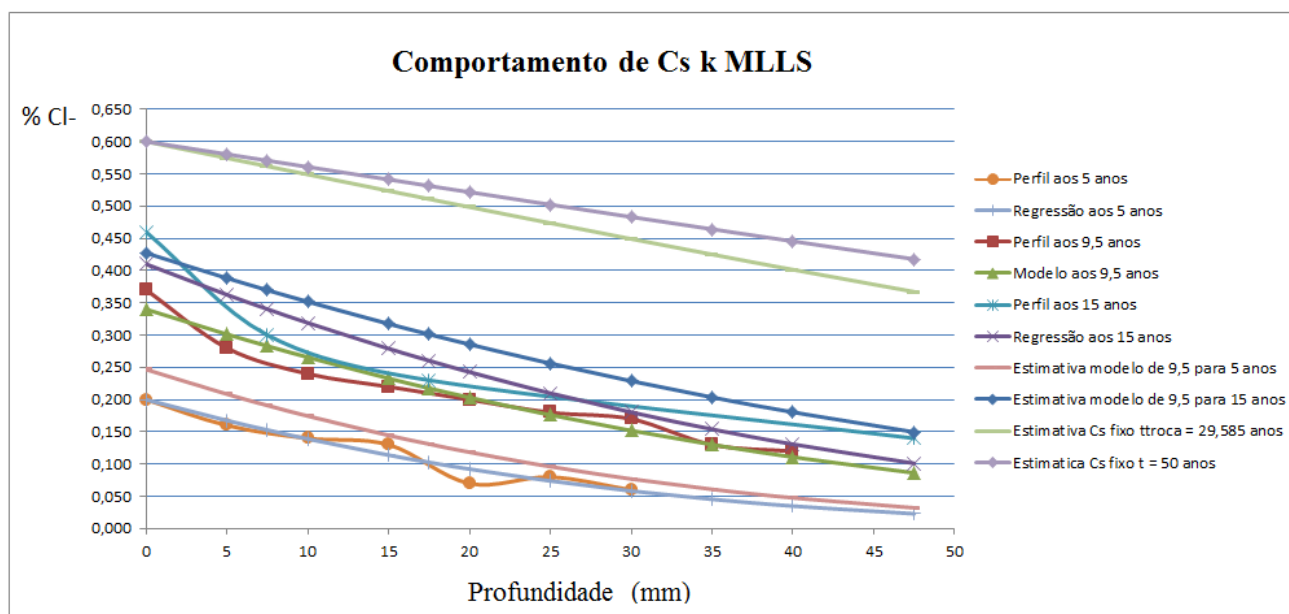


Figura 4.9 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos.

E, na Figura 4.10, são apresentadas as medições de cloretos em função da profundidade no concreto dos tetrápodes para o microambiente MLLS na idade de 15 anos com a transposição do pico para a origem do eixo x (perfil aos 15 anos ajustado com o pico na origem). Com os valores desse perfil e pela regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.3), representada na Fig. 4.10 por modelo aos 15 anos, determinou-se o teor de cloretos na superfície do concreto pelo menor erro quadrado, já que o pico foi deslocado para a origem, chegando ao valor de 0,4100 % em relação à massa de concreto. Com o valor de C_s e o ano de estudo do microambiente MLLS (5, 9,5 ou 15), neste caso 15, obteve um k através da Eq. 2.17 de $0,1059 \text{ \%} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. E, o coeficiente de difusão de cloretos encontrado foi de $D = 90,6694 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

Para traçar um perfil de previsão, considerando além da variação de C_s a formação de pico no perfil, do comportamento do percentual de cloretos aos 15 anos, mantiveram-se os mesmos valores de D e k encontrados aos 15 anos (ANEXO 2 - Tab. 2.7).

Com a finalidade de traçar um perfil de previsão, considerando além da variação de C_s a formação de pico no perfil, do comportamento do percentual de cloretos aos 5 e 9,5 anos, manteve-

se os mesmos valores de D e k encontrados aos 15 anos, porém alterando a idade para 5 e 9,5 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.8 e 2.9). Com isso, Cs e Mt variaram e apresentaram os perfis de previsão para as respectivas idades (Fig. 4.11, 4.12).

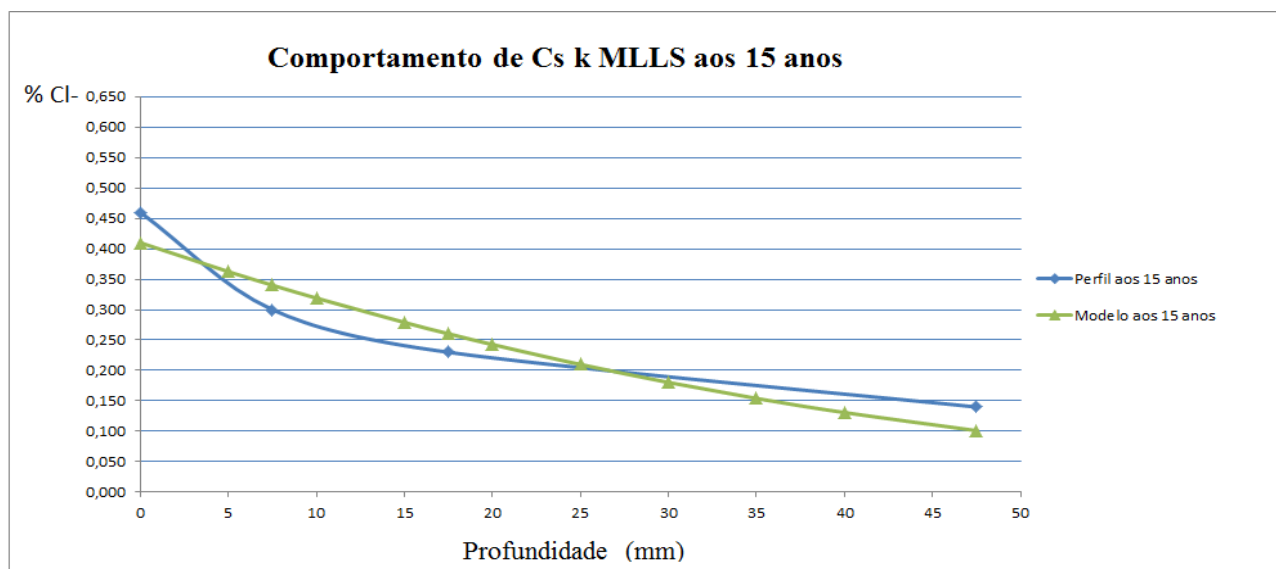


Figura 4.10 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) aos 15 anos.

O ideal é sempre estimar para frente e não para trás, mas a fim de observar o comportamento de 15 para 5 anos (ou de 15 para 9,5 anos) e 5 para 15 anos (ou 5 para 9,5 anos) coincidem entre si e para verificar o momento em que houve despasse de uma armadura realizou-se esse procedimento.

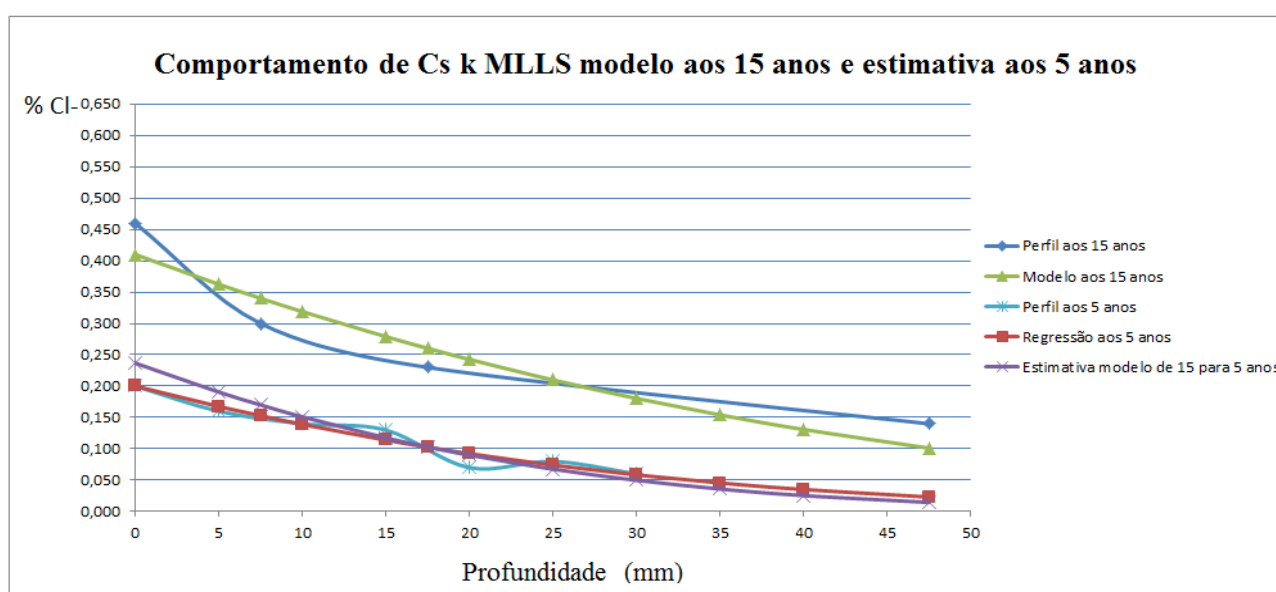


Figura 4.11 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloro aos 5 anos.

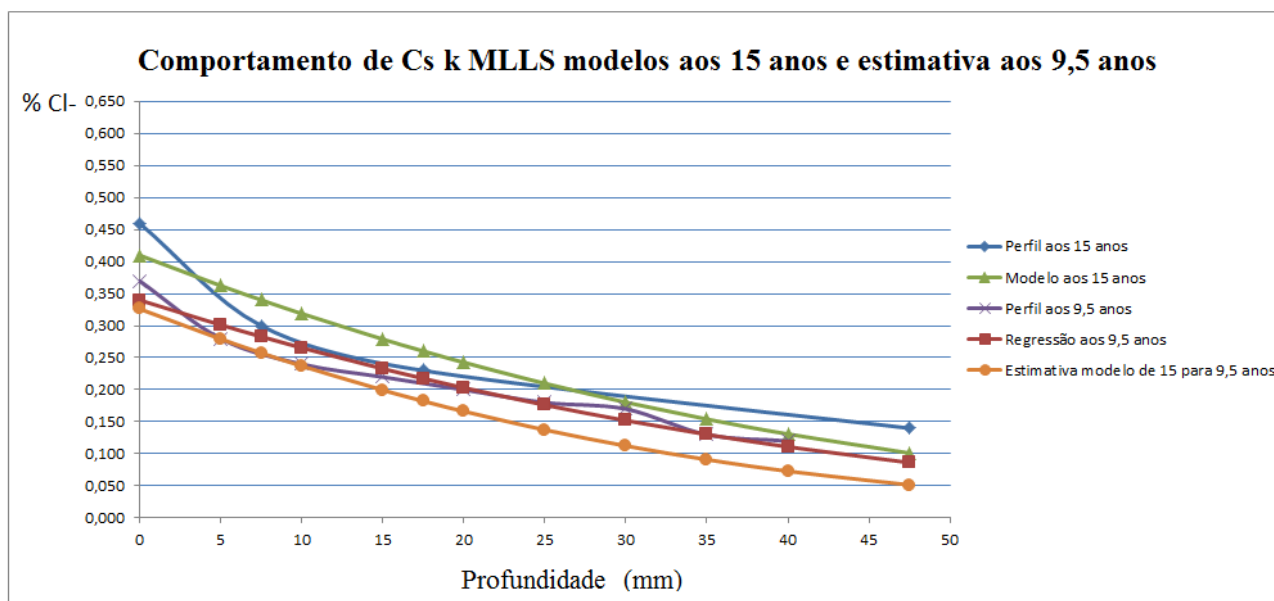


Figura 4.12 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.

A Figura 4.13, obtém o conjunto dos perfis, as regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos e a previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 15 para 5 e 9,5 anos.

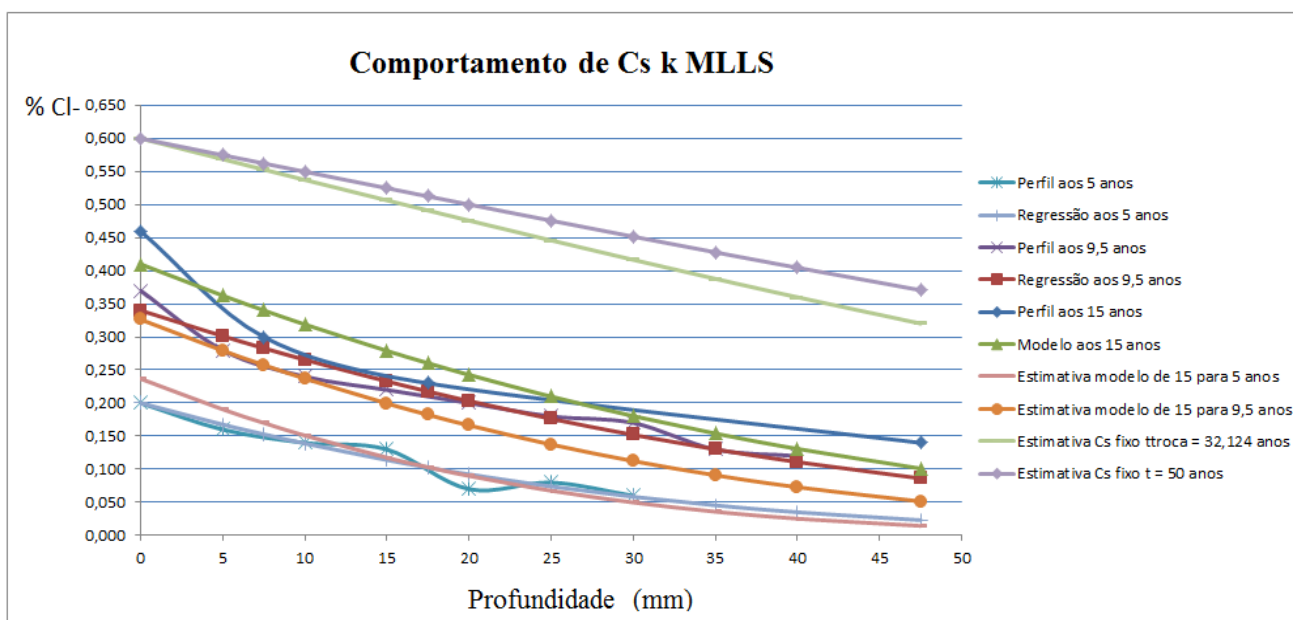


Figura 4.13 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 9,5 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.

O teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do tetrápode em $C_s = 0,600\%$, em relação à massa de concreto.

A partir do perfil aos 15 anos, obtendo um t_{troca} de 32,12 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.6) e calculando um tempo equivalente de 19,82 anos, com C_s constante de 0,600%, através da Eq. 2.8, traçou-se o perfil de cloretos para a idade de 50 anos (ANEXO 4 – Tab. 4.5), representado por estimativa C_s fixo $t = 50$ anos.

Todos os cálculos anteriores consideraram um valor de k para cada idade do microambiente MLLS do molhe leste da barra do Rio Grande. Contudo, também foi utilizado um keq , valor intermediário obtido por regressão entre as idades de 5 e 9,5, considerando a variação de C_s e a formação de pico para as estimativas da evolução dos perfis de cloretos.

Então, por regressão (ANEXO 5 – Tab. 5.1), novamente, para o microambiente MLLS obteve-se um keq de $0,103\% \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Para o keq foram realizados os mesmos procedimento feitos para as idade de 5, 9,5 e 15 anos. Neste caso, como não se levou em consideração a idade de 15 anos na regressão, por falta de referência, o keq estimado ficou apenas entre as idades de 5 e 9,5 anos.

Para esse microambiente, MLLS aos 5 anos, utilizando o keq , encontrasse um coeficiente de difusão de cloretos D de $134,709\text{ mm}^2/\text{ano}$ e um C_s de 0,2303 % em relação à massa de concreto. A área abaixo da curva de regressão Mt foi estimada segundo o ANEXO 1 – Tab. 1.1.

A Figura 4.14 mostra como se comporta o perfil aos 5 anos e seu modelo (aos 5 anos) (ANEXO 6 – Tab. 6.1) para um keq de $0,103\% \cdot \text{ano}^{-1/2}$ e um D de $134,709\text{ mm}^2/\text{ano}$.

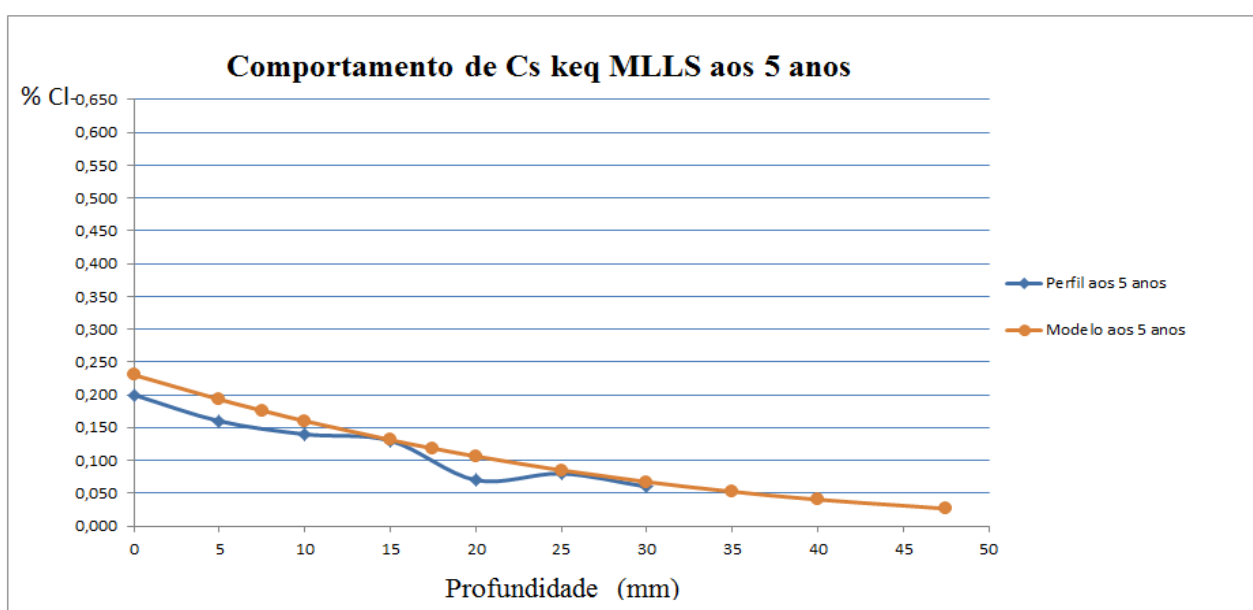


Figura 4.14 – Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 5 anos.

Já a Figura 4.15 apresenta os perfis de cloretos traçados a partir da transposição do pico para o eixo x, as regressões e as estimativas para os anos de 9,5 e 15 (ANEXO 6 – Tab. 6.2 e 6.3).

Com o teor de cloretos máximo em 0,600 % em relação à massa de concreto calculou-se um novo tempo, a partir de k_{eq} , para o qual o teor de cloretos na superfície (C_s) atinge o valor máximo, $t_{troca} = 33,933$ anos (ANEXO 7 = Tab. 7.2). A partir do tempo de troca obteve-se um t_{eq} de 20,947, tempo no qual C_s não varia mais. Com o coeficiente de difusão de cloretos em $D = 134,709$ mm²/ano e através da Eq. 2.8 foi possível traçar o perfil o qual C_s atinge o valor máximo de 0,600 %, realizando o mesmo para a idade de 50 anos.

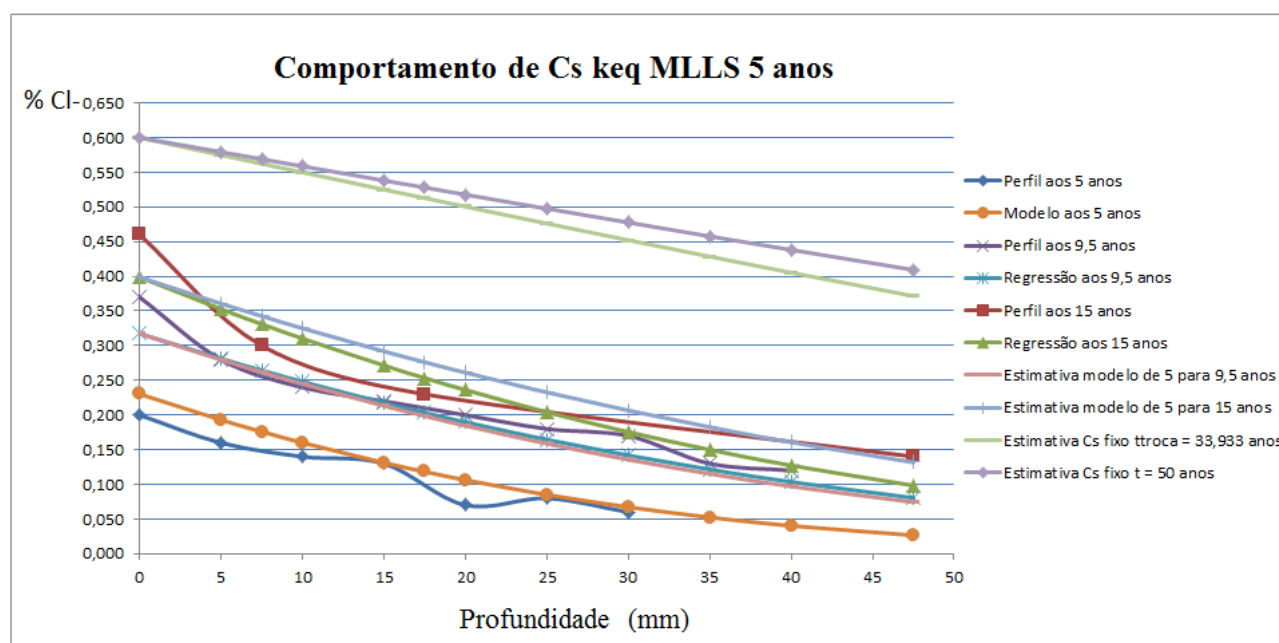


Figura 4.15 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLS (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos.

Aos 9,5 anos, com o mesmo k_{eq} , mostra-se o modelo aos 9,5 anos (Fig. 4.16) (ANEXO 6 – Tab. 6.4) e as previsões de estimativas do teor de cloretos para 5 e 15 anos (Fig. 4.17) (ANEXO 6 – Tab. 6.5 e 6.6).

Considerando o teor máximo em 0,600 % em relação à massa de concreto obteve-se um $t_{troca} = 33,933$ anos (ANEXO 7 = Tab. 7.4). Com o tempo de troca calculou-se um t_{eq} de 20,947. E, com coeficiente de difusão de cloretos em $D = 148,042$ mm²/ano, através da Eq. 2.8 traçou-se o perfil o qual C_s atinge o valor máximo de 0,600 %, aplicando também para a idade de 50 anos (Fig. 4.17) (ANEXO 7 – Tab. 7.3).

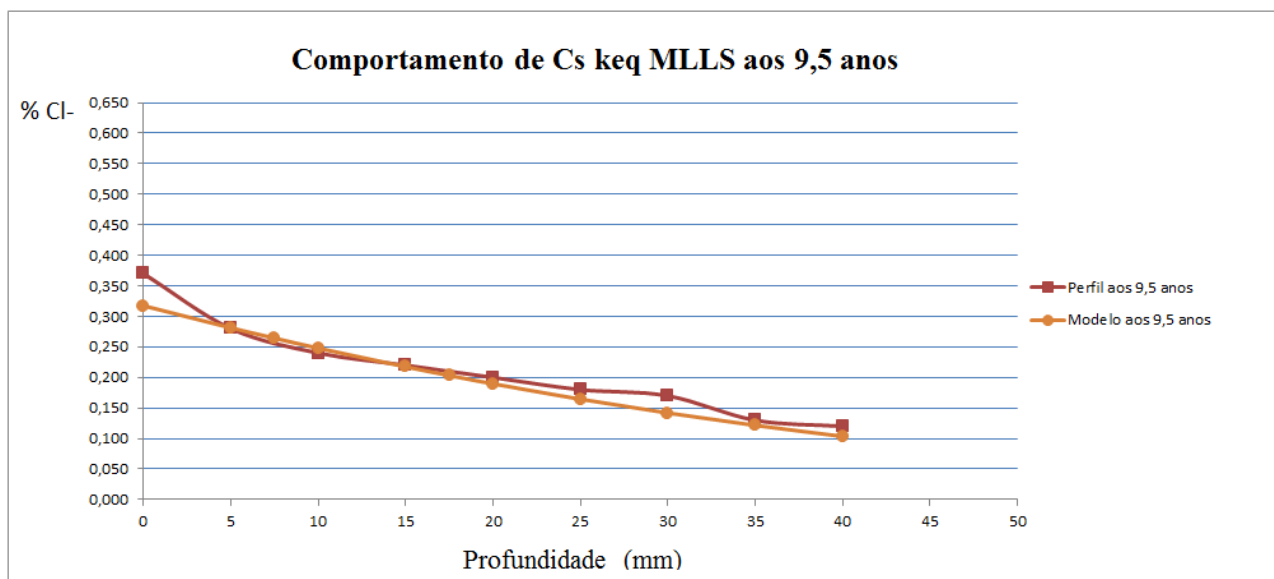


Figura 4.16 – Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 9,5 anos.

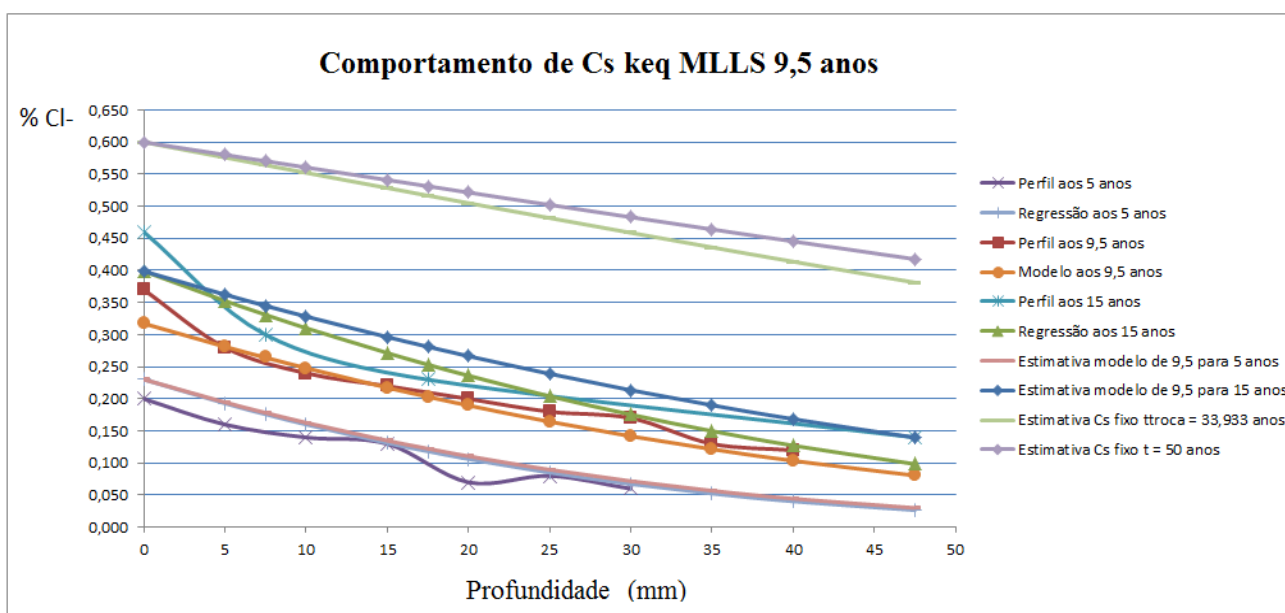


Figura 4.17 – Comportamento do % de Cl^- MLLS (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.

A Tabela 4.1., em resumo, apresenta todos os resultados referentes ao comportamento do teor de cloretos no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS, para o microambiente MLLS para as três idades de estudo com k e com as duas idades com keq .

Tabela 4.1 – Resultados obtidos a partir da análise do microambiente MLLS dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.

Microambiente MLLS					
Idade (anos)	Cs em relação ao concreto	k (mm.ano^{-1/2})	D (mm²/ano)	teq (anos)	tempo de troca (anos)
5	0,200	0,089	134,709	27,778	45,000
9,5	0,340	0,110	148,042	18,262	29,585
15	0,410	0,106	90,669	19,829	32,124
keq 5 anos	0,230	0,103	134,709	20,947	33,933
keq 9,5 anos	0,317	0,103	148,042	20,947	33,933

Nota-se que o comportamento de Cs em relação a massa de concreto aumenta com o aumento da idade passando de 0,200 % aos 5 anos para 0,340 % aos 9,5 anos e para 0,410 % aos 15 anos. Em conformidade com Silva (2010) isso já era de se esperar, visto que as idades analisadas ainda são pequenas, tendendo a aumentar com o tempo.

Já o coeficiente de difusão de cloretos D passa de 134,709 mm²/ano aos 5 anos para 148,042 mm²/ano aos 9,5 anos e diminui aos 15 anos, passando para 90,669 mm²/ano.

4.2.1 Comentários sobre MLLS k aos 5 anos

O perfil de cloretos medido, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, decresce da superfície até a profundidade de 20 mm tendo um acréscimo dos 20 aos 25 mm e voltando a decrescer após os 25 mm (Fig. 4.2). A correlação entre os pontos (perfil/regressão) se mostrou coerente conforme apresentado na curva de regressão (modelo aos 5 anos) do perfil aos 5 anos.

A partir do modelo obtido aos 5 anos, estimando para 9,5 anos (Fig. 4.3), considerando também a formação de pico, fica evidente que os resultados não foram satisfatórios, não demonstrando similaridade com o perfil e a regressão aos 9,5 anos.

Por outro lado, com o modelo obtido aos 5 anos, estimando para 15 anos (Fig. 4.4), apresentou bons resultados, porém divergindo apenas nas profundidades primárias (de 0 a 7,5 mm).

Aos 5 anos também foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 45 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.5), no qual pressupõe-se, no tempo de troca, que Cs não varie mais

com o aumento da idade do concreto, ou seja, estabilize em 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.2.2 Comentários sobre MLLS k aos 9,5 anos

O perfil de cloretos medido, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, somente decresce da superfície até a profundidade de 40 mm (Fig. 4.6). A curva de regressão para esse perfil também apresentou boa correlação entre os pontos.

O modelo obtido aos 9,5 anos, estimando para 5 anos (Fig. 4.7), considerando também a formação de pico, mostra que os resultados também não foram satisfatórios, o que já era esperado, visto que a estimativa de 5 para 9,5 anos também não foi adequada.

O modelo obtido aos 9,5 anos, estimando para 15 anos (Fig. 4.8), apresentou resultados com muito pouca similaridade divergindo em diversas profundidades (de 5 a 40 mm).

Aos 9,5 anos também foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 29,585 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.9), com Cs não variando mais com o aumento da idade do concreto, em 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.2.3 Comentários sobre MLLS k aos 15 anos

O perfil de cloretos medido aos 15 anos, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, somente decresce da superfície até a profundidade de 47,5 mm (Fig. 4.10). A curva de regressão para esse perfil não apresentou boa correlação entre os pontos. Isso se pode verificar pela irregularidade do perfil e por possuir pontos medidos bastante dispersos entre si.

Para o modelo obtido aos 15 anos, estimando para 5 anos (Fig. 4.11), considerando também a formação de pico, apresentou-se resultados bem coerentes, da mesma forma que o modelo aos 5 anos estimado para a idade de 15 anos.

Já o modelo obtido aos 15 anos, estimando para 9,5 anos (Fig. 4.12), apresentou resultados com muito pouca similaridade. Apenas nas primeiras profundidades (de 0 a 10 mm) que a estimativa encontra-se similar ao perfil e a regressão aos 9,5 anos.

Da mesma forma que para os 5 e 9,5 anos, foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 32,124 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.13), com Cs não variando mais com o aumento da idade do concreto, Estabilizando também aos 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.2.4 Comentários sobre MLLS keq aos 5 anos

Utilizando keq, k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos, percebe-se que o perfil de cloretos medido aos 5 anos, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, aumenta e decresce com o aumento da profundidade, conforme o perfil aos 5 anos utilizando k (Fig. 4.14). A curva de regressão utilizando keq se mostrou menos eficaz comparado com a utilização de k.

Para o modelo obtido aos 5 anos, estimando para 9,5 anos, utilizando keq (Fig. 4.15), considerando também a formação de pico, ao contrário da estimativa de 5 para 9,5 anos utilizando k, apresentou bons resultados, coincidindo bastante sobre a regressão aos 9,5 anos.

De 5 para 15 anos, utilizando keq (Fig. 4.15), também apresentou bons resultados, divergindo entre os pontos centrais da curva de 15 anos e muito próximo nos extremos da curva.

Aos 5 anos, com a utilização do keq, foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 33,933 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.15), mantendo Cs constante em 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.2.5 Comentários sobre MLLS keq aos 9,5 anos

Utilizando keq, k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos, salienta-se que o perfil de cloretos medido aos 9,5 anos, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, se mostrou melhor em relação a utilização de k (Fig. 4.16). A correlação entre os pontos (medido/regressão) foi mais coerente e muito boa.

O modelo obtido aos 9,5 anos, estimando para 5 anos, utilizando keq (Fig. 4.17), considerando também a formação de pico, e inverso a estimativa de 5 para 9,5 anos utilizando k, apresentou bons resultados, coincidindo sobre a regressão de 5 anos.

E, o modelo de 9,5 anos, estimado para 15 anos, utilizando keq (Fig. 4.17), foi melhor que o apresentado de 9,5 para 15 anos utilizando k.

Aos 9,5 anos, com a utilização do k_{eq} , foram estimados os perfis para C_s fixo no tempo de troca de 33,933 anos, sabendo que o k_{eq} é o mesmo para as idades de 5 e 9,5 anos, obtido por regressão entre eles e para a idade de 50 anos (Fig. 4.17), permanecendo C_s invariável em 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.3 Análise do microambiente localizado no molhe leste, voltado para leste e em cota média - MLLM

De acordo com a Figura 4.18, que traz as medições de cloretos em função da profundidade no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS para o microambiente MLLM na idade de 5 anos, com a transposição do pico para a origem do eixo x (perfil aos 5 anos ajustado com o pico na origem), foi possível realizar a regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.4) representada na fig. 4.18 por modelo aos 5 anos. A curva de regressão determina o teor de cloretos na superfície do concreto pelo menor erro quadrado, já que o pico foi deslocado para a origem, chegando ao valor de 0,300 % em relação à massa de concreto. Com C_s obtido para a idade de 5 anos do microambiente MLLM calculou-se um k , através da equação 2.20, de $0,1342 \text{ \%} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. E, assim, chegando ao valor do coeficiente de difusão de cloretos de $D = 798,58 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

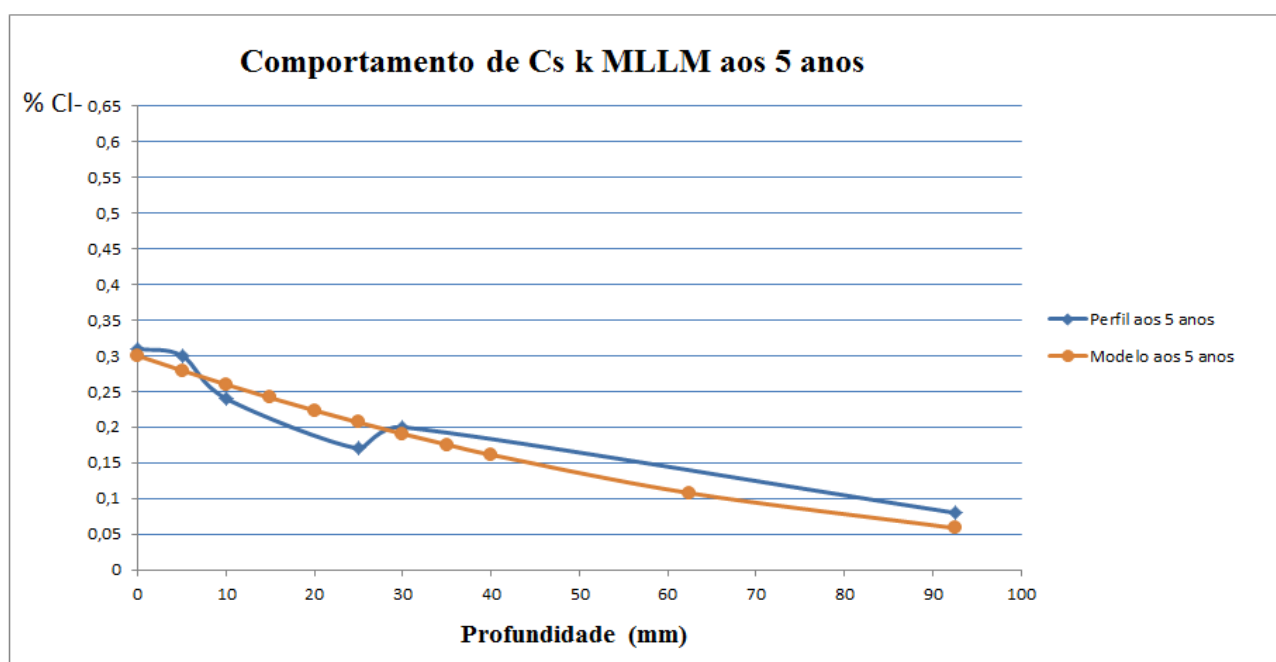


Figura 4.18 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5 anos.

Para prever a estimativa de 5 para 9,5 e 5 para 15 anos, considerando além da variação de Cs a formação de pico no perfil, o comportamento do percentual de cloretos foram mantidos os valores de D e k encontrados aos 5 anos, no entanto alterando a idade para 9,5 e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.11 e 2.12). Portanto, Cs e Mt se comportam diferentes quando altera-se a idade (Fig. 4.19, 4.20).

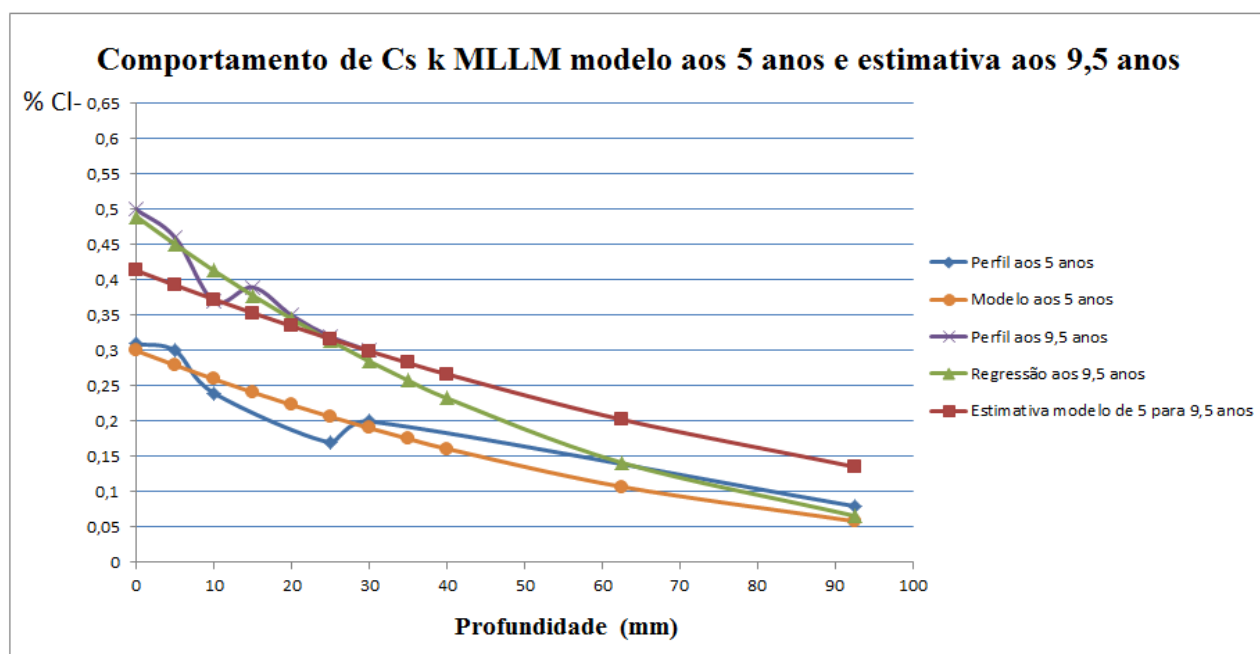


Figura 4.19 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.

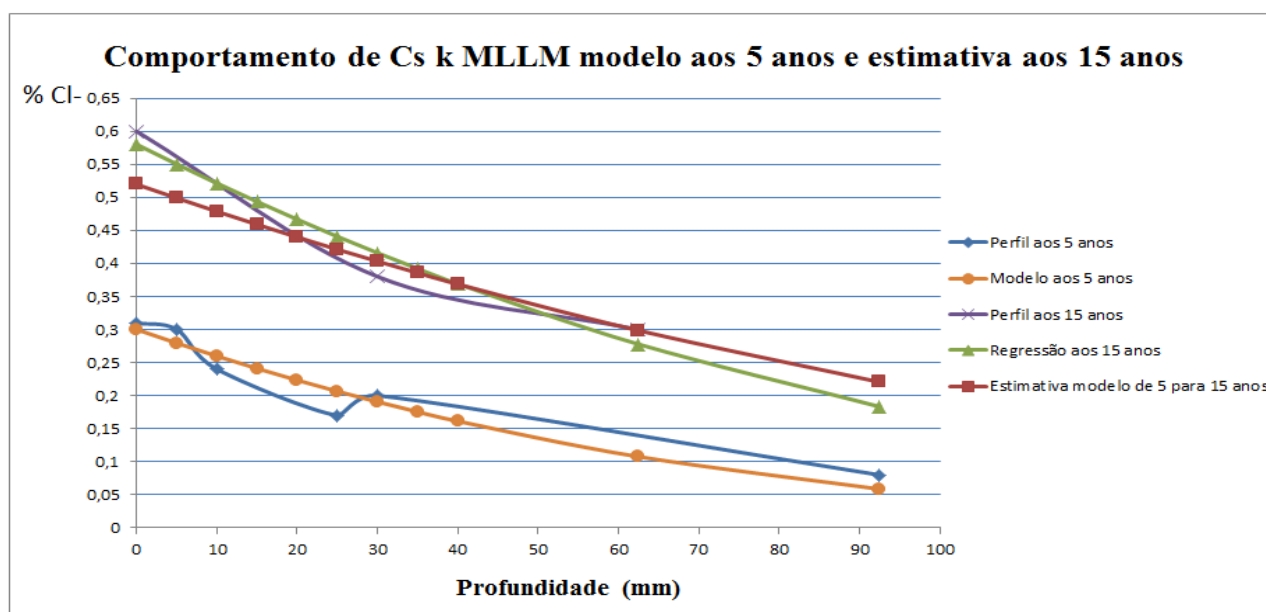


Figura 4.20 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (k) modelo aos 5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.

Na Figura 4.21 são apresentados os perfis, as regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos e a previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 5 para 9,5 e 15 anos.

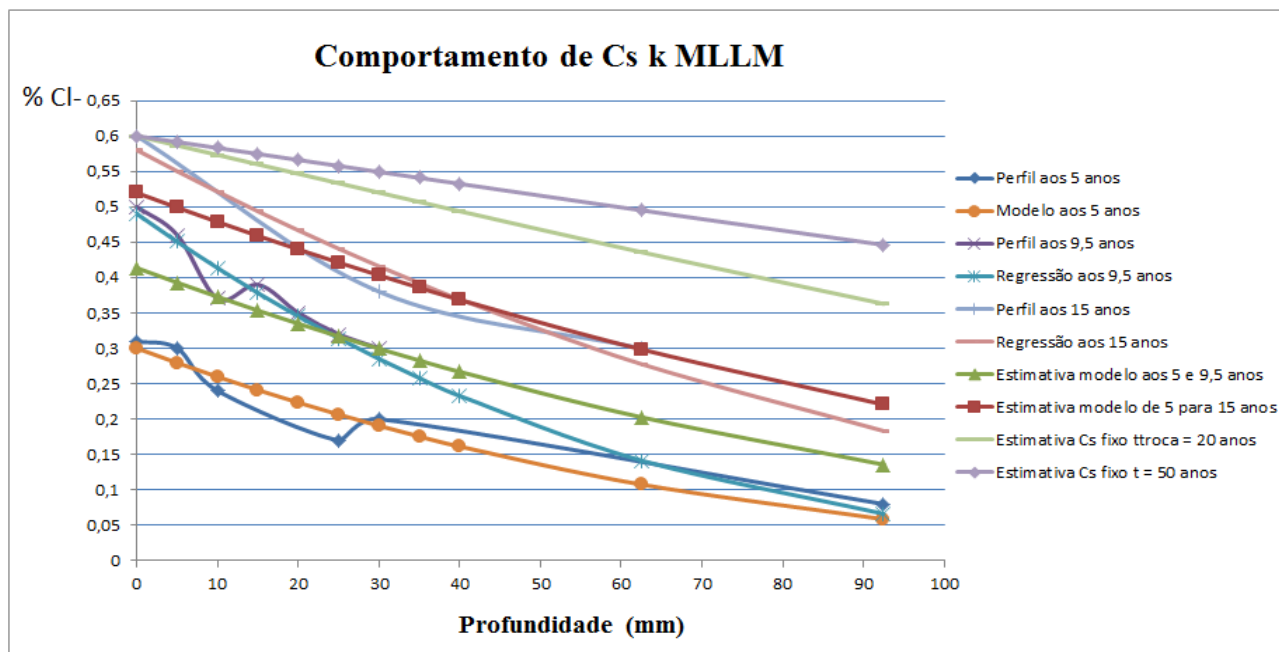


Figura 4.21 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.

Também são mostrados, na Fig. 4.21, o tempo de troca, tempo a partir do qual considera-se Cs constante e a estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos quando o teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do concreto, $C_s = 0,600$ %, em relação a massa de concreto.

Para o perfil na idade de 5 anos, MLLM, tem-se um t_{troca} de 20 anos. Com ele, calcula-se o tempo equivalente de 12,346 anos, pela Eq. 4.1, com C_s constante de 0,600 %. E, através da Eq. 2.8, se traça o perfil de cloretos para a idade de 50 anos e para o tempo de troca, 20 anos, (ANEXO 4 – Tab. 4.7 e 4.8), representado na fig. 4.21 por estimativa Cs fixo $t = 50$ anos e estimativa Cs fixo $t_{troca} = 20$ anos.

As medições de cloretos em função da profundidade no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS para o microambiente MLLM na idade de 9,5 anos, com o deslocamento do pico para a origem do eixo x (perfil aos 9,5 anos ajustado com o pico na origem), são representadas na fig. 4.22, assim como a regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.5) representada na Fig. 4.22 por modelo aos 9,5 anos. Pela regressão, o teor de cloretos na superfície do concreto, pelo menor erro quadrado, com o pico na origem, tem-se $C_s = 0,4900$ % em relação à massa de concreto.

O valor do k obtido, através da Eq. 2.17, foi de $0,1590 \text{ \%} \cdot \text{ano}^{-1/2}$ e valor do coeficiente de difusão de cloretos de $D = 303,04 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

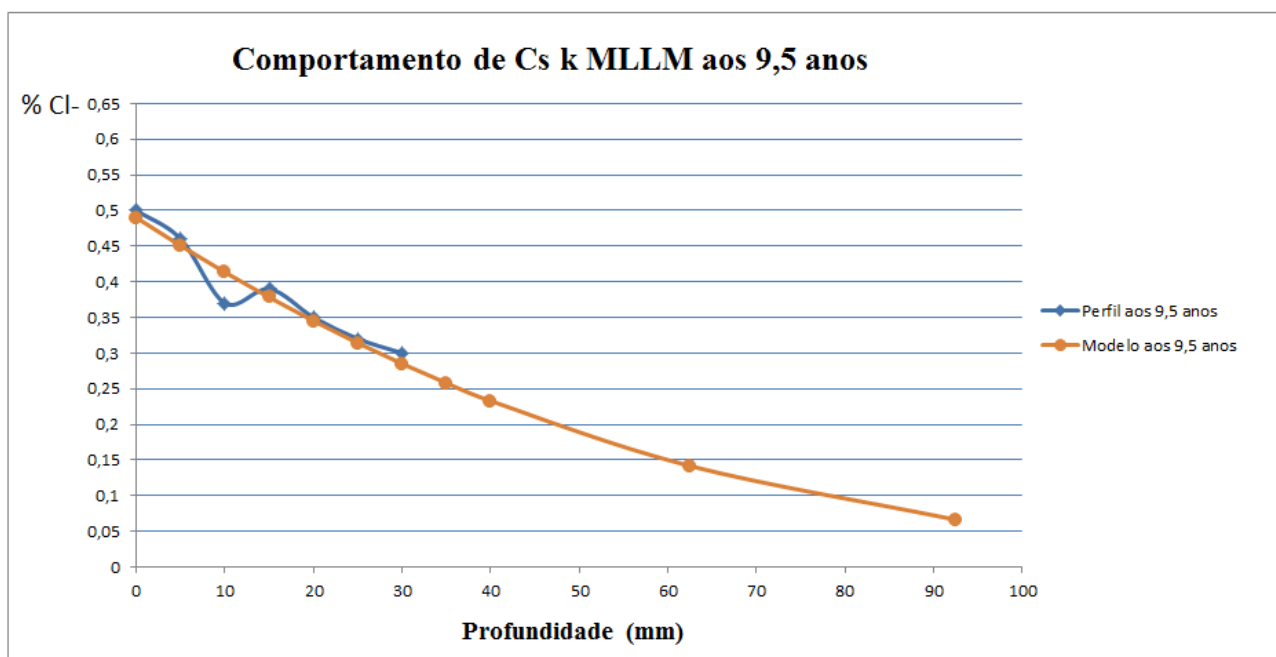


Figura 4.22 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 9,5 anos.

Embora não se tenha pontos medidos, para os 9,5 anos, até os 92,5 mm, esticou-se o modelo para padronizar com o perfil medido aos 5 anos (até 92,5 mm).

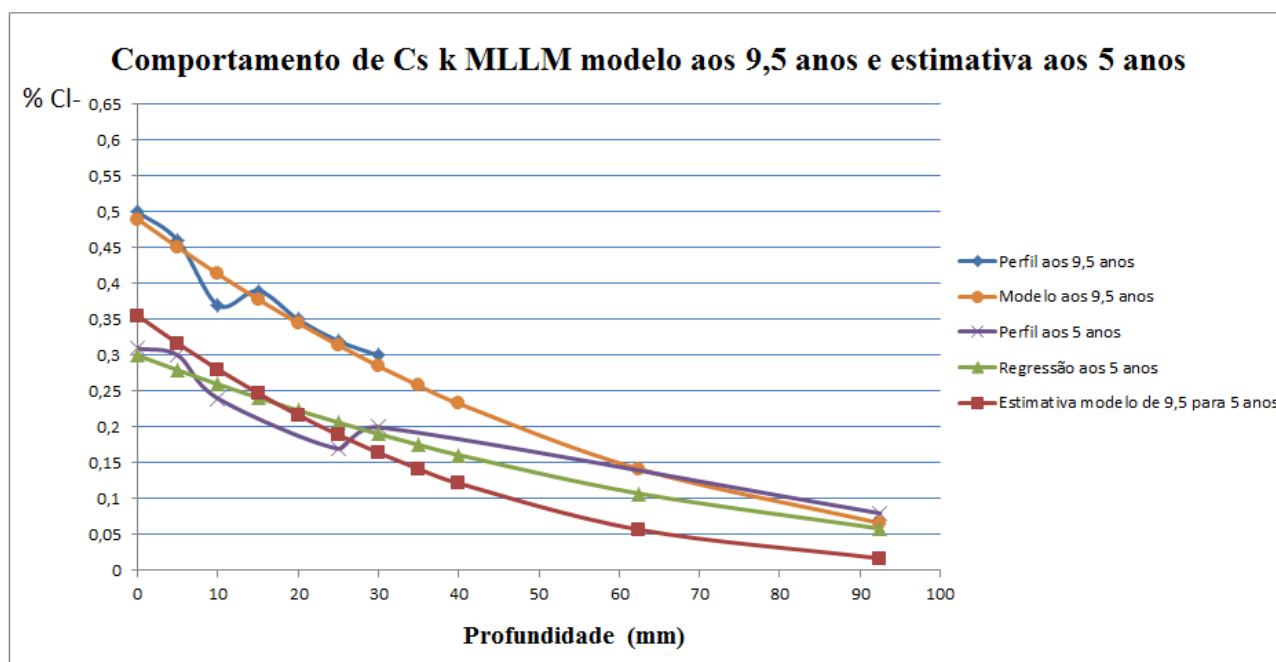


Figura 4.23 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.

As estimativas aos 5 e 15 anos, pelo modelo de 9,5 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.13), considerando além da variação de Cs a formação de pico no perfil, são representadas nas Fig. 4.23 e 4.24. Foram mantidos os valores de D e k encontrados aos 9,5 anos, alterando a idade para 5 e 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.14 e 2.15). Logo, Cs e Mt variam quando altera a idade.

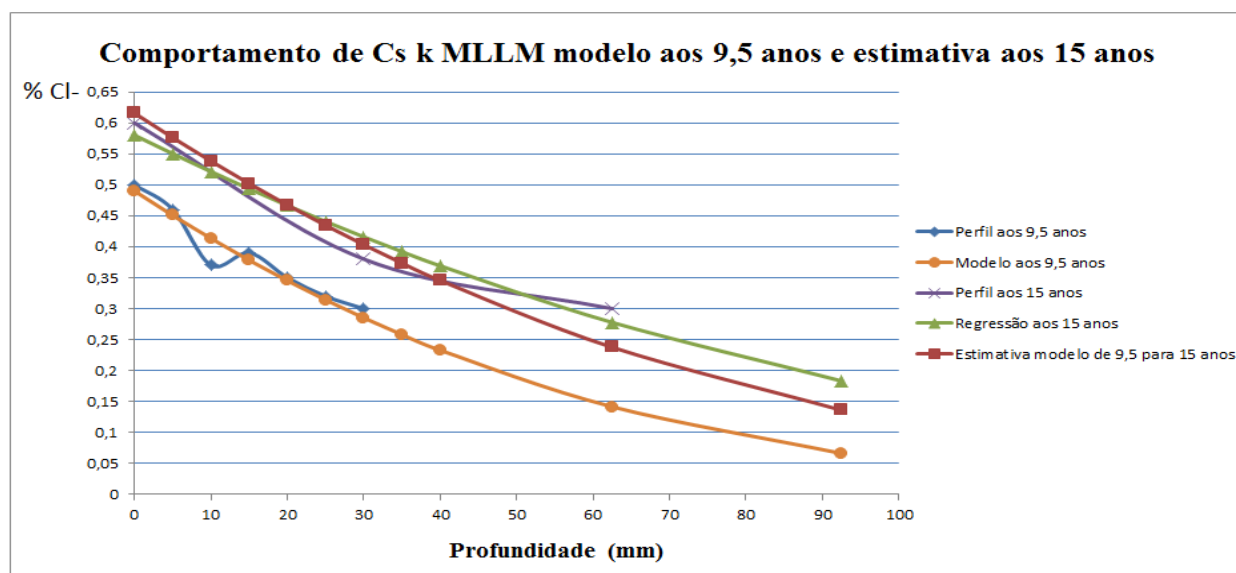


Figura 4.24 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (k) modelo aos 9,5 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos.

A Figura 2.25 representa, os perfis, as regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos.

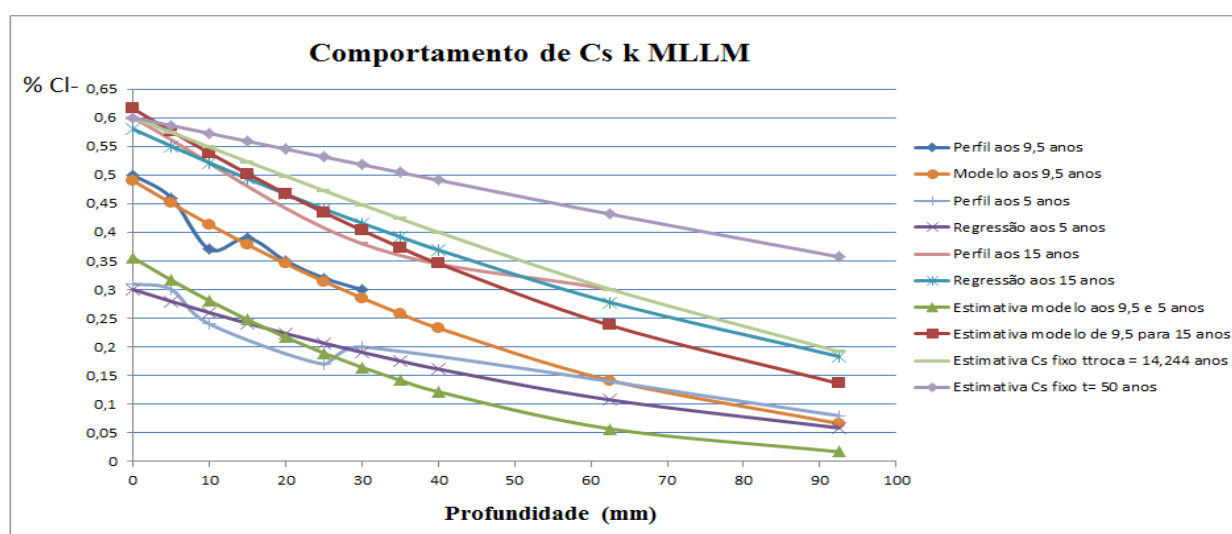


Figura 4.25 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.

A previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 9,5 para 5 e 15 anos e tempo de troca, para C_s invariável e a estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos quando o teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do concreto, $C_s = 0,600 \%$, em relação a massa de concreto também estão contidos na Fig. 2.25.

A Figura 2.26 mostra as medições de cloretos em função da profundidade no concreto para o microambiente MLLM na idade de 15 anos, deslocando o pico para a origem do eixo x (perfil aos 15 anos ajustado com o pico na origem), apresentado na fig. 4.26 junto com a regressão (ANEXO 1 – Tab. 1.6) representada por modelo aos 15 anos. O C_s do concreto, pelo menor erro quadrado, com o pico na origem, ficou $0,5800 \%$ em relação à massa de concreto, quase atingindo o valor máximo no qual estabiliza e se mantém constante. O k obtido, através da Eq. 2.17, foi de $0,14,98 \%.ano^{-1/2}$ e valor do coeficiente de difusão de cloretos $D = 477,46 \text{ mm}^2/ano$.

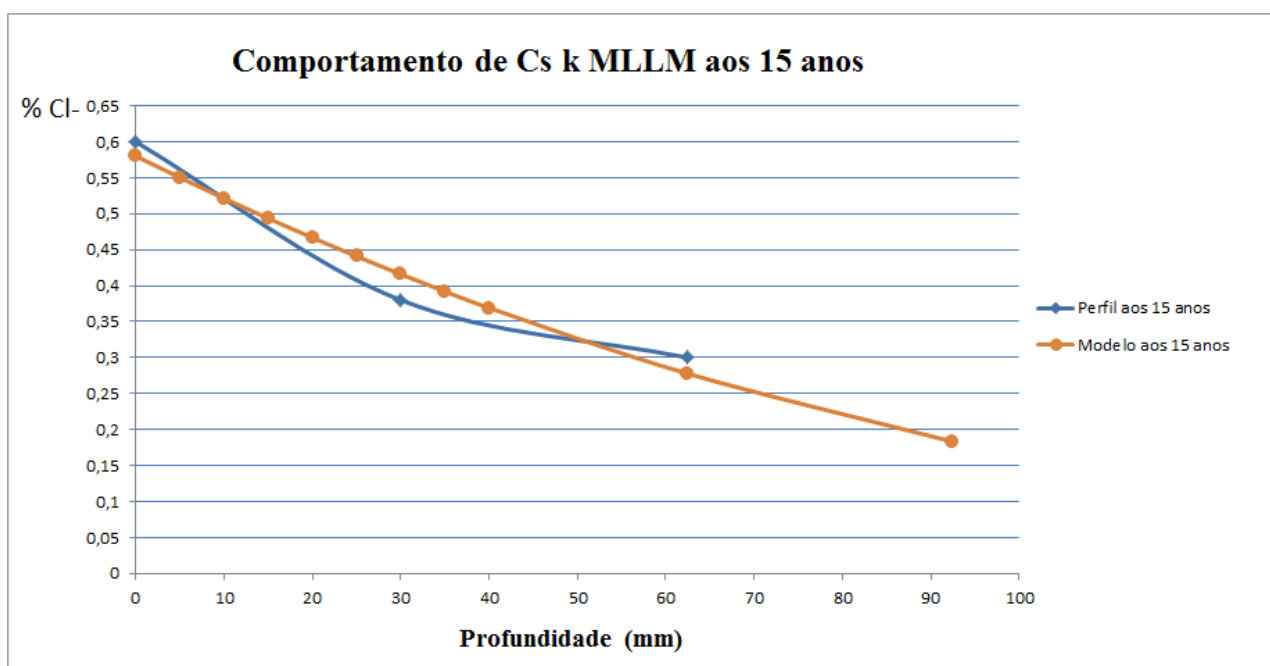


Figura 4.26 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 15 anos.

Para as previsões aos 5 e 9,5 anos, pelo modelo de 15 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.16), considerando além da variação de C_s a formação de pico no perfil, são apresentadas nas Fig. 4.27 e 4.28 as suas respectivas curvas. D e k são os mesmos aos 15 anos, modificando a idade para 5 e 9,5 anos (ANEXO 2 – Tab. 2.17 e 2.18).

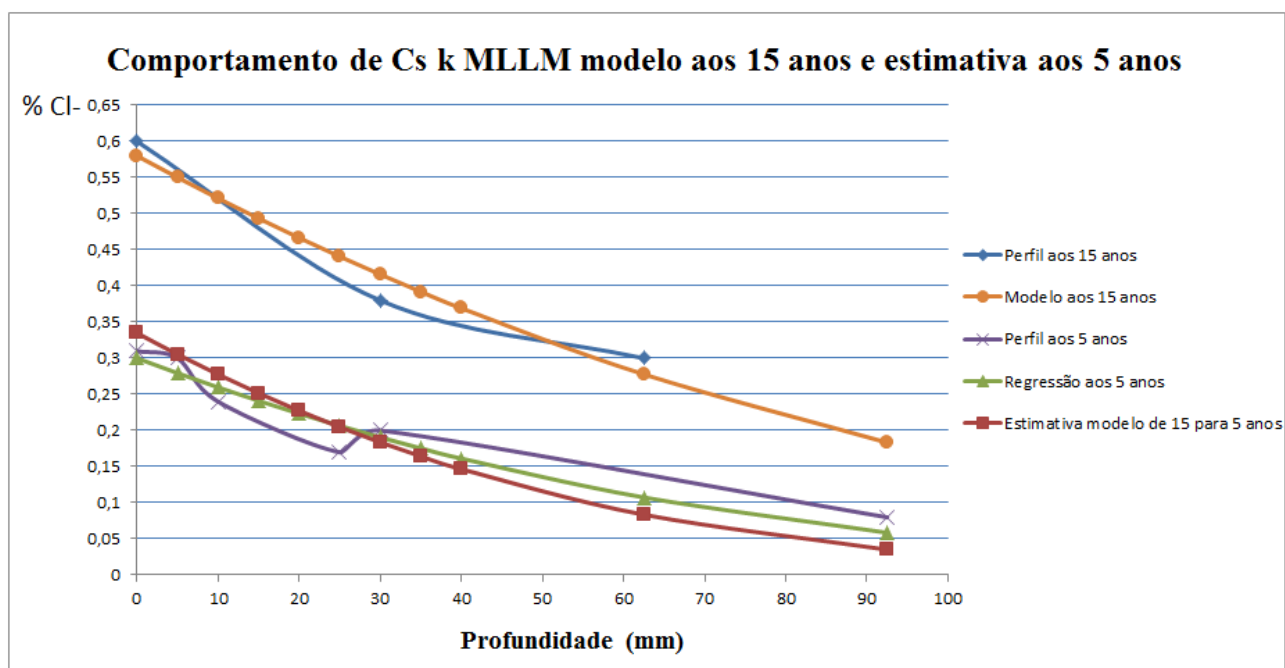


Figura 4.27 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos.

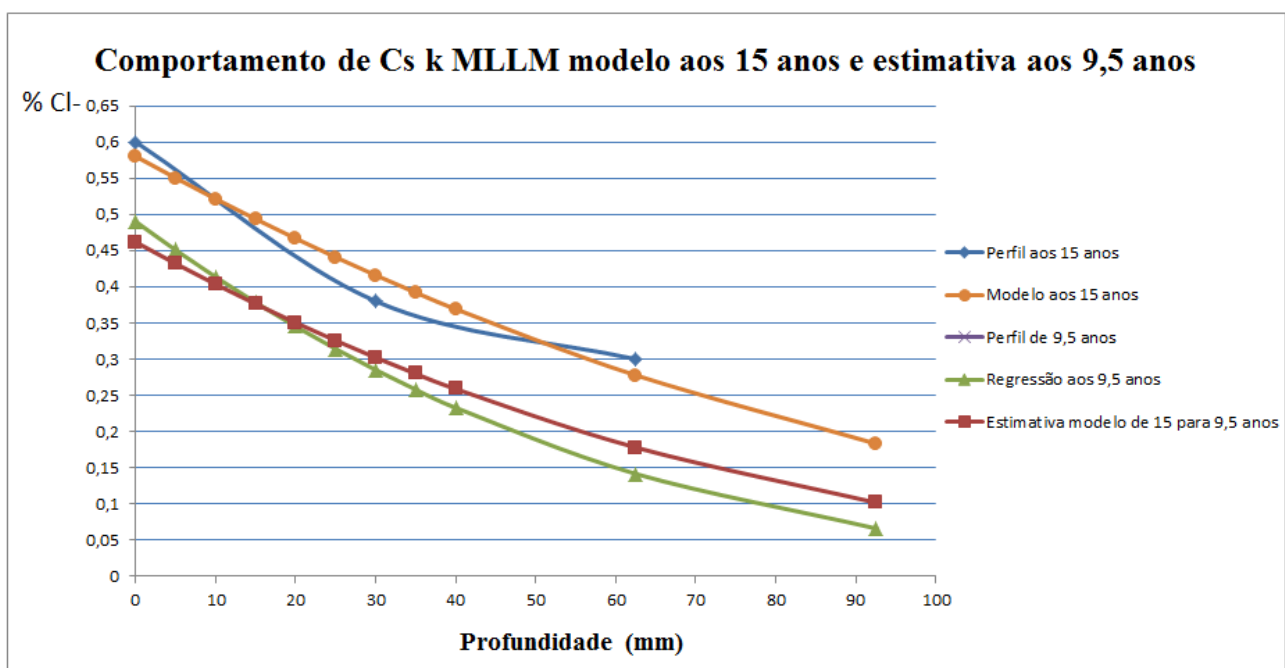


Figura 4.28 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) modelo aos 15 anos e previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos.

E, para finalizar o estudo com a utilização do k, a Fig. 2.29 demonstra os perfis, as regressões pelo menor erro quadrado aos 5, 9,5 e 15 anos e a previsão do comportamento do teor de cloretos em função da profundidade de 15 para 5 e 9,5 anos. O tempo de troca, para Cs máximo e a

estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos quando o teor de cloretos atinge o seu valor máximo na superfície do concreto, $C_s = 0,600 \%$, em relação a massa de concreto também estão dispostos na Fig. 2.29.

O t_{troca} , para 15 anos, MLLM, k , é de 16,052 anos e o um tempo equivalente de 9,909 anos, obtido pela equação 4.1. Com a Eq. 2.4, é possível obter o perfil de cloretos para a idade de 50 anos e para o tempo de troca 16,052 anos, (ANEXO 4 – Tab. 4.11 e 4.12), representado na Fig. 4.29 por estimativa C_s fixo $t = 50$ anos e estimativa C_s fixo $t_{troca} = 16,052$ anos.

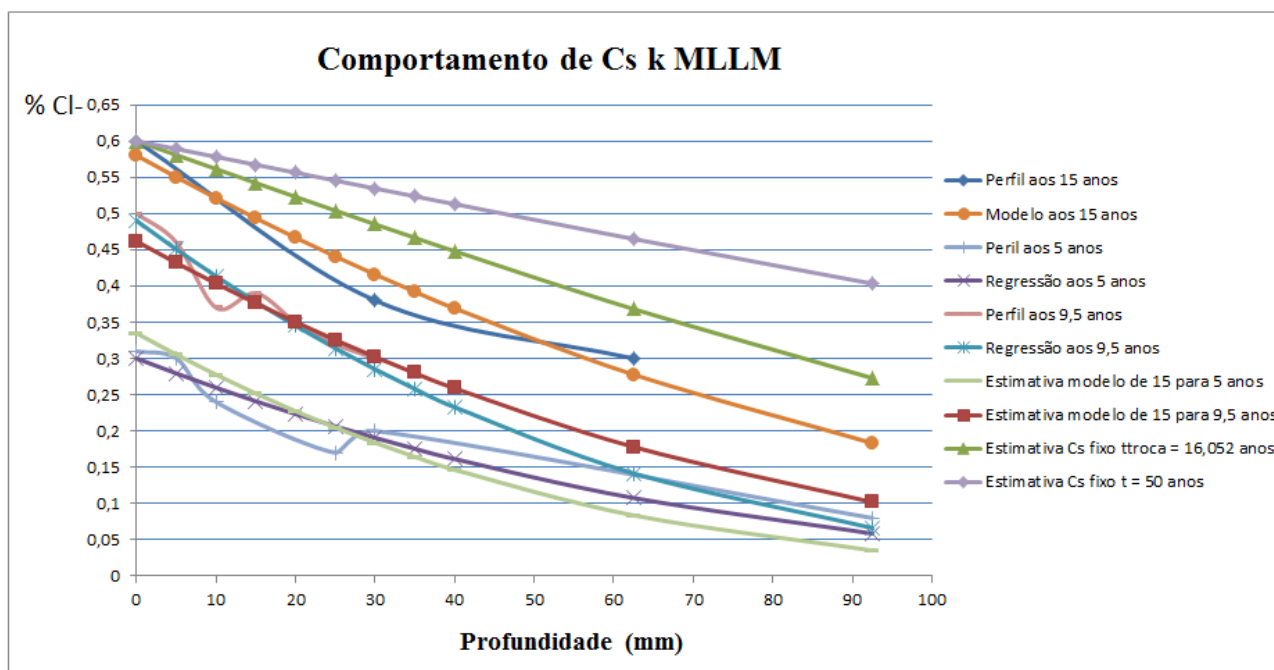


Figura 4.29 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 9,5 anos, tempo de troca e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos.

Mantendo os mesmos procedimentos utilizados para k (MLLM), só que para k_{eq} , a partir de então, que como já foi mencionado é um valor intermediário obtido por regressão entre as idades de 5 e 9,5, considerando a variação de C_s e a formação de pico para as estimativas da evolução dos perfis de cloretos.

Portanto, por regressão (ANEXO 5 – Tab. 5.2), para o microambiente MLLM calculou-se um k_{eq} de $0,150 \text{ } \%. \text{ano}^{-1/2}$. Da mesma forma que o microambiente MLLS não se levou em consideração a idade de 15 anos na regressão, por falta de referência, e o k_{eq} estimado foi realizado entre as idades de 5 e 9,5 anos.

No MLLM aos 5 anos, utilizando k_{eq} , encontra-se um coeficiente de difusão de cloretos D de $798,5758 \text{ mm}^2/\text{ano}$ e um C_s de $0,3354 \%$ em relação à massa de concreto. A área abaixo da curva de regressão Mt foi estimada segundo o ANEXO 1 – Tab. 1.4.

A Figura 4.30 apresenta o perfil aos 5 anos e seu modelo (aos 5 anos) (ANEXO 6 – Tab. 6.7) para um k_{eq} de $0,150 \text{ \%}\cdot\text{ano}^{-1/2}$ e um D de $798,5758 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

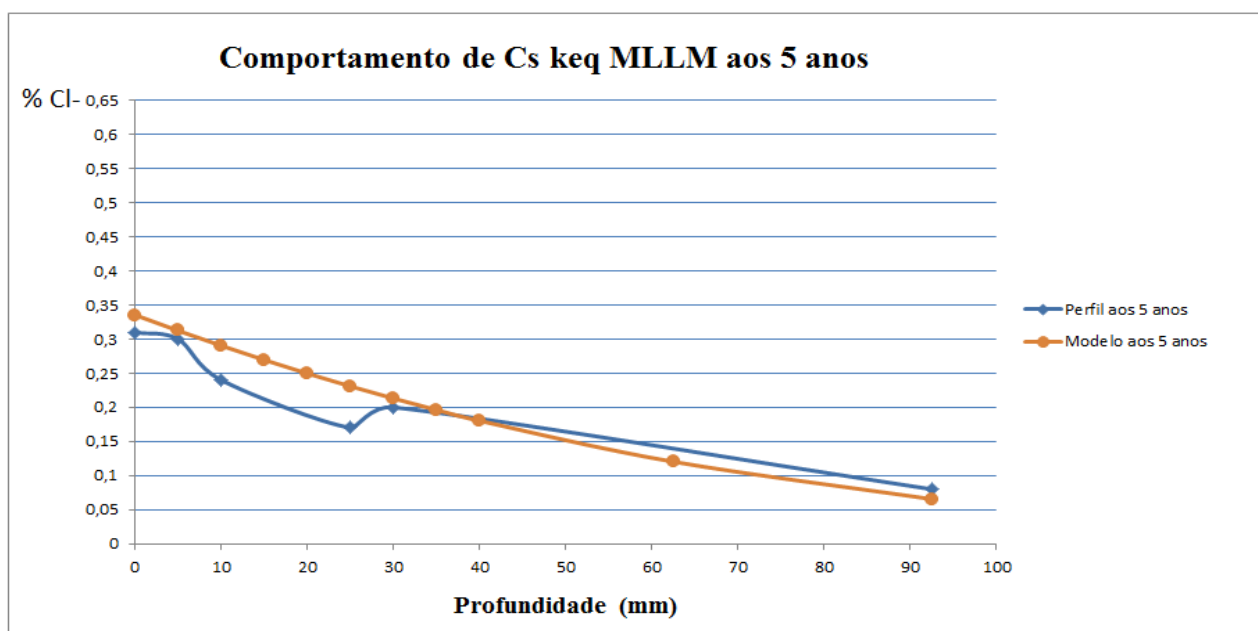


Figura 4.30 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k_{eq}) aos 5 anos.

E, na Figura 4.31 apresenta os perfis de cloretos traçados com o deslocamento do pico para o eixo x, as regressões e as estimativas para os anos de 9,5 e 15 (ANEXO 6 – Tab. 6.8 e 6.9).

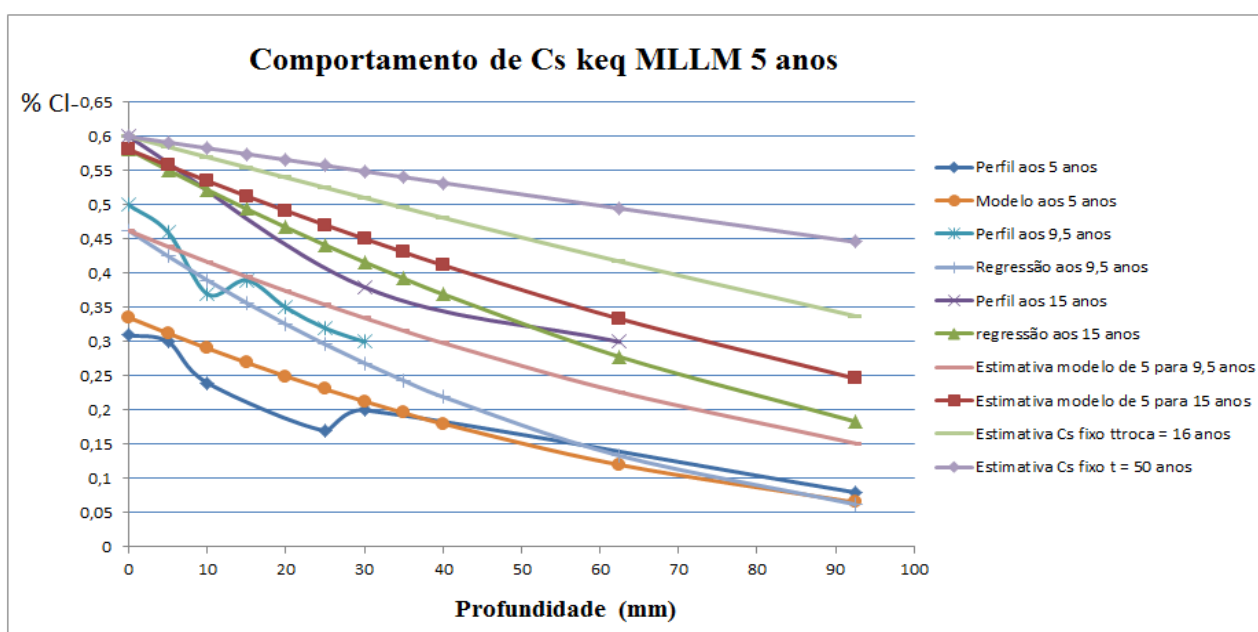


Figura 4.31 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (k_{eq}) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo $t = 50$ anos.

Sendo o teor de cloretos máximo em 0,600 % em relação à massa de concreto o novo tempo, a partir de keq , para o qual o teor de cloretos na superfície (C_s) atinge o valor máximo, $t_{troca} = 16$ anos (ANEXO 7 = Tab. 7.5 e 7.6). A partir do tempo de troca obteve-se um teq de 9,877 anos. O coeficiente de difusão de cloretos ficou em torno de $D = 798,576 \text{ mm}^2/\text{ano}$, e com a Eq. 2.8 foi possível traçar o perfil o qual C_s atinge o valor máximo de 0,600 %, realizando o mesmo para a idade de 50 anos.

Refazendo todo o procedimento para a idade de 9,5 anos, por regressão (ANEXO 5 – Tab. 5.2), para o microambiente MLLM, o keq de $0,150 \text{ \%.ano}^{-1/2}$ permanece o mesmo e encontra-se um coeficiente de difusão de cloretos D de $303,0444 \text{ mm}^2/\text{ano}$ e um C_s de 0,4623 % em relação à massa de concreto. A área abaixo da curva de regressão Mt foi estimada segundo o ANEXO 1 – Tab. 1.5.

Na Figura 4,32 está o perfil aos 9,5 anos e seu modelo (aos 9,5 anos) (ANEXO 6 – Tab. 6.10) para um keq de $0,150 \text{ \%.ano}^{-1/2}$ e um D de $303,0444 \text{ mm}^2/\text{ano}$.

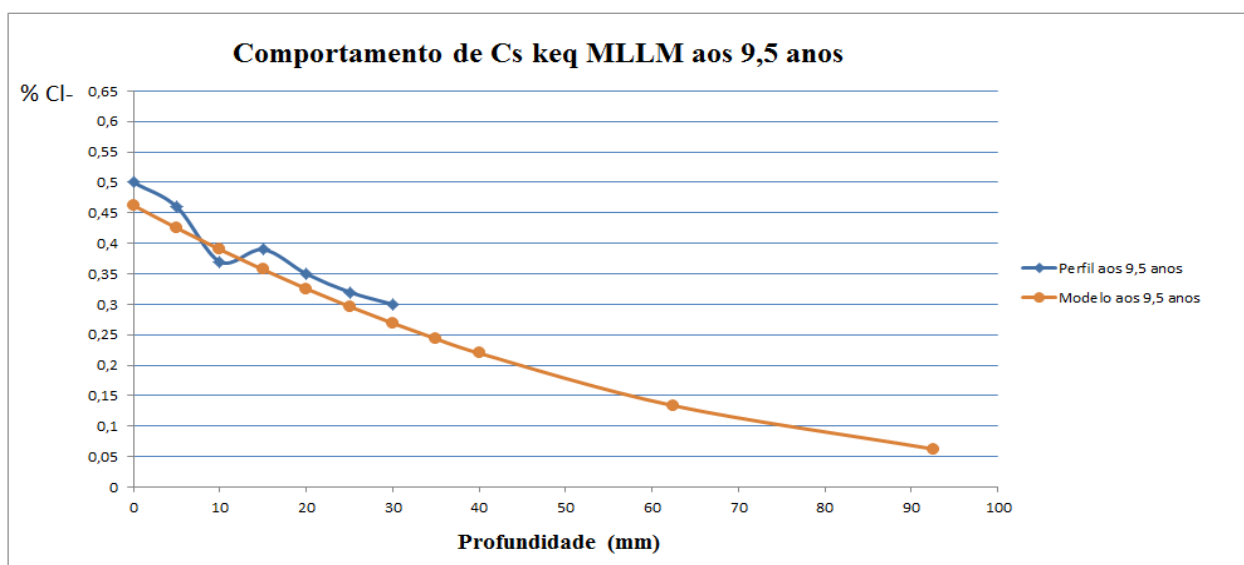


Figura 4.32 – Comportamento do % de Cl^- MLLM (keq) aos 9,5 anos.

São apresentados na Fig. 4.33 os perfis de cloretos traçados com o deslocamento do pico para o eixo x, as regressões e as estimativas para os anos de 5 e 15 (ANEXO 6 – Tab. 6.11 e 6.12). Com 0,600 % de teor máximo em relação à massa de concreto o novo tempo, a partir de keq , para o qual o teor de cloretos na superfície (C_s) atinge o valor máximo, é de $t_{troca} = 16$ anos (ANEXO 7 = Tab. 7.7 e 7.8). O teq ficou de 9,877 anos. O coeficiente de difusão de cloretos manteve-se, e com a equação 2.8 se traçou o perfil o qual C_s atinge o valor máximo de 0,600 %, utilizando também para estimar na idade de 50 anos.

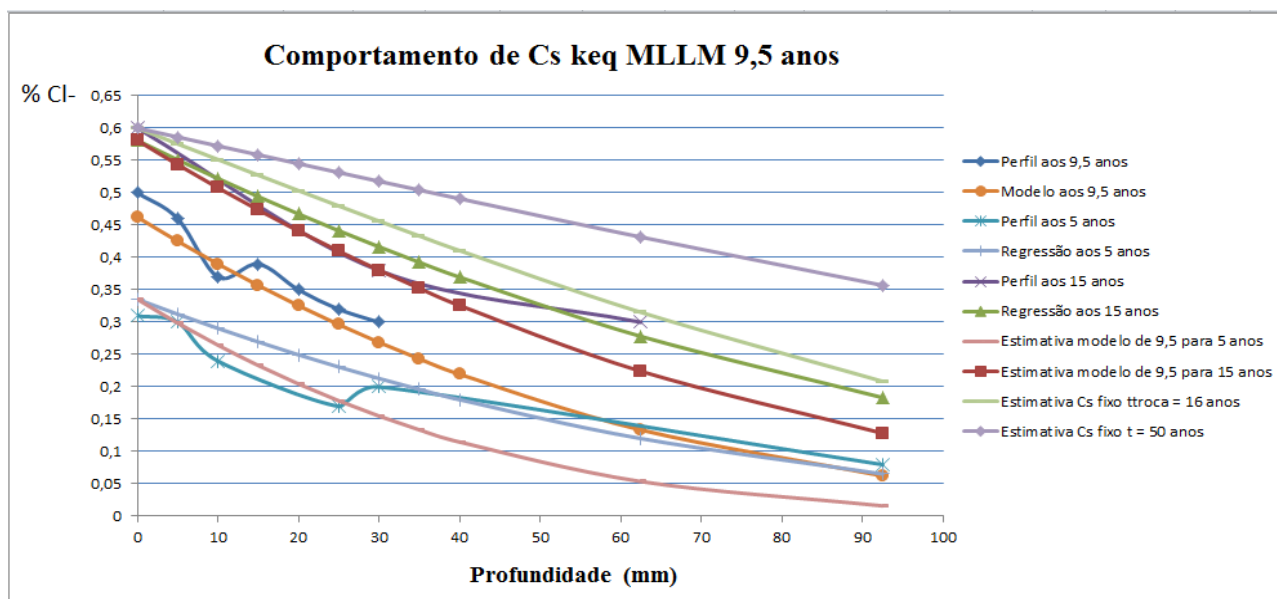


Figura 4.33 – Comportamento do % de Cl⁻ MLLM (keq) aos 5, 9,5 e 15 anos, previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 e 15 anos, tempo de troca e estimativa de Cs fixo t = 50 anos.

A Tabela 4.2., em resumo, explana os resultados do comportamento do teor de cloretos no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS, para o microambiente MLLM para as três idades de estudo com k e para as duas idades com keq.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos a partir da análise do microambiente MLLM dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.

Microambiente MLLM					
Idade (anos)	Cs em relação ao concreto	k (mm.ano ^{-1/2})	D (mm ² /ano)	teq (anos)	tempo de troca (anos)
5	0,300	0,134	798,576	12,346	20,000
9,5	0,490	0,159	303,044	8,793	14,244
15	0,580	0,150	477,465	9,909	16,052
keq 5 anos	0,335	0,150	798,576	9,877	16,000
keq 9,5 anos	0,462	0,150	303,044	9,877	16,000

O comportamento de Cs em relação à massa de concreto aumenta com o aumento da idade, passando de 0,300 % aos 5 anos para 0,490 % aos 9,5 anos e chegando a 0,580 % aos 15 anos. Na idade de 15 anos, com o valor de Cs = 0,580 % e sendo o teor máximo de cloretos na superfície do concreto de 0,600 % em relação a massa de concreto verifica-se que, para essa idade, o Cs já tende a permanecer constante, pois, praticamente, já atingiu seu valor máximo.

Já o coeficiente de difusão de cloretos D começa com um valor alto de 798,576 mm²/ano, baixa na idade de 9,5 anos para 303,044 mm²/ano e volta a aumentar na idade de 15 anos para 477,465 mm²/ano.

4.3.1 Comentários sobre MLLM k aos 5 anos

O perfil de cloretos medido aos 5 anos para o microambiente MLLM com k (Fig. 4,18) mostra um decréscimo até a profundidade de 25 mm, voltando a subir aos 30 mm e descendo novamente. A regressão dos pontos da curva de 5 anos do perfil medido é representada pela curva de regressão aos 5 anos e apresentou boa correlação entre os pontos.

Com o perfil medido aos 5 anos, através de seu modelo, estimou-se para a idade de 9,5 anos (Fig. 4.19). A estimativa para 9,5 anos nos pontos iniciais ficou distante do perfil medido, se aproximando mais a partir dos 10 mm.

Estimou-se também, o perfil medido aos 5 anos, através de seu modelo, para a idade de 15 anos (Fig. 4.20). A estimativa também se demonstrou um pouco distante nas primeiras profundidades coincidindo mais a partir dos 15 mm.

Com o perfil medido aos 5 anos foram estimados os perfis de cloreto para o qual se supõe que C_s não varie mais com a idade do concreto, 0,600 %, em relação a massa de concreto. As curvas foram denominadas de estimativa de C_s fixo $t_{troca} = 20$ anos e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos as quais representam as penetrações de cloretos para o tempo equivalente de 12,346 anos (Fig. 4.21).

4.3.2 Comentários sobre MLLM k aos 9,5 anos

Para o perfil de cloretos medido aos 9,5 anos para o microambiente MLLM com k (Fig. 4,22) mostra um decréscimo até a profundidade de 10 mm, voltando a subir aos 15 mm e decrescendo de novo até 30 mm. A regressão dos pontos da curva de 9,5 anos do perfil medido é representada pela curva de regressão aos 9,5 anos e também apresentou boa correlação entre os pontos.

O perfil medido aos 9,5 anos, pelo seu modelo, estimando para a idade de 5 anos (Fig. 4.23), percebe-se que a uma boa interação entre os pontos de 0 até 25 mm e se afastam de 30 a 92,5 mm.

Já a estimativa do perfil medido aos 9,5 anos, através do seu modelo, para a idade de 15 anos (Fig. 4.24) mostra que apenas para os pontos finais (de 40 até 92,5) não possuem boa similaridade, passando C_s de 0,5 % para 0,6137 %.

Aos 9, 5 anos também foram estimados os perfis de cloreto para o qual se supõe que C_s não varie mais com a idade do concreto, 0,600 %, em relação a massa de concreto. As curvas, denominadas de estimativa de C_s fixo $t_{troca} = 14,244$ anos e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos representam as penetrações de cloretos para o tempo equivalente de 8,793 anos (Fig. 4.25).

4.3.3 Comentários sobre MLLM k aos 15 anos

No perfil de cloretos medido aos 15 anos para o microambiente MLLM com k (Fig. 4.26), com apenas três pontos medidos após o deslocamento do pico para a origem o perfil só decresce. A regressão dos pontos da curva aos 15 anos do perfil medido é representada pela curva de regressão aos 15 anos e apresenta boa correlação entre os pontos (medido e regressão).

De 15 anos, pelo modelo, regredindo a estimativa para 5 anos (Fig. 4.27), nota-se que de 5 pra 15 e de 15 para 5 anos são estimativas bem parecidas e se comportam como o esperado.

Estimando o perfil medido aos 15 anos para 9,5 anos, através do seu modelo (Fig. 4.28), pode-se dizer que a estimativa se comporta muito bem, ficando praticamente em cima do perfil aos 9,5 anos, porém o comportamento de 9,5 para 15 anos não coincidiu da mesma.

E aos 15 anos, utilizando k, também, estimou-se os perfis de cloreto para C_s constante, 0,600 %, em relação a massa de concreto. As curvas, denominadas de estimativa de C_s fixo $t_{troca} = 16,052$ anos e estimativa de C_s fixo $t = 50$ anos representam as penetrações de cloretos para o tempo equivalente de 9,909 anos (Fig. 4.29).

4.3.4 Comentários sobre MLLM k_{eq} aos 5 anos

Com todos os procedimento feitos utilizando o k, fez-se também utilizando k_{eq} , k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos, no qual traçou-se o modelo do perfil de cloretos

medido aos 5 anos, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, que apresentou baixa conformidade com o perfil medido se comparado com o modelo traçado utilizando k. A figura 4.30 apresenta o perfil medido aos 5 anos e a regressão com a utilização do keq.

Na estimativa do modelo obtido aos 5 anos, para 9,5 anos, utilizando keq (Fig. 4.31), considerando também a formação de pico, ao contrário da estimativa de 5 para 9,5 anos utilizando k, apresentou resultados melhores sobre o perfil de 9,5 anos.

De 5 para 15 anos, utilizando keq (Fig. 4.31), os resultados foram piores do que a estimativa feita com k, onde a estimativa se afasta do perfil a partir dos 15 mm.

Nos 5 anos, com a utilização do keq, foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 16 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.31), mantendo Cs constante em 0,600 % em relação a massa de concreto.

4.3.5 Comentários sobre MLLM keq aos 9,5 anos

Com a utilização do keq, k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos, também se traçou o modelo do perfil de cloretos medido aos 9,5 anos, considerando o deslocamento do pico para a origem do eixo x, que também apresentou baixa conformidade com o perfil medido, comparando com o modelo traçado utilizando k. A Figura 4.32 apresenta o perfil medido aos 9,5 anos e a regressão com a utilização do keq.

Na estimativa do modelo obtido aos 5 anos, para 9,5 anos, utilizando keq (Fig. 4.33), considerando também a formação de pico, se assemelha muito a estimativa de 9,5 para 5 utilizando km mas se comporta de forma melhor

Observando a estimativa de 9,5 anos para 15 anos, com keq (Fig. 4.33), os resultados se mostraram melhores do que a estimativa feita de 9,5 para 15 anos utilizando k.

E, aos 9,5 anos, para keq, foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca de 16 anos e para a idade de 50 anos (Fig. 4.33), mantendo Cs constante em 0,600 % em relação a massa de concreto para um teq de 9,8765 anos.

4.4 Comparação entre os resultados de Silva (2010) e Oliveira (2013) com a pesquisa atual

A fim de comparar os resultados obtidos na pesquisa de Silva (2010) e Oliveira (2013), considerando a variação de C_s no tempo, com os resultados obtidos na pesquisa atual, considerando a variação de C_s no tempo e a formação de pico, traçaram-se os gráficos comparativos, para os mesmo pontos, das estimativas para cada ano de cada microambiente.

4.4.1 Comparações gráficas

Para melhor visualização das curvas estimadas das pesquisas anteriores e da pesquisa atual foram feitos gráficos com o objetivo de facilitar a compreensão dos resultados. Realizou-se o traçado das curvas somente considerando k , ou seja, o k real do modelo. Os modelos e as estimativas atuais representadas nos gráficos são as da presente pesquisa, porém acrescentaram-se os referentes aos recálculos e cálculos das pesquisas anteriores. As comparações gráficas são apresentadas nas Fig. 4.34 até 4.41.

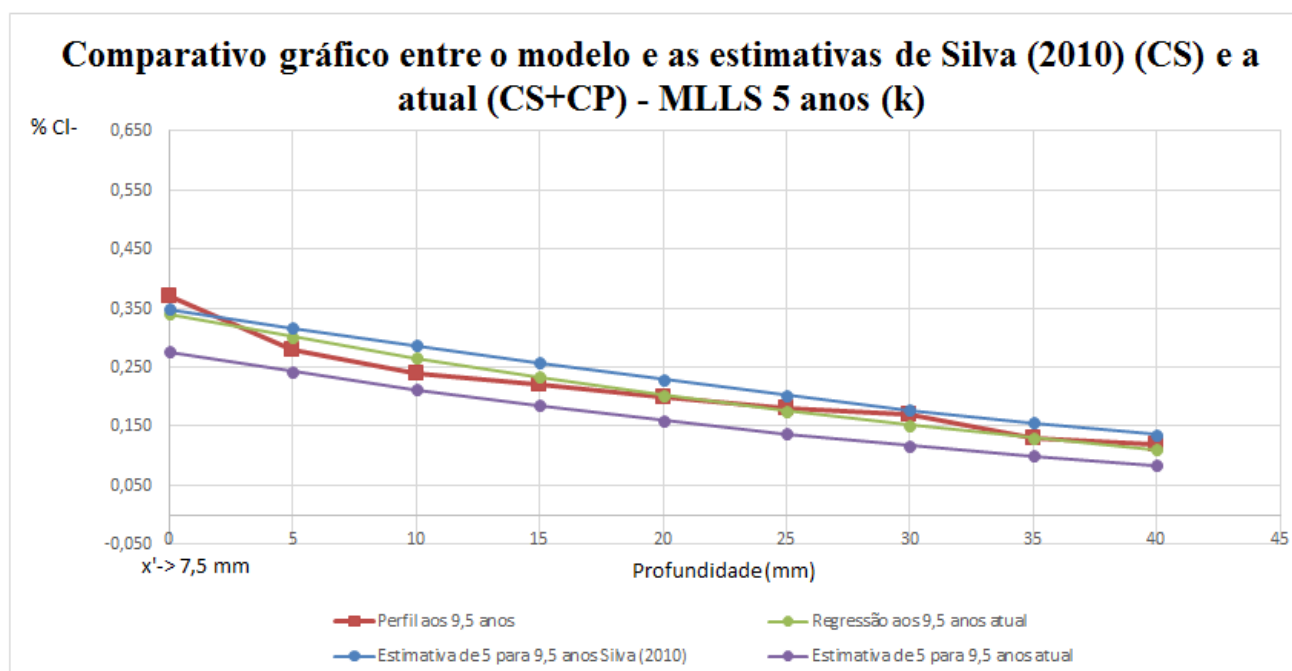


Figura 4.34 – Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLS – 5 anos (k)).

Percebe-se que, os resultados atuais, comparando-se com os anteriores e considerando além da variação de C_s no tempo a formação de pico é menos próxima da regressão do que a da pesquisa anterior para os 5 anos. Como já ressaltado anteriormente as estimativa atual de 5 para 9,5 anos se comporta melhor considerando apenas a variação de C_s no tempo. Vale salientar que as estimativas feitas em 2010 e 2013 foram alteradas de acordo com esse estudo, o qual foram calculados e recalculados os modelos e as estimativas considerando os pontos que mais se aproximam do estudo atual, para fins de comparação.

Na Figura 4.35, considerando o microambiente MLLS aos 9,5 anos, comparando as curvas, nota-se que a estimativa que mais se aproxima da regressão atual é a estimativa da pesquisa atual “estimativa de 9,5 para 5 anos” demonstrando um modelo bastante coerente.

Ainda considerando o microambiente MLLS, aos 15 anos (Fig. 4.36 e 4.37), a curva de estimativa de 5 para 15 anos (2013) se aproxima muito da regressão atual nas primeiras profundidades do concreto. Mas, a partir da profundidade de 7,5 mm os resultados da pesquisa atual, considerando a variação de C_s no tempo e a formação de pico, se assemelham muito bem ao perfil e a curva de regressão até a profundidade de 47,5 mm.

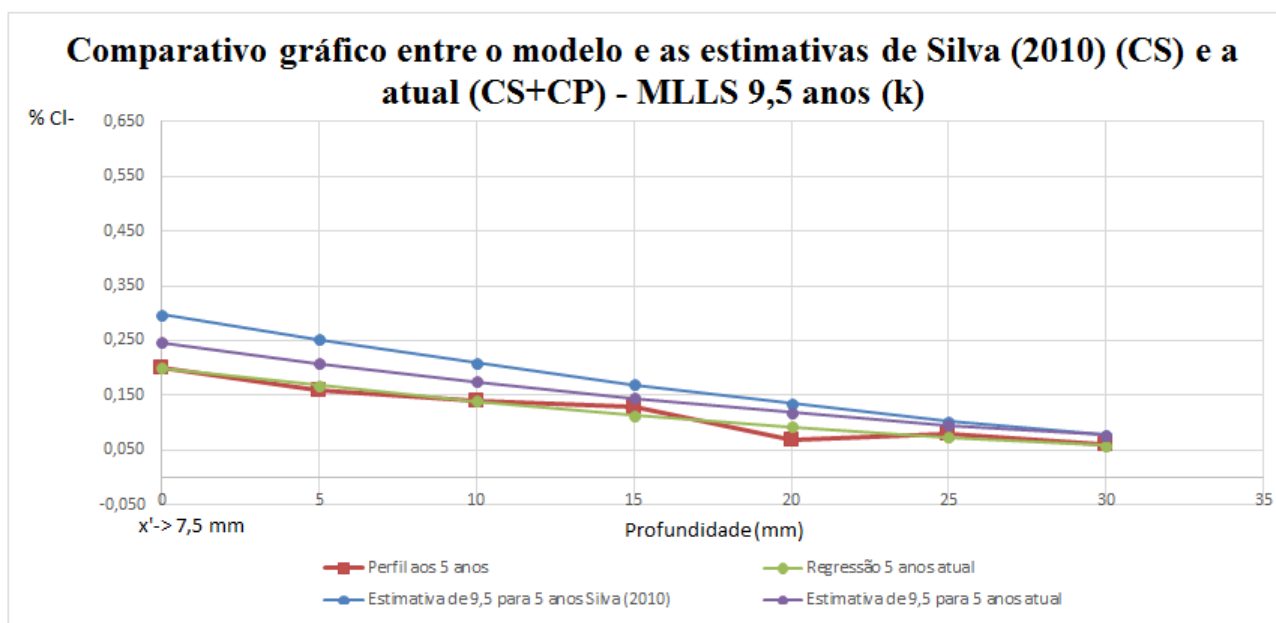


Figura 4.35 – Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLS – 9,5 anos (k)).

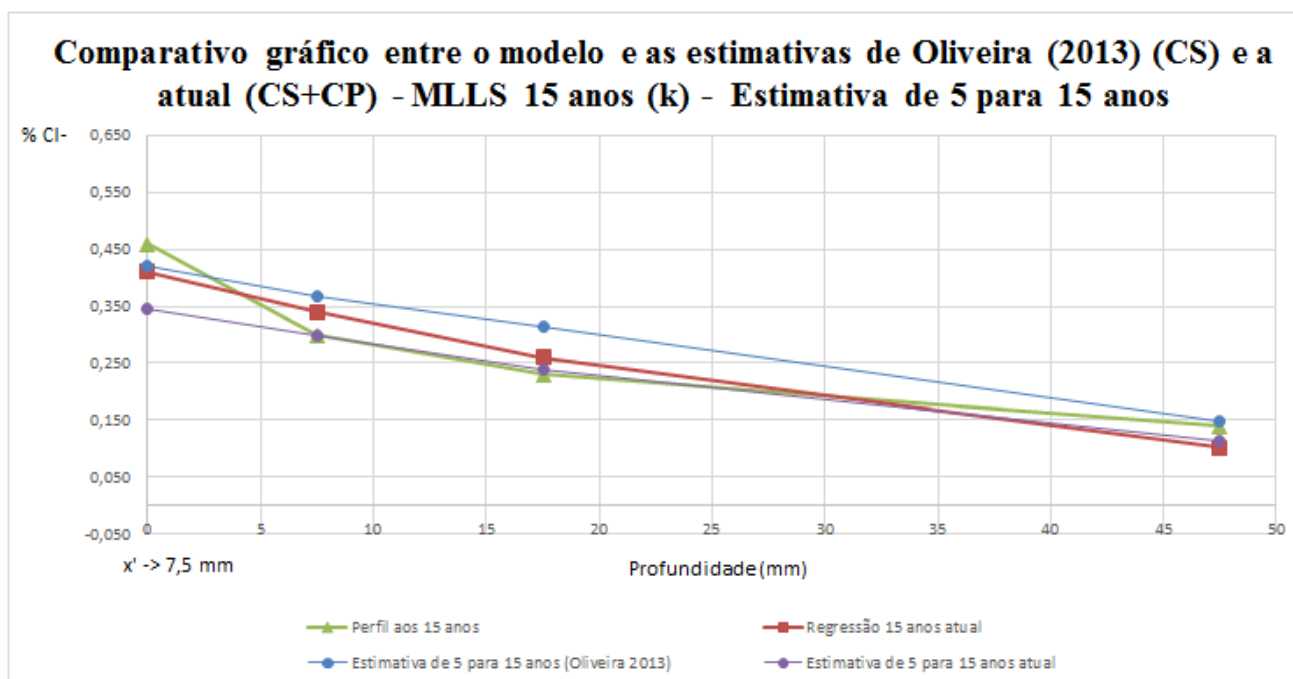


Figura 4.36 – Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLS – 15 anos 5/15 (k)).

A estimativa de 9,5 para 15 anos (Fig. 4,37) estão bem próximas do modelo/regressão aos 15 anos tanto para a pesquisa atual quanto para a pesquisa anterior. Entretanto, o modelo atual pode ser considerado de melhor desempenho, pois sua curva está mais coincidente com o perfil/regressão medido aos 15 anos pela sua pequena diferença.

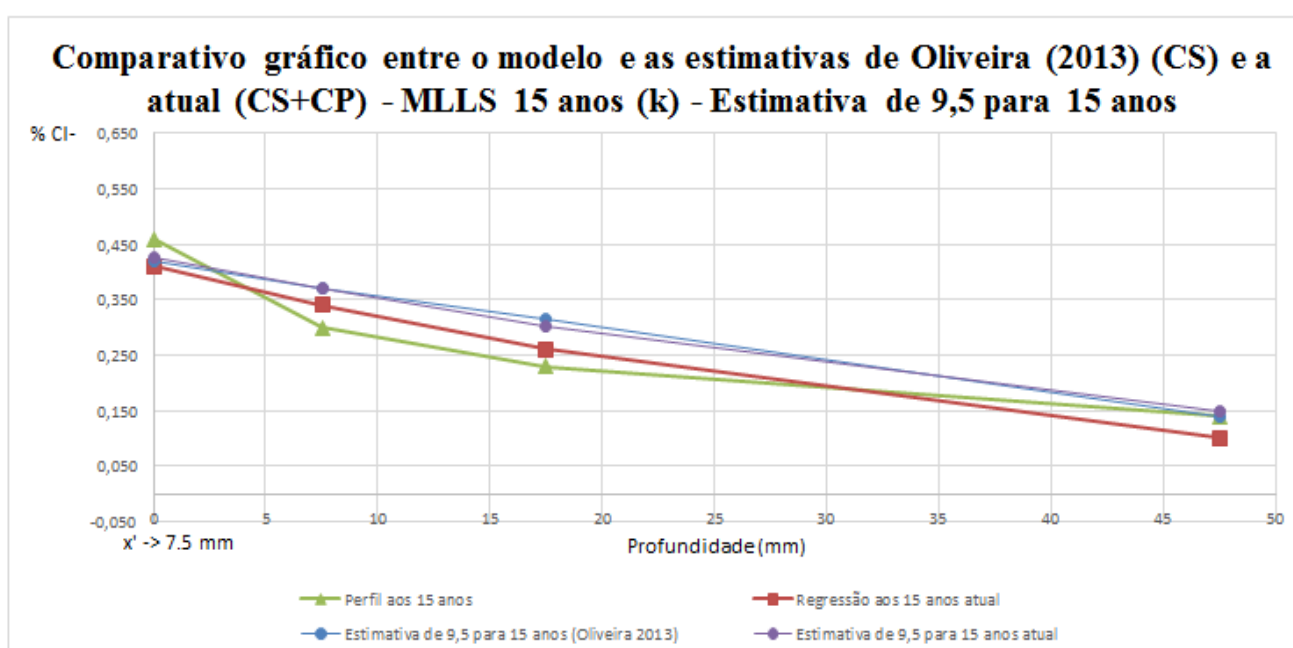


Figura 4.37 – Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLS – 15 anos 9,5/15 (k)).

Para o microambiente MLLM, aos 5 anos (Fig. 4.38), a curva estimada de 5 para 9,5 anos da pesquisa de (2010) coincide bastante com o perfil/regressão até a profundidade de 5 mm. O modelo atual é um pouco afastado até a profundidade de 10 mm, mas se mostrou de bom desempenho após os 10 mm de profundidade, ao contrário da estimativa de Silva (2010).

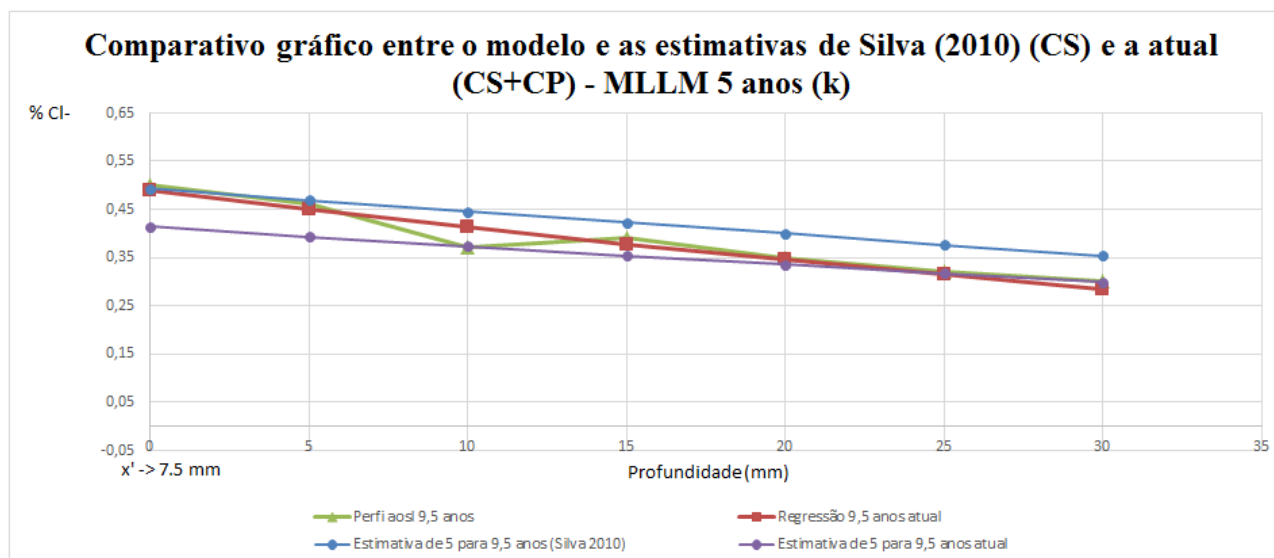


Figura 4.38 – Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLM – 5 anos (k)).

Na Figura 4.39, microambiente MLLM, aos 9,5 anos e sua estimativa para 5 anos o modelo atual é muito próximo do perfil medido mostrando um ótimo resultado considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico.

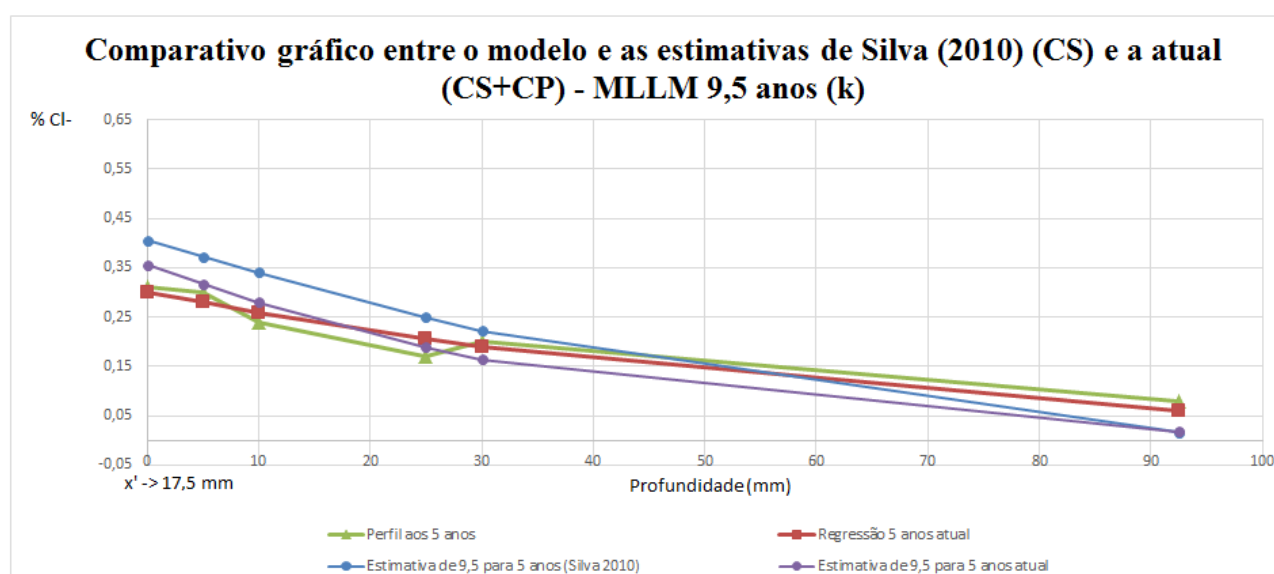


Figura 4.39 – Comparação modelo/estimativas 2010 e atual (MLLM – 9,5 anos (k)).

Na Fig. 4.40 a representação gráfica das curvas estimadas para o microambiente MLLM, de 5 para 15 anos são muito parecidas. Isso mostra que os dois modelos considerando parâmetros diferentes podem ser aplicados para estimar a vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente marítimo.

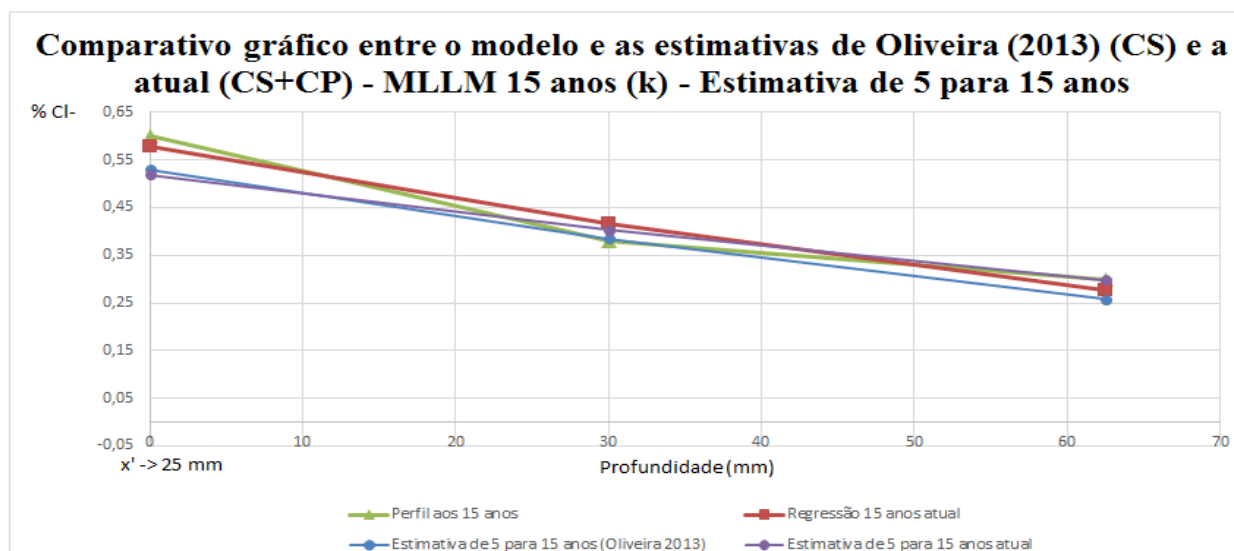


Figura 4.40 – Comparação modelo/estimativas 2013 e atual (MLLM – 15 anos 5/15 (k)).

E, por último, no microambiente MLLM, considerando as estimativas de 9,5 para 15 anos da pesquisa realizada em 2013 e da pesquisa atual a curva atual está muito próxima do perfil/regressão medido, caracterizando um ótimo desempenho considerando a variação de C_s no tempo e a formação de pico.

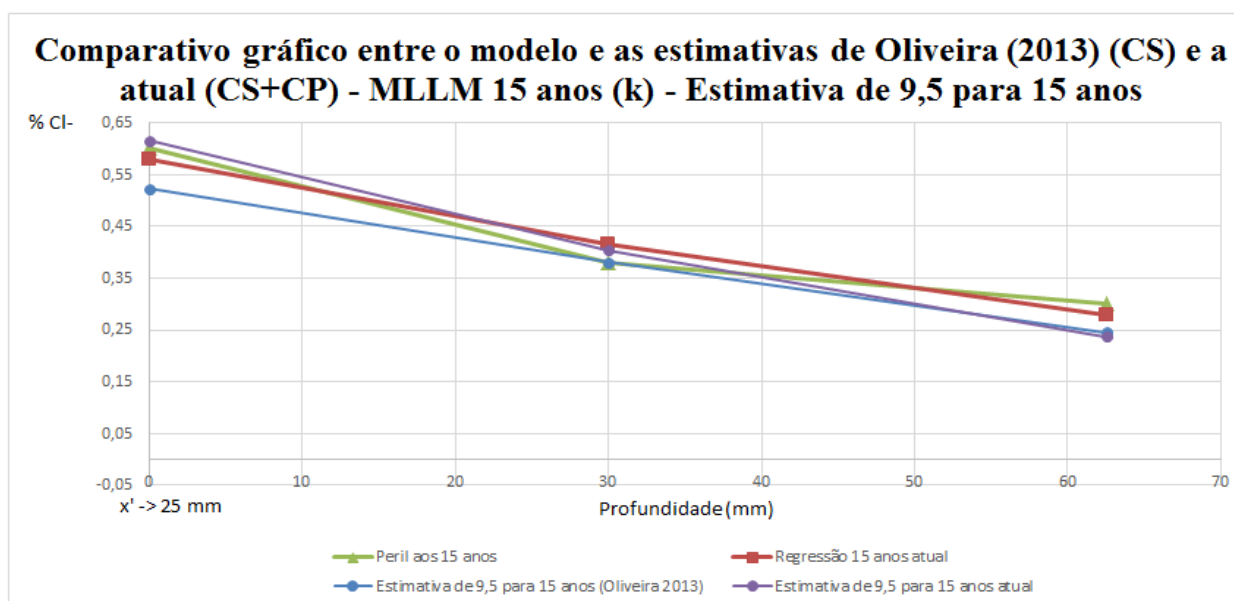


Figura 4.41 – Comparação modelo/estimativas 2010, 2013 e atual (MLLM – 15 anos 9,5/15 (k)).

Com exceção daquelas curvas estimadas que apresentaram desempenho ruim (>10 o resultado do erro relativo) os resultados mostram que tanto para os modelos anteriores, considerando a variação de C_s no tempo, como os modelos e as estimativas atuais, considerando a variação de C_s no tempo e a formação de pico, podem ser utilizados para prever a durabilidade de estruturas no concreto em ambientes marítimos. Portanto, seria de grande viabilidade desenvolver uma equação capaz de levar em consideração os dois fatores juntos para aprimorar as estimativas e a precisão dos modelos.

4.4.2 Cálculo dos erros relativos e comparação numérica

Os erros relativos foram calculados, conforme proposto por Sila (2010), a fim de comparar o desempenho de cada modelo obtido, tanto para o microambiente MLLS quanto para o MLLM, para as três idades de estudo da penetração de cloretos no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.

O erro relativo é calculado pela seguinte expressão:

$$E \text{ Relativo} = \frac{EEst.}{Emin.Reg.} \quad (4.2)$$

Onde:

$EEst.$ = Erro quadrado da estimativa (entre pontos medidos e pontos estimados pelo modelo);

$EMín.Reg.$ = Erro quadrado mínimo da regressão (entre pontos medidos e pontos de sua regressão);

$ERelativo$ = Erro relativo.

Então, sendo assim, para que o modelo proposto, considerando a variação de C_s e a formação de pico, seja considerado de bom desempenho ele deve apresentar um pequeno erro relativo. O cálculo dos erros relativos, para k , está apresentado no ANEXO 8 – Tab. de 8.1 até 8.4.

Portanto, na Tabela 4.3 são apresentados os parâmetros estimados para os 2 micro ambientes, considerando a variação de C_s e a formação de pico, como a concentração superficial de cloretos no concreto dos tetrápodes (C_s), o coeficiente de difusão de cloretos para as estimativas regressas e pregressas e o erro relativo respectivo para cada estimativa, utilizando k .

Silva (2010) salienta que considerou a seguinte classificação para melhor analisar os resultados obtidos:

- Entre 1 e 2 – muito bom (MB);
- Entre 2 e 4 -bom (B);
- Entre 4 e 10 – regular (Reg.);
- E, maior que 10 – ruim (R).

Tabela 4.3 – Resultados obtidos a partir da análise do cálculo do erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para k, no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.

ERRO RELATIVO CONSIDERANDO k									
MICROAMBIENTE	CS 5 anos	CS 9,5 anos	CS 15 anos	D 5 anos			D 9,5 anos		
	(%)	(%)	(%)	Erro relativo mm²/ano			Erro relativo mm²/ano		
MLLS	0,2000	0,3400	0,4100	5//9,5	134,7087	7,814	9,5//5	148,0422	10,350
				5//15	134,7087	2,082	9,5//15	148,0422	1,692
MLLM	0,3000	0,4900	0,5800	5//9,5	798,5758	4,900	9,5//5	303,0444	2,250
				5//15	798,5758	2,050	9,5//15	303,0444	1,370
Classificação do Erro Relativo		1 a 2 MUITO BOM		2 a 4 BOM		4 a 10 REGULAR		>10 RUIM	
D 5 anos 5/9,5 - 5/15		Coeficiente de difusão de cloretos aos 5 anos, erro relativo de 5 para 9,5 anos e de 5 para 15 anos							
D 9,5 anos 9,5/5 - 9,5/15		Coeficiente de difusão de cloretos aos 9,5 anos, erro relativo de 9,5 para 5 anos e de 9,5 para 15 anos							

Logo, a partir da análise da Tab. 4.3. pode-se dizer que os modelos que apresentaram um bom desempenho, considerando a variação de Cs e a formação de pico juntos foram os modelo aos 9,5 anos estimados para 15 anos, tanto para o microambiente MLLS quanto para o MLLM. E, a única estimativa que foi considerada de mau desempenho foi a de 9,5 para 5 anos, para o microambiente MLLS, o que já era de se esperar, pois o perfil medido aos 5 anos apresenta grande irregularidade entre os pontos.

Também se calculou o erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para k_{eq} (Tab. 4.4).

Tabela 4.4 – Resultados obtidos a partir da análise do cálculo do erro relativo para os microambientes MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para keq, no concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS.

ERRO RELATIVO CONSIDERANDO keq									
MICROAMBIENTE	CS 5 anos (%)	CS 9,5 anos (%)	CS 15 anos (%)	D 5 anos Erro relativo mm²/ano			D 9,5 anos Erro relativo mm²/ano		
MLLS	0,2303	0,3175	0,3989	5//9,5	134,70874	1,258	9,5//5	148,0422	1,195
				5//15	134,70874	1,113	9,5//15	148,0422	1,205
MLLM	0,3354	0,4623	0,5809	5//9,5	798,57584	1,125	9,5//5	303,04435	1,000
				5//15	798,57584	2,982	9,5//15	303,04435	2,804
Classificação do Erro Relativo		1 a 2 MUITO BOM		2 a 4 BOM		4 a 10 REGULAR		>10 RUIM	
D 5 anos 5/9,5 - 5/15				Coeficiente de difusão de cloretos aos 5 anos, erro relativo de 5 para 9,5 anos e de 5 para 15 anos					
D 9,5 anos 9,5/5 - 9,5/15				Coeficiente de difusão de cloretos aos 9,5 anos, erro relativo de 9,5 para 5 anos e de 9,5 para 15 anos					

Percebe-se que, por se tratar de um k intermediário entre as idades de 5 e 9,5 anos, todas as estimativas são consideradas de bom desempenho. Nenhuma apresentou desempenho ruim. O cálculo dos erros relativos, para keq, está apresentado no ANEXO 9 – Tab. de 9.1 até 9.4.

Para comparar e verificar o desempenho dos modelos e estimativas traçadas, para k e keq, considerando, além da variação de Cs no tempo a formação de pico, recalculou-se os erros relativos de Silva (2010), que considera apenas a variação de Cs no tempo, para os mesmos pontos obtidos com a variação de Cs no tempo e a formação de pico, pois se um modelo apresenta mais ponto do que outro o erro se altera por esse motivo. Assim, com a igualdade de pontos, se obtém as mesmas condições para essa análise. Como Oliveira (2013) não verificou o desempenho da aplicabilidade de seus modelos quanto aos erros relativos se calculou para os anos 5/15 e 9,5/15. Dessa forma se pode fazer a comparação de desempenho dos modelos e as estimativas aos 5, 9,5 e 15 anos (somente de 5 para 15 e 9,5 para 15 anos). Os resultados do recálculo do erro relativo de Silva (2010) e o cálculo do erro relativo de Oliveira (2013) estão expressos no ANEXO 10 – Tab. de 10.1 até 10.6.

A tabela 4.5 apresenta, de forma resumida, todos os resultados obtidos, para melhor entendimento, entre o modelo de Silva (2010), a aplicação do modelo de Silva (2010) por Oliveira (2013) considerando apenas a variação de Cs no tempo e a presente pesquisa levando em consideração tanto a variação de Cs no tempo e a formação de pico.

Tabela 4.5 – Comparativo entre os resultados obtidos no ano de 2010 e 2013 por Silva (2010) e Oliveira (2013) considerando somente a variação de Cs no tempo e em 2017 considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico nos perfis de cloretos dos microambientes do molhe leste da barra do Rio Grande RS para k.

COMPARATIVO DE ERROS RELATIVOS CONSIDERANDO k										
MICROAMBIENTE	D 5 anos					D 9,5 anos				
	Erro relativo mm²/ano					Erro relativo mm²/ano				
	Estimativas	D Silva (2010)	Erro²	D atual (2017)	Erro²	Estimativas	D Silva (2010)	Erro²	D atual (2017)	Erro²
MLLS	5//9,5	179,23	3,040	134,71	7,814	9,5//5	129,01	34,370	148,04	10,349
	5//15	179,23	2,040	134,71	2,082	9,5//15	129,01	2,080	148,04	1,692
MLLM	5//9,5	593,15	5,070	798,58	4,900	9,5//5	451,80	12,550	303,04	2,250
	5//15	593,15	3,050	798,58	2,050	9,5//15	451,80	4,090	303,04	1,370
Classificação do Erro Relativo		1 a 2 MUITO BOM		2 a 4 BOM		4 a 10 REGULAR		>10 RUIM		
D 5 anos 5/9,5 - 5/15		Coeficiente de difusão de cloretos aos 5 anos, erro relativo das estimativas de 5 para 9,5 anos e de 5 para 15 anos Coeficiente de difusão de cloretos aos 9,5 anos, erro relativo das estimativas de 9,5 para 5 anos e de 9,5 para 15 anos								
D 9,5 anos 9,5/5 - 9,5/15										

Com D aos 5 anos, MLLS, as previsões se mostraram-se mais coerentes para os perfis de cloretos que levam em consideração a variação de Cs no tempo e a formação de pico, pois a estimativa de 5/9,5 anos foi a que mudou em faixa de cores e valores. O recálculo e o cálculo para D aos 5 anos também ficaram com bom desempenho diminuindo em valores para a pesquisa atual, no microambiente MLLM de 5 para 9,5 anos.

Para D aos 9,5 anos, a variação do recálculo, Silva (2010), e do cálculo, Oliveira (2013), para MLLS e MLLM se mostrou menos eficiente, tendo dois desempenhos ruins. O resultado do recálculo e do cálculo para a estimativa de 9,5 para 5 anos, MLLS, e de 9,5 para 5 anos, MLLM tiveram seus desempenhos menos satisfatórios que os cálculos atuais. Embora no cálculo atual, de 9,5 para 5 anos, o resultado obtido tenha sido ruim, ele melhorou muito passando de 34 para 10. Os demais cálculos atuais melhoraram muito, tanto em faixa de cores quanto valores.

A partir da análise comparativa entre os resultados obtidos pelos cálculos e recálculos dos erros relativos, considerando a variação de Cs no tempo, para as pesquisas anteriores, e a pesquisa considerando a variação de Cs no tempo e a formação de pico fica evidente que, no geral, o modelo considerando as duas situações apresentou um desempenho muito bom, se comparado com o modelo existente. O modelo que considera variação de Cs no tempo e a formação de pico se aproxima muito de bom e muito bom, melhorando muito em faixa de cores e valores, obtendo apenas uma estimativa de desempenho ruim. E o modelo de Silva (2010), em algumas estimativas, se mostra também eficiente, porém com duas estimativas de desempenho não satisfatório. Contudo,

não significa que um ou outro é melhor ou pior modelo para estimar comportamentos de teor de cloretos no concreto em ambientes marítimos, mas sim que os dois podem ser utilizados, cada um com suas peculiaridades, buscando prever e estimar a intensidade do ataque de cloretos em estruturas de concreto.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Todos os perfis de cloretos originais medidos, para os microambientes MLLS e MLLM, do molhe leste da barra do Rio Grande RS aos 5, 9,5 e 15 anos, apresentaram pico no teor de cloretos em alguma profundidade. No microambiente MLLS, aos 5 e 15 anos é evidente a formação de pico, assim como para o microambiente MLLM. Aos 9,5 anos foi considerado o pico na profundidade de 7,5 mm para transposição do pico para a origem no microambiente MLLS e 17,5 para o microambiente MLLM. Observar-se que, com o deslocamento do pico para origem, os perfis de MLLS, aos 9,5 e 15 anos não possuem outra oscilação de pico, somente decrescem, ao contrário do perfil de 5 anos que para maiores profundidades volta a oscilar formando um leve pico. Já para o microambiente MLLM, aos 5 e 9,5 anos, mesmo com o deslocamento do pico para origem, há outras formações de pico ao longo do perfil medido, o que não acontece com o perfil medido aos 15 anos.

Referente à durabilidade, os perfis de 5 anos ainda são de pouca idade para usar como estimativa de vida útil residual em estruturas de concreto armado. No entanto, os perfis com 9,5 e 15 anos podem ser utilizados para realizar essas estimativas, mas levando em consideração que os percentuais de teor de cloretos podem ter seus valores de C_s aumentado. Entretanto, aos 15 anos, para o microambiente MLLM, o valor de C_s já chegou ao máximo, 0,600 % em relação à massa de concreto. Sendo assim, tem-se uma expectativa de que C_s não varia mais e pode ser considerado fixo, a partir do tempo de troca, ao longo do tempo.

Em conformidade com Silva (2010), antes da obtenção dos resultados aos 9,5 anos ainda existiam dúvidas quanto à possível contaminação do concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS devido aos elevados percentuais de cloreto obtidos aos 5 anos. Mas, após o traçado dos perfis, aos 9,5 anos, ficou evidente que os elevados percentuais são resultado do ambiente muito agressivo do local.

Utilizando o modelo da pesquisa, considerando a variação de C_s no tempo e a formação de pico para a previsão do comportamento do teor de cloretos, que apresentou resultados satisfatórios com o percentual de cloretos diminuindo com o aumento da profundidade o modelo pode ser utilizado em locais onde há tendência de formação de pico do teor de cloretos em função da estação do ano. As regressões considerando as equações de variação de C_s e formação de pico também se

mostraram boas, assim como a equação utilizada após o t_{troca} considerando C_s fixo e invariável. A maioria das regressões feitas para cada perfil, do microambiente MLLS e MLLM, aos 5, 9,5 e 15 se aproximam muito dos reais perfis de cloretos dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS. Alguns perfis possuem inclinação semelhante, outros os pontos são bastante próximos, mas, no geral apresentaram boa correlação.

No microambiente MLLS, para a idade de 5 anos, a previsão da estimativa para 9,5 anos os resultados estimados obtiverem grande diferença entre perfil medido e o perfil estimado. O que não ocorre quando se estima o modelo 5 para 15 anos, ou seja, o resultado ficou muito bom para essa idade. Quando se estima o modelo de 9,5 para 5 anos há maior precisão entre o perfil medido e o estimado, se comportando de forma similar quando estimado para 15 anos. Já a estimativa do modelo aos 15 anos é considerada muito boa, o qual, praticamente, as curvas se sobrepõem. E, a curva estimada levando em consideração o modelo de 15 para 9,5 anos não foi tão precisa quanto a do perfil medido/perfil estimado, mas pode ser considerada boa.

Para o microambiente MLLM, o modelo representado aos 5 anos quando estimado para 9,5 e 15 anos apresentou boa relação com os perfis medidos em cada idade, principalmente a estimativa do modelo de 5 para 15 anos, os quais as curvas quase coincidiram entre si. As estimativas do modelo de 9,5 anos para as idades de 5 e 15 anos também foram boas, porém com inclinações diferentes. E as estimativas partindo do modelo de 15 anos, retroagindo para as idades de 9,5 e 5 anos, podendo ser utilizado, neste caso, para averiguar em que tempo a armadura foi despassivada, apresentou curvas coerentes com pouca variação na inclinação.

Já com a utilização do k intermediário, pode-se dizer que os perfis estimados a partir de k_{eq} estiveram bem próximos dos perfis de medição de cloreto do concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS, sendo considerados, em grande parte, muito bons. O teor de cloretos na superfície do concreto (C_s) aumentou com o passar do tempo até atingir o valor de estabilidade.

Os perfis aos 15 anos, se mostraram muito satisfatório, tanto para o microambiente MLLS quanto para o MLLM, quando estimado para as idades de 9,5 e 5 anos. Conforme já mencionado por Silva (2010), mas apenas considerando a variação de C_s no tempo, os perfis de 9,5 anos demonstraram estar mais bem definidos e também, levando em consideração a formação de pico, pois os perfis de 5 anos ainda apresentaram picos ou oscilações que desapareceram na idade de 9,5 anos. Pode ser que, por algumas estimativas, o perfil de 9,5 anos teve seus valores apresentado de forma diferente quando estimado o perfil aos 5 anos com o modelo obtido com o perfil medido aos 9,5 anos.

No concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande RS foi utilizado cimento de alta resistência inicial resistente a sulfato (RS) com pequena adição de cinza volante (12%), que

apesar de ser capaz de apresentar grande resistência já nas primeiras idades, não é recomendado para concreto armado exposto em ambiente marítimo. A exposição do concreto em um ambiente com tamanha agressividade de agentes deteriorantes faria com que ocorresse despassivação precoce do aço, reduzindo então, a vida útil do elemento estrutural.

No entanto, para que isso fosse possível, levando em consideração o ambiente agressivo, a qualidade do concreto e a durabilidade do elemento, algumas precauções deveriam ser tomadas tais como: cobrimento adequado da armadura; a utilização de adições apropriadas em benefício da estrutura, cinza de casca de arroz, pozolana e micro-silica são exemplos de adições que podem melhorar a qualidade e a vida útil do concreto nesse ambiente, e dependendo, mudar o cimento utilizado para fabricação do concreto.

Portanto, este fato confirma o que salientam Guimarães (2000), Rodrigues (2009) e Silva (2010), no qual o cimento ARI RS não é recomendável para obras marítimas e as recomendações da NBR 6118/2014 sobre o tipo de cimento CPIII (alto forno) e CPIV (pozolânico) ou o uso de aditivos, o que é pouco, a base de pozolanas ou cinza de casca de arroz deveriam ser mantidas. Salienta-se que a norma não estabelece percentuais mínimos de adições que devem ser utilizadas nesse tipo de ambiente para que o concreto mantenha a mesma durabilidade que o concreto feito com CPIII e CPIV em ambientes menos agressivos. Deveriam ser feitas recomendações mais específicas para utilização de adições para concretos em ambientes desse tipo. Ou, também, remeter a um concreto com um máximo coeficiente de difusão.

5.2 Sugestões de continuidade das pesquisas

A fim de dar continuidade a presente pesquisa uma sugestão bastante viável seria o monitoramento do concreto dos tetrápodes do molhe leste da barra do Rio Grande aos 20 anos, extraíndo corpos de prova (CP's) ou com a obtenção de amostras na forma de pó, para posterior análise em laboratório, para verificar o comportamento nessa idade, verificando, por exemplo, se o valor máximo de cloretos (C_{pico}) do micro ambiente MLLM esta estabilizado.

Poderiam também ser realizados trabalhos futuros que levassem em consideração outras influências nesses ambientes como a ação do vento, umidade relativa e o índice pluviométrico da região. Aspectos econômicos quanto à recuperação de estruturas atacadas com cloretos, em ambientes similares, também seriam de fundamental importância para engenharia. Estudar a obtenção de modelo determinístico que considerasse a formação de pico e a variação de

Cs, obtendo um coeficiente de difusão real em estado não estacionário, sem usar o artifício de transladar o pico para a

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7680. Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência a compressão. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2006.
- ANDRADE, C.; CASTELO, V.; ALONSO, C.; GONZALES, J. A., 1986. **The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance AC Impedance Methods.** ASTM STP 906, ed. V. Chaker, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ANDRADE, M. C., 1992. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras.** Tradução e adaptação Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini.
- ANDRADE, J. J. O. 1997. **Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos.** Porto Alegre. 256 p. Tese apresentada a Escola de Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

- ANDRADE, et al. 2000. **Chloride Penetration Modelling**. In: Workshop design of Durability of Concrete. Proceedings, Berlin.
- ANG, A.; TANG, W., 1984. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability**. v. 2, 1ª Ed., Ed. John Wiley and Sons. 562p.
- BAGGIO, T. F., 2011. **Filmes Híbridos Obtidos a Partir de Precursores Alcoóxicos para Proteção Contra Corrosão em Aço Estrutural**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre/RS.
- BAKKER, R. F. M., 1988. **Initiation priod. In: Corrosion of Steel in Concrete** – Report of The Technical Committee 60-csc-Rilem. Editor Peter Schiessl, Ed. Chapman & Hall, p. 22- 55.
- BARBOSA, P.; HELENE, P.R.L.; PEREIRA, P.; GRULLON M.; MEDEIROS, M. 2004. **Influência dos Ciclos Molhamento e Secagem da Altura e do Posicionamento de Pilares no Teor de Íons Cloreto Presentes no Concreto com 30 Anos de Idade**. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENGO. Rio Grande, FURG.
- BICZÓK, I. 1972. **Corrosion y Proteccion del Hormigon**. Trad. Emilio j. Dócon Asensi. Bilbao, Ediciones Urmo.
- CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. **Estuaries, In: The Sea. Ideas and observations on progress in the Study of the sears**. ed. M. N. Hill, Interscience Publishers, N. Y., P. 306-324, 1963.
- CÁNOVAS, M. F.,1988. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. Trad. e adapt. de M. Celeste Marcondes et alii, Coordenação Técnica de L.A. Falcão Bauer. São Paulo, Pini.
- CASCUDO, O. 1994. **Inspeção de Estruturas de Concreto com Vistas ao Controle da Corrosão das Armaduras – Técnicas e Parâmetros**. In: Reunião do IBRACON – REIBRAC: Manutenção e Controle de Estruturas de Concreto, 36a. Porto Alegre. Anais. 5º ed.

- CASTRO, P.; DE RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. 2001. **Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments**. Cement and Concrete Research, v.31, p. 529-37.
- CRANK, J., 1975. **The Mathematics of Diffusion**, second ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK.
- CAPIOTO, N., 2006. **Uso de Silano Btse como Protetivo Contra Corrosão de Laminado de Aço Carbono**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CIENTEC, 1997. **Relatórios de ensaios realizados durante a execução dos tetrápodes**. Porto Alegre, 1997.
- CLIMENT, M. A.; VERA, G.; LÓPEZ, J. F.; VIQUEIRA, E.; ANDRADE, C. A., 2002. **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.
- FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L., 1994. **Assim Caminha a Corrosão**. Técnica, v. 10, P. 28-33, maio/junho. São Paulo, Pini.
- FURG–FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE, CENTRO DE PESQUISAS E ORIENTAÇÃO INDUSTRIAL. **Relatórios de Ensaios Realizados Durante a execução dos Tetrápodes**. Rio Grande, 1997 a 1998.
- GEMELLI, E., 2001. **Atuação da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Joinville, 2001. Universidade UDESC. Escola de Engenharia.
- GENTIL, V., 2003. **Corrosão**. 4ª Edição, LTC, 2003, 201-212
- GUIMARÃES, A. T. C., 1997. **Desempenho do Concreto em Ambiente Marítimo na Região do Extremo Sul do Brasil. Rio Grande**. 151 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica – FURG – Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

- GUIMARÃES, A. T. C., 2000. **Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado em Ambientes Marítimos** – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil – PCC/USP.
- GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Chloride Diffusion and the Influence of the Saturation Degree of the Concrete**, 2002. Proceedings of the Third International RILEM Workshop, 9-10 September 2002, Madrid, Spain, p. 237-256.
- GUIMARÃES, A. T. C.; BANDEIRA, F.; GUIMARÃES, D.; PENNA, L., 2003. **Durabilidade de Tetrápode de Concreto Contaminado com Íons Cloreto: estudo de caso**. 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Espírito Santo. Anais.
- GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L.; CASTAGNO, R., 2004. **Penetração de Cloretos em Estruturas com Secagem e Molhagem em Zona de Névoa**. Seminário em Engenharia Oceânica. Mestrado em Engenharia Oceânica. Departamento de Materiais e Construção – FURG. Departamento de Construção Civil PCC/USP. Rio Grande, RS.
- GUIMARÃES, A. T. C., 2005. **Grau de Saturação: Sua Variação com o Tipo de Concreto e sua Influência na Difusão e Íons Cloreto**. São Paulo. Monografia Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de Pós-Doutorado em Engenharia Civil.
- GUIMARÃES, A. T. C., CASTRO, P. e NUNES, Jorge L.O. 2007. **Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos**. In: 49o Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. 49o Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, v. 1.
- GUIMARÃES, A. T. C.; ANTÓN, M. A.; CLIMENT, M. A.; ALMENAR, G. V.; **Behaviour of Chloride Content at the Surface of Concrete in Submerged Test Conditions**. International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto: Portugal, 2011.
- HAUSMANN, D. A., 1967. **Steel Coorosion in concrete: how does it occur Materials Protection**, v6, p. 19-23, nov.

- HELENE, P. R. L., 1981. **Corrosão das Armaduras em Concreto Armado**. In: Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto, 4., Campinas, 1981. SIMPATCON: QDLV Campinas, Concrelix.
- HELENE, P. R. L., 1986. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. Pini/ipt São Paulo.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P., 1992. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Pini.
- HELENE, P. R. L., 1993. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. Tese (livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil.
- HELENE, P. R. L., 1994. **Contribuição a Normalização: A Resistência sob Carga Mantida a Idade de Estimativa da Resistência Característica; Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto Armado**. São Paulo, (Monografias. EPUSO).
- ISAIA, G. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol. 1 p.1-55. IBRACON, São Paulo: Editor Isaia, G. C., 2011.
- KASMIERCZAK, C. S., 1995. **Contribuição para Análise de Películas Aplicadas Sobre Estruturas de Concreto com o Objetivo de Proteção Contra a Carbonatação**. São Paulo. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
- JASTRZEBSKI, Z. D. 1987. **The nature and properties of engineering materials**. Singapore, John Wiley & Sons Inc.
- LEA, 1970. **The Chemistry of cement and concrete**. Great Britain, Edward Arnould Ltd.
- LIMA, M. G., 2005. **Ação do Meio Ambiente Sobre as Estruturas de Concreto**. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor: Isaia, G. C., IBRACON, V.1.

- LONGUET, 1973. **La Protection des Armatures dans Le Béton Armé Elaboré Avec des Ciment de Laiter, Silicates Industriales**, v7/8, p.321-28.
- MAGALHÃES, C. P.; FOLLONI, R.; FURMAN, H., 1989. **Análise da Patologia das Obras de Arte do Município de São Paulo. In: Simpósio Nacional de Reforços, Reparos e Proteção das Estruturas de concreto**. São Paulo, maio, 1989. Anais, São Paulo, EPSUP, 1989. P. 3-17.
- MALHEIRO, R. L. M. C., 2008. **Influência do Revestimento de Argamassa no Transporte de Cloretos em Estruturas de Concreto Armado no Meio Urbano**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.
- MARTYS, N. S., 1999. **Diffusion in Partially-Saturated Porous Materials**. Materials and Structures , v.32, p.555-62.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M., 1994. **Concreto: Estruturas, Propriedades e materiais**. São Paulo, Ed. Pini.
- MEIRA, G. R., 2004. **Agressividade por Cloretos em Zonas de Atmosfera Marinha Frente ao Problema da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- MIGLIORINI, A. V. & Guimarães, A. T. C., 2008. **Tipos de bloco de concreto para estrutura hidráulica de proteção as ondas marítima e análise visual dos tetrápode da barra de Rio Grande**. Departamento de materiais e construção. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande, RS, Brasil.
- MIGLIORINI, A. V. 2011. **Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para possível utilização em carapaça de molhes**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- MIGLIORINI, A. V. & Guimarães, A. T. C., 2011. **Verificação da Resistência do Concreto Exposto ao Ambiente Marítimo com Inserção de Fibras em Teor Próximo ao Volume Crítico**. Departamento de materiais e construção. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande, RS, Brasil.

- MOHAMMED, T. U. & HAMADA, H., 2003. **Relationship Between free Chloride and total Chloride Contents in Concrete**. Cement and Concret Research.
- MOTA, J. M., 2012. et al. **A Influência do Teor de Adição Metacaulim nas Propriedades no Estado Endurecido: Capilaridade e Resistência Mecânica de Argamassas Inorgânicas para Recuperação de Monumentos Históricos**. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- NEPOMUCENO, A. N., 2005. **Mecanismo de Transporte de Fluido no Concreto**. CONCRETO; Vol. 2 Goiás, IBRACOM.
- NEVILLE, A. M., 1982. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini.
- NEVILLE, A. M., 1995. **Chloride Attack of Reinforced Concrete: in Overview**. Materials and Structures. V. 28, p. 63-73. London.
- NEVILLE, A. M. 1997. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini.
- NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. **Chloride diffusion in partially saturated cementitious material, Cement and Concrete Research**. 2003, p. 133-138.
- NUNES, J. L. O. **Intensidade de Ataque de Cloretos: Considerações sobre a Distância do Concreto em Relação à Água do Mar**. Tese Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2006.
- OLIVEIRA, J. C. P. **Projeto de graduação: Avaliação de Modelo Considerando a Avaliação no Tempo do Teor de Cloretos na Superfície**. Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Engenharia, 2013.
- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. 1981. **Diffusion of Chloride Ions in Hardenedcement Pastes**. Cement and Concrete Research, v. 11, p. 395-406, USA, Pergamon Press, Lt, Jan.

- PERAÇA, M. G. T. **Modelos para Estimativa do Grau de Saturação do Concreto Mediante Variáveis Ambientais que Influenciam na sua Variação**. Dissertação Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.
- PEREPÉREZ, B.; BARBERÁ, E.; ANDRADE, C. 1987. **La Aressividad y la Durabilidad de las Estructuras de Homigón**. Informe de la construccion. V. 38. 388.
- POURBAIX, M., 1973. **Lectures on Eletrochemical Corrosion**. Plenum Press – New York.
- RIBEIRO, Daniel Vêras. et al.. 2014. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de janeiro: Elsevier Editora Ltda. 246 p.
- RINCÓN, O. T.; CARRUYO, A. R.; ANDRADE, C.; HELENE, P.; DÍAS, I. 1998. **Manual de Inspeccion, evaluacion y Diagnostico de Corrosion es Estructuras de Hormigón armado**. DURAR – Red Tematica XV.B – Durabilidad de la armadura.
- RODRIGUES, F. T., 2009. **Medição do Grau de Saturação e Difusão de íons Cloreto em Concretos Executados com Cimento de alta Resistência Inicial**. Dissertação apresentada para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande.
- RUSCH, H. 1975. **Hormigón Armado y Hormigón Pretensado: propiedades de los materiales y procedimiento de cálculo**. Trad. Departamento técnico C.E.C.S.A., Barcelona, Compañia Editorial Continental.
- SILVA, C. A., 2010. **Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da barra (Rio Grande – RS – Brasil)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- SHIMOMUKAY, R. 2011. **Modelos de Previsão de Vida Útil para Estruturas de Concreto Armado no Estado de Propagação da Corrosão da Armadura**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia. Porto Alegre.

- SOUZA, K. N., 2005. **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**. Dissertação Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- SOUZA E RIPPER, 1998. **Patologia – Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI.
- TOUKAKU, 2007. Disponível site: <http://members.aol.com/paperworks77/toukakoutoueimokei/toukakoutoueimokei.htm>. Acessado dia: 12 de março de 2017.
- TREADAWAY, 1988. **Corrosion Period**. In schiessl, P., ed. Corrosion of Steel in Concrete. London, Chapman and Hall.
- TULA, 2000. **Modelo de Previsão de Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas a Carbonatação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- TUUTI, K., 1980. **Corrosion Stell in Concrete**. STOCKOLM; Swedish cement and concrete research institue.
- VAN DER TOORN, A., 1992. **The Maintenance of Civil Engineering Structures**. Heron v. 39, n. 4. 1992.

Cs Perfil 5 anos MLLS	0,2000	%
Mt	4,6000	mm
t	5,0000	ano
k	0,0894	mm/ano^0,5
D^0,5	11,6064	mm²/ano
π	3,1416	
D	134,7087	mm²/ano

Perfil MLLS aos 5 anos	
PROF. (mm)	TEOR CL- (%)
0	0,200
5	0,160
10	0,140
15	0,130
20	0,070
25	0,080
30	0,060
CORRELAÇÃO	-0,960158717

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 5 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	1	0	1	0,2	0
5	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,990763641	0,170738731	0,89163962	0,1677052	5,93708E-05
10	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,963563281	0,341477462	0,785268655	0,1390823	8,42088E-07
15	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,919878659	0,512216194	0,682767619	0,1140308	0,000255015
20	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,862027193	0,682954925	0,585809097	0,0923892	0,000501276
25	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,792960419	0,853693656	0,495777223	0,0739437	3,66787E-05
30	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5,0000	0,716015088	1,024432387	0,413711996	0,058439	2,43665E-06
Soma:										0,0008556

Tabela 1.2 – Regressão para obter o valor de Cs, Mt, k e D para o perfil aos 9,5 anos (MLLS).

Cs Perfil 9,5 anos MLLS	0,3500	%
Mt	11,2000	mm
t	9,5000	ano
k	0,1136	mm/ano^{0,5}
D^{0,5}	11,7150	mm²/ano
π	3,1416	
D	137,2418	mm²/ano

Perfil MLLS aos 9,5 anos	
PROF. (mm)	TEOR CI- (%)
0	0,370
5	0,280
10	0,240
15	0,220
20	0,200
25	0,180
30	0,170
35	0,130
40	0,120
	-
CORRELAÇÃO	0,939755631

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 9,5 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^{0,5}	Cs	D	t	EXP (-X ² /4.D.t)	X.PI ^{0,5} /2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro ²
0	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	1	0	1	0,35	0,0004
5	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,995217781	0,122718463	0,921999656	0,308725	0,000825125
10	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,981007906	0,245436926	0,844742967	0,2707869	0,000947832
15	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,957774218	0,368155389	0,768952383	0,2361381	0,000260438
20	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,926168552	0,490873852	0,695308955	0,2047008	2,2098E-05
25	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,88706036	0,613592315	0,62443408	0,1763693	1,31817E-05
30	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,841496993	0,736310778	0,556873992	0,1510126	0,00036052
35	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,790657178	0,859029241	0,493087652	0,1284782	2,31599E-06
40	0,1136	3,0822	0,3500	137,2418	9,5000	0,735800573	0,981747704	0,433438437	0,1085957	0,000130058

Cs Perfil 9,5 anos MLLS	0,3400	%
Mt	11,3000	mm
t	9,5000	ano
k	0,1103	mm/ano^0,5
D^0,5	12,1673	mm^2/ano
π	3,1416	
D	148,0422	mm^2/ano

Perfil MLLS aos 9,5 anos	
PROF. (mm)	TEOR CL- (%)
0	0,370
5	0,280
10	0,240
15	0,220
20	0,200
25	0,180
30	0,170
35	0,130
40	0,120
CORRELAÇÃO	- 0,939755631

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 9,5 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X^2/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx	Erro^2
0	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	1	0	1	0,34	0,0009
5	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,995565893	0,118157246	0,92489004	0,3013364	0,000455241
10	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,98238119	0,236314492	0,850444204	0,265679	0,000659412
15	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,960793566	0,354471737	0,777309052	0,2329882	0,000168694
20	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,931365514	0,472628983	0,706096788	0,2031989	1,02327E-05
25	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,894849993	0,590786229	0,637369959	0,1762222	1,42717E-05
30	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,852158429	0,708943475	0,571628295	0,1519481	0,00032587
35	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,804322965	0,827100721	0,509298177	0,1302479	6,14572E-08
40	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5000	0,752455138	0,945257967	0,450725093	0,1109772	8,14102E-05
Soma:										0,0026152

Cs Perfil 9,5 anos MLLS	0,3300	%
Mt	11,5000	mm
t	9,5000	ano
k	0,1071	mm/ano^0,5
D^0,5	12,7578	mm^2/ano
π	3,1416	
D	162,7625	mm^2/ano

MLLS aos 9,5 anos	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,370
5	0,280
10	0,240
15	0,220
20	0,200
25	0,180
30	0,170
35	0,130
40	0,120
CORRELAÇÃO	- 0,939755631

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 9,5 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X^2/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx	Erro^2
0	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	1	0	1	0,33	0,0016
5	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,995966104	0,112687563	0,92835741	0,2941461	0,000200112
10	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,983961789	0,225375125	0,857291265	0,2609474	0,000438793
15	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,964275261	0,338062688	0,787364133	0,230372	0,000107577
20	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,937374064	0,45075025	0,719111381	0,2023674	5,6044E-06
25	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,90388662	0,563437813	0,653028939	0,176862	9,84711E-06
30	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,864577838	0,676125375	0,589562593	0,1537667	0,000263521
35	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,820320108	0,788812938	0,529099219	0,1329767	8,86094E-06
40	0,1071	3,0822	0,3300	162,7625	9,5000	0,772061207	0,901500501	0,471960204	0,1143743	3,16483E-05
Soma:										0,0026660

Cs Perfil 15 anos MLLS	0,4100	%
Mt	13,4000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1059	mm/ano^{0,5}
D^{0,5}	9,5220	mm²/ano
π	3,1416	
D	90,6694	mm²/ano

Perfil MLLS aos 15 anos	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,460
7,5	0,300
17,5	0,230
47,5	0,140
CORRELAÇÃO	- 0,893029491

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^{0,5}	Cs	D	t	EXP (-X ² /4.D.t)	X.PI ^{0,5} /2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx	Erro ²
0	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	1	0	1	0,41	0,0025
7,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,98971351	0,180231295	0,885655428	0,3403372	0,001627088
17,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,945260944	0,420539688	0,737216174	0,2604452	0,000926912
47,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,660512431	1,141464868	0,362423321	0,1011958	0,001505769
									Soma:	0,0065598

Cs Perfil 15 anos MLLS	0,4100	%
Mt	13,4000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1059	mm/ano^{0,5}
D^{0,5}	9,5220	mm²/ano
π	3,1416	
D	90,6694	mm²/ano

Perfil MLLS aos 15 anos	
PROF. (mm)	TEOR CI- (%)
0	0,460
7,5	0,300
17,5	0,230
47,5	0,140
CORRELAÇÃO	- 0,893029491

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLS 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx	Erro^2
0	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	1	0	1	0,41	0,0025
7,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,98971351	0,180231295	0,885655428	0,3403372	0,001627088
17,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,945260944	0,420539688	0,737216174	0,2604452	0,000926912
47,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15,000	0,660512431	1,141464868	0,362423321	0,1011958	0,001505769
Soma:										0,0065598

Tabela 1.5 – Regressão para obter o valor de Cs, Mt, k e D para o perfil aos 9,5 anos (MLLM).

Cs Perfil 9,5 anos MLLM	0,4900	%	Perfil MLLM aos 9,5 anos	
Mt	23,3000	mm	PROF. (mm)	TEOR CI- (%)
t	9,5000	ano	0	0,5
k	0,1590	mm/ano^0,5	5	0,46
D^0,5	17,4082	mm²/ano	10	0,37
π	3,1416		15	0,39
D	303,0444	mm²/ano	20	0,35
			25	0,32
			30	0,3
			CORRELAÇÃO	-0,954212546

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 9,5 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (- X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	1	0	1	0,49	0,0001
5	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,997831403	0,082584785	0,947462914	0,4505968	8,84195E-05
10	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,991353787	0,165169571	0,895153362	0,4133158	0,001876261
15	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,980651073	0,247754356	0,843295927	0,3781432	0,000140584
20	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,965861112	0,330339142	0,79210935	0,3450562	2,44409E-05
25	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,947172736	0,412923927	0,741803771	0,3140235	3,5719E-05
30	0,1590	3,0822	0,4900	303,0444	9,5000	0,924821742	0,495508713	0,692578146	0,2850052	0,000224844
Soma:										0,002265

Cs Perfil 9,5 anos MLLM	0,5000	%
Mt	22,4000	mm
t	9,5000	ano
k	0,1622	mm/ano^0,5
D^0,5	16,4010	mm²/ano
π	3,1416	
D	268,9940	mm²/ano

Perfil MLLM aos 9,5 anos	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,5
5	0,46
10	0,37
15	0,39
20	0,35
25	0,32
30	0,3
CORRELAÇÃO	-0,954212546

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 9,5 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (- X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	1	0	1	0,5	0
5	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,997557228	0,087656045	0,944241889	0,4573944	6,78936E-06
10	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,990264658	0,17531209	0,888755744	0,4172275	0,002230438
15	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,978228651	0,262968135	0,833809556	0,3794817	0,000110636
20	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,96162361	0,35062418	0,779663468	0,3441274	3,44878E-05
25	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,940687767	0,438280225	0,726566087	0,3111241	7,87814E-05
30	0,1622	3,0822	0,5000	268,9940	9,5000	0,915717501	0,52593627	0,674751071	0,2804207	0,000383348
Soma:										0,002461

Tabela 1.6 – Regressão para obter o valor de Cs, Mt, k e D para o perfil aos 15 anos (MLLM).

Cs Perfil 15 anos MLLM	0,5800	%
Mt	43,5000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1498	mm/ano^0,5
D^0,5	21,8510	mm²/ano
π	3,1416	
D	477,4648	mm²/ano

Perfil MLLM aos 15 anos	
PROF. (mm)	TEOR CI- (%)
0	0,6
30	0,38
62,5	0,3
CORRELAÇÃO	-0,959303664

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1498	3,8730	0,5800	477,4648	15,000	1	0	1	0,58	0,0004
30	0,1498	3,8730	0,5800	477,4648	15,000	0,969072426	0,314159265	0,802074803	0,4159141	0,001289819
62,5	0,1498	3,8730	0,5800	477,4648	15,000	0,872533834	0,654498469	0,601521184	0,2777267	0,0004961
Soma:										0,002186

Cs Perfil 15 anos MLLM	0,5900	%
Mt	43,0000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1523	mm/ano^0,5
D^0,5	21,2337	mm^2/ano
π	3,1416	
D	450,8704	mm^2/ano

Perfil MLLM aos 15 anos	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,6
30	0,38
62,5	0,3
CORRELAÇÃO	-0,95930366

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1523	3,8730	0,5900	450,8704	15,000	1	0	1	0,59	0,0001
30	0,1523	3,8730	0,5900	450,8704	15,000	0,967278344	0,323291802	0,796445853	0,4187784	0,001503766
62,5	0,1523	3,8730	0,5900	450,8704	15,000	0,865544385	0,673524588	0,590994886	0,2758219	0,000584579
Soma:										0,002188

Cs Perfil 15 anos MLLM	0,5700	%
Mt	44,1000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1472	mm/ano^0,5
D^0,5	22,5410	mm²/ano
π	3,1416	
D	508,0966	mm²/ano

MLLMA OS 15 ANOS	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,6
30	0,38
62,5	0,3
CORRELAÇÃO	-0,959303664

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1472	3,8730	0,5700	508,0966	15,000	1	0	1	0,57	0,0009
30	0,1472	3,8730	0,5700	508,0966	15,000	0,970909573	0,304542145	0,80801355	0,4131562	0,001099332
62,5	0,1472	3,8730	0,5700	508,0966	15,000	0,879735987	0,634462802	0,612696549	0,2798716	0,000405152
Soma:										0,002404

Cs Perfil 15 anos MLLM	0,6000	%
Mt	42,5000	mm
t	15,0000	ano
k	0,1549	mm/ano^0,5
D^0,5	20,6370	mm²/ano
π	3,1416	
D	425,8868	mm²/ano

MLLMA OS 15 ANOS	
PROF. (mm)	TEOR Cl- (%)
0	0,6
30	0,38
62,5	0,3
CORRELAÇÃO	-0,959303664

Regressão pelo método dos mínimos quadrados MLLM aos 15 anos - k										
PROF. (mm)	K 9,5 anos	t ^0,5	Cs	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx	Erro^2
0	0,1549	3,8730	0,6000	425,8868	15,000	1	0	1	0,6	0
30	0,1549	3,8730	0,6000	425,8868	15,000	0,965392404	0,332639222	0,790695405	0,4214257	0,001716085
62,5	0,1549	3,8730	0,6000	425,8868	15,000	0,858243612	0,692998379	0,58030949	0,273654	0,000694109
Soma:										0,002410

ANEXO 2 – Previsão do comportamento dos teores de cloretos em função de k, D e t (Cx) (MLLS).

Tabela 2.1 – Modelo aos 5 anos k (MLLS).

Modelo MLLS aos 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(D.t))$	Cx
0	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2000
5	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,9908	0,1707	0,8916	0,1677
7,5	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,9793	0,2561	0,8381	0,1529
10	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,9636	0,3415	0,7853	0,1391
15	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,9199	0,5122	0,6828	0,1140
17,5	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,8926	0,5976	0,6335	0,1028
20	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,8620	0,6830	0,5858	0,0924
25	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,7930	0,8537	0,4958	0,0739
30	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,7160	1,0244	0,4137	0,0584
35	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,6346	1,1952	0,3403	0,0456
40	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,5522	1,3659	0,2758	0,0351
47,5	0,0894	2,2361	0,2000	134,7087	5	0,4328	1,6220	0,1956	0,0231

Tabela 2.2 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 9,5 anos k (MLLS).

Estimativa modelo de MLLS 5 para 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(D.t))$	Cx
0	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2757
5	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9951	0,1239	0,9213	0,2429
7,5	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9891	0,1858	0,8821	0,2275
10	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9807	0,2477	0,8433	0,2128
15	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9570	0,3716	0,7669	0,1853
17,5	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9419	0,4335	0,7294	0,1725
20	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,9248	0,4955	0,6926	0,1604
25	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,8851	0,6193	0,6212	0,1379
30	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,8388	0,7432	0,5532	0,1179
35	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,7872	0,8671	0,4891	0,1001
40	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,7316	0,9909	0,4291	0,0844
47,5	0,0894	3,0822	0,2757	134,7087	9,5	0,6435	1,1767	0,3478	0,0646

Tabela 2.3 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 15 anos k (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 5 para 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	erfc $(X/2RAIZ(D.t))$	Cx
0	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,3464
5	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9969	0,0986	0,9373	0,3133
7,5	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9931	0,1479	0,9061	0,2976
10	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9877	0,1972	0,8750	0,2824
15	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9725	0,2957	0,8135	0,2536
17,5	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9628	0,3450	0,7831	0,2399
20	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9517	0,3943	0,7531	0,2268
25	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,9256	0,4929	0,6941	0,2021
30	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,8946	0,5915	0,6370	0,1794
35	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,8594	0,6900	0,5819	0,1586
40	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,8204	0,7886	0,5292	0,1396
47,5	0,0894	3,8730	0,3464	134,7087	15	0,7564	0,9365	0,4549	0,1144

Tabela 2.4 – Modelo aos 9,5 anos k (MLLS).

Modelo MLLS aos 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx
0	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3400
5	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9956	0,1182	0,9249	0,3013
7,5	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9901	0,1772	0,8875	0,2831
10	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9824	0,2363	0,8504	0,2657
15	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9608	0,3545	0,7773	0,2330
17,5	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9470	0,4136	0,7414	0,2177
20	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,9314	0,4726	0,7061	0,2032
25	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,8948	0,5908	0,6374	0,1762
30	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,8522	0,7089	0,5716	0,1519
35	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,8043	0,8271	0,5093	0,1302
40	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,7525	0,9453	0,4507	0,1110
47,5	0,1103	3,0822	0,3400	148,0422	9,5	0,6696	1,1225	0,3705	0,0863

Tabela 2.5 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 5 anos k (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 9,5 para 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx
0	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2467
5	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,9916	0,1629	0,8966	0,2086
7,5	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,9812	0,2443	0,8455	0,1911
10	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,9668	0,3257	0,7949	0,1746
15	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,9268	0,4886	0,6966	0,1447
17,5	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,9017	0,5700	0,6492	0,1311
20	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,8736	0,6515	0,6032	0,1186
25	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,8097	0,8143	0,5159	0,0961
30	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,7379	0,9772	0,4356	0,0770
35	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,6612	1,1401	0,3630	0,0610
40	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,5825	1,3029	0,2985	0,0477
47,5	0,1103	2,2361	0,2467	148,0422	5	0,4667	1,5473	0,2170	0,0323

Tabela 2.6 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 15 anos k (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 9,5 para 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc $(X/2RAIZ(Dt))$	Cx
0	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,4272
5	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9972	0,0940	0,9402	0,3883
7,5	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9937	0,1410	0,9104	0,3697
10	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9888	0,1881	0,8807	0,3517
15	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9750	0,2821	0,8219	0,3175
17,5	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9661	0,3291	0,7929	0,3013
20	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9560	0,3761	0,7641	0,2856
25	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9321	0,4702	0,7076	0,2561
30	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,9036	0,5642	0,6526	0,2288
35	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,8712	0,6582	0,5995	0,2036
40	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,8352	0,7523	0,5484	0,1806
47,5	0,1103	3,8730	0,4272	148,0422	15	0,7757	0,8933	0,4760	0,1497

Tabela 2.7 – Modelo aos 15 anos k (MLLS).

Modelo aos 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D 15 anos	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(Dt))$	CX
0	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,4100
5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9954	0,1202	0,9236	0,3626
7,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9897	0,1802	0,8857	0,3403
10	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9818	0,2403	0,8479	0,3190
15	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9595	0,3605	0,7736	0,2791
17,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9453	0,4205	0,7372	0,2604
20	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,9291	0,4806	0,7014	0,2427
25	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,8915	0,6008	0,6317	0,2099
30	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,8475	0,7209	0,5651	0,1804
35	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,7984	0,8411	0,5022	0,1542
40	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,7452	0,9612	0,4431	0,1309
47,5	0,1059	3,8730	0,4100	90,6694	15	0,6605	1,1415	0,3624	0,1012

Tabela 2.8 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 15 para 5 anos k (MLLS).

Estimativa modelo de 15 para 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D 15 anos	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	CX
0	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2367
5	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,9863	0,2081	0,8681	0,1907
7,5	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,9695	0,3122	0,8033	0,1701
10	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,9463	0,4162	0,7398	0,1511
15	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,8833	0,6243	0,6184	0,1177
17,5	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,8446	0,7284	0,5611	0,1032
20	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,8021	0,8325	0,5066	0,0900
25	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,7085	1,0406	0,4064	0,0676
30	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,6088	1,2487	0,3191	0,0498
35	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,5089	1,4568	0,2451	0,0359
40	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,4138	1,6649	0,1840	0,0254
47,5	0,1059	2,2361	0,2367	90,6694	5	0,2882	1,9771	0,1147	0,0145

Tabela 2.9 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 15 para 9,5 anos k (MLLS).

Estimativa modelo de 15 para 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D 15 anos	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc $(X/2RAIZ(Dt))$	CX
0	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3263
5	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,9928	0,1510	0,9041	0,2794
7,5	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,9838	0,2265	0,8566	0,2577
10	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,9714	0,3020	0,8096	0,2372
15	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,9368	0,4529	0,7178	0,1996
17,5	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,9150	0,5284	0,6733	0,1824
20	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,8904	0,6039	0,6299	0,1664
25	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,8341	0,7549	0,5470	0,1374
30	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,7701	0,9059	0,4698	0,1124
35	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,7008	1,0569	0,3991	0,0910
40	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,6285	1,2078	0,3352	0,0730
47,5	0,1059	3,0822	0,3263	90,6694	9,5	0,5195	1,4343	0,2524	0,0514

Tabela 2.10 – Modelo aos 5 anos k (MLLM).

Modelo MLLM aos 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	Cx
0	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3000
5	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9984	0,0701	0,9554	0,2794
10	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9938	0,1402	0,9109	0,2598
15	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9860	0,2104	0,8667	0,2411
20	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9753	0,2805	0,8229	0,2233
25	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9616	0,3506	0,7797	0,2065
30	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9452	0,4207	0,7371	0,1905
35	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9262	0,4909	0,6953	0,1755
40	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,9047	0,5610	0,6544	0,1613
62,5	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,7830	0,8766	0,4843	0,1076
92,5	0,1342	2,2361	0,3000	798,58	5	0,5852	1,2973	0,3006	0,0586

Tabela 2.11 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 9,5 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 5 para 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	C_x
0	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,4135
5	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9992	0,0509	0,9676	0,3928
10	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9967	0,1017	0,9353	0,3728
15	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9926	0,1526	0,9031	0,3535
20	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9869	0,2035	0,8710	0,3348
25	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9796	0,2544	0,8392	0,3168
30	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9708	0,3052	0,8076	0,2995
35	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9604	0,3561	0,7763	0,2828
40	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,9486	0,4070	0,7454	0,2668
62,5	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,8792	0,6359	0,6119	0,2027
92,5	0,1342	3,0822	0,4135	798,58	9,5	0,7543	0,9412	0,4527	0,1357

Tabela 2.12 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 15 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 5 para 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	C_x
0	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,5196
5	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9995	0,0405	0,9742	0,4988
10	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9979	0,0810	0,9485	0,4786
15	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9953	0,1215	0,9228	0,4589
20	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9917	0,1619	0,8972	0,4398
25	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9870	0,2024	0,8717	0,4212
30	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9814	0,2429	0,8463	0,4031
35	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9748	0,2834	0,8211	0,3856
40	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9672	0,3239	0,7961	0,3686
62,5	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,9217	0,5061	0,6864	0,2984
92,5	0,1342	3,8730	0,5196	798,58	15	0,8365	0,7490	0,5501	0,2205

Tabela 2.13 – Modelo aos 9,5 anos k (MLLM).

Modelo MLLM aos 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	Cx
0	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,4900
5	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9978	0,0826	0,9475	0,4506
10	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9914	0,1652	0,8952	0,4133
15	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9807	0,2478	0,8433	0,3781
20	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9659	0,3303	0,7921	0,3451
25	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9472	0,4129	0,7418	0,3140
30	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,9248	0,4955	0,6926	0,2850
35	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,8991	0,5781	0,6446	0,2580
40	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,8703	0,6607	0,5981	0,2328
62,5	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,7123	1,0323	0,4101	0,1416
92,5	0,1590	3,0822	0,4900	303,04	9,5	0,4757	1,5278	0,2228	0,0663

Tabela 2.14 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 5 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 9,5 para 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	t	EXP (- X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx
0	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3555
5	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,9959	0,1138	0,9276	0,3165
10	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,9836	0,2277	0,8559	0,2804
15	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,9636	0,3415	0,7853	0,2472
20	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,9361	0,4553	0,7164	0,2168
25	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,9020	0,5692	0,6497	0,1892
30	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,8620	0,6830	0,5858	0,1642
35	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,8170	0,7968	0,5249	0,1417
40	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,7680	0,9107	0,4675	0,1217
62,5	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,5249	1,4229	0,2562	0,0570
92,5	0,1590	2,2361	0,3555	303,04	5	0,2437	2,1060	0,0929	0,0171

Tabela 2.15 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 15 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 9,5 para 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	C_x
0	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,6157
5	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9986	0,0657	0,9582	0,5761
10	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9945	0,1314	0,9165	0,5382
15	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9877	0,1972	0,8750	0,5019
20	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9782	0,2629	0,8339	0,4673
25	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9662	0,3286	0,7932	0,4344
30	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9517	0,3943	0,7530	0,4031
35	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9348	0,4601	0,7136	0,3735
40	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,9158	0,5258	0,6748	0,3454
62,5	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,8067	0,8215	0,5122	0,2376
92,5	0,1590	3,8730	0,6157	303,04	15	0,6246	1,2159	0,3320	0,1361

Tabela 2.16 – Modelo aos 15 anos k (MLLM).

Modelo MLLM aos 15 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	Cx
0	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,5800
5	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9991	0,0524	0,9667	0,5501
10	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9965	0,1047	0,9334	0,5213
15	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9922	0,1571	0,9003	0,4934
20	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9861	0,2094	0,8673	0,4666
25	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9784	0,2618	0,8345	0,4408
30	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9691	0,3142	0,8021	0,4159
35	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9581	0,3665	0,7700	0,3920
40	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,9457	0,4189	0,7382	0,3691
62,5	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,8725	0,6545	0,6015	0,2777
92,5	0,1498	3,8730	0,5800	477,46	15	0,7418	0,9687	0,4396	0,1833

Tabela 2.17 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 15 para 5 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 15 para 5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx
0	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3349
5	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9974	0,0907	0,9423	0,3054
10	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9896	0,1814	0,8849	0,2776
15	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9767	0,2721	0,8281	0,2516
20	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9590	0,3628	0,7722	0,2273
25	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9366	0,4534	0,7175	0,2047
30	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,9101	0,5441	0,6642	0,1837
35	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,8796	0,6348	0,6125	0,1643
40	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,8457	0,7255	0,5627	0,1465
62,5	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,6643	1,1336	0,3657	0,0836
92,5	0,1498	2,2361	0,3349	477,46	5	0,4082	1,6778	0,1807	0,0352

Tabela 2.18 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 15 para 9,5 anos k (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 15 para 9,5 anos - k									
PROFUNDIDADE (mm)	K aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (- $X^2/4.D.t$)	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc ($X/2RAIZ(Dt)$)	Cx
0	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,4616
5	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9986	0,0658	0,9581	0,4318
10	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9945	0,1316	0,9164	0,4034
15	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9877	0,1974	0,8749	0,3762
20	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9782	0,2632	0,8337	0,3502
25	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9661	0,3290	0,7930	0,3255
30	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9516	0,3948	0,7528	0,3021
35	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9347	0,4606	0,7133	0,2798
40	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,9156	0,5263	0,6745	0,2587
62,5	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,8063	0,8224	0,5117	0,1779
92,5	0,1498	3,0822	0,4616	477,46	9,5	0,6240	1,2172	0,3315	0,1018

ANEXO 3 – Determinação do tempo equivalente (teq) considerando o tempo de troca (t_{troca}) e Cs constante (0,600 %) para os microambientes MLLS e MLLM.

Tabela 3.1 – Teq e ttroca para Cs constante (0,600 %) (MLLS e MLLM) k.

MLLS			MLLM		
Tempo de troca k aos 5 anos			Tempo de troca k aos 5 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
k	0,0894	mm/ano ^{0,5}	k	0,1342	mm/ano ^{0,5}
ttroca	45	anos	ttroca	20	anos
teq	27,7778	anos	teq	12,3457	anos
Tempo de troca k aos 9,5 anos			Tempo de troca k aos 9,5 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
k	0,1103	mm/ano ^{0,5}	k	0,1590	mm/ano ^{0,5}
ttroca	29,5848	anos	ttroca	14,2441	anos
teq	18,2622	anos	teq	8,7926	anos
Tempo de troca k aos 15 anos			Tempo de troca k aos 15 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
k	0,1059	mm/ano ^{0,5}	k	0,1498	mm/ano ^{0,5}
ttroca	32,1237	anos	ttroca	16,0523	anos
teq	19,8295	anos	teq	9,9088	anos

Tabela 3.2 – Teq e ttroca para Cs constante (0,600 %) (MLLS e MLLM) keq.

MLLS			MLLM		
Tempo de troca keq aos 5 anos			Tempo de troca keq aos 5 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
keq	0,1030	mm/ano ^{0,5}	keq	0,1500	mm/ano ^{0,5}
ttroca	33,9335	anos	ttroca	16,0000	anos
teq	20,9466	anos	teq	9,8765	anos
Tempo de troca keq aos 9,5 anos			Tempo de troca keq aos 9,5 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
keq	0,1030	mm/ano ^{0,5}	keq	0,1500	mm/ano ^{0,5}
ttroca	33,9335	anos	ttroca	16,0000	anos
teq	20,9466	anos	teq	9,8765	anos
Tempo de troca keq aos 15 anos			Tempo de troca keq aos 15 anos		
Cs	0,6	%	Cs	0,6	%
keq	0,1030	mm/ano ^{0,5}	keq	0,1500	mm/ano ^{0,5}
ttroca	33,9335	anos	ttroca	16,0000	anos
teq	20,9466	anos	teq	9,8765	anos

ANEXO 4 – Comportamento dos perfis de cloretos considerando C_s constante (0,600%) e t_{troca} para a idade de 50 anos k (MLLS).

Tabela 4.1 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando C_s constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLS).

Estimativa C_s fixo MLLS aos 5 anos $t = 50$ anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	$t_{eq\ real}$	C_0	$erfc(X/2.RAIZ(D.t))$	C_s	C_x
0	0,089	7,071	0,629	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9656	0,6000	0,5794
7,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9485	0,6000	0,5691
10	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9313	0,6000	0,5588
15	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8972	0,6000	0,5383
17,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8802	0,6000	0,5281
20	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8632	0,6000	0,5179
25	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8295	0,6000	0,4977
30	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7960	0,6000	0,4776
35	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7630	0,6000	0,4578
40	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7304	0,6000	0,4382
47,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,6824	0,6000	0,4094

Tabela 4.2 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 45 anos k (MLLS).

Estimativa Cs fixo MLLS aos 5 anos ttroca = 45 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9638	0,6000	0,5783
7,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9457	0,6000	0,5674
10	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,9276	0,6000	0,5566
15	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8916	0,6000	0,5350
17,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8737	0,6000	0,5242
20	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8559	0,6000	0,5135
25	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,8204	0,6000	0,4922
30	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7853	0,6000	0,4712
35	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7506	0,6000	0,4504
40	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,7164	0,6000	0,4298
47,5	0,089	7,071	0,632	134,709	50	45,000	27,778	17,222	32,778	0,000	0,6662	0,6000	0,3997

Tabela 4.3 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando C_s constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLS).

Estimativa C_s fixo MLLS aos 9,5 anos $t = 50$ anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k \cdot t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	$t_{eq \text{ real}}$	C_0	$erfc(X/2 \cdot \text{RAIZ}(D \cdot t))$	C_s	C_x
0	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9627	0,6000	0,5776
7,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9441	0,6000	0,5665
10	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9255	0,6000	0,5553
15	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8885	0,6000	0,5331
17,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8701	0,6000	0,5221
20	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8517	0,6000	0,5110
25	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8153	0,6000	0,4892
30	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7792	0,6000	0,4675
35	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7436	0,6000	0,4462
40	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7086	0,6000	0,4251
47,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,6571	0,6000	0,3943

Tabela 4.4 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando C_s constante (0,600%) e o tempo de troca de 29,585 anos k (MLLS).

Estimativa C_s fixo MLLS aos 9,5 anos $t_{troca} = 29,585$ anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k \cdot t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	t_{eq} real	C_0	$erfc(X/2 \cdot RAIZ(D \cdot t))$	C_s	C_x
0	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9574	0,6000	0,5744
7,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9361	0,6000	0,5617
10	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,9149	0,6000	0,5489
15	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8727	0,6000	0,5236
17,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8517	0,6000	0,5110
20	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,8308	0,6000	0,4985
25	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7894	0,6000	0,4736
30	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7486	0,6000	0,4491
35	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,7084	0,6000	0,4251
40	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,6691	0,6000	0,4015
47,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	29,585	18,262	11,323	38,677	0,000	0,6118	0,6000	0,3671

Tabela 4.5 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLS).

Estimativa Cs fixo MLLS aos 15 anos t = 50 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,9518	0,6000	0,5711
7,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,9277	0,6000	0,5566
10	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,9037	0,6000	0,5422
15	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8561	0,6000	0,5136
17,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8324	0,6000	0,4994
20	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8089	0,6000	0,4853
25	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,7624	0,6000	0,4574
30	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,7168	0,6000	0,4301
35	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,6721	0,6000	0,4033
40	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,6286	0,6000	0,3771
47,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,5657	0,6000	0,3394

Tabela 4.6 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 32,124 anos k (MLLS).

Estimativa Cs fixo MLLS aos 15 anos ttroca = 32,124 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,9478	0,6000	0,5687
7,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,9217	0,6000	0,5530
10	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8958	0,6000	0,5375
15	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8442	0,6000	0,5065
17,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,8186	0,6000	0,4912
20	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,7933	0,6000	0,4760
25	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,7432	0,6000	0,4459
30	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,6943	0,6000	0,4166
35	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,6465	0,6000	0,3879
40	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,6002	0,6000	0,3601
47,5	0,106	7,071	0,749	90,669	50	32,124	19,829	12,294	37,706	0,000	0,5337	0,6000	0,3202

Tabela 4.7 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 5 anos t = 50 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9847	0,6000	0,5908
10	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9693	0,6000	0,5816
15	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9540	0,6000	0,5724
20	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9387	0,6000	0,5632
25	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9234	0,6000	0,5541
30	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9082	0,6000	0,5449
35	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8929	0,6000	0,5358
40	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8778	0,6000	0,5267
62,5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8101	0,6000	0,4860
92,5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,7221	0,6000	0,4332

Tabela 4.8 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 20 anos k (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 5 anos ttroca = 20 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 5 anos	t ^{0,5}	k.t ^{0,5}	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9777	0,6000	0,5866
10	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9554	0,6000	0,5732
15	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9331	0,6000	0,5599
20	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,9109	0,6000	0,5465
25	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8888	0,6000	0,5333
30	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8667	0,6000	0,5200
35	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8447	0,6000	0,5068
40	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,8229	0,6000	0,4937
62,5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,7266	0,6000	0,4359
92,5	0,134	7,071	0,949	798,576	50	20,000	12,346	7,654	42,346	0,000	0,6048	0,6000	0,3629

Tabela 4.9 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 9,5 anos t = 50 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9757	0,6000	0,5854
10	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9515	0,6000	0,5709
15	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9273	0,6000	0,5564
20	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9031	0,6000	0,5419
25	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8791	0,6000	0,5274
30	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8551	0,6000	0,5131
35	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8313	0,6000	0,4988
40	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8077	0,6000	0,4846
62,5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,7037	0,6000	0,4222
92,5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,5735	0,6000	0,3441

Tabela 4.10 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 14,244 anos k (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 9,5 anos t = 14,244 anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9571	0,6000	0,5743
10	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,9143	0,6000	0,5486
15	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8717	0,6000	0,5230
20	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,8296	0,6000	0,4977
25	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,7879	0,6000	0,4727
30	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,7468	0,6000	0,4481
35	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,7064	0,6000	0,4238
40	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,6668	0,6000	0,4001
62,5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,5012	0,6000	0,3007
92,5	0,159	7,071	1,124	303,044	50	14,244	8,793	5,451	44,549	0,000	0,3195	0,6000	0,1917

Tabela 4.11 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos considerando C_s constante (0,600%) para a idade de 50 anos k (MLLM).

Estimativa C_s fixo MLLM aos 15 anos $t = 50$ anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k \cdot t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	$t_{eq \text{ real}}$	C_0	$\text{erfc}(X/2 \cdot \text{RAIZ}(D \cdot t))$	C_s	C_x
0	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9805	0,6000	0,5883
10	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9610	0,6000	0,5766
15	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9416	0,6000	0,5649
20	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9221	0,6000	0,5533
25	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9028	0,6000	0,5417
30	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8835	0,6000	0,5301
35	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8642	0,6000	0,5185
40	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8450	0,6000	0,5070
62,5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,7601	0,6000	0,4560
92,5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,6513	0,6000	0,3908

Tabela 4.12 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 15 anos considerando C_s constante (0,600%) e o tempo de troca de 16,052 anos k (MLLM).

Estimativa C_s fixo MLLM aos 15 anos $t_{troca} = 16,052$ anos k													
PROFUNDIDADE (mm)	k aos 15 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	$t_{eq\ real}$	C0	$erfc(X/2.RAIZ(D.t))$	C_s	C_x
0	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9678	0,6000	0,5807
10	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9356	0,6000	0,5614
15	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,9036	0,6000	0,5421
20	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8717	0,6000	0,5230
25	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8400	0,6000	0,5040
30	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,8085	0,6000	0,4851
35	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,7774	0,6000	0,4664
40	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,7466	0,6000	0,4480
62,5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,6137	0,6000	0,3682
92,5	0,150	7,071	1,059	477,465	50	16,052	9,909	6,143	43,857	0,000	0,4550	0,6000	0,2730

ANEXO 5 – Cálculo do keq considerando o mesmo D para cada microambiente e levando em consideração a idade de 5 e 9,5 anos.

Tabela 5.1 – Cálculo do keq considerando o mesmo D (diferente apenas nas idades estudadas 5, 9,5 e 15) e levando em consideração as idades de 5 e 9,5 anos. (MLLS).

Cs=k.(t)0,5		k =	0,104
Tempo	Cs medido	Cs calc	(Csm-Csc)^2
5	0,21	0,232551	0,000508551
9,5	0,33	0,32055	8,93114E-05
			0,000597862

Cs=k.(t)0,5		k =	0,103
Tempo	Cs medido	Cs calc	(Csm-Csc)^2
5	0,21	0,230315	0,000412699
9,5	0,33	0,3174673	0,000157068
			0,000570

Tabela 5.2 – Cálculo do keq considerando o mesmo D (diferente apenas nas idades estudadas 5, 9,5 e 15) e levando em consideração as idades de 5 e 9,5 anos. (MLLM).

Cs=k.(t)0,5		k =	0,149
Tempo	Cs medido	Cs calc	(Csm-Csc)^2
5	0,3	0,333174	0,001100523
9,5	0,49	0,459249	0,000945634
			0,002046

Cs=k.(t)0,5		k =	0,150
Tempo	Cs medido	Cs calc	(Csm-Csc)^2
5	0,3	0,33541	0,001253882
9,5	0,49	0,462331	0,000765571
			0,002019

ANEXO 6 – Previsão do comportamento dos teores de cloretos em função de k_{eq} , D e t (Cx)

Tabela 6.1 – Modelo aos 5 anos k_{eq} (MLLS).

Modelo MLLS aos 5 anos - k_{eq}									
PROFUNDIDADE (mm)	k_{eq}	$t^{0,5}$	$k_{eq}.t^{0,5}$	D	t	$EXP (-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	$erfc (X/2RAIZ(D.t))$	CX
0	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2303
5	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,9908	0,1707	0,8916	0,1931
7,5	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,9793	0,2561	0,8381	0,1761
10	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,9636	0,3415	0,7853	0,1602
15	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,9199	0,5122	0,6828	0,1313
17,5	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,8926	0,5976	0,6335	0,1184
20	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,8620	0,6830	0,5858	0,1064
25	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,7930	0,8537	0,4958	0,0852
30	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,7160	1,0244	0,4137	0,0673
35	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,6346	1,1952	0,3403	0,0525
40	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,5522	1,3659	0,2758	0,0404
47,5	0,1030	2,2361	0,2303	134,709	5	0,4328	1,6220	0,1956	0,0266

Tabela 6.2 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 9,5 anos keq (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 5 para 9,5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	keq	t ^0,5	keq.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	CX
0	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3175
5	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9951	0,1239	0,9213	0,2797
7,5	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9891	0,1858	0,8821	0,2620
10	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9807	0,2477	0,8433	0,2450
15	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9570	0,3716	0,7669	0,2133
17,5	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9419	0,4335	0,7294	0,1986
20	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,9248	0,4955	0,6926	0,1847
25	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,8851	0,6193	0,6212	0,1588
30	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,8388	0,7432	0,5532	0,1358
35	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,7872	0,8671	0,4891	0,1153
40	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,7316	0,9909	0,4291	0,0972
47,5	0,1030	3,0822	0,3175	134,709	9,5	0,6435	1,1767	0,3478	0,0744

Tabela 6.3 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 15 anos keq (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 5 para 15 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	keq	t ^0,5	keq.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	CX
0	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,3989
5	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9969	0,0986	0,9373	0,3608
7,5	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9931	0,1479	0,9061	0,3427
10	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9877	0,1972	0,8750	0,3252
15	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9725	0,2957	0,8135	0,2920
17,5	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9628	0,3450	0,7831	0,2763
20	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9517	0,3943	0,7531	0,2612
25	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,9256	0,4929	0,6941	0,2328
30	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,8946	0,5915	0,6370	0,2066
35	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,8594	0,6900	0,5819	0,1826
40	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,8204	0,7886	0,5292	0,1608
47,5	0,1030	3,8730	0,3989	134,709	15	0,7564	0,9365	0,4549	0,1318

Tabela 6.4 – Modelo aos 9,5 anos keq (MLLS).

Modelo MLLS aos 9,5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	keq	t ^0,5	k.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^0,5/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx
0	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3175
5	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9956	0,1182	0,9249	0,2814
7,5	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9901	0,1772	0,8875	0,2644
10	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9824	0,2363	0,8504	0,2481
15	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9608	0,3545	0,7773	0,2175
17,5	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9470	0,4136	0,7414	0,2033
20	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,9314	0,4726	0,7061	0,1897
25	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,8948	0,5908	0,6374	0,1645
30	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,8522	0,7089	0,5716	0,1419
35	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,8043	0,8271	0,5093	0,1216
40	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,7525	0,9453	0,4507	0,1036
47,5	0,1030	3,0822	0,3175	148,042	9,5	0,6696	1,1225	0,3705	0,0806

Tabela 6.5 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 5 anos keq (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 9,5 para 5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	keq	t ^0,5	k.t^0,5	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)	erfc (X/2RAIZ(D.t))	Cx
0	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,2303
5	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,9916	0,1629	0,8966	0,1947
7,5	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,9812	0,2443	0,8455	0,1784
10	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,9668	0,3257	0,7949	0,1630
15	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,9268	0,4886	0,6966	0,1351
17,5	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,9017	0,5700	0,6492	0,1224
20	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,8736	0,6515	0,6032	0,1107
25	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,8097	0,8143	0,5159	0,0897
30	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,7379	0,9772	0,4356	0,0719
35	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,6612	1,1401	0,3630	0,0570
40	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,5825	1,3029	0,2985	0,0446
47,5	0,1030	2,2361	0,2303	148,042	5	0,4667	1,5473	0,2170	0,0302

Tabela 6.6 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 15 anos keq (MLLS).

Estimativa modelo MLLS de 9,5 para 15 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	keq	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(D.t))$	Cx
0	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,3989
5	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9972	0,0940	0,9402	0,3625
7,5	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9937	0,1410	0,9104	0,3452
10	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9888	0,1881	0,8807	0,3284
15	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9750	0,2821	0,8219	0,2964
17,5	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9661	0,3291	0,7929	0,2813
20	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9560	0,3761	0,7641	0,2667
25	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9321	0,4702	0,7076	0,2391
30	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,9036	0,5642	0,6526	0,2136
35	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,8712	0,6582	0,5995	0,1901
40	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,8352	0,7523	0,5484	0,1686
47,5	0,1030	3,8730	0,3989	148,042	15	0,7757	0,8933	0,4760	0,1398

Tabela 6.7 – Modelo aos 5 anos keq (MLLM).

Modelo MLLM aos 5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(D.t)$	erfc $(X/2RAIZ(D.t))$	Cx
0	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3354
5	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9984	0,0701	0,9554	0,3124
10	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9938	0,1402	0,9109	0,2905
15	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9860	0,2104	0,8667	0,2696
20	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9753	0,2805	0,8229	0,2497
25	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9616	0,3506	0,7797	0,2308
30	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9452	0,4207	0,7371	0,2130
35	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9262	0,4909	0,6953	0,1962
40	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,9047	0,5610	0,6544	0,1803
62,5	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,7830	0,8766	0,4843	0,1202
92,5	0,1500	2,2361	0,3354	798,5758	5	0,5852	1,2973	0,3006	0,0655

Tabela 6.8 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 9,5 anos keq (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 5 para 9,5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(Dt))$	Cx
0	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,4623
5	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9992	0,0509	0,9676	0,4392
10	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9967	0,1017	0,9353	0,4168
15	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9926	0,1526	0,9031	0,3952
20	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9869	0,2035	0,8710	0,3743
25	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9796	0,2544	0,8392	0,3542
30	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9708	0,3052	0,8076	0,3349
35	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9604	0,3561	0,7763	0,3162
40	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,9486	0,4070	0,7454	0,2983
62,5	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,8792	0,6359	0,6119	0,2266
92,5	0,1500	3,0822	0,4623	798,5758	9,5	0,7543	0,9412	0,4527	0,1518

Tabela 6.9 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 5 para 15 anos keq (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 5 para 15 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP (-X²/4.D.t)	X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)	erfc (X/2RAIZ(Dt))	Cx
0	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,5809
5	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9995	0,0405	0,9742	0,5577
10	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9979	0,0810	0,9485	0,5351
15	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9953	0,1215	0,9228	0,5131
20	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9917	0,1619	0,8972	0,4917
25	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9870	0,2024	0,8717	0,4709
30	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9814	0,2429	0,8463	0,4507
35	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9748	0,2834	0,8211	0,4311
40	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9672	0,3239	0,7961	0,4121
62,5	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,9217	0,5061	0,6864	0,3337
92,5	0,1500	3,8730	0,5809	798,5758	15	0,8365	0,7490	0,5501	0,2466

Tabela 6.10 – Modelo aos 9,5 anos keq (MLLM).

Modelo MLLM aos 9,5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc $(X/2RAIZ(Dt))$	Cx
0	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	1,0000	0,0000	1,0000	0,4623
5	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9978	0,0826	0,9475	0,4252
10	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9914	0,1652	0,8952	0,3900
15	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9807	0,2478	0,8433	0,3568
20	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9659	0,3303	0,7921	0,3256
25	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9472	0,4129	0,7418	0,2963
30	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,9248	0,4955	0,6926	0,2689
35	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,8991	0,5781	0,6446	0,2434
40	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,8703	0,6607	0,5981	0,2197
62,5	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,7123	1,0323	0,4101	0,1336
92,5	0,1500	3,0822	0,4623	303,0444	9,5	0,4757	1,5278	0,2228	0,0625

Tabela 6.11 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 5 anos keq (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 9,5 para 5 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	$\text{EXP}(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	$\text{erfc}(X/2RAIZ(Dt))$	Cx
0	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	1,0000	0,0000	1,0000	0,3354
5	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,9959	0,1138	0,9276	0,2986
10	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,9836	0,2277	0,8559	0,2646
15	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,9636	0,3415	0,7853	0,2332
20	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,9361	0,4553	0,7164	0,2046
25	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,9020	0,5692	0,6497	0,1785
30	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,8620	0,6830	0,5858	0,1549
35	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,8170	0,7968	0,5249	0,1337
40	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,7680	0,9107	0,4675	0,1148
62,5	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,5249	1,4229	0,2562	0,0538
92,5	0,1500	2,2361	0,3354	303,0444	5	0,2437	2,1060	0,0929	0,0161

Tabela 6.12 – Previsão do comportamento do teor de cloreto de 9,5 para 15 anos keq (MLLM).

Estimativa modelo MLLM 9,5 para 15 anos - keq									
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	t	EXP $(-X^2/4.D.t)$	$X.PI^{0,5}/2RAIZ(Dt)$	erfc $(X/2RAIZ(Dt))$	Cx
0	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	1,0000	0,0000	1,0000	0,5809
5	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9986	0,0657	0,9582	0,5436
10	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9945	0,1314	0,9165	0,5078
15	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9877	0,1972	0,8750	0,4736
20	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9782	0,2629	0,8339	0,4410
25	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9662	0,3286	0,7932	0,4099
30	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9517	0,3943	0,7530	0,3804
35	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9348	0,4601	0,7136	0,3524
40	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,9158	0,5258	0,6748	0,3259
62,5	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,8067	0,8215	0,5122	0,2242
92,5	0,1500	3,8730	0,5809	303,0444	15	0,6246	1,2159	0,3320	0,1284

ANEXO 7 – Comportamento dos perfis de cloretos considerando C_s constante (0,600%) e t_{troca} para a idade de 50 anos k_{eq} (MLLS).

Tabela 7.1 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando C_s constante (0,600%) para a idade de 50 anos k_{eq} (MLLS).

Estimativa C_s fixo MLLS aos 5 anos $t = 50$ anos k_{eq}													
PROFUNDIDADE (mm)	K_{eq} aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	t_{eq} real	C0	erfc ($X/2.RAIZ(D.t)$)	C_s	C_x
0	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,946	12,987	37,013	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9656	0,6000	0,5794
7,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9485	0,6000	0,5691
10	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9313	0,6000	0,5588
15	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8972	0,6000	0,5383
17,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8802	0,6000	0,5281
20	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8632	0,6000	0,5179
25	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8295	0,6000	0,4977
30	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7960	0,6000	0,4776
35	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7630	0,6000	0,4578
40	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7304	0,6000	0,4382
47,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6824	0,6000	0,4094

Tabela 7.2 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando C_s constante (0,600%) e o tempo de troca de 33,933 anos keq (MLLS).

Estimativa C_s fixo MLLS aos 5 anos $t_{troca} = 33,933$ anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	Keq aos 5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	t_{troca}	t_{eq}	Δt	$t_{eq\ real}$	C0	erfc ($X/2.RAIZ(D.t)$)	C_s	C_x
0	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9583	0,6000	0,5750
7,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9375	0,6000	0,5625
10	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9167	0,6000	0,5500
15	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8753	0,6000	0,5252
17,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8548	0,6000	0,5129
20	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8343	0,6000	0,5006
25	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7937	0,6000	0,4762
30	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7537	0,6000	0,4522
35	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7143	0,6000	0,4286
40	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6757	0,6000	0,4054
47,5	0,103	7,071	0,728	134,709	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6193	0,6000	0,3716

Tabela 7.3 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos keq (MLLS).

Estimativa Cs fixo MLLS aos 9,5 anos t = 50 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,103	7,071	0,728	148,042	50	0,000	0,000	0,000	50,000	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9672	0,6000	0,5803
7,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9508	0,6000	0,5705
10	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9345	0,6000	0,5607
15	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9019	0,6000	0,5411
17,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8856	0,6000	0,5314
20	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8694	0,6000	0,5217
25	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8372	0,6000	0,5023
30	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8052	0,6000	0,4831
35	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7736	0,6000	0,4642
40	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7423	0,6000	0,4454
47,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6962	0,6000	0,4177

Tabela 7.4 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 33,933 anos keq (MLLS).

Estimativa Cs fixo MLLS aos 9,5 anos ttroca = 33,933 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,103	7,071	0,728	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9602	0,6000	0,5761
7,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9404	0,6000	0,5642
10	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,9205	0,6000	0,5523
15	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8810	0,6000	0,5286
17,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8614	0,6000	0,5168
20	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8418	0,6000	0,5051
25	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,8030	0,6000	0,4818
30	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7647	0,6000	0,4588
35	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,7270	0,6000	0,4362
40	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6898	0,6000	0,4139
47,5	0,110	7,071	0,780	148,042	50	33,933	20,947	12,987	37,013	0,000	0,6356	0,6000	0,3813

Tabela 7.5 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos keq (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 5 anos t = 50 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9859	0,6000	0,5915
10	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9718	0,6000	0,5831
15	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9577	0,6000	0,5746
20	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9436	0,6000	0,5661
25	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9295	0,6000	0,5577
30	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9155	0,6000	0,5493
35	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9014	0,6000	0,5409
40	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8874	0,6000	0,5325
62,5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8250	0,6000	0,4950
92,5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,7434	0,6000	0,4461

Tabela 7.6 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 16 anos keq (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 5 anos ttroca = 16 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9750	0,6000	0,5850
10	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9501	0,6000	0,5701
15	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9252	0,6000	0,5551
20	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,9004	0,6000	0,5403
25	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8757	0,6000	0,5254
30	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8511	0,6000	0,5107
35	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8267	0,6000	0,4960
40	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,8024	0,6000	0,4814
62,5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,6958	0,6000	0,4175
92,5	0,150	7,071	1,061	798,576	50	16,000	9,877	6,123	43,877	0,000	0,5628	0,6000	0,3377

Tabela 7.7 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 9,5 anos considerando Cs constante (0,600%) para a idade de 50 anos keq (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 9,5 anos t = 50 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 9,5 anos	t ^0,5	k.t^0,5	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9771	0,6000	0,5863
10	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9542	0,6000	0,5725
15	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9313	0,6000	0,5588
20	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9085	0,6000	0,5451
25	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8858	0,6000	0,5315
30	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8632	0,6000	0,5179
35	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8407	0,6000	0,5044
40	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8183	0,6000	0,4910
62,5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,7196	0,6000	0,4317
92,5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,5952	0,6000	0,3571

Tabela 7.8 – Previsão do comportamento do teor de cloretos aos 5 anos considerando Cs constante (0,600%) e o tempo de troca de 16 anos keq (MLLM).

Estimativa Cs fixo MLLM aos 9,5 anos ttroca = 16 anos keq													
PROFUNDIDADE (mm)	keq aos 9,5 anos	$t^{0,5}$	$k.t^{0,5}$	D	Estimativa	ttroca	teq	Δt	teq real	C0	erfc (X/2.RAIZ(D.t))	Cs	Cx
0	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	1,0000	0,6000	0,6000
5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9595	0,6000	0,5757
10	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,9191	0,6000	0,5515
15	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8789	0,6000	0,5274
20	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,8391	0,6000	0,5034
25	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,7996	0,6000	0,4798
30	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,7606	0,6000	0,4564
35	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,7223	0,6000	0,4334
40	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,6846	0,6000	0,4108
62,5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,5256	0,6000	0,3154
92,5	0,1500	7,0711	1,0607	303,044	50	16,0000	9,8765	6,1235	43,8765	0,0000	0,3476	0,6000	0,2085

Tabela 8.2 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos k (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5	PERFIL 5	ERRO
0,200	0,200	0,0000	0,2467	0,200	0,0022
0,168	0,160	0,0001	0,2086	0,160	0,0024
0,139	0,140	0,0000	0,1746	0,140	0,0012
0,114	0,130	0,0003	0,1447	0,130	0,0002
0,092	0,070	0,0005	0,1186	0,070	0,0024
0,074	0,080	0,0000	0,0961	0,080	0,0003
0,058	0,060	0,0000	0,0770	0,060	0,0003
Σ		0,00085562	Σ		0,0088551
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			10,3494		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15	PERFIL 15	ERRO
0,410	0,460	0,0025	0,4272	0,460	0,0011
0,340	0,300	0,0016	0,3697	0,300	0,0049
0,260	0,230	0,0009	0,3013	0,230	0,0051
0,101	0,140	0,0015	0,1497	0,140	0,0001
Σ		0,00655977	Σ		0,0111023
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,6925		

Tabela 8.3 – Resultado do erro relativo aos 5 anos k (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 9,5	PERFIL 9,5	ERRO	MODELO 5/9,5	PERFIL 9,5	ERRO
0,490	0,500	0,0001	0,4135	0,500	0,0075
0,451	0,460	0,0001	0,3928	0,460	0,0045
0,413	0,370	0,0019	0,3728	0,370	0,0000
0,378	0,390	0,0001	0,3535	0,390	0,0013
0,345	0,350	0,0000	0,3348	0,350	0,0002
0,314	0,320	0,0000	0,3168	0,320	0,0000
0,285	0,300	0,0002	0,2995	0,300	0,0000
Σ		0,002490	Σ		0,013574
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			5,4510		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 5/15	PERFIL 15	ERRO
0,580	0,600	0,0004	0,5196	0,600	0,0065
0,416	0,380	0,0013	0,4031	0,380	0,0005
0,278	0,300	0,0005	0,2984	0,300	0,0000
Σ		0,002186	Σ		0,006999
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			3,2017		

Tabela 8.4 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos k (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5	PERFIL 5	ERRO
0,300	0,310	0,0001	0,3555	0,310	0,0021
0,279	0,300	0,0004	0,3165	0,300	0,0003
0,260	0,240	0,0004	0,2804	0,240	0,0016
0,206	0,170	0,0013	0,1892	0,170	0,0004
0,191	0,200	0,0001	0,1642	0,200	0,0013
0,059	0,080	0,0005	0,0171	0,080	0,0040
Σ		0,002795	Σ		0,009579
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			3,4280		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15	PERFIL 15	ERRO
0,580	0,600	0,0004	0,6157	0,600	0,0002
0,416	0,380	0,0013	0,4031	0,380	0,0005
0,278	0,300	0,0005	0,2376	0,300	0,0039
Σ		0,002186	Σ		0,004674
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			2,1382		

ANEXO 9 – Cálculos dos erros relativos para os microclimas MLLS e MLLM, considerando a variação de Cs e a formação de pico, para keq.

Tabela 9.1 – Resultado do erro relativo aos 5 anos keq (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 9,5	PERFIL 9,5	ERRO	MODELO 5/9,5	PERFIL 9,5	ERRO
0,317	0,370	0,0028	0,3175	0,370	0,0028
0,281	0,280	0,0000	0,2797	0,280	0,0000
0,248	0,240	0,0001	0,2450	0,240	0,0000
0,218	0,220	0,0000	0,2133	0,220	0,0000
0,190	0,200	0,0001	0,1847	0,200	0,0002
0,165	0,180	0,0002	0,1588	0,180	0,0004
0,142	0,170	0,0008	0,1358	0,170	0,0012
0,122	0,130	0,0001	0,1153	0,130	0,0002
0,104	0,120	0,0003	0,0972	0,120	0,0005
Σ		0,004306	Σ		0,005419
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,2583		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 5/15	PERFIL 15	ERRO
0,399	0,460	0,0037	0,3989	0,460	0,0037
0,331	0,300	0,0010	0,3427	0,300	0,0018
0,253	0,230	0,0005	0,2763	0,230	0,0021
0,098	0,140	0,0017	0,1318	0,140	0,0001
Σ		0,006974	Σ		0,007766
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,1136		

Tabela 9.2 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos keq (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5	PERFIL 5	ERRO
0,230	0,200	0,0009	0,2303	0,200	0,0009
0,193	0,160	0,0011	0,1947	0,160	0,0012
0,160	0,140	0,0004	0,1630	0,140	0,0005
0,131	0,130	0,0000	0,1351	0,130	0,0000
0,106	0,070	0,0013	0,1107	0,070	0,0017
0,085	0,080	0,0000	0,0897	0,080	0,0001
0,067	0,060	0,0001	0,0719	0,060	0,0001
Σ		0,003829	Σ		0,004576
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,1951		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15	PERFIL 15	ERRO
0,399	0,460	0,0037	0,3989	0,460	0,0037
0,331	0,300	0,0010	0,3452	0,300	0,0020
0,253	0,230	0,0005	0,2813	0,230	0,0026
0,098	0,140	0,0017	0,1398	0,140	0,0000
Σ		0,006974	Σ		0,008404
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,2050		

Tabela 9.3 – Resultado do erro relativo aos 5 anos keq (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 9,5	PERFIL 9,5	ERRO	MODELO 5/9,5	PERFIL 9,5	ERRO
0,4623	0,500	0,0014	0,4623	0,500	0,0014
0,4252	0,460	0,0012	0,4392	0,460	0,0004
0,3900	0,370	0,0004	0,4168	0,370	0,0022
0,3568	0,390	0,0011	0,3952	0,390	0,0000
0,3256	0,350	0,0006	0,3743	0,350	0,0006
0,2963	0,320	0,0006	0,3542	0,320	0,0012
0,2689	0,300	0,0010	0,3349	0,300	0,0012
Σ		0,006261	Σ		0,007048
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,1257		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 5/15	PERFIL 15	ERRO
0,581	0,600	0,0004	0,5809	0,600	0,0004
0,417	0,380	0,0013	0,4507	0,380	0,0050
0,278	0,300	0,0005	0,3337	0,300	0,0011
Σ		0,002178	Σ		0,006495
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			2,9820		

Tabela 9.4 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos keq (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5	PERFIL 5	ERRO
0,335	0,310	0,0006	0,3354	0,310	0,0006
0,312	0,300	0,0002	0,2986	0,300	0,0000
0,290	0,240	0,0025	0,2646	0,240	0,0006
0,231	0,170	0,0037	0,1785	0,170	0,0001
0,213	0,200	0,0002	0,1549	0,200	0,0020
0,065	0,080	0,0002	0,0161	0,080	0,0041
Σ		0,007429	Σ		0,007434
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			1,0007		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15	PERFIL 15	ERRO
0,581	0,600	0,0004	0,5809	0,600	0,0004
0,417	0,380	0,0013	0,3804	0,380	0,0000
0,278	0,300	0,0005	0,2242	0,300	0,0057
Σ		0,002178	Σ		0,006108
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			2,8044		

ANEXO 10 – Recálculo e cálculo dos erros relativos para os microclimas MLLS e MLLM considerando a variação de Cs (Silva, 2010) e Oliveira (2013), para k.

Tabela 10.1 – Resultado do erro relativo aos 5 anos k (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 9,5 ATUAL	PERFIL 9,5	ERRO	MODELO 5/9,5 SILVA	PERFIL 9,5	ERRO
0,3400	0,3700	0,0009	0,3480	0,3700	0,0005
0,3013	0,2800	0,0005	0,3170	0,2800	0,0014
0,2657	0,2400	0,0007	0,2870	0,2400	0,0022
0,2330	0,2200	0,0002	0,2580	0,2200	0,0014
0,2032	0,2000	0,0000	0,2300	0,2000	0,0009
0,1762	0,1800	0,0000	0,2030	0,1800	0,0005
0,1519	0,1700	0,0003	0,1780	0,1700	0,0001
0,1302	0,1300	0,0000	0,1566	0,1300	0,0007
0,1110	0,1200	0,0001	0,1358	0,1200	0,0002
Σ		0,0026	Σ		0,0080
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			3,0423		

Tabela 10.2 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos k (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5 ATUAL	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5 SILVA	PERFIL 5	ERRO
0,2000	0,2000	0,0000	0,2970	0,2000	0,0094
0,1677	0,1600	0,0001	0,2520	0,1600	0,0085
0,1391	0,1400	0,0000	0,2100	0,1400	0,0049
0,1140	0,1300	0,0003	0,1700	0,1300	0,0016
0,0924	0,0700	0,0005	0,1350	0,0700	0,0042
0,0739	0,0800	0,0000	0,1030	0,0800	0,0005
0,0584	0,0600	0,0000	0,0770	0,0600	0,0003
Σ		0,0009	Σ		0,0294
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			34,3798		

Tabela 10.3 – Resultado do erro relativo aos 15 anos k (MLLS).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15 ATUAL	PERFIL 15	ERRO	MODELO 5/15 OLIVEIRA	PERFIL 15	ERRO
0,4100	0,4600	0,0025	0,4200	0,4600	0,0016
0,3403	0,3000	0,0016	0,3670	0,3000	0,0045
0,2604	0,2300	0,0009	0,3150	0,2300	0,0072
0,1012	0,1400	0,0015	0,1480	0,1400	0,0001
Σ		0,0066	Σ		0,0134
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			2,0413		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15 ATUAL	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15 OLIVEIRA	PERFIL 15	ERRO
0,4100	0,4600	0,0025	0,4190	0,4600	0,0017
0,3403	0,3000	0,0016	0,3690	0,3000	0,0048
0,2604	0,2300	0,0009	0,3150	0,2300	0,0072
0,1012	0,1400	0,0015	0,1400	0,1400	0,0000
Σ		0,0066	Σ		0,0137
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			2,0854		

Tabela 10.4 – Resultado do erro relativo aos 5 anos k (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 9,5 ATUAL	PERFIL 9,5	ERRO	MODELO 5/9,5 SILVA	PERFIL 9,5	ERRO
0,4900	0,5000	0,0001	0,4930	0,5000	0,0000
0,4506	0,4600	0,0001	0,4690	0,4600	0,0001
0,4133	0,3700	0,0019	0,4450	0,3700	0,0056
0,3781	0,3900	0,0001	0,4225	0,3900	0,0011
0,3451	0,3500	0,0000	0,3995	0,3500	0,0025
0,3140	0,3200	0,0000	0,3760	0,3200	0,0031
0,2850	0,3000	0,0002	0,3540	0,3000	0,0029
Σ		0,0025	Σ		0,0153
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			6,1479		

Tabela 10.5 – Resultado do erro relativo aos 9,5 anos k (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 5 ATUAL	PERFIL 5	ERRO	MODELO 9,5/5 SILVA	PERFIL 5	ERRO
0,3000	0,3100	0,0001	0,4050	0,3100	0,0090
0,2794	0,3000	0,0004	0,3720	0,3000	0,0052
0,2598	0,2400	0,0004	0,3400	0,2400	0,0100
0,2065	0,1700	0,0013	0,2500	0,1700	0,0064
0,1905	0,2000	0,0001	0,2220	0,2000	0,0005
0,0586	0,0800	0,0005	0,0166	0,0800	0,0040
Σ		0,0028	Σ		0,0351
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			12,5543		

Tabela 10.6 – Resultado do erro relativo aos 15 anos k (MLLM).

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15 ATUAL	PERFIL 15	ERRO	MODELO 5/15 OLIVEIRA	PERFIL 15	ERRO
0,5800	0,6000	0,0004	0,5300	0,6000	0,0049
0,4159	0,3800	0,0013	0,3850	0,3800	0,0000
0,2777	0,3000	0,0005	0,2580	0,3000	0,0018
Σ		0,0022	Σ		0,0067
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			3,0598		

ERRO REGRESSÃO			ERRO MODELO		
REGRESSÃO 15 ATUAL	PERFIL 15	ERRO	MODELO 9,5/15 OLIVEIRA	PERFIL 15	ERRO
0,5800	0,6000	0,0004	0,5230	0,6000	0,0059
0,4159	0,3800	0,0013	0,3800	0,3800	0,0000
0,2777	0,3000	0,0005	0,2450	0,3000	0,0030
Σ		0,0022	Σ		0,0090
ERRO RELATIVO = E MOD/E REG			4,0959		

