

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ADALBERTO MATOSKI

ORIENTADOR: PROF. ANTÔNIO EDÉSIO JUNGLES

CO-ORIENTADOR: PROF. NATHAN MENDES


**EFEITOS DELETÉRIOS DOS CLORETOS EM RESERVATÓRIOS
DE CONCRETO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA.


Florianópolis, 1998

FOLHA DE APROVAÇÃO

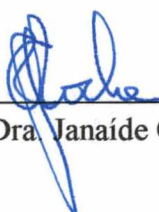
Dissertação defendida e aprovada em 17 / 12 / 1998, pela comissão
examinadora.




Prof. Dr. Antônio Edésio Jungles – Orientador



Prof. Dr. Nathan Mendes – Co-Orientador



Prof. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha



Prof. Dr. Phillippe Jean Paul Gleize



Prof. Dr. Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz



Prof. Dr. Roberto de Oliveira – Coordenador do CPGEC

AGRADECIMENTOS

Aos Professores José Antonio Bellini da Cunha Neto, Philippe Gleize e Luiz Roberto Prudêncio Jr. que colaboraram para a conclusão dessa dissertação através de incentivos e valiosas contribuições.

Aos Professores Antônio E. Jungles e Nathan Mendes pela orientação e incentivo durante a execução dessa dissertação.

A VOTORAN, através do Químico Clair Ceron que possibilitou a execução dos ensaios com a utilização de equipamentos específicos.

A Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR – através do Eng. Shigueru Shimizu e o Eng. Hugo C. Colodel pelo apoio financeiro e tecnológico possibilitando assim a extração de testemunhos de concreto em Curitiba.

A Companhia de Saneamento de Santa Catarina – CASAN – através do Eng. Adilson P. Paulino e Eng. Roberto Biz também pelo apoio financeiro e tecnológico que facilitou a extração de testemunhos em Florianópolis.

Aos colegas de curso, que também de um forma ou de outra colaboraram durante esses dois anos de curso.

A CAPES pelo apoio prestado através da concessão de bolsa do programa PICDT.

Aos meus filhos André e Fábio e a
Selma, minha companheira, pela
Compreensão durante minha
ausência.

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Situação atual	1
1.2 – Justificativa	3
1.3 – Organização do trabalho	9
2 – A DURABILIDADE DO CONCRETO	11
2.1 – Durabilidade das estruturas de concreto armado	11
2.2 - A inspeção inicial	16
2.3 – A corrosão das armaduras	20
2.3.1 – <i>Quando há a presença do cloro</i>	22
2.3.2 – <i>Quando há a carbonatação</i>	30
2.4 - A permeabilidade do concreto	32
2.5 - A estrutura de concreto e o meio ambiente	36
3 – METODOLOGIA	39
3.1 - Vistoria dos reservatórios	40
3.1.1 - <i>Avaliação das condições do meio ambiente</i>	41
3.1.2 – <i>Avaliação das condições da água dos reservatórios</i>	46
3.2 – Caracterização do concreto das estruturas	52
3.2.1 – <i>A difusão dos gases</i>	52
3.2.2 - <i>A carbonatação na laje de concreto dos reservatórios</i>	52
3.2.3 - <i>Avaliação da corrosão de armaduras em lajes de reservatórios</i>	54
3.2.4 - <i>Determinação do perfil de cloretos</i>	61
3.2.5 - <i>Extração de testemunhos</i>	64
3.2.6 - <i>Determinação da resistência do concreto</i>	67
3.2.7 - <i>Reconstituição do traço</i>	69
3.2.8 - <i>Caracterização dos agregados</i>	70
4 – DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
4.1 - Características dos reservatórios visitados	72
4.2 - Vistoria dos reservatórios	77

4.3 – O ambiente	79
4.4 – Caracterização da água armazenada pelos reservatórios	80
4.5 – Extração de testemunhos de concreto	84
4.5.1 – Reservatório Santa Efigênia, Curitiba – PR.....	84
4.5.2 – Reservatório Santa Cândida, Curitiba – PR.....	85
4.5.3 – Reservatório Bacacheri, Curitiba – PR.....	86
4.5.4 – Reservatório R5 Agrônômica, Florianópolis - SC.....	86
4.5.5 – Reservatório de Canelinha, Canelinha – SC.....	86
4.5.6 – Reservatório de São João Batista – São João Batista - SC.....	87
4.6 – A carbonatação do concreto da laje de cobertura	88
4.7 – Resultados do ensaio de potencial de eletrodo	90
4.8 – Características do concreto da laje dos reservatórios	92
4.8.1 – Resultados da resistência dos testemunhos.....	92
4.8.2 – Resultado da densidade do concreto dos reservatórios.....	94
4.8.3 – Características dos agregados	96
4.8.4 – Caracterização do aço	97
4.9 – O perfil de cloretos.....	98
4.9.1 – O método químico.....	99
4.9.2 – O método da espectrometria de raios X.....	108
4.9.3 – Comparação entre ensaios.....	116
4.9.4 – A reconstituição de traço.....	117
4.9.5 – Determinação da quantidade do cloro em função da massa de cimento. 121	
4.9.6 – Análise estatística.....	125
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
5.1 – Conclusões da pesquisa	127
5.2 – Medidas preventivas para ampliar a vida útil dos reservatórios	130
5.2.1 – Para as estruturas existentes.....	130
5.2.2 – Para novos projetos de estruturas de reservação	131
5.3 – Continuidade da pesquisa.....	131
6 – BIBLIOGRAFIA.....	133
A N E X O I: RESULTADOS DO ENSAIO DE POTENCIAL DE ELETRODO. 140	

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Relação de perda média de água por estado do Brasil para o ano de 1992...	2
Quadro 1.2 - Comparativo da distribuição das manifestações patológicas por tipo de obra no estado de Pernambuco.....	5
Quadro 1.3 - Resultados da difusibilidade de cloretos	7
Quadro 2.1 - Quantidade de buracos p/ furacão em laje de concreto	29
Quadro 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente.....	36
Quadro 2.3 - Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras.....	37
Quadro 2.4 - Espessura mínima de cobrimento em função do Fa/c e da resistência.....	37
Quadro 3.1 - Influência do conteúdo de umidade sobre a durabilidade	42
Quadro 3.2 - Quadro geral de causas de patologias	44
Quadro 3.3 - Classes de exposição	45
Quadro 3.4 - Parâmetros aquosos.....	47
Quadro 3.5 - Níveis de agressividade de água de diversos países.....	48
Quadro 3.6 - Classes de exposição ambiental relacionadas à agressividade química.....	48
Quadro 3.7 - Dosagem em função das classes de exposição.....	49
Quadro 3.8 - Tipos de agressividade e valores limites para sua avaliação	50
Quadro 3.9 - Classificação dos níveis de deterioração.....	58
Quadro 3.10 - Tabela de valores para comparação.....	61
Quadro 3.11 - Limites do teor de cloretos	62
Quadro 3.12 - Teor crítico de cloretos.....	64
Quadro 3.13 - Fator de correção para cálculo da resistência a compressão do concreto ...	69
Quadro 4.1 - Características dos reservatórios visitados	73
Quadro 4.2 - Dados dos reservatórios obtidos através do projeto estrutural.....	75
Quadro 4.3 - Ocorrência de patologias nos reservatórios visitados.....	78
Quadro 4.4 - Média dos resultado de análises físico-químicas dos reservatórios.	82
Quadro 4.5 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Sta. Efigênia:.....	85
Quadro 4.6 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Sta. Cândida:.....	85
Quadro 4.7 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Bacacheri	86
Quadro 4.8 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório R5 - Agrônômica.....	86

Quadro 4.9 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório de Canelinha.....	87
Quadro 4.10 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório de S. João Batista..	87
Quadro 4.11 - Resultados dos ensaios de carbonatação para os reservatórios da região de Curitiba.....	89
Quadro 4.12 - Resultados dos ensaios de carbonatação para os reservatórios da região de Florianópolis	89
Quadro 4.13 - Resultados dos ensaios de resistência para os reservatórios da região de Curitiba em Mpa.	93
Quadro 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência para os reservatórios da região de Florianópolis em Mpa.	93
Quadro 4.15 - Desvio padrão e coeficiente de variação para os reservatórios de Curitiba e Florianópolis.	94
Quadro 4.16 - Resultados da determinação da densidade para os reservatórios da região de Curitiba (kg/dm ³).	95
Quadro 4.17 - Resultados da determinação da densidade para os reservatórios da região de Florianópolis (kg/dm ³).	95
Quadro 4.18 - Caracterização dos agregados para região de Curitiba.....	96
Quadro 4.19 - Caracterização dos agregados para região de Florianópolis.....	96
Quadro 4.20 - Caracterização do aço dos reservatórios para região de Curitiba	97
Quadro 4.21 - Caracterização do aço dos reservatórios para região de Florianópolis	97
Quadro 4.22 - Relação de equipamentos utilizados – ensaio químico	99
Quadro 4.23 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto – ensaio químico - Santa Efigênia	102
Quadro 4.24 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto – ensaio químico - Santa Cândida	103
Quadro 4.25 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto – ensaio químico - Bacacheri.....	104
Quadro 4.26 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - Agronômica.....	105
Quadro 4.27 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - Canelinha.....	106

Quadro 4.28 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - São João Batista	107
Quadro 4.29 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Santa Efigênia	109
Quadro 4.30 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Santa Cândida	110
Quadro 4.31 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Bacacheri	112
Quadro 4.32 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Agronômica.....	113
Quadro 4.33 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Canelinha.....	114
Quadro 4.34 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - São João Batista.....	115
Quadro 4.35 - Planilha de cálculo para reconstituição de traço.....	120
Quadro 4.36 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Santa Efigênia (profundidade de 20 mm).....	121
Quadro 4.37 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Santa Cândida (profundidade de 20 mm).....	121
Quadro 4.38 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Bacacheri (profundidade 20 mm).	122
Quadro 4.39 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Agronômica (profundidade de 20 mm).....	122
Quadro 4.40 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Canelinha (profundidade de 20 mm).....	122
Quadro 4.41 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - São João Batista (profundidade de 20 mm).....	122
Quadro 4.42 - Resumo do conteúdo de cloro por reservatório – teor crítico de 0,4 %	123
Quadro 4.43 - Resumo do conteúdo de cloro por reservatório – teor crítico de 0,2 %	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de corrosão causada pela presença do cloro.....	4
Figura 1.2 - Relação entre comportamento e vida útil do concreto.....	8
Figura 2.1 - Relação entre a deterioração e a idade da estrutura.....	13
Figura 2.2 - Métodos de reparos em função da idade e deterioração da estrutura.....	14
Figura 2.3 - Fluxograma para determinação de patologias em estruturas.....	17
Figura 2.4 - Fluxograma para manutenção de estruturas.....	18
Figura 2.5 - Deterioração do concreto.....	20
Figura 2.6 - Ataque do cloro sobre o aço.....	22
Figura 2.7 - Relação entre cloretos ligados e os cloretos totais no cimento.....	24
Figura 2.8 - Redução da concentração de cloretos com a profundidade.....	27
Figura 2.9 - Relação da carbonatação com a umidade.....	31
Figura 2.10 - Relação da profundidade carbonatada com a resistência.....	31
Figura 2.11 - Classificação do tamanho dos poros.....	32
Figura 2.12 - Relação entre concentração e difusão do cloro.....	33
Figura 3.1 - Relação entre conteúdo de água e umidade ambiente.....	41
Figura 3.2 - Fator de risco da corrosão em função da umidade.....	43
Figura 3.3 - Agressividade do meio ambiente em função da temperatura.....	43
Figura 3.4 - Círculo de qualidade para uma estrutura.....	46
Figura 3.5 - Relação entre difusão do oxigênio e o gás carbônico.....	52
Figura 3.6 - Relação entre profundidade de carbonatada e o método de determinação.....	53
Figura 3.7 - Diagrama de Pourbaix.....	55
Figura 3.8 - Relação entre a penetração do cloro nos pites e sua penetração no aço.....	58
Figura 3.9 - Equipamentos utilizados no ensaio de potencial de eletrodo.....	60
Figura 3.10 - Equipamento utilizado para extração de testemunhos de concreto.....	65
Figura 3.11 - Esquema para vedação dos furos na laje de concreto.....	66
Figura 3.12 - Esquema de corte dos testemunhos de concreto.....	68
Figura 4.1 - Esquema das camadas nas lajes de concreto dos reservatórios.....	74
Figura 4.2 - Esquema das camadas das lajes de concreto dos reservatórios - variação.....	75
Figura 4.3 - Percentual de ocorrência de patologias.....	79
Figura 4.4 - Resultado do ensaio de carbonatação.....	88

Figura 4.5 - Equipamento utilizado para medir a quantidade de íons.	101
Figura 4.6 - Perfil de cloretos - Santa Efigênia - ensaio químico.....	102
Figura 4.7 - Perfil de cloretos – Santa Cândida – ensaio químico	103
Figura 4.8 - Perfil de cloretos - Bacacheri - ensaio químico.....	104
Figura 4.9 - Perfil de cloretos - Agrônômica - ensaio químico.....	105
Figura 4.10 - Perfil de cloretos - Canelinha - ensaio químico.....	106
Figura 4.11 - Perfil de cloretos - São João Batista - ensaio químico	107
Figura 4.12 - Aparelho utilizado para a determinação do cloro no concreto.	108
Figura 4.13 - Perfil de cloretos Santa Efigênia - ensaio por fluorescência	110
Figura 4.14 - Perfil de cloretos - Santa Cândida - ensaio de fluorescência	111
Figura 4.15 - Perfil de cloretos - Bacacheri - ensaio de fluorescência	112
Figura 4.16 - Perfil de cloretos - agrônômica - ensaio de fluorescência.....	113
Figura 4.17 - Perfil de cloretos - Canelinha - ensaio de fluorescência	114
Figura 4.18 - Perfil de cloreto São João Batista - Ensaio de fluorescência.....	115
Figura 4.19 - Comparação de perfis de cloretos - químico & fluorescência.....	116
Figura 4.20 - Relação entre ensaios químico e de fluorescência.....	125
Figura 4.21 - Relação entre o teor de cloro na água e o teor de cloro encontrado no concreto. - Ensaio químico.....	126
Figura 4.22 - Relação entre o teor de cloro na água e o teor de cloro encontrado no concreto. - Ensaio de Fluorescência.	126

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACO	Associação Brasileira da Corrosão
ANTAC	Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ASTM	American Society For Testing and Materials
CEB	Committée Européen du Béton
CETESB	Companhia Técnica de Saneamento Ambiental
CP	Cimento Portland
CIB	Conseil International du Bâtiment pour la Recherche, l'Étude et la Documentation
EPH	Eletrodo Padrão de Hidrogênio
ECS	Eletrodo de Calomelano Saturado
Erf	Função erro de Gauss
a/c	água/cimento
Hab.	Habitantes
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NACE	National Association of Corrosion Engineers
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions
UR	Umidade relativa

SIMBOLOGIA

Letra latinas

A	Área (m ²)
At	Alcalinidade total da água (em termos de CaCO ₃)
a	Quantidade de íons cloretos na solução
Ar	Quantidade de areia
c	Cobertura em mm
C	Dureza devido ao cálcio
Ci	Conteúdo inicial de cloreto no concreto
Cs	Conteúdo de cloretos na superfície medido em % de concreto seco
Cx	Conteúdo de cloreto na profundidade X medido em % de concreto seco
D	Coefficiente de difusão
d	Massa específica
Da	Densidade da areia
Dc	Densidade do cimento
Dp	Densidade da brita
E	Valor do potencial de eletrodo
E ₀	Potencial de referencia (constante)
Erf	Função erro de Gauss
F	Função
Kw	Coefficiente de permeabilidade a água (m ²)
l	Espessura em metros
L	Comprimento
LI	Índice de Langelier
M	Massa em kg
Mi	Massa do volume d'água deslocado em kg
Ms	Massa em kg
P	Pressão N/m ²
pH	Potencial hidrogeniônico;
Q	Fluxo da água em m ²
q	Densidade de fluxo de calor (J/m ² s)
R	Raio do poro

S	Sólidos totais dissolvidos em ppm, onde $S < 1000$ mg/L.
s	Declinação do eletrodo (em torno de 57 mV por década)
t	Tempo em segundos
T	Vida útil em anos
t°	Temperatura em $^\circ\text{C}$, onde t situa-se entre 0 e 25 $^\circ\text{C}$
T_0	Vida útil de serviço
t_1	Idade do concreto em anos
T_a	Idade de inspeção em anos
V_t	Volume total em m^3
X	Profundidade da medição do conteúdo de cloretos
x	Fator água/cimento

Letras gregas

ν	Viscosidade (Ns/m^2)
η	Porosidade
Θ	Conteúdo volumétrico da umidade (m^3/m^3)
σ	Tensão superficial (N/m)
ϕ	Diâmetro (m)
ρ_0	Densidade aparente (kg/m^3)

RESUMO

As características fornecidas pelo projeto, quer seja de uma edificação ou de um reservatório de água potável, tem influência importante na durabilidade dessa estrutura. Os reservatórios de água que abastecem as cidades são partes integrantes do sistema de abastecimento e tem grande influência no padrão de vida da população onde sua importância se reflete no fato de que armazenam toda a água a ser distribuída. A qualidade da água distribuída, a eficiência desse armazenamento e o custo de operação também dependem do estado de conservação dessas estruturas de concreto.

Os reservatórios de concreto estão sujeitos a ambientes muito agressivos e a causa dessa agressividade às estruturas tem origem na própria água, devido às substâncias que a ela são adicionadas para garantir sua potabilidade. Assim, esse trabalho busca identificar as causas e os efeitos da corrosão de armaduras das lajes de cobertura desses reservatórios, mostrando o grau de agressividade do ambiente onde estão imersas essas estruturas. A caracterização da permeabilidade do concreto a essas substâncias é um dos importantes fatores que influenciam diretamente na durabilidade da estrutura de concreto

Com os resultados obtidos, é possível caracterizar a estrutura de concreto desses reservatórios e com isso estabelecer novos procedimentos na elaboração dos projetos, possibilitando um aumento da vida útil dessas estruturas e uma diminuição do custo de manutenção.

Palavras chave: reservatórios, durabilidade, cloretos, corrosão.

ABSTRACT

Project design characteristics, for either a building or a water reservoir, have great influence on the structure durability. The water reservoirs in the cities are integral parts of the supplying system and have great influence on the population living level. The other important fact is that they store all the water to be distributed which is related to the production cost. In turn, this cost is always rising due to the increasing raise of the pollution level in the great cities.

The reservoirs of concrete are subjected to very aggressive environments. Substances are added to the water to guarantee its drinkability. Such substances are aggressive to the concrete structures in the sense that they cause corrosion of its reinforcements. Thus, the aim of this work is to identify the cause and the effect of the corrosion on reservoir structures, and to show the level of the environment deleterious effect on these structures.

The characterization of the porosity of the concrete is one of the most important factors that influence directly the durability of concrete structures. This work also shows the characteristics of the concrete structures of these reservoirs in order to establish new procedures for design elaboration. Such procedures aim to provide an increase in the structure's life as well as to reduce the maintenance costs.

Keywords: reservoirs, durability, chlorides, corrosion.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Situação atual

O problema de abastecimento da água nas cidades brasileiras tem recebido cada vez mais atenção sobretudo devido a importância do tema. Alguns países adotam a política de cobrar pela água, mesmo sem tratamento o que pode ser uma tendência mundial.

A água é um bem essencial para sobrevivência e devido a sua aparente abundância muitos não têm consciência de suas condições atuais. A água está se tornando uma mercadoria de consumo cada vez mais escassa. Várias entidades no mundo dão conta que em um futuro não muito distante a água será considerada como material estratégico de máxima prioridade.

No Brasil há escassez em várias regiões. Na região sudeste, por exemplo, observa-se em São Paulo, a maior cidade da América Latina ver suas reservas naturais de água escassearem. A exaustão das fontes se dá através de dois motivos principais, segundo artigo publicado pelo departamento de engenharia da Docol, (1994): a) Pela contaminação ou poluição por produtos químicos e outros poluentes. b) Pela demanda provocada pelo desenvolvimento econômico, urbanizações, uso excessivo, desperdícios e perdas distribuídas.

É grande o índice das perdas, sobretudo quando comparado às perdas de outros países; pode-se observar no Quadro 1.1, os valores das perdas para as diversas regiões do Brasil. A média nacional chega a quase 50% onde metade desse valor é constituída de vazamentos e desperdícios e outra metade em volume não faturado, segundo COSTA E SILVA JR. (1996). Parte dessas perdas são devidas a falta de manutenção nas diversas etapas que compõe um sistema de abastecimento de água, onde os reservatórios têm participação fundamental, pois a falta de sua manutenção contribui com uma boa parcela no cálculo desse índice de perdas.

Quadro 1.1 Relação de perda média de água por estado do Brasil para o ano de 1992.

ESTADO	PERDA MÉDIA 1992 (%)
Pará	57
Roraima	58
Rondônia	62
Amazonas	65
NORTE	60
Sergipe	34
Rio Grande do Norte	40
Alagoas	41
Paraíba	50
Pernambuco	53
Bahia	54
Maranhão	69
NORDESTE	50
Distrito Federal	27
Goiás	33
Mato Grosso do Sul	52
Mato Grosso	54
CENTRO OESTE	43
Minas Gerais	30
Espírito Santo	31
São Paulo	36
Rio de Janeiro	47
SUDESTE	34
Paraná	29
Santa Catarina	36
Rio Grande do Sul	43
SUL	36
BRASIL	45,5

Fonte: Revista BIOS - vol. VIII, n. 1 - 1996

Progressivamente a água vem se tornando escassa tanto em quantidade quanto em qualidade e portanto cresce o seu valor econômico. Assim, conforme MELO (1995), o Banco Mundial definiu 4 estratégias básicas para melhorar o quadro atual da utilização dos recursos hídricos. Entre essas estratégias a primeira propõe: “Melhor gerenciamento dos recursos hídricos “. Ora, esse gerenciamento compreende todo o processo desde o monitoramento dos mananciais, passando pela captação da água até sua chegada na residência do consumidor, passando pela reservação e distribuição.

Isto significa minimizar as perdas e conseqüentemente os custos, que por sua vez implica num conhecimento detalhado de todos os mecanismos de degradação do sistema,

inclusive os mecanismos de deterioração do concreto dos reservatórios de água potável, como por exemplo a presença do cloro.

1.2 – Justificativa

Os reservatórios das Companhias de Água e Saneamento por sua vez, têm recebido apenas manutenção corretiva, com um ônus relativamente elevado, pois geralmente essa manutenção se dá após o término da vida útil de serviço, ou seja, quando a estrutura apresenta manchas, fissuras, eflorescências, quando começa haver destacamento de partes do cobrimento e vazamentos. Nestes reservatórios, uma das importantes causas de sua degradação e conseqüente redução de sua vida útil é a corrosão das armaduras da estrutura de concreto.

Há casos de reservatórios abandonados ou em desuso devido a esse fato. No passado ocorreram graves acidentes (felizmente sem vítimas) também devido a esse tipo de problema. Munro, citado por SILVA, L.C.P. (1994), relata o ocorrido com uma piscina pública cujo teto desabou devido a corrosão das armaduras causada pela presença de cloretos. Em geral, nos reservatórios existem as condições mínimas necessárias para a formação de uma célula eletroquímica, ou seja:

- existe um eletrólito formado pelo meio aquoso em que se encontra a armadura, pois a água está sempre presente no concreto;
- existe uma diferença de potencial criada pela formação do ânodo onde ocorre a reação de oxidação ou dissolução, e pela conseqüente formação do cátodo onde ocorre a reação de redução;
- existe a presença do oxigênio pois o reservatório nunca fica completamente cheio.

Aliado a esse fato, existe a presença do cloro adicionado a água que por sua vez é um agente altamente agressivo a armadura do concreto. Um exemplo da corrosão causada pela presença do cloro pode ser observado na Figura 1.1 abaixo onde o degrau da escada que fica acima do nível d'água encontra-se totalmente deteriorado.



Figura 1.1 – Exemplo de corrosão causada pela presença do cloro.

ANDRADE e DAL MOLIN (1997) em sua contribuição para uma sistematização de pesquisas de levantamento de manifestações patológicas e analisando as diferentes metodologias para coleta de dados, mostraram também que a corrosão de armaduras está entre as maiores manifestações patológicas do concreto. No caso do levantamento realizado no estado de Pernambuco, ANDRADE (1997), conforme Quadro 1.2, observou uma concentração na ocorrência de corrosão de armaduras, comparando-se com outras patologias. Essa situação deve-se ao fato de que boa parte dessas obras estão concentradas próximas a orla marítima onde a maresia, traz junto com a umidade, o cloro que ataca as armaduras.

A causa da principal patologia, a corrosão das armaduras, neste caso é resultado de elevada concentração de cloro na brisa marinha. A mesma situação pode ser observada nos reservatórios uma vez que a água distribuída a população contém o cloro

utilizado para sua desinfecção, e esse cloro acaba evaporando para a atmosfera interna dos reservatórios causando situação semelhante ao tipo de problema observado em concretos expostos a ação da água do mar ou da brisa marinha.

Quadro 1.2 - Comparativo da distribuição das manifestações patológicas por tipo de obra no estado de Pernambuco

Patologia	Residenciais	Comerciais	Industriais	Públicas
Corrosão de armaduras	60%	28%	74%	59%
Problemas estruturais	10%	21%		
Fissuras	6%	4%		3%
Segregação do concreto	4%			10%
Detalhe construtivos	3%	17%		
Concreto contaminado	3%			
Desagregação do concreto	3%		2%	
Recalque	2%			
Cobrimento insuficiente	2%	4%	8%	6%
Deformação excessiva		8%		
Incêndio (fissuras)		6%		
Sobrecarga		2%		3%
Ataque químico			12%	
Flexão			1%	
Concreto cap. fraturado			1%	
Infiltrações				9%

Fonte: IV congresso Ibero-americano de patologia das construções - Dal Molin out/1997 Porto Alegre Brasil

Muitas das manifestações patológicas têm como origem o projeto da edificação e a mesma situação ocorre para o caso dos reservatórios. Há ainda que se considerar o fato de que alguns projetistas desconhecem o ambiente em que estarão imersas essas estruturas para, a partir desse ponto, elaborarem um projeto completo especificando não só o modelo de estrutura mas também o tipo de material a ser utilizado, a sobrecarga, os detalhes construtivos e a forma correta para execução da obra, conforme ARANHA e DAL MOLIN (1995).

A manutenção dos reservatórios é relativamente complexa pois como primeiro passo para sua realização é necessário seu esvaziamento completo com conseqüente prejuízo ao atendimento da população residente na área atendida pelo reservatório.

O custo dessa manutenção é freqüentemente elevado pela premência na execução dos serviços, pois a população não pode ficar sem água. Às vezes essa urgência pode

prejudicar inclusive a qualidade desses serviços, tornando obrigatória uma nova parada desse reservatório onerando mais ainda o já elevado custo.

Além dos custos diretos mencionados anteriormente há também que se considerar os custos indiretos como a perda do produto, perda da eficiência na sua distribuição, contaminação da água, questões de segurança e a preservação do bem estar da população. Não deve ser descartado também o custo político pois os reservatórios, salvo algumas exceções devido a lei das concessões, pertencem a administração pública.

É interessante observar que as recomendações técnicas feitas para a execução dos reservatórios, na década de 70, não levavam em consideração o problema da durabilidade das estruturas. Conforme OLIVEIRA (1978) em publicação feita pela CETESB (Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Defesa do Meio Ambiente de São Paulo), as recomendações gerais e detalhes para o projeto de reservatórios eram:

- Divisão do reservatório (enterrado ou semi-enterrado) em dois compartimentos para facilitar a limpeza e reparo.
- Canalizações de entrada e saída de água no reservatórios independentes para cada compartimento.
- Canalização extravasora de água para cada compartimento, descarregando diretamente (sem válvula).
- Canalização de descarga e limpeza para cada compartimento, providas de válvula.
- Aberturas de inspeção do reservatório convenientemente localizada e protegidas contra a poluição.
- Escada de acesso oferecendo segurança apropriada.
- Impedir ao máximo toda iluminação no interior do reservatório.
- Indicação do nível da água, na parte externa.
- Assegurar a impermeabilidade das paredes dos reservatórios.
- Dispositivos especiais de ventilação.
- Sinalização de torres para proteção da navegação aérea.
- Proteção de reservatórios enterrados contra águas poluídas.
- Localização em terrenos inacessíveis a água de inundação.
- Localização em áreas de fácil drenagem para afastar convenientemente a água das chuvas.

- Uso de tubulações resistentes, proteção contra a poluição do reservatório, penetração de animais, etc.

Na época da execução dos reservatórios em estudo, pouco era citado a respeito da proteção, assim por exemplo, o item que cita a necessidade da impermeabilização das paredes, não faz nenhuma referência a laje de cobertura e, muito menos a face inferior desta laje.

A preocupação com a durabilidade do concreto e o conseqüente estudo dos problemas de corrosão, têm sido objeto de atenção cada vez maior pela comunidade técnica internacional. Dentre os vários motivos desta situação, pode-se citar o fato de que muitas estruturas de concreto estão apresentando patologias que comprometem sua funcionalidade com elevação dos custos operacionais, dos custos de manutenção e porque, no caso dos reservatórios, geram perdas cada vez maiores.

Algumas indústrias cimenteiras também preocupadas com a durabilidade do concreto estão desenvolvendo estudos para fabricar cimentos com alta resistência a difusibilidade de cloretos, conforme Quadro 1.3 abaixo.

Quadro 1.3 – Resultados da difusibilidade de cloretos

Amostra	Carga passante em Coulombs		Resistência a penetração dos íons cloreto	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
CP II - Z	2505	2560	Moderada	Moderada
CP V – ARI – RS	2048	1267	Moderada	Baixa
CP IV – 32 – RS	1168	700	Baixa	Muito baixa
CP V – ARI – R	4483	4054	Elevada	Elevada

FONTE: CERON, C. – Cimentos Rio Branco - 1998

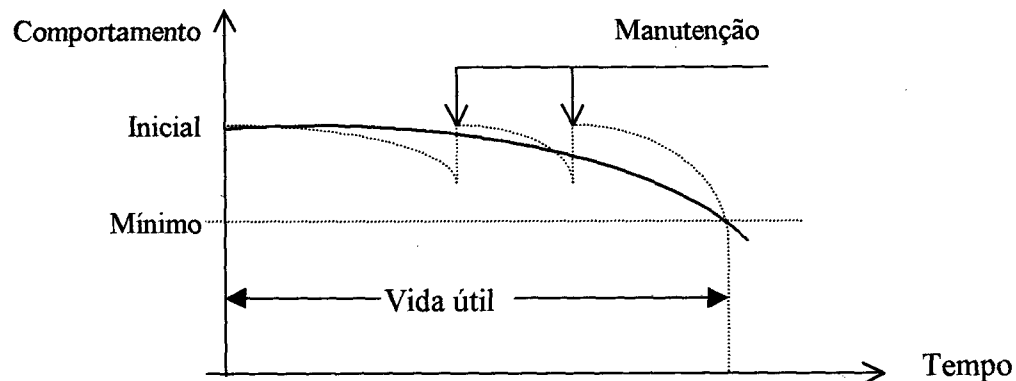
Legenda:

Tipo de cimento	Características
CP II - Z	Cimento com 6 a 14 % de material pozolânico .
CP V – ARI – RS	Cimento de alta resistência inicial, resistente a sulfatos.
CP IV – 32 – RS	Cimento com resistência mínima de 32 Mpa e resistente a sulfatos.
CP V – ARI – R	Cimento de alta resistência inicial, resistente a penetração de cloretos.

Atualmente a manutenção que tem sido feita nem sempre resolve por completo a situação encontrada. No caso de reservatórios os problemas são semelhantes aos encontrados nas demais estruturas, com o agravante de que pode envolver uma parcela significativa da população em caso de colapso. Já ocorreram em décadas passadas desabamentos da laje de cobertura de reservatórios, devido a falta de manutenção e de conhecimento dos problemas causados pela corrosão da armadura proveniente da difusão do cloro.

Na região do Paraná reservatórios tem sido abandonados por causa da degradação das armaduras, em que um dos fatores é o cloro contido na água.

O efeito da manutenção corretamente realizada pode ser observado através da Figura 1.1 abaixo onde mostra-se o aumento da vida útil. Deve-se considerar que a durabilidade dos materiais que compõe a estrutura depende da relação que esta faz com o meio ambiente, através da troca de calor, da umidade e dos parâmetros que controlam os mecanismos de transporte.



Fonte: Boletim n. 12 – Guia de diseño CEB – 1996

Figura 1.2 – Relação entre comportamento e vida útil do concreto

Devido aos problemas de corrosão causados pelo cloro na água, busca-se na presente dissertação analisar o concreto utilizado para a confecção desses reservatórios, definindo qual o seu comportamento ao longo do período de sua utilização frente aos íons cloretos liberados pela água tratada e com isso ressaltar os critérios que permitem aumentar a durabilidade desses reservatórios, diminuindo assim os custos de operação e de manutenção.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo é de caracterizar as estruturas de reservação existentes nas cidades de Curitiba e Florianópolis quanto ao tipo e forma de patologias apresentadas, enfocando em especial o sistema concreto/armadura/meio ambiente, utilizando para isto:

- a determinação do estado de corrosão das armaduras;
- a análise da permeabilidade do concreto obtido na extração de testemunhos;
- a determinação do perfil de cloretos dentro desse concreto;
- a profundidade de carbonatação

Todos esses fatores têm grande influência na corrosão das armaduras e como conseqüência na durabilidade dessas estruturas.

1.3 – Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos onde o primeiro capítulo fornece uma introdução geral do assunto identificando o tema abordado e a origem das patologias em estruturas de concreto. O primeiro capítulo encerra indicando os objetivos e forma de organização do presente trabalho.

O segundo capítulo faz uma revisão bibliográfica geral sobre a durabilidade de estruturas de concreto, abrangendo os conceitos sobre corrosão de armaduras, permeabilidade do concreto, porosidade e a difusão de gases. Apresenta também dois fluxogramas propostos por diferentes autores onde procuram indicar o caminho mais curto para uma manutenção eficiente e conseqüente prorrogação da vida útil. Procura abordar os aspectos ambientais, onde mostra o que existe a respeito da influência do meio ambiente, sobre estruturas de concreto.

O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada para caracterização do concreto das estruturas de reservação e suas patologias. Descreve os parâmetros utilizados para a definição das condições do meio ambiente em que estão inseridas tais estruturas e os parâmetros que definem as principais características da água armazenada nesses reservatórios. Mostra a metodologia para a utilização de técnicas eletroquímicas, onde o ensaio realizado é o de potencial de eletrodo, indicando seus pontos positivos e negativos, passando pelos ensaios de carbonatação e resistência a compressão.

Descreve como é realizado o ensaio químico de determinação de cloretos e também o ensaio que de fluorescência de raio X, também conhecido com espectrometria de raio X. Esse capítulo aborda também aqueles ensaios que permitem a caracterização dos agregados e do aço que compõe o concreto desses reservatórios, descrevendo também a técnica utilizada para a reconstituição do traço do concreto.

Na seqüência, o quarto capítulo apresenta todos os resultados de acordo com a metodologia citada no capítulo anterior, analisando-os e comparando-os entre si. Apresenta os resultados da vistoria dos reservatórios demonstrando sua situação atual, descrevendo também todo o material extraído dessas estruturas. Mostra também os resultados dos ensaios feitos para a determinação da quantidade de cloretos, comparando com índices adotados por normas internacionais.

Neste capítulo também é feita a comparação entre os dois tipos de ensaios adotados para determinar o teor de cloretos, mostrando que apesar dos valores diferenciados existe uma correlação significativa entre ambos.

Finalmente o capítulo cinco conclui todo esse trabalho apresentando os resultados de forma concisa e efetuando propostas para dar continuidade a esta pesquisa e sobretudo para a manutenção dos reservatórios já construídos permitindo assim prolongar sua vida útil. Fecha-se a conclusão com indicações que evitem essas patologias que podem ser adotadas durante a execução do projeto desses reservatórios.

Nos anexos estão relacionados os resultados dos ensaios de potencial de eletrodo obtidos em quatro reservatórios analisados.

2 – A DURABILIDADE DO CONCRETO

2.1 – Durabilidade das estruturas de concreto armado

A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado já existe a algum tempo no meio acadêmico e científico. Vários simpósios e encontros de estudos ocorreram nas duas últimas décadas. Conforme citado por FARIAS (1991), a ASTM (American Society For Testing And Materials) através do comitê G.01 de corrosão de metais, promoveu em 1976 o primeiro simpósio sobre corrosão de armaduras no concreto. Ainda, nesta mesma época a NACE (National Association of Corrosion Engineers) formou o comitê T-3K para tratar da corrosão e de outros fenômenos associados a deterioração do concreto. A ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão), desde 1986 trata sobre corrosão de armaduras no concreto através de comissão específica para este assunto.

Dentro e fora do país acontecem todos os anos diversas atividades entre simpósios, congressos e reuniões especiais que tratam da durabilidade do concreto. Em 1997 ocorreu o workshop sobre a durabilidade das construções, no Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS - promovido pela ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído). Este evento permitiu o intercâmbio entre pesquisadores da área. Assim o RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Éssais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) com comitê específico para estudar a durabilidade do concreto também esteve apresentando dando sua contribuição.

Conforme SJÖSTRÖN (1993) cita em seu artigo, o RILEM e o CIB (Conseil International du Bâtiment pour la Recherche, l'Étude et la Documentation) em 1982 iniciaram juntos um trabalho para a análise da vida útil dos materiais de construção e seus componentes, procurando com isso demonstrar a importância dessa área de pesquisas.

O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) mantém uma pesquisa contínua no estudo da durabilidade de concretos através do Agrupamento de Materiais da Divisão de Construção Civil.

E assim, cada vez mais pessoas através de órgãos de pesquisa vão se inteirando e reconhecendo a importância desta área. O recente acidente com a ponte dos Remédios em São Paulo é uma ilustração típica do que está ocorrendo com nossas estruturas sem uma maior preocupação dos responsáveis, até por falta de conhecimento de causa, conforme palestra proferida pelo Prof. HELENE, na UFSC.

A preocupação com a durabilidade das estruturas se reflete também através de modelos que vêm sendo propostos no meio científico. Esse fato se torna mais evidente uma vez que a sociedade não tem recursos ilimitados para o reparo e manutenção das estruturas como afirma HENRIKSEN (1993), em seu artigo sobre o cálculo da vida útil de serviço e as estratégias de manutenção.

A necessidade da manutenção se deve aos danos encontrados nos reservatórios e que, se alguns são graves a ponto de causar o colapso da estrutura outros causam apenas o desconforto visual para o usuário da obra. De qualquer forma, ambos originam a manutenção.

Cabe ressaltar que um número elevado de danos no concreto não são visíveis e portanto não são relacionados para a manutenção. GONZÁLEZ et alii (1996) demonstra em seu trabalho que há a necessidade da detecção dos problemas de corrosão o mais cedo possível, pois inerente a estruturas de concreto armado, existe um problema econômico-social de grande magnitude.

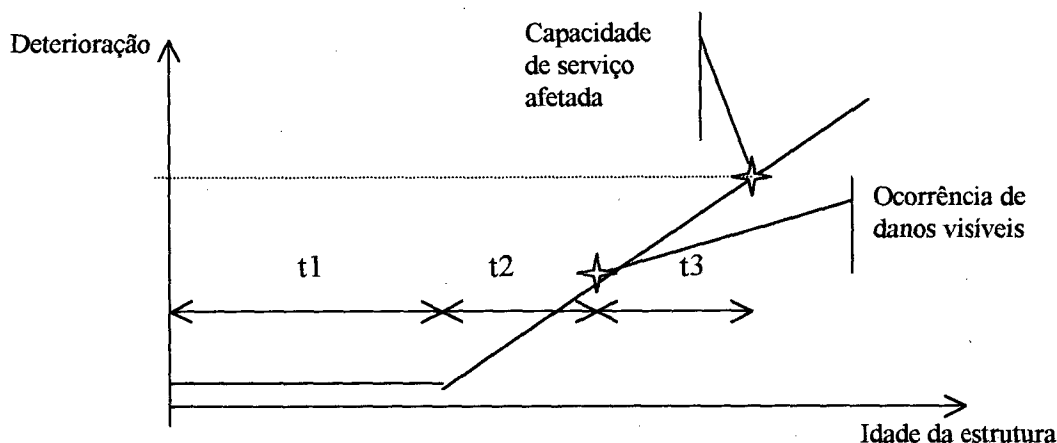
Nessa linha de raciocínio, HENRIKSEN (1993), propõe um modelo para a determinação da vida útil de serviço, no qual os seguintes elementos, segundo o autor, devem estar inseridos: mecanismos de deterioração; procedimentos e métodos de investigação; métodos de reparo; planilha de custos

Como mecanismo de deterioração temos a corrosão, a reação álcali-sílica, o congelamento/degelo; os sulfatos e a carbonatação, entre outros. A corrosão, segundo o autor, é o mecanismo mais severo de deterioração. Para o caso dos reservatórios tem-se a corrosão aliada a presença de cloretos entre outras substâncias nocivas encontradas na água. Assim a deterioração causada pela corrosão segue três fases distintas:

- t1- tempo de iniciação do processo

- t2 - tempo em que aparecem os primeiros sinais visíveis
- t3 - tempo em que a deterioração afeta a capacidade de serviço da estrutura.

Esquemáticamente tem-se:



Fonte: HENRIKSEN, 1993

Figura 2.1 – Relação entre a deterioração e a idade da estrutura

O tempo t1 pode ser calculado medindo a profundidade de carbonatação e utilizando a seguinte fórmula: $T = (\sqrt{Ta/X} * C)^2$ (2.1)

onde:

T = vida útil em anos

Ta = idade na inspeção em anos

X = profundidade de carbonatação em mm C = cobertura em mm.

Se for considerado o perfil de cloretos no concreto a fórmula passa a ser:

$$C_x = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf}(X/(\sqrt{2t_1}) * D) \quad (2.2)$$

onde

Cx = conteúdo de cloreto na profundidade X medido em % de concreto seco

Cs = conteúdo de cloretos na superfície medido em % de concreto seco

Ci = Conteúdo inicial de cloreto no concreto.

Erf = função erro de Gauss;

X = profundidade de Cx em mm;

t1 = tempo em anos;

D = Coeficiente de difusão

Ressalta-se aqui, que a equação 2.2 serve apenas para a difusão de cloretos e não para a penetração por capilaridade. Quando o perfil de cloretos não puder ser determinado haverá grande incerteza na utilização dessa fórmula. O conteúdo crítico de cloretos (quantidade na qual o aço inicia seu processo de corrosão), é um parâmetro que

A Figura 2.2 mostra claramente que é possível prolongar o tempo de vida útil com uma significativa redução de custos, uma vez que o custo de execução dos dois primeiros métodos de reparos são menores que os demais.

Seguindo esta linha da previsão da vida útil, WANG e ZHAO (1993), propõem um método para estimar a vida útil residual, ou seja, quanto falta para a estrutura colapsar, chamando este critério de final de vida útil. Cabe a observação que o final da vida útil não significa que a estrutura colapsou mas sim que se deteriorou a um nível inaceitável para sua finalidade.

Quando se projeta a estrutura o nível de confiança é β_0 e, no estado em que se encontra o nível de confiança é representado por β . Dessa forma pode-se fazer as seguintes suposições:

Quando $\beta \leq \beta_0$ a vida útil de serviço é zero . $T_0 = 0$.

Quando $\beta > \beta_0$ calcula-se nesse caso a taxa de corrosão e a perda da área do aço até o limite que leva a $\beta \leq \beta_0$. Neste caso o tempo necessário para atingir essa condição é T_B .

O valor de α depende da experiência do pesquisador e, neste caso foi adotado $\alpha = 0,85$ o que é um valor conservador.

Pelo critério da quebra da durabilidade, o autor propõe a utilização do método dos elementos finitos para calcular o tempo necessário para a armadura reduzir sua seção até um determinado valor. O processo é complicado e demorado e portanto de difícil utilização pelas empresas.

NAKURA et al. (1993), também seguindo a mesma linha análise da durabilidade de estruturas, propõem um método para a avaliação da impermeabilidade à água de estruturas de concreto considerando o estado atual de deterioração. Porém, para o método proposto, duas importantes considerações devem ser feitas:

- a) O método foi estabelecido para estruturas de concreto enterradas;
- b) O modelo considera que não existem defeitos de origem na execução, projeto ou lançamento do concreto.

Ora, existem vários trabalhos que demonstram que a maior parte da origem dos problemas em estruturas está na elaboração do projeto, incluindo o caso dos reservatórios de água potável. NEVILLE (1998), mostra que as estruturas construídas nas décadas de 60 e 70 tinham maior resistência e seus projetistas não se preocupavam

com a durabilidade, logo neste aspecto a proposta de NAKURA et al. (1993) fica limitada.

2.2 - A inspeção inicial

As etapas iniciais para o levantamento das necessidades de manutenção e reparos, podem ser definidas como:

- Inspeção;
- Diagnóstico;
- Definição do método de reparo.

O grau de detalhamento na inspeção pode ser superficial quando apenas é feita uma vistoria com ensaios rápidos de campo; ou pode ser detalhada, com ensaios efetuados sobre a estrutura e análises feitas em laboratórios através da coleta de amostras da estrutura.

A escolha do tipo de inspeção a ser feita, depende da experiência de quem está analisando a estrutura. Algumas vezes o dano que se apresenta na estrutura pode ser tão evidente quanto a sua origem e a consequência que pode dispensar qualquer outro tipo de inspeção mais detalhada. Em outras situações há a necessidade de um exame cuidadoso, pois como foi citado anteriormente nem sempre a patologia se mostra aparente.

É importante analisar também os antecedentes da obra, onde, no caso de reservatórios os pontos abordados são:

- Data da execução da obra;
- Tipo do problema;
- A quanto tempo existe o problema;
- Característica da armadura;
- Caracterização do meio ambiente em que a estrutura está imersa;
- Tipo de concreto e suas características principais;
- Tratamentos superficiais existentes;
- Manutenções feitas anteriormente.

Como proposta para estabelecer uma seqüência de inspeção, HELENE (1993) apresenta um fluxograma indicando os vários tipos de atividade que envolve o exame de uma dada estrutura, como pode ser visto a seguir:

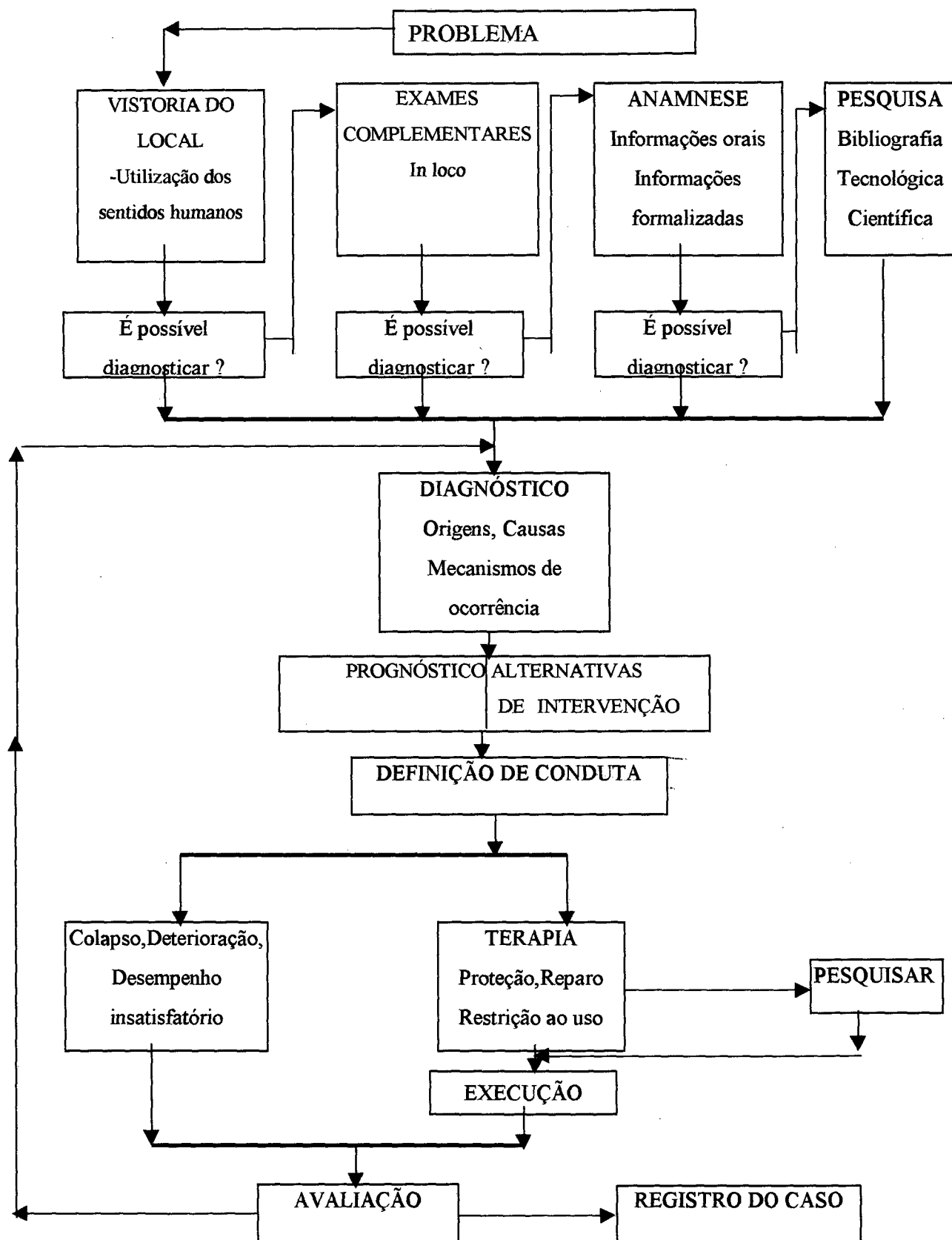


Figura 2.3 – Fluxograma para determinação de patologias em estruturas

Por sua vez, SASAY e SEKIGUCHI, (1993) apresentam a seguinte proposta,

para manutenção de estruturas..

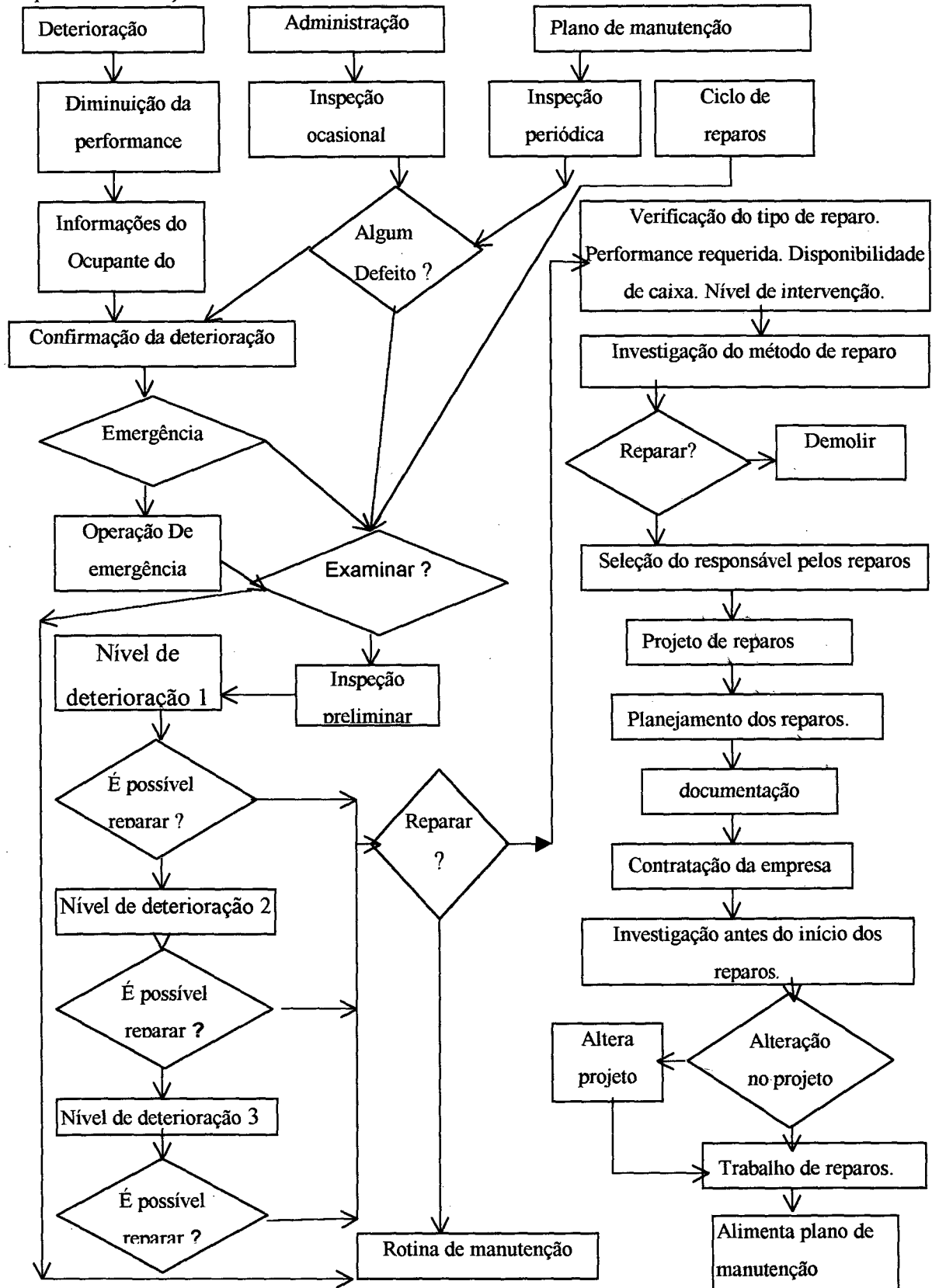


Figura 2.4 – Fluxograma para manutenção de estruturas

Cabe observar que enquanto no fluxograma apresentado por HELENE, atenção especial é dada a parte da vistoria, exames, anamnese e pesquisa sobre a patologia incidente, no fluxograma apresentado por SASAY e SEKIGUCHI (1993), atenção especial é dada ao aspecto da manutenção especialmente no que se refere aos projetos.

Por sua vez, FIGUEIREDO (1993), propõe como etapas de um sistema completo de reparo como sendo:

- diagnóstico
- definição da intervenção
- remoção do concreto antigo
- imprimação da armadura
- aplicação de adesivo de ponte de aderência sobre o concreto
- aplicação de argamassa de reparo
- cura e aplicação de pintura superficial.

Ainda, afirma como princípios básicos de atuação de reparo a:

- interrupção ou controle do processo anódico
- interrupção ou controle do processo catódico
- interrupção ou controle do processo eletrolítico
- passivação da armadura
- utilização de pigmentos anticorrosivos
- proteção catódica através de pigmentos ativos
- barreira para impedir o acesso de água, oxigênio ou agentes de corrosão. O que está de acordo com os fluxogramas das figuras 2.1 e 2.2, procurando atuar sobre o problema ocorrido.

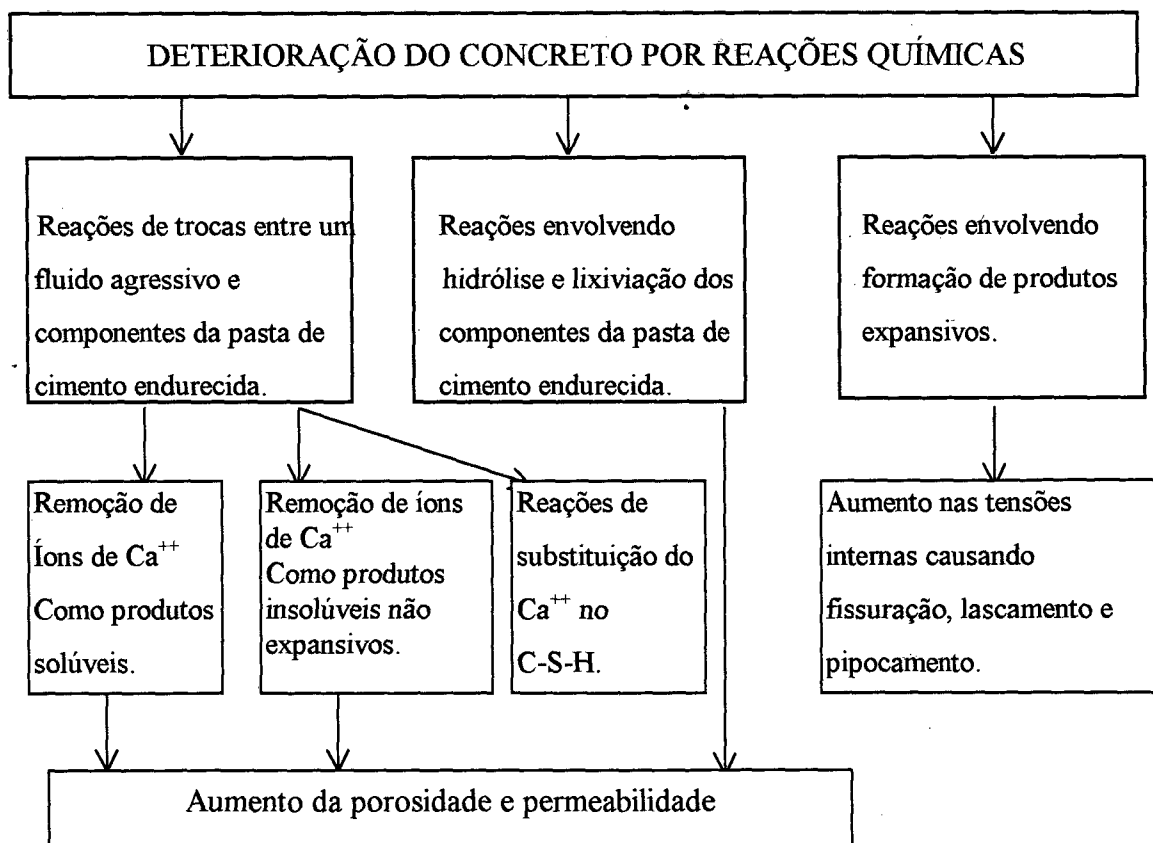
PRUDÊNCIO (1993) em seu estudo sobre durabilidade do concreto, mostra que a tendência atual para a especificação de concretos destinados a estruturas imersas em ambiente agressivo é estudar particularmente cada caso. Propôs uma metodologia que se resume em quatro linhas básicas:

- Ensaios em materiais com composição e microestrutura similar a que será utilizada na obra.
- Condições de agressividade representativas do meio em que a obra estará inserida.
- Técnicas de ensaio que reflitam efetivamente a condição de degradação do material e que permitam projeções para estimativa da vida útil.

Ao analisar o aspecto preventivo GEYER e GREVEN (1993) propõem a utilização de manta geotextil como um revestimento interno das formas de concreto antes da concretagem, sendo essa manta retirada junto com a desforma. O objetivo é obter um concreto impermeável, evitando reduzir muito o fator água/cimento (a/c) pelo fato de que concretos com baixo fator a/c são de difícil trabalhabilidade sendo necessário a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes que além de elevar os custos nem sempre tem seus resultados atingidos plenamente.

2.3 – A corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras está ligada a deterioração do concreto, e para exemplificar esta situação, a Figura 2.5 baseado no trabalho de MEHTA e MONTEIRO (1994), apresenta as causas químicas da deterioração do concreto, que por sua vez leva a corrosão das armaduras.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO – Concreto- estrutura, propriedades e materiais - 1994

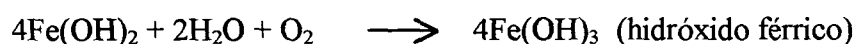
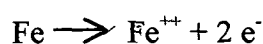
Figura 2.5 – Deterioração do concreto

Conforme citado por HELENE (1986) “pode-se definir corrosão com a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica.” Para que haja corrosão deve existir um eletrólito (a água está sempre presente no concreto); deve existir uma diferença de potencial (pode surgir por diferença de umidade, concentração salina, etc.); deve existir oxigênio; podem existir agentes agressivos como o cloro que está presente nos reservatórios, que é o objeto de estudo.

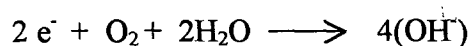
A origem do íon de ferro se dá quando surge no aço uma diferença de potencial entre dois pontos, formando aí uma célula eletroquímica com uma região anódica e uma região catódica, ligadas pelo eletrólito que é a água contida nos poros e capilares do concreto. Os íons de ferro com carga elétrica positiva no ânodo passam para a solução enquanto os elétrons livres e com cargas negativa passam pelo aço em direção ao cátodo onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito (íons de cloro) e também combinam com a água e o oxigênio livre formando os íons de hidróxidos (OH⁻).

Esses íons se deslocam pelo eletrólito e combinam com os íons ferrosos, transformando-os em hidróxido férrico. As reações são as seguintes (NEVILLE, 1997):

a) reação anódica



b) reação catódica

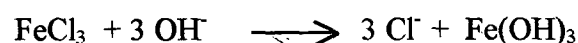
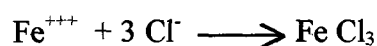


Considerando o fato de que apenas o oxigênio é consumido e a água é regenerada, sem a presença desta não há corrosão, bem como não há corrosão se não houver presença do oxigênio também, o que ocorre em estruturas de concreto completamente imersas.

Não há consenso sobre qual é a umidade ótima do ar para a corrosão, NEVILLE (1997), por exemplo afirma que está entre 70 e 80%, já de acordo com o Guia de Desenho da CEB (Comitê Europeu do Concreto) cita o intervalo de 60 a 80 %.

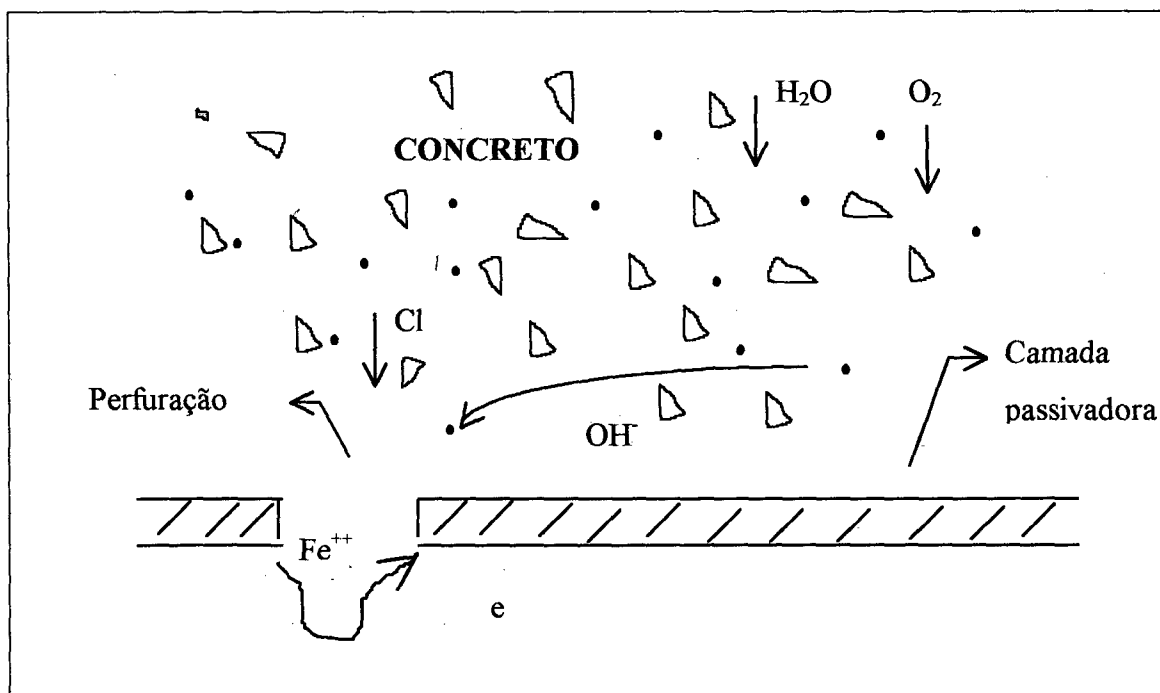
2.3.1 – Quando há a presença do cloro

Quando ocorre a presença do cloro no interior do concreto, formam-se os agentes agressivos que atuam como catalisadores, acelerando o processo de corrosão, e a reação do íon cloreto com a armadura pode se dar como abaixo descrito.



Ou seja, o íon cloreto após reagir com o ferro é regenerado, de forma muito semelhante como o que ocorre com o Cloro Flúor Carbono (CFC) quando destrói a camada de ozônio.

A representação esquemática da corrosão é a seguinte:



Fonte: Neville – Propriedades do concreto.- 1997

Figura 2.6 – Ataque do cloro sobre o aço

KROPP (1995) em seu artigo sobre cloretos no concreto, diz que a origem do cloro em estruturas de concreto pode-se dar de várias formas, dentre as quais cita:

- a) Cloretos que estão dentro dos materiais que compõe o concreto. Exemplo desse fato é quando são utilizados aditivos. Alguns desses aditivos contem cloro em sua composição.
- b) Exposição a água do mar.
- c) Em países de clima frio o sal é utilizado como agente de degelo.
- d) O fogo pode ser uma causa da origem do cloro, isto ocorre no caso de incêndio quando as tubulações de PVC são queimadas liberando o cloro de sua composição.
- e) Em estruturas enterradas também pode haver ataque de cloretos pois podem estar presentes no soló em regiões mais poluídas.

Nos reservatórios o cloro é adicionado a água para desinfecção, e ao volatilizar acaba atingindo a superfície interna do concreto iniciando o processo de migração até atingir as armaduras e aí inicia-se o processo de corrosão.

OLIVIER et al. (1995) citam em seu trabalho as características dos parâmetros que influenciam o transporte da umidade. Segundo os autores esses parâmetros podem ser agrupados em:

- Características dos componentes
- Características do projeto
- Condições de carga.

Essa classificação relaciona-se com os caminhos pelos quais a umidade passa pelo concreto ou seja: pela pasta de cimento, pela interface entre o cimento e o agregado e pelas fissuras causadas pelo carregamento da estrutura, etc.

O sistema de poros na pasta de cimento endurecida é fator importante, pois a célula eletroquímica necessita de uma conexão entre o ânodo e o cátodo para estabelecer a corrosão. Em termos elétricos é a conectividade dos poros que controla a passagem da corrente e assim a resistividade elétrica do concreto é fortemente influenciada pelo teor de umidade do concreto e pela composição iônica da água dos poros. NEVILLE (1997).

O produto final da corrosão ocupa um volume maior que o original o que resulta em tensões internas maiores que por sua vez causam a fissuração do concreto. Ora, com o aumento da fissuração, aumenta a facilidade para a penetração da entrada de agentes agressivos, aumentando a velocidade de corrosão e dando início a um círculo vicioso.

Essa situação acaba diminuindo a seção do aço reduzindo sua capacidade de suportar as solicitações, colocando em risco toda a estrutura. Por sua vez o concreto, com o aumento da fissuração acaba lascando caracterizando a deterioração da estrutura e praticamente o fim de sua vida útil.

2.3.1.1 - Tipos de cloretos no concreto

Existem basicamente 2 tipos de cloretos presentes no concreto, ou seja: a) cloretos livres, existentes na solução de poros; b) cloretos combinados com os produtos hidratados do cimento.

Segundo KROPP (1995), o conhecimento dos cloretos totais é insuficiente, a menos que a relação entre ambos (livres e totais) seja conhecida. Essa razão é conhecida como capacidade de combinação e depende do tipo de cimento. No caso de concreto com adições há a diminuição da concentração de C_3A , que é a fase mais importante para a fixação dos cloretos formando o sal de Friedel. ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Por outro lado, as adições aumentam a formação do CSH onde o cloreto pode permanecer ligado por adsorção, devido a alta área específica do CSH.

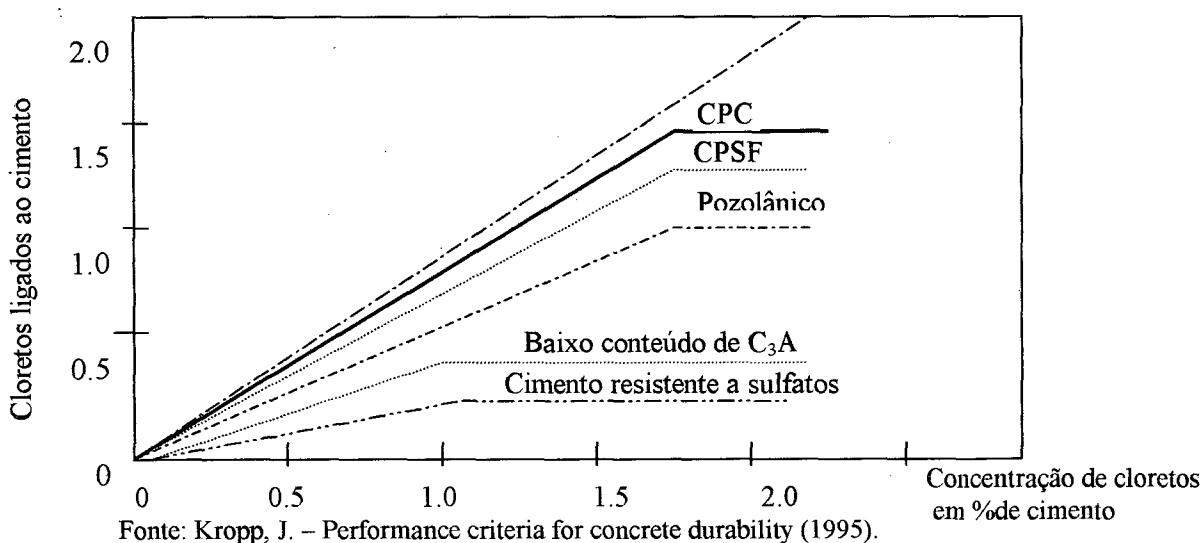


Figura 2.7 – Relação entre cloretos ligados e os cloretos totais no cimento

Mas, de uma maneira geral, os resultados têm mostrado baixa capacidade de fixação dos cloretos para cimentos que contêm adição. No entanto o inverso pode ocorrer se houver escória em excesso. A maioria dos íons de cloreto permanecem

ligados ao cimento baixando assim a concentração desses cloretos. Mas essa capacidade tem um limite de acordo com a concentração dos cloretos. Esse limite varia com o tipo de cimento. A Figura 2.7 acima, mostra 2 intervalos distintos.

De acordo com Figura 2.7 no primeiro intervalo o cloreto ligado é proporcional ao cloreto total. No segundo intervalo acaba a capacidade de combinação com o cimento e aí tem-se somente um crescimento de cloretos livres.

No caso dos cloretos no concreto a ligação por adsorção é justificada pela quimiossorção. A relação existente entre o cloreto livre e o cloreto combinado pode variar entre 0,7 e 3,8.

A carbonatação causa decomposição dos produtos hidratados destruindo a “jaula” dos cloretos ligados. Assim por exemplo o sal de Friedel se decompõe em carbonato de cálcio e alumínio, liberando cloretos e água.

2.3.1.2 - Concentração crítica dos cloretos

Os cloretos são uma presença constante em nosso meio e podem ser detectados em pequena quantidade em qualquer lugar. Para o concreto pequenas quantidades não causam danos. Efeitos corrosivos iniciam a partir do momento que esses cloretos atingem a concentração crítica.

A ação dos cloretos no aço consiste em sua despassivação causando a corrosão pontual. Ainda, o íon cloreto na solução de poros reduz a resistência ôhmica na seção do concreto entre o lado catódico e o anódico, aumentando assim a taxa de corrosão.

A relação entre os cloretos e os hidróxidos não é a mesma para os vários tipos de concreto. Em testes de laboratório o valor limite encontrado para o aço imerso em solução foi de $Cl^-/OH^- = 0,6$, HELENE(1993)

No entanto para concreto armado, outros valores podem ser encontrados, pois a concentração crítica de cloretos depende do tipo de cimento e também do tipo de sal em contato com o concreto.

A carbonatação ao decompor produtos hidratados libera íons cloretos aumentando a taxa de corrosão de armaduras. Daí a importância em medir esse efeito.

Por causa das diferenças da capacidade de ligação dos íons cloretos aos produtos hidratados a concentração de cloretos depende também:

- do tipo de concreto;
- da permeabilidade;
- da cobertura do concreto;
- da profundidade de carbonatação;
- do suprimento de O₂;
- da umidade ambiente.

De acordo com esses dados a concentração crítica em muitos casos varia de 0 a 1% de cloretos por massa de cimento. Esses limites aplicam-se aos estados de não corrosão.

2.3.1.3 - Mecanismos de transporte

A rede de poros capilares, a interface matriz agregado e as microfissuras providenciam caminhos para os íons cloreto. Diferentes mecanismos podem ser envolvidos: porosidade; absorção capilar e a difusão. Dependendo da situação esses mecanismos podem atuar simultaneamente, KROPP (1995).

- a) Permeabilidade: neste caso o transporte de cloretos é um fluxo convectivo que é governado pelo fluxo do líquido e a concentração do cloreto. No caso de sais é considerado seu efeito na viscosidade. Em pequenas quantidades pode ser negligenciado.
- b) Sucção capilar: O ingresso de cloretos devido a capilaridade é um fluxo convectivo de íons e a quantidade de cloretos transportada é dado pelo volume absorvido da solução que contém esses cloretos. A sucção capilar é controlada pelo raio dos poros, a tensão superficial, densidade e viscosidade do líquido. Mas experimentalmente foram observadas maiores velocidades de sucção capilar para soluções de cloreto de cálcio ou de sódio do que para a água pura. Então foi concluído que outros fatores também controlam a sucção capilar. Tanto a absorção da água quanto a de solução de sais dependem da $(t)^{1/2}$. É uma importante causa de penetração de cloretos no concreto.
- c) Difusão: a difusão é causada por um gradiente de concentração de cloretos. Esse mecanismo não depende do fluxo da água como veículo, mas depende de sua presença no concreto. Não há dados disponíveis para definir a taxa de difusão de

cloretos em função da umidade. Entretanto, como o transporte ocorre através dos poros estes devem conter uma grande quantidade de água. Uma alta taxa de difusão é esperada com o material saturado e seu decréscimo ocorre com a diminuição da umidade. A taxa de 60% - 80% pode ser considerada como o limite mínimo para haver difusão de íons. Por outro lado pode ser considerada como o limite máximo para a difusão dos gases como o oxigênio ou o gás carbônico. Outro fator importante é a temperatura, pois a difusão cresce com seu aumento.

2.3.1.4 - Perfis de cloretos

A distribuição espacial dos cloretos no concreto é função das condições de exposição e do tempo. Para os casos onde as condições de contorno prevalecem com respeito a umidade e concentração de cloretos, a teoria da difusão pode ser aplicada utilizando-se a segunda lei de Fick. KROPP (1995). Essa lei supõe que os íons cloretos se deslocam sob efeito de um gradiente de concentração, o que não deixa de ser uma simplificação, uma vez que outros efeitos devem ser considerados, como por exemplo as interações químicas.

A Figura 2.8 mostra que a difusão dos cloretos no concreto devido a um gradiente de concentração diminui sensivelmente com a profundidade.

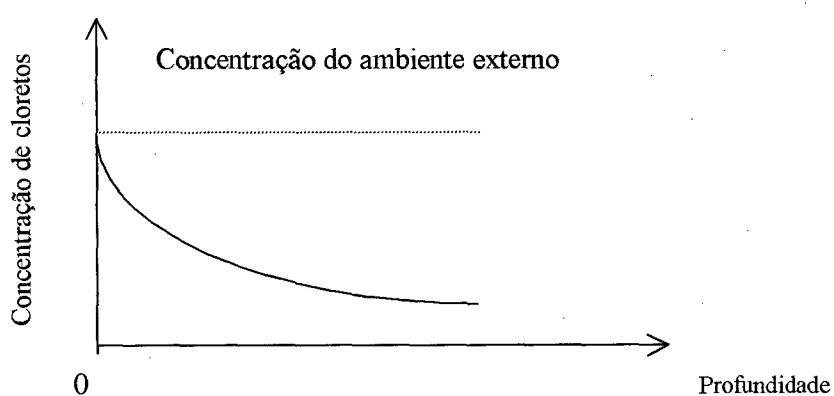


Figura 2.8 – Redução da concentração de cloretos com a profundidade.

Cabe considerar aqui que alguns fatores tem influência no processo de difusão dos gases, ou seja: a estrutura dos poros, o tipo de cimento utilizado, a concentração dos gases e o teor de umidade.

YOSHIZAKI et alii (1993) em seu trabalho, chegaram as seguintes conclusões:

- Quando existe um fluxo de água sobre a superfície do concreto, o cloreto é levado junto com a água.
- Em condições úmidas o cloreto migra devido a permeabilidade a água e a difusão devido ao gradiente de concentração.
- Sob condições impermeabilizantes, o cloreto migra somente devido ao gradiente de concentração.
- Sob condições secas a migração do cloreto também se dá através de um gradiente de concentrações.

Dentre essas conclusões, cabe observar aquela que se refere a impermeabilização, onde no experimento foi utilizado apenas o epoxi como produto impermeabilizante. Ou seja, não é possível a partir desse resultado inferir sobre o comportamento de outros impermeabilizantes.

2.3.1.5 - *Análise química*

A análise química envolve 2 problemas:

a) Amostragem:

A profundidade de penetração dos cloretos varia de mm a cm. Amostras pequenas podem dar respostas incorretas. Extração de amostras com brocas é o procedimento mais adequado. Há no entanto o risco de se alterar o conteúdo de cloro. Se a água for utilizada para extração, um diâmetro mínimo de 100 mm é recomendado. Para o corte a seco, o diâmetro varia de 30 a 50 mm. Outro método utilizado é a coleta de pó. Assim o risco de mudar a concentração de cloretos é reduzido. A dificuldade é a pequena quantidade de material para análise.

b) Considerando a heterogeneidade do concreto, várias amostras são necessárias para se obter certa confiabilidade. O Quadro 2.1 dá o número mínimo de buracos de broca considerando o diâmetro de ferramenta e o tamanho máximo do agregado.

Quadro 2.1 – Quantidade de buracos p/ furacão em laje de concreto

Diam. Máx. Do agregado (mm)	Número de buracos da broca c/ diâmetro mm			
	20	26	32	40
8	1	1	1	1
16	2	1	1	1
32	5	3	2	1

Fonte: Kropp, Chlorides in concrete - 1995

A quantidade de pó também depende da espessura da seção a ser analisada. Os valores da tabela acima são baseados em espessura de 10 mm para cada amostra. Variar a quantidade e profundidade depende da confiabilidade desejada e do tipo de análise a ser feita.

2.3.1.6 - Análise do conteúdo de cloretos

Existem diferentes métodos para análise, tanto quantitativos, quanto qualitativos. Similar ao teste da fenolftaleína, existem indicadores para os cloretos no concreto. Pode ser feito no local, aplicando-se sobre a fratura. Um kit para testes foi desenvolvido para análise total do HCl contido no pó. Os testes podem ser feitos em 2 horas, conforme citado por BROOMFIELD (1997). Exceto para a análise de dispersão de energia de raio X, os métodos de análise requerem que o concreto seja moído.

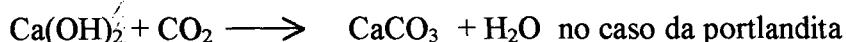
Apesar de existirem ensaios que possibilitam a determinação dos cloretos livres ou dos cloretos ligados, de forma independente, é mais importante a determinação dos cloretos totais, ou seja dos cloretos livres e ligados. Isto se deve ao fato de que os cloretos ligados podem tornar-se livres com a carbonatação.

Na determinação dos cloretos no concreto, busca se determinar qual a quantidade existente a uma determinada profundidade, (geralmente aquela profundidade que corresponde ao cobrimento adotado para as armaduras) comparando-o com os valores da norma.

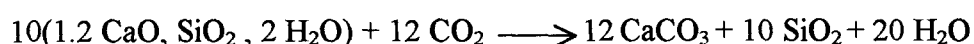
A quantidade de cloretos determinados na amostra é usualmente referida a massa de concreto ou a massa de cimento, o que varia de país para país.

2.3.2 – Quando há a carbonatação

Toda estrutura de concreto expostas ao ar livre estão sujeitas ao fenômeno da carbonatação. O gás carbônico encontrado na atmosfera se apresenta sob forma de uma molécula de 5,8 Å de diâmetro e que pode difundir-se pela quase totalidade dos poros de concreto. Segundo BALAYSSAC (1992), é o anidrido carbônico o agente agressivo no cimento. O processo de carbonatação ocorre segundo a reação:



Para o silicato de cálcio hidratado a reação fica:



A carbonatação reduz substancialmente a alcalinidade do concreto, a valores de pH inferiores a 8,5, despассивando assim a armadura. FARIAS (1991).

O fato é que a carbonatação ocorre pelo processo de difusão fazendo com que o pH varie progressivamente no interior do concreto tendo valores menores quanto mais próximo da superfície.

Existem vários métodos para se medir a carbonatação, dentre esses métodos o mais conhecido é a utilização da fenolftaleína. Esse produto tem como característica o fato de ao entrar em contato com substâncias com pH superior a 9,0 reage produzindo uma cor vermelho carmim facilmente identificável. Esse método consiste em aspergir sobre uma superfície de concreto recém fraturada a fenolftaleína, medindo com uma régua graduada a profundidade carbonatada, que caso exista, será identificada pela não coloração do concreto. Pode-se aplicar a timolftaleína em substituição a fenolftaleína. Neste caso o processo é o mesmo, mudando apenas a cor, que para a timolftaleína se aproxima do azul da prússia para regiões não carbonatadas.

A grande vantagem desses métodos está em sua facilidade de aplicação, baixo custo e pelo fato de que pode ser realizado em campo, não havendo necessidade de laboratórios ou equipamentos especiais.

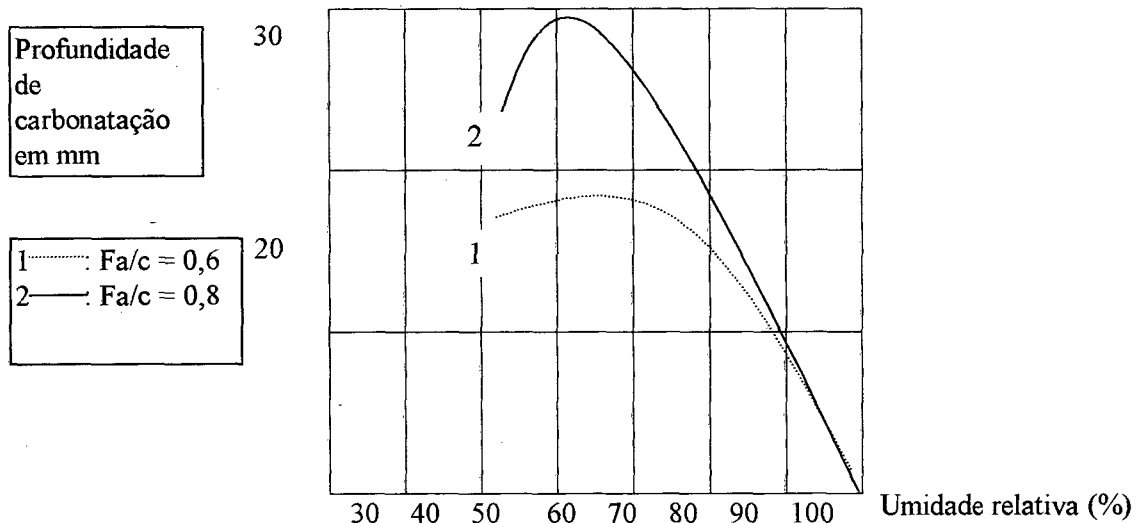
De acordo com OLLIVIER (1998), a profundidade de carbonatação, depende, para uma determinada idade, dos seguintes fatores:

- As características da porosidade do sistema.
- A conectividade dos poros.
- A capacidade dos hidratos reagirem com o dióxido de carbono.

- A saturação dos poros do sistema.

O coeficiente de difusão do CO_2 é menor na água que no ar. No entanto a carbonatação é impossível sem a presença da água, por que o CO_2 deve ser dissolvido antes de reagir.

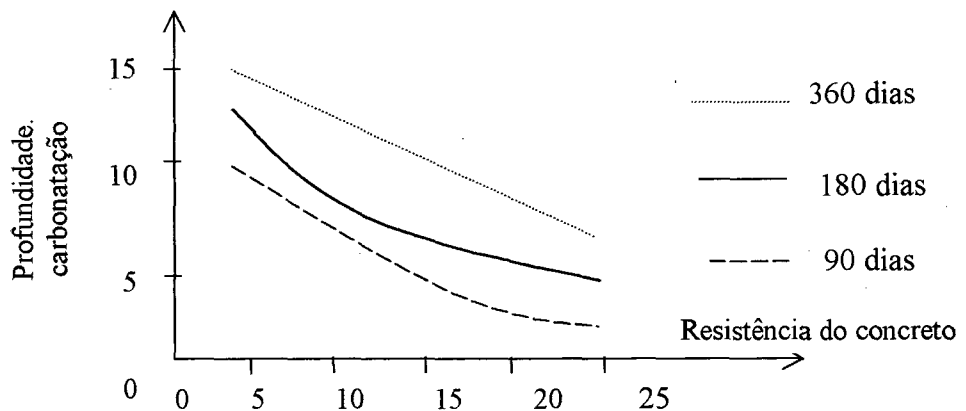
Dessa forma a umidade que maximiza a carbonatação situa-se em torno de 65%, conforme figura 2.9 a seguir.



Fonte: Durabilidade do concreto - Jean-Pierre Ollivier (1998)

Figura 2.9 – Relação da carbonatação com a umidade

BALAYSSAC (1992), por sua vez mostrou que existe uma correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência, conforme pode-se observar na figura abaixo:



Fonte: BALAYSSAC – tese de doutorado – Toulouse – 1992

Figura 2.10 – Relação da profundidade carbonatada com a resistência

2.4 - A permeabilidade do concreto

O concreto possui três fases distintas em que se pode considerar a permeabilidade, ou seja: a pasta de cimento, o agregado e a zona de transição do agregado com a pasta de cimento. NEVILLE (1997) afirma que a permeabilidade da pasta de cimento não é menor que a do concreto feito com a mesma pasta de cimento. No entanto há autores que afirmam ocorrer exatamente o oposto, ou seja: que a permeabilidade da pasta de cimento é menor que a do concreto feito com essa mesma pasta.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a justificativa desse fato é devido as microfissuras que estão presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Citam ainda que essas fissuras ocorrem por que no início da hidratação a zona de transição é fraca e vulnerável devido aos esforços diferenciais entre os agregados e a pasta de cimento originados pela contração térmica, esforços externos e retração devido a secagem.

De qualquer forma existem outros fatores intervenientes na difusão dos gases e, entre esses fatores pode-se citar a porosidade e a forma como ela se distribui dentro do concreto. Os poros podem ser classificados em macroporos, poros capilares e microporos de acordo com o esquema da Figura 2.11 abaixo. Macroporos e poros capilares são os que mais influem nas propriedades de transporte e por conseguinte na durabilidade.

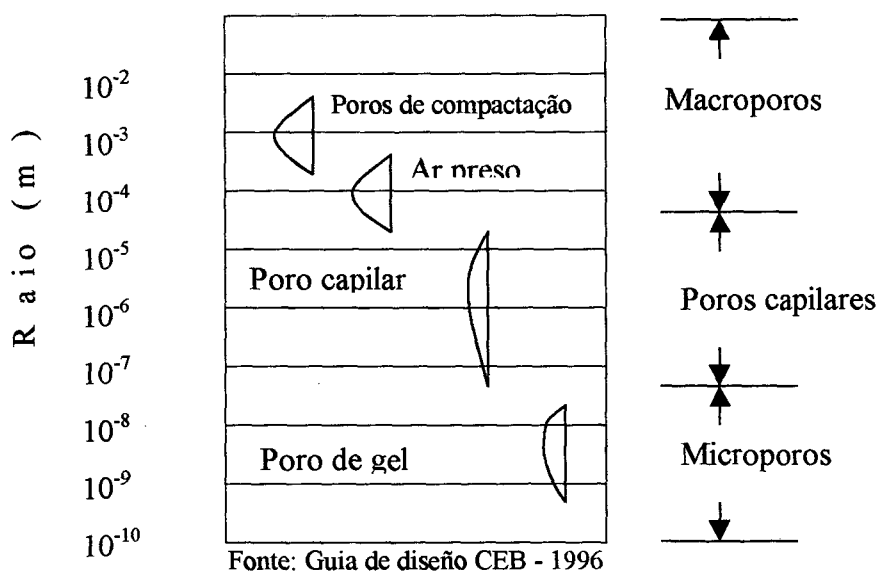
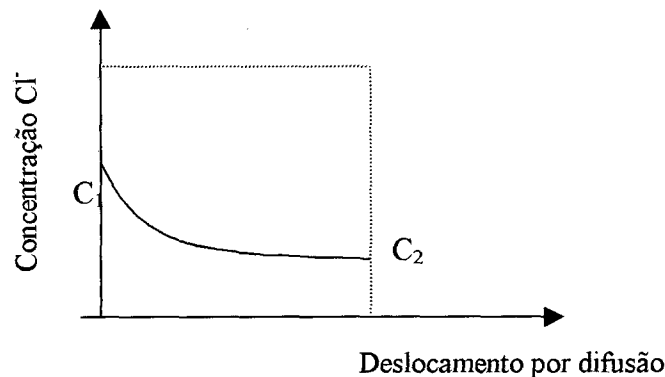


Figura 2.11 – Classificação do tamanho dos poros

Os mecanismos de transporte da umidade são de interesse particular para o presente estudo, pois a caracterização do estado em que se encontra o concreto que compõe a laje de cobertura de reservatórios de água potável é a consequência desses mecanismos, pois junto com a umidade aparecem os agentes agressivos, no caso o cloro. Os poros maiores em contato com o ar úmido, têm sua superfície recoberta com uma capa de água adsorvida facilitando a difusão do cloro, pois os processos de difusão são induzidos por uma tendência ao equilíbrio quando existe um gradiente de concentração.

Os processos de difusão são induzidos por uma tendência ao equilíbrio, quando existe um gradiente de concentrações. Assim o gradiente torna-se a força motriz para a difusão. A figura a seguir exemplifica este fato.



Fonte: Guia de Diseño CEB - 1996

Figura 2.12 – Relação entre concentração e difusão do cloro

Já o gás carbônico (CO_2) se difunde devido a reação química com o concreto. Assim, se houver saturação dos poros não há difusão do CO_2 . O mesmo ocorre com o oxigênio, responsável pela oxidação das barras de aço.

A relação entre a porosidade e a permeabilidade aos gases pode ser explicada pela teoria do tubo, ou seja: grandes dimensões de tubos tem maior taxa de transporte que os pequenos tubos e, tubos bloqueados tem transporte zero. Essas idéias podem ser associadas ao tamanho dos poros e sua conectividade.

Para explicar a teoria da conectividade, GARBOCZI (1995) utiliza o seguinte artifício: imagine uma folha de papel na qual são feitos vários furos aleatoriamente. A pergunta é: Quantos furos são necessários para se ter uma continuidade? Matematicamente demonstra-se que os furos irão cobrir 68 % do papel. Agora, se ao invés do papel, imaginar um cubo e no lugar dos furos, vazios esféricos, a proporção

para atingir a conectividade cai para 32 % aproximadamente. No concreto existe ambos os tipos de percolação, isto é: tanto no plano, quanto no espaço.

Para analisar o efeito dos tamanhos dos poros, imagina-se um cubo de aresta L com um único poro de forma tubular no meio, com raio R . Assim, a porosidade é dada por: $\phi = \pi R^2 / L^2$; a permeabilidade: $K = \pi R^4 / 8L^4$ e a difusividade iônica: $D = D_0 \pi R^2 / L^2$ onde D_0 é a difusividade intrínseca, ou seja aquela difusividade que não depende do fluido.

Supondo agora um cubo com N poros tubulares de tal forma que o raio de cada poro seja: $r = R/\sqrt{N}$. Neste caso a porosidade continua a mesma, ou seja:

$$\phi = N(\pi r^2 / L^2) = \pi R^2 / L^2 ;$$

apesar de existirem mais poros. A difusividade também permanece a mesma, no entanto a permeabilidade muda para menor: $K = N(\pi r^4 / 8L^4)$.

Assim a permeabilidade e a difusividade dependem do tamanho do poro de diferentes maneiras, mas dependem de maneira similar da conectividade.

A pasta de cimento pode ser considerada como feita de 4 fases: cimento anidro; produtos com superfície, como o CSH (Hidróxido de cálcio); produtos porosos como o CH (silicato de cálcio hidratado) e os poros capilares. Assim essa pasta é um material randômico com mais de uma fase distinta GARBOCZI (1995).

Por sua vez, a argamassa e o concreto são considerados como compósitos, pois têm os agregados misturados a pasta de cimento, que neste caso pode ser considerada uniforme uma vez que a grandeza dos poros da pasta comparada com as zonas de interface é consideravelmente menor. As propriedades de transporte da pasta de cimento variam com o tempo, enquanto que para os agregados permanecem constantes, no entanto a zona de interface pode ser considerada como um caminho crítico que tem como características: porosidade capilar maior que a pasta e maior concentração de CH.

Alguns estudos mostram que o concreto pode ser 100 vezes mais permeável que a pasta de cimento, apesar disto as propriedades de transporte do concreto são determinadas pela pasta de cimento.

Assim, os conceitos de conectividade dos poros e da percolação, mostram a importância desses efeitos na permeabilidade do concreto. Por sua vez o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio pode quantificar com boa aproximação a

porosidade, apesar da limitação de que o diâmetro registrado neste ensaio pode ser o diâmetro de entrada o poro de conexão, CAMPITELI (1985).

A preocupação com a permeabilidade do concreto está ligada a sua durabilidade e no fato de procurar-se evitar a penetração de agentes agressivos. A permeabilidade do concreto é um importante indicador de durabilidade e por meio de modelos matemáticos sua vida útil pode ser estimada. SANJUÁN e MUÑOZ (1997).

A umidade, o vapor d'água e com eles os agentes agressivos, são transferidos através do meio poroso por diferentes mecanismos de transporte. Assim o fenômeno da difusão explica como são transportado o vapor d'água e os gases, já o fenômeno da capilaridade explica o transporte de líquidos. Ou seja, a permeabilidade é também um fenômeno importante para a determinação do comportamento de uma estrutura de concreto frente aos agentes agressivos e essa permeabilidade pode ser estimada com a porosimetria a mercúrio. MENDES (1997).

O ensaio de porosimetria a mercúrio é realizado através de medidas ao longo de um processo de deslocamento de mercúrio em um meio poroso. Para se obter uma distribuição acumulada do volume de poros em função do raio, utiliza-se a equação de Laplace tendo o mercúrio como fluido:

$$P_c = -2\sigma \cos \theta / r, \quad (2.3)$$

onde:

σ = tensão superficial;

θ = ângulo de contato;

para o mercúrio: $\sigma = 0,48 \text{ N/m}$ e $\theta = 140^\circ$

A permeabilidade intrínseca pode ser determinada conhecendo-se a distribuição de poros através de modelos matemáticos, MENDES (1997).

LASKAR et al. (1997) através de um experimento utilizando o porosímetro verificaram que algumas propriedades relacionadas com a resistência têm distribuição normal para diferentes misturas de concreto. Entre as propriedades relacionadas tem-se a distribuição dos raios dos poros, o fator de retenção e a porosidade total. Isto permite estabelecer procedimentos estatísticos apropriados para o tratamento da permeabilidade.

KROPP (1995), afirma que a deterioração do concreto está intimamente ligada com a permeabilidade e que muitos pesquisadores concluíram que um concreto adequadamente curado diminui a conectividade dos poros. O estudo apresentado também

mostrou que o concreto sujeito as cargas de trabalho sofrem microfissuras e que estas podem alterar a permeabilidade do concreto.

Assim pode-se admitir a permeabilidade como a propriedade pelo um fluxo hidráulico através do concreto definido pela interligação dos vários poros existentes, pelas fissuras eventualmente existentes e pelas microfissuras sempre presentes. Os reservatórios de água encontram nas fissuras, poros e conseqüente permeabilidade, fatores determinantes da sua durabilidade, GEYER et al. (1995). Cabe lembrar aqui que a presença de agentes agressivos também deve ser considerada como fator determinante da durabilidade de um reservatório.

O poder de corrosão dos cloretos fica ressaltado, também pela grande quantidade de artigos que são publicados anualmente, incluindo até o efeito sinérgico entre o ataque de sulfatos e a influência do dióxido de carbono junto a difusividade dos cloretos, conforme TUMIDAJSKI et al. (1996).

Testes para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no concreto vem sendo desenvolvidos como se observa no trabalho de McGRATH et al. (1996) cuja proposta é medir esse coeficiente a partir de um gradiente de potencial elétrico.

2.5 - A estrutura de concreto e o meio ambiente

As situações em que se encontram as estruturas de concreto variam muito e em algumas delas a agressividade ambiental deve ser considerada sobretudo pelo fato de existirem outros fatores que colaboram com a deterioração dessas estruturas.

HELENE (1993), em seu artigo "Introdução a durabilidade no projeto estrutural de concreto", apresenta os seguintes quadros de classificação da agressividade do meio ambiente.

Quadro 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente

<i>Classe de agressividade</i>	<i>Agressividade</i>	<i>Risco de deterioração da estrutura</i>
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

Fonte: Helene, workshop: Durabilidade das construções

Quadro 2.3 - Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras

<i>Classe de agressividade</i>	<i>Macroclima</i>	<i>Microclima</i>	<i>Gás carbônico CO₂ no ambiente</i>	<i>Cloretos CL no ambiente</i>
I	atmosfera rural	UR ≤ 60% interiores secos	≤ 0,3%	≤ 200 mg/L
II	urbana	UR de 60 A 95% UR = 100% (submersa)	≤ 0,3%	< 500 mg/L
III	marinha ou industrial	UR de 60 a 100 % (variável)	≥ 0,3 %	> 500 mg/L
IV	pólos industriais	interiores úmidos de indústria com agentes agressivos	≥ 0,3 %	> 500 mg/L

Fonte: Helene, workshop: Durabilidade das construções

HELENE (1993), apresenta em seu trabalho um quadro onde relaciona a espessura mínima de cobrimento com a resistência e o fator a/c adotados. Para o registro desses dados, conforme Quadro 2.4 abaixo, o autor parte do pressuposto de que a vida útil de uma estrutura deve ser de pelo menos 50 anos e admitindo-se, a favor da segurança, que o coeficiente de permeabilidade praticamente se mantém constante após os 28 dias da concretagem.

Quadro 2.4 – Espessura mínima de cobrimento em função do Fa/c e da resistência.

A/c	Idade Dias	Fck MPa	Coeficiente de permeabilidade k 10 ⁻¹² cm/s	x mm
	1	13	2.000.000	126
0,38	7	33	20.000	33
	28	45	2	17
	1	10	8.000.000	259
0,42	7	29	80.000	68
	28	40	8	35
	1	8	25.000.000	459
0,48	7	25	25.000	121
	28	35	25	62
	1	4	500.000.000	2072
0,60	7	16	500.000	548
	28	25	500	280
	1	2	5.600.000.000	6926
0,70	7	12	56.000.000	1834
	28	20	5.600	936

Fonte: HELENE, P.L. - Contribuição ao estudo da corrosão em C. A. - USP - 1993

Neste quadro pode-se observar que para a vida útil de 50 anos uma estrutura com f_{ck} de 45 MPa terá cobertura mínima de 17 mm enquanto que para a mesma vida útil, uma estrutura com 25 MPa teria um cobrimento mínimo de 280 mm o que é altamente inviável.

Dessa forma este trabalho procura enfatizar os aspectos da durabilidade das estruturas de reservação caracterizando o tipo de concreto utilizado para a confecção dos reservatórios e propondo alternativas que melhorem esta durabilidade.

Há que se considerar que, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) a maior parte dos processos físico-químicos de degradação do concreto provém da história de estruturas em campo, pois existem dificuldades de se reproduzir as mesmas condições em laboratórios. VERDÚ, citado por SILVA (1994) salientava a dificuldade em encontrar uma relação entre os ensaios de laboratório e o comportamento do concreto na realidade, sendo freqüente a necessidade de se recorrer a ensaios de longa duração em condições totalmente reais.

3 – METODOLOGIA

O primeiro aspecto a ser analisado nos reservatórios, refere-se ao estado geral de conservação das estruturas e de importantes características tais como: tipo de concreto; tempo de operação; capacidade de reservação; concentração de cloro na água (concentração média); forma e tipo do reservatório; cobrimento, taxa e tipo da armadura. Todos esses dados são obtidos através dos projetos executivos, visita ao local e entrevista com os responsáveis por sua operação.

Essas etapas fazem parte de um levantamento de dados inicial que permite efetuar um diagnóstico, ou seja, uma descrição minuciosa das patologias, executando a primeira parte do fluxograma apresentado por HELENE (1993), conforme apresentado na Figura 2.3 deste trabalho.

Cabe observar que os projetos dos reservatórios, no qual baseia-se o presente trabalho, são os projetos estruturais e ainda, que o procedimento comum nas companhias de saneamento é o de utilizar um mesmo projeto estrutural para vários reservatórios, baseando apenas no fato de que o modelo e tamanho é o mesmo, não havendo maiores preocupações com a sua localização.

Outro aspecto a ser considerado nos reservatórios é o número e tipo de patologias incidentes nesses reservatórios como por exemplo: fissuras, eflorescências, vazamentos, corrosão nos componentes metálicos (escada, tampa, tubulação, etc.), corrosão das armaduras e má execução do reservatório. Esses dados permitem por si só, caracterizar os reservatórios quanto a suas patologias aparentes, no entanto quando se trata de verificar a influência do cloro e o estado geral das armaduras do concreto é necessário a execução de alguns ensaios mais apurados.

Apesar de existirem inúmeros testes, nenhum encontra-se normalizado pois o fenômeno da corrosão envolve reações físico-químicas complexas e o meio em que se encontra fornece uma gama muito grande de variáveis de difícil controle.

A anamnese do problema tem se revelado particularmente complicada uma vez que não é possível, em geral, obter informações sobre quem executou a obra (empreiteiro,

construtora), a data de execução (o que foi adotado neste trabalho é a data de inauguração), o registro do tipo de concreto utilizado (daí a necessidade de reconstituição de traço). Assim, as informações obtidas são apenas aquelas constantes nos projetos estruturais, mesmo porque até os funcionários que atuam nessas companhias já são outros, pois a idade média dos reservatórios estudados está entre 10 e 25 anos.

Assim, para a execução do presente trabalho procura-se avaliar, o concreto, a armadura e o sistema concreto/armadura: selecionando-se os seguintes ensaios:

Vistoria dos reservatórios;

Avaliação das condições do meio ambiente;

Profundidade de carbonatação;

Avaliação da corrosão através do ensaio de potencial de eletrodo

3.1 - Vistoria dos reservatórios

A vistoria dos reservatórios trata-se de uma inspeção visual cuidadosa, onde são anotados todos os problemas que estão aparentes, ou seja, aqueles cujas patologias têm como resultados defeitos visíveis.

Essa vistoria é importante, pois neste primeiro contato é possível observar algumas patologias ou defeitos e ter uma noção sobre quais procedimentos devem ser adotados para um possível tratamento de recuperação do reservatório ou para a realização de novos ensaios.

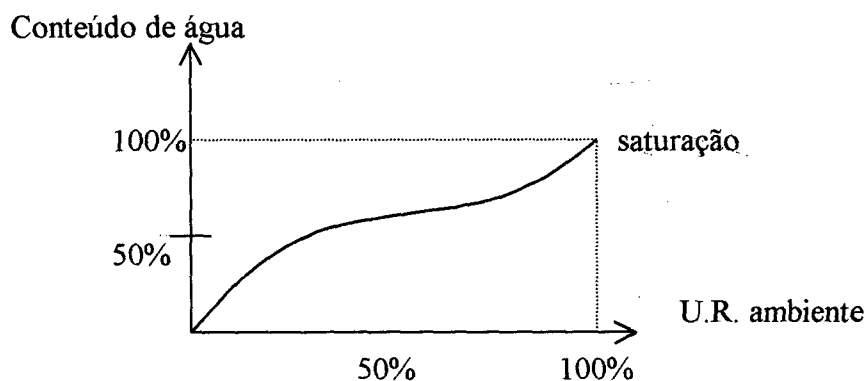
Assim, foi considerado um reservatório com fissuras quando essas representam individualmente mais de 5% do total da amostra, adotando o mesmo procedimento do trabalho de DAL MOLIN (1988). Considerou-se como eflorescências quando o reservatório apresenta formação de depósito salino na superfície, sendo, no presente caso em forma de manchas esbranquiçadas. Os vazamentos foram considerados quando a quantidade de água que sai através do concreto forma um fluxo constante e visível a olho nu. É considerado como tendo corrosão de armadura quando o reservatório apresenta manchas de ferrugem ou armadura exposta. O mesmo ocorre com os componentes, como as escadas de acesso, as tampas e as tubulações metálicas.

3.1.1 - Avaliação das condições do meio ambiente

O objetivo desta avaliação é determinar os fatores mais importantes que podem causar algum tipo de patologia junto aos reservatórios. Assim, por exemplo, a quantidade de cloro presente na água, implica a princípio num aumento do risco de corrosão das armaduras devido a grande quantidade de cloro contido no concreto da laje desses reservatórios. Busca-se também classificar a agressividade do meio ambiente sobre a estrutura e sobre a armadura desses reservatórios e assim ter uma visão geral de toda a situação.

Devido a alta área específica do gel de CSH, o concreto tem relativamente um alto conteúdo de água. O aumento de umidade do ar produz um aumento da quantidade de água no concreto reduzindo o espaço disponível para a difusão dos gases reduzindo também a permeabilidade aos gases.

A relação entre a umidade relativa do ar e o conteúdo de água de concreto se dá conforme Figura 3.1 abaixo, também conhecida como curva isotérmica de equilíbrio.



Fonte: Boletim n. 12 – Guia de designo CEB – 1996

Figura 3.1 – Relação entre conteúdo de água e umidade ambiente

Considerando que a umidade relativa dentro dos reservatórios é elevada, (em torno de (90 - 95%)) pode-se inferir que a umidade dentro do concreto também seja elevada.

Para que ocorra o processo de deterioração do concreto armado, devem existir interações entre a estrutura e o meio ambiente. O tipo, a intensidade e o momento em

que começam a interagir dependem das propriedades do material, do tipo de estrutura e da agressividade do meio ambiente.

O macroclima tem pequena influência sobre a durabilidade da estrutura. O que efetivamente influencia é o microclima, ou seja aquele cuja distância esta na ordem de milímetros ou no máximo de centímetros.

Existem várias propostas que procuram classificar o tipo do meio ambiente e sua agressividade sobre a estrutura de concreto, como o Quadro 2.3 desse trabalho.

O Guia de Diseño CEB, fornece o Quadro 3.1 na página seguinte, onde define o grau de agressividade de acordo com o umidade relativa dentro do concreto e as condições de carbonatação, corrosão de aço devido a carbonatação ou à presença de cloretos, o ataque por gelo e degelo e o ataque químico isolado.

Da mesma forma que o Quadro 3.1, o gráfico abaixo procura mostrar a influência da umidade no risco de corrosão das armaduras. A linha contínua, desse gráfico indica o risco de corrosão em ambiente normal. A agressividade (eixo das ordenadas), foi considerada proporcional ao recobrimento requerido para produzir um risco constante. Em outras palavras se numa situação inicial temos para um ambiente normal um recobrimento de 1,5 centímetros, o risco seria o mesmo num ambiente agressivo mas com recobrimento de 3 centímetros.

Quadro 3.1 - Influência do conteúdo de umidade sobre a durabilidade

Umidade Relativa Dentro Do Concreto	Processo				
	Carbonatação	Corrosão do Aço		Ataque por gelo e degelo	Ataque químico
		Carbonatado	Contaminado com cloretos		
Muito baixa (<45%)	1	0	0	0	0
Baixa (45 – 65%)	3	1	1	0	0
Média (65 – 85%)	2	3	3	0	0
Alta (85 – 98%)	1	2	3	2	1
Saturado (>98%)	0	1	1	3	3

Fonte: Boletim n. 12 – Guia de diseño CEB – 1996

Legenda:

Risco 0 = não significativo	Risco 2 = médio
Risco 1 = levemente significativo	Risco 3 = alto

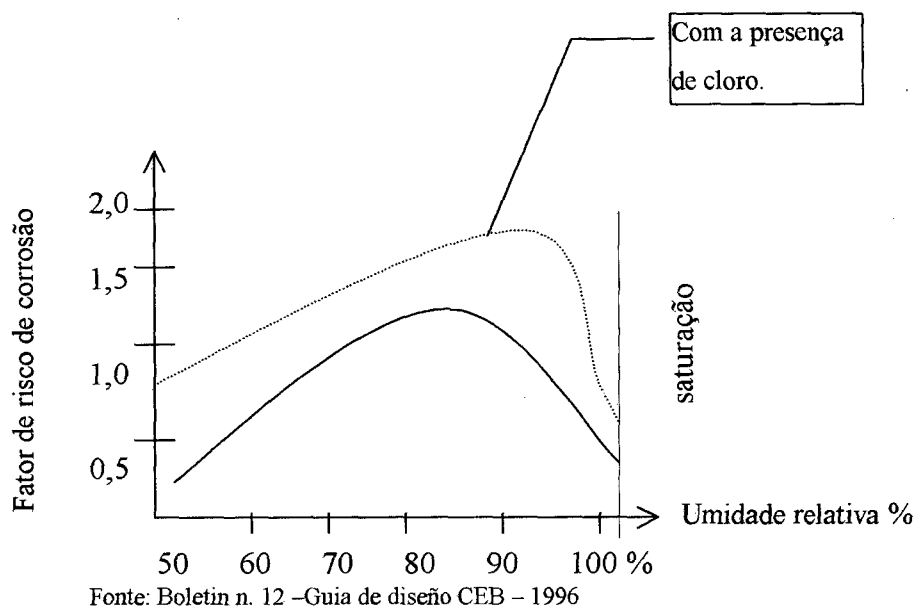


Figura 3.2 - Fator de risco da corrosão em função da umidade

A temperatura também tem influência na agressividade, pois um aumento de 10 graus centígrados dobra a velocidade de reação (CEB, 1992). Assim, considerando a mesma escala para a agressividade, dada para o gráfico anterior, tem-se o seguinte resultado para a relação entre a temperatura e a agressividade do meio ambiente.

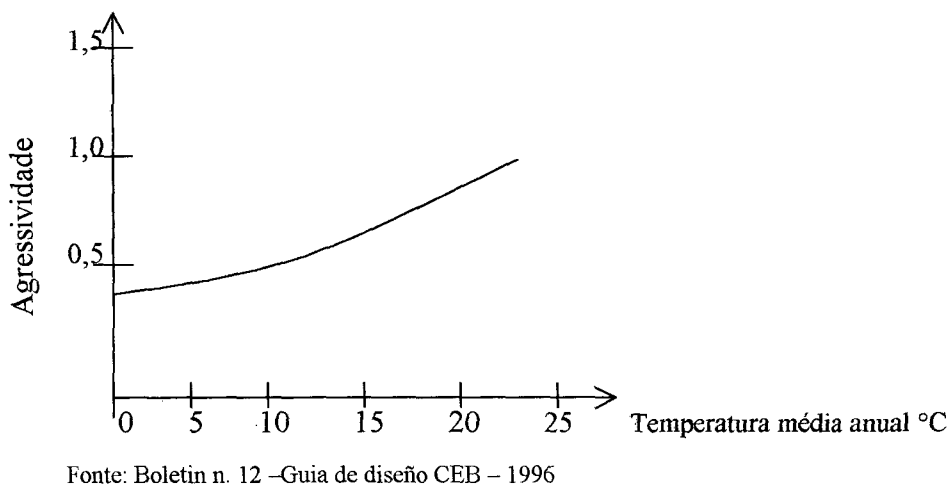


Figura 3.3 – Agressividade do meio ambiente em função da temperatura

O que ocorre geralmente é que a temperatura tende a ser ignorada nas definições de agressividade, no entanto, para o caso das lajes de reservatórios ela é muito importante. O ambiente no qual está inserido esse concreto, pode ser caracterizado

analisando as condições da face interna e externa. Na parte interna a temperatura da água varia anualmente de 23 a 24 °C ; na superfície interna do concreto que não está em contato com a água varia anualmente de 30 a 36 °C; e na parte externa do reservatório a temperatura varia também anualmente de 44 a 46°C conforme é apresentado por SARKIS et alii (1997). Compreender o comportamento desse concreto nessa situação é muito importante para estimar a durabilidade desse tipo de estrutura.

É possível classificar as causas que originam essas patologias. Essas causas podem ser diretas ou indiretas, conforme classificação feita por CARRIO (1997). As causas são apresentadas no Quadro 3.2 abaixo.

Quadro 3.2 - Quadro geral de causas de patologias

Família	Causas	
Diretas	Mecânicas: Esforços mecânicos Empuxos Impactos	
	Físicas Agentes atmosféricos	
	Químicas Contaminação do ambiente Umidade Sais solúveis Micro organismos Corrosão	
	Outras origens Fissuras Deformações Desprendimentos	
	Indiretas	Do projeto Escolha do material Sistema construtivo Desenhos e detalhes
		De execução
		Do material Defeito de fabricação Troca de material
Manutenção Uso incorreto Falta de manutenção periódica		

Fonte: Carrio, J. M – Patologia de fachadas – Munilla Leria – Madri - 1997

A NBR 6118 (projeto e execução de concreto armado - RJ - 1978) pouco esclarece sobre a proteção que deve ser dada a armadura em função do ambiente em que está inserida a estrutura de concreto. É importante considerar no projeto as condições do meio ambiente, pois elas irão definir as espessuras, cobrimentos, tipos de cimento e de concreto, dimensões, métodos construtivos, etc.

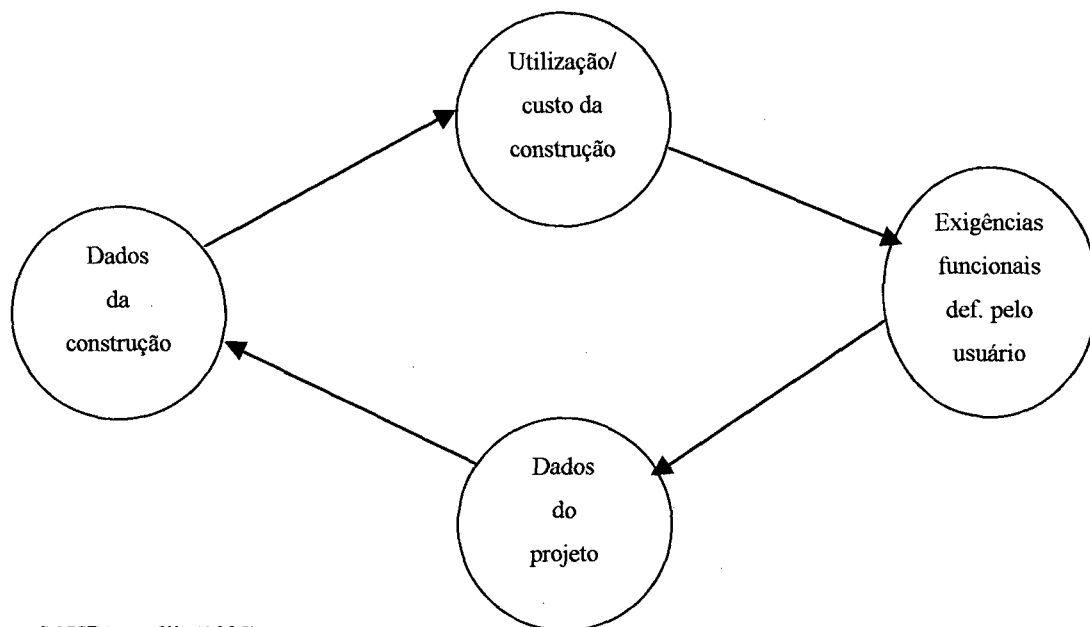
Com o objetivo de fornecer recomendações para auxiliar o projetista nas especificações de uma estrutura durável, o CEB criou a seguinte tabela de exposição de condições ambientais.

Quadro 3.3 – Classes de exposição

Classes de exposição		Condições do ambiente
1		Seco: interior de edifícios (residências, etc.); exterior não exposto ao vento. Locais com alta umidade relativa.
2	A	Úmido sem congelamento; interior de construções onde a umidade é alta; exterior exposto ao vento e a chuva; em contato com solo/água não agressivos.
	B	Úmido com congelamento.
3		Úmido com congelamento e sais descongelantes; em contato com solo/água não agressivos; exterior exposto ao vento e a chuva.
4	A	Marinho; região de respingos ou submerso com uma face exposta ao ar. Expostos ao ar marinho.
	B	Marinho com congelamento; região de respingos ou submerso com uma face exposta ao ar. Expostos ao ar marinho.
5	A	Ataque químico fraco
	B	Ataque químico moderado
	C	Ataque químico forte

Fonte: Boletim n. 12 – Guia de diseño CEB – 1996

Assim, comparando as condições observadas nos reservatórios de concreto para água potável com a tabela acima, pode-se caracterizar o ambiente da estrutura e obter subsídios tanto para a manutenção desses reservatórios quanto para a elaboração de futuros projetos, cumprindo assim com uma das etapas no círculo da qualidade citado por SOUZA et alii (1995) e a seguir descrito:



Fonte: SOUZA et alii, (1995).

Figura 3.4 – Círculo de qualidade para uma estrutura

Na prática a deterioração do concreto raramente é devido a uma causa única e que geralmente em estágios avançados de degradação, mais de um fenômeno está em ação (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Esses fenômenos por sua vez estão intimamente ligados com as condições do ambiente, principalmente em se tratando de reservatórios de concreto.

3.1.2 – Avaliação das condições da água dos reservatórios.

De acordo com a norma L1.007 da CETESB (Companhia Técnica de Saneamento Ambiental), para se classificar o meio quanto a agressividade ao concreto, deve-se atender o seguinte procedimento:

- obter os resultados da análise química da água, referente aos seguintes parâmetros: pH; anidrido carbônico agressivo; alcalinidade; amônia; dureza; sulfatos; resíduo não evaporável;
- atribuir grau de agressividade do agente de acordo com Quadro 3.8;
- adotar o grau de agressividade mais alto quando a água contiver mais de um agente agressivo em diferentes graus.

A água dos reservatórios pode conter mais de um agente agressivo, mas o fenômeno patológico preponderante para laje de concreto é o da difusão.

Assim, na determinação das características da água, a quantidade de cloro adicionada se torna importante. O grau de agressividade da água pode ser atribuído de acordo com a tabela a seguir, onde se relacionam as diversas propriedades medidas da água.

Quadro 3.4 - Parâmetros aquosos

Propriedades	Grau de Agressividade			
	Moderado	Alto	Muito Alto	Excessivo
PH	8,0 a 6,0	6,0 a 5,0	5,0 a 4,5	< 4,5
pH – pH _{sat}	-0,2 a -0,3	-0,3 a -0,4	-0,4 a -0,5	< -0,5
Cálcio (ppm Ca ²⁺)	120 a 80	80 a 40	40 a 20	< 20
Amônia Total (ppm NH ₄ ⁺)	30 a 50	50 a 80	80 a 100	> 100
Magnésio (ppm Mg ²⁺)	100 a 500	500 a 1000	1000 a 1500	> 1500
Sulfato (ppm SO ₄ ²⁻)	150 a 1000	1000 a 2000	2000 a 3000	> 3000
Cloreto (ppm Cl ⁻)	500 a 1000	1000 a 2500	2500 a 5000	> 5000

Fonte – Concreto, ensaios e propriedades – Furnas centrais elétricas S/A

Considerando que a água em questão é a aquela que é servida à população em geral, espera-se que, o grau de agressividade seja menor que o moderado. No entanto, importantes considerações devem ser feitas com relação aos índices, apresentados no Quadro 3.4, sobretudo quando se considera a vida útil desses reservatórios.

Os limites para a classificação da agressividade da água são bastantes discutíveis, pois outros fatores além das características da água e do concreto interferem nesta classificação. Esses limites variam também de país para país. O Quadro 3.5 a seguir mostra os níveis considerados de agressividade para diversos países.

Quadro 3.5 - Níveis de agressividade de água de diversos países

País	Grau de Agressividade de Água			
	Médio	Alto	Muito alto	Excessivo
Íon Sulfato (mg/L)				
Estados Unidos	150-1000	1000-2000	>2000	-
Grã-Bretanha	120-360	360-1200	>1200	-
Polônia	-	250-1500	-	>1500
Valor de pH				
Antiga União Soviética	5,5 - 6,5	4,0 - 5,5	-	<4,0
Polônia	-	6,0 - 7,0	-	<6,0
Antiga Alemanha Ocidental	5,5 - 6,5	4,5 - 5,5	<4,5	-
Teor de CO ₂ (mg/L)				
Antiga Alemanha Ocidental	15-30	30-60	>60	-
Antiga Tchecoslováquia	5-8	8-15	>15	-
Antiga Alemanha Oriental	10-90	>90	-	-
Teor de Mg ²⁺ (mg/L)				
Polônia	-	1000-2000	-	>2000
Antiga União Soviética	1500-3500	>3500	-	-
Antiga Alemanha Ocidental	100-300	300-1500	>1500	-

Fonte: - Concreto, ensaios e propriedades - Furnas centrais elétricas S/A

Observa-se, nesta tabela, uma variação grande entre estes índices, o que mostra diferentes níveis em sua classificação.

O livro editado por Furnas S/A (Concreto, ensaios e propriedades), apresenta um quadro para auxiliar na definição das classes de exposição relacionados a agressividade química, ou seja:

Quadro 3.6 - Classes de exposição ambiental relacionadas à agressividade química

Elementos Agressivos	Classes de Exposição			Documento Normativo
	EQ1	EQ2	EQ3	
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	200 - 600	600 - 3000	3000 - 6000	NP 413
SO ₄ ²⁻ total no solo (mg/kg)	2000-3000	3000-12000	12000-24000	LNEC E 202
PH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	4,5 - 4,0	NP 411
CO ₂ , expresso em CaCO ₃ (mg/l)	35 - 90	91 - 200	>200	NP 1416
NH ₄ ⁺ (mg/l)	15 - 30	30 - 60	60 - 100	NP 730
Mg ²⁺ (mg/l)	30 - 1000	1000-3000	>3000	NP 507

Fonte: - Concreto, ensaios e propriedades - Furnas centrais elétricas S/A

A fabricação do concreto, segundo o autor, deve obedecer as características de dosagem, conforme Quadro 3.7 a seguir,

onde:

EQ = exposição química;

EC = exposição a carbonatação.

Quadro 3.7 - Dosagem em função das classes de exposição

Fatores de Deterioração do Concreto	Ação de Ambientes Quimicamente Agressivos			Carbonatação			
	EQ1	EQ2	EQ3	EC1	EC2	EC3	EC4
Classes de Exposição Ambiental							
Máxima Razão A/C	0,45	0,45	0,40	0,65	0,60	0,60	0,55
Consumo Mínimo de Cimento (kg/m^3)	340	360	380	260	280	300	320
Recobrimento Mínimo da Armadura (mm)	-	-	-	20	25	25	25

Fonte: - Concreto, ensaios e propriedades - Furnas centrais elétricas S/A

Interessante observar que o quadro 3.7 acima não coloca o cloro como agente agressivo possivelmente por tratar-se de águas subterrâneas, mas seria mais completo se assim o fizesse. Por fim, a CETESB apresenta em sua norma L1.007 os tipos de agressividade e valores limites para avaliação do grau de agressividade, que pode ser observado no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Tipos de agressividade e valores limites para sua avaliação

Reações	A			B			C			D			
	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12	13	14
Agressividade	Fenômeno preponderante de lixiviação incluindo a Hidrólise dos compostos de cálcio do aglomerante			Fenômeno preponderante acompanhado da lixiviação									
	Carbonatação			Troca iônica									
Grau da Água	Águas puras	Águas não-salinas ácidas		Ácidas	Águas salinas		Águas magnesianas		Águas amoniacais			Águas do mar, salobra, de esgoto ou poluída industrialmente	
	Sólidos Dissolvidos (mg/L)	pH	CO ₂ agressivo (mg/L)	pH	pH	HCO ₃ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)			
0	> 150	7,0	-	7,0	7,0	-	< 100	< 100	< 50	< 200	< 250	< 100	-
I	150 a 50	> 6,0	< 20	> 6,0	-	-	100 a 150	100 a 150	50 a 100	200 a 350	250 a 400	100 a 200	-
II	150 a 50	6,0 a 5,6	20 a 30	6,0 a 5,6	-	-	150 a 250	150 a 250	100 a 150	350 a 600	400 a 700	200 a 350	-
III	< 50	5,5 a 4,5	> 30	5,5 a 4,5	8 a 9	400	250 a 500	250 a 500	150 a 250	600 a 1200	700 a 1500	350 a 600	3000
IV	< 50	< 4,5	-	< 4,5	> 9	>= 600	> 500	> 500	> 250	> 1200	> 1500	> 600	> 3000

Fonte: Norma CETESB L1007 - Revisão de dezembro de 1988

Ainda, de acordo com a norma LI.007, o grau de agressividade apresentado no quadro 3.6 corresponde ao grau efetivo de agressividade em relação a um concreto dosado com cimento Portland comum, consumo de 300 kg/m³ e relação água/cimento 0,60.

Existem condições atenuantes que podem ser consideradas:

- a) a água agressiva entra em contato com o concreto após 28 dias de sua execução.
- b) A água agressiva ao concreto entra em contato com este algumas vezes por ano.
- c) O concreto encontra-se envolvido por um terreno reconhecidamente coesivo (baixa permeabilidade).

Por sua vez, as condições agravantes que podem ser consideradas, são:

- a) a água está em movimento;
- b) o nível de água varia com frequência (molhagem e secagem);
- c) existe uma pressão hidráulica (gradiente hidráulico) unilateral;
- d) a temperatura da água é superior a 45 °C;
- e) a estrutura de concreto é de seção delgada, sendo a menor dimensão de 20 cm, aproximadamente.

Para o caso dos reservatórios, pode se considerar como atenuante o fato da água agressiva entrar em contato com o concreto somente 28 dias após a sua execução, pois neste caso, após a execução da estrutura existe toda a instalação hidráulica para ser executada, o que demanda tempo. As outras condições atenuantes não se aplicam, pois no caso a agressividade do gás cloro despendido pela água atua durante o tempo todo sobre a laje de cobertura.

Por outro lado, no que se refere às condições agravantes, apenas o último item pode ser aplicado, pois no caso dos reservatórios as estruturas são quase sempre delgadas e com dimensões inferiores a 20 cm. Para a laje de cobertura, a espessura do concreto varia de 12 a 20 cm.

Embora a norma cite como agravante a temperatura apenas para a água. Cabe observar aqui que no caso das lajes de cobertura a diferença térmica entre a parte externa da laje e a parte interna da laje pode chegar a mais de 10 °C que por sua vez pode contribuir para sua deterioração. Essa diferença de temperatura cria tensões térmicas que contribuem para a fissuração e criam um potencial para um fluxo de massa.

que por sua vez protege o aço contra a corrosão cujos agentes são o oxigênio e a água, pode ser eliminada pela carbonatação.

Esse é um dos motivos pelo qual se deve conhecer a profundidade de carbonatação, utilizando-se para isso os vários processos existentes que podem ser químicos, através do uso de indicadores como a fenolftaleína e a timolftaleína ou outros processos como a microscopia eletrônica.

A grande vantagem dos métodos que utilizam a fenolftaleína (ou o timolftaleína) como indicadores, está em sua facilidade de aplicação, baixo custo e pelo fato de que pode ser realizado em campo, não havendo necessidade de laboratórios ou equipamentos especiais.

No entanto, cuidados devem ser tomados a fim de se evitar a contaminação da superfície do concreto onde será medida a carbonatação. Geralmente quebra-se parte do concreto aspergindo-se o indicador químico. A mudança de cor indica que não há carbonatação, pois neste caso o pH é maior que 9,0; se o concreto permanece incolor indica que há carbonatação. Mede-se com uma régua a profundidade carbonatada. Outra consideração a ser feita, é que a profundidade da carbonatação medida com fenolftaleína pode ser menor que a profundidade realmente carbonatada, conforme gráfico abaixo.

Valores do pH

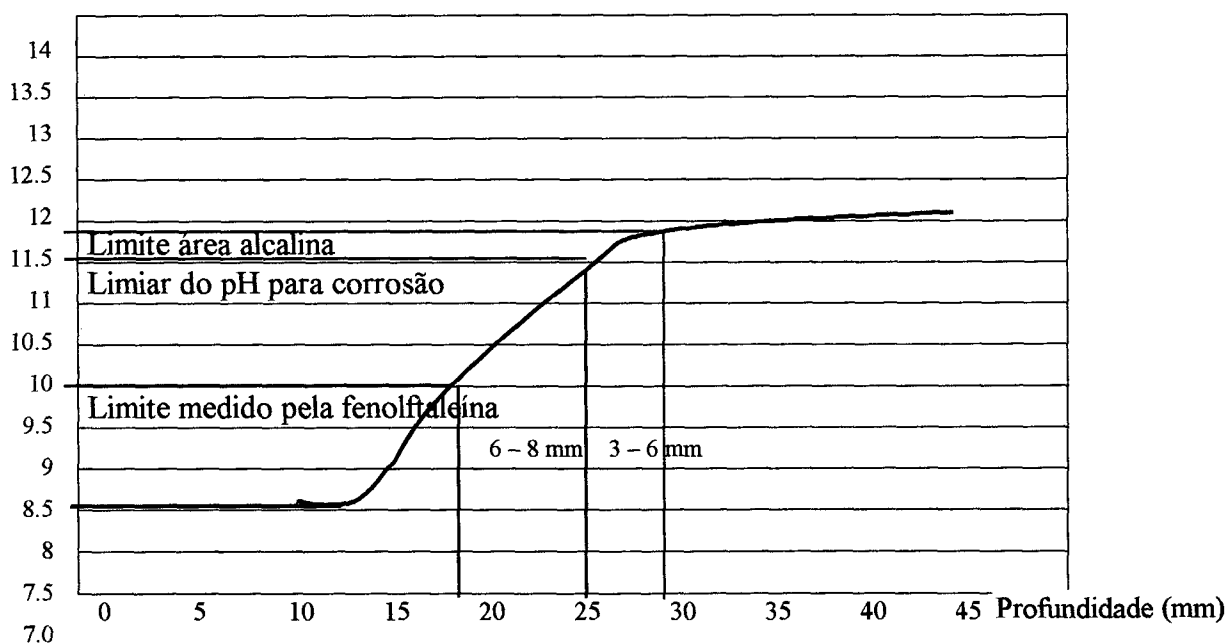


Figura 3.6 – Relação entre profundidade de carbonatada e o método de determinação

Ainda, conforme OLLIVIER (1998), a profundidade de carbonatação, depende, para uma determinada idade dos seguintes fatores:

- As características da porosidade do sistema.
- A conectividade dos poros.
- A capacidade dos hidratos reagirem com o dióxido de carbono.
- A saturação dos poros do sistema, pois o coeficiente de difusão do CO_2 é menor na água que no ar. No entanto a carbonatação é impossível sem a presença da água, por que o CO_2 deve ser dissolvido antes de reagir.

A porosidade depende do fator a/c, do tipo de cimento e da cura feita no concreto, que são os mesmos fatores que influenciam a resistência. Por isso, afirma-se as vezes que a carbonatação está diretamente relacionada com a resistência do concreto, conforme figura 2.10 apresentada por BALAYSSAC (1992).

Cabe acrescentar aqui que as condições de exposição também influenciam a carbonatação, onde pode-se citar: a concentração de CO_2 na atmosfera e a umidade relativa do ar.

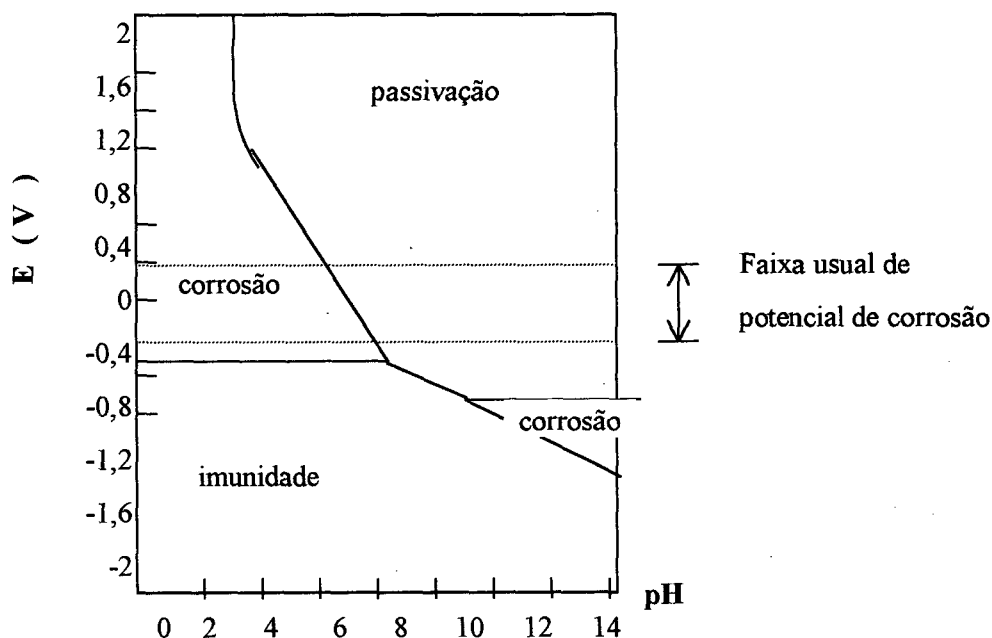
A concentração do gás carbônico na atmosfera exerce grande influência no valor da carbonatação, KAZMIRCZAK (1995), e essa concentração varia muito de acordo com o tipo de ambiente, isto é: se o ambiente é rural, urbano ou industrial.

A umidade do ar tem influência preponderante na carbonatação, pois em ambientes úmidos ela tende a ser menos intensa. HELENE (1986), citando Greger afirma que a carbonatação pode ser praticamente 10 vezes mais intensa em ambientes climatizados ($\text{UR} < 65\%$ e temperatura = 25°C) do que em ambientes mais úmidos.

3.2.3 - Avaliação da corrosão de armaduras em lajes de reservatórios

O meio em que se encontra o aço dentro do concreto é altamente alcalino e essa alcalinidade provém da solução de poros a qual é inicialmente saturada de hidróxido de cálcio. Como visto anteriormente esse pH alcalino pode ser alterado devido a necessidade constante do sistema entrar em equilíbrio. Podé-se estabelecer uma relação em função do pH, uma vez que o potencial do processo de corrosão depende desses equilíbrios, os quais são representados nos diagramas de Pourbaix.

O diagrama de Pourbaix estabelece as várias condições onde, o aço pode passivar, corroer ou permanecer imune.



Fonte: ANDRADE, C. – Manual para diagnósticos de obras deterioradas - Pini - 1992

Figura 3.7 – Diagrama de Pourbaix

A corrosão leva a desagregação da camada de concreto que envolve a armadura, pela expansão do óxido de ferro hidratado e causa também a fissuração agravando o processo de deterioração, uma vez que abre caminho para outros agentes agressivos. Ainda, a corrosão causa a perda da seção da armadura gerando como consequência uma diminuição da capacidade resistente da armadura.

Esses aspectos demonstram a importância de se efetuar análises e ensaios que levem ao conhecimento real do estado das armaduras das estruturas do concreto dentro de um plano abrangente de manutenção preventiva.

Quando ocorre a corrosão no concreto, tem-se um caso específico de corrosão eletroquímica onde o eletrólito tem como característica uma resistividade elétrica mais alta que as resistividades dos eletrólitos típicos utilizados em laboratório, ou seja, num meio aquoso comum. CASCUDO (1997).

Para ocorrer o processo da corrosão das armaduras, deve existir um circuito elétrico dentro do concreto composto por um eletrólito (a água está sempre presente no concreto), uma diferença de potencial é originada pela imersão do aço nesse eletrólito.

A medida do potencial de corrosão, também conhecida como potencial de eletrodo pode ser um mecanismo muito importante na detecção da corrosão de armaduras no interior do concreto, sem a necessidade de quebrar essa estrutura.

Sabe-se que quando um metal reage, tem a tendência de perder elétrons, sofrendo oxidação e conseqüente corrosão. A imersão de um metal numa solução aquosa gera uma diferença de potencial entre as fases sólida e líquida, gerando o que pode ser chamado de semi-pilha. Para completar essa semi-pilha pode ser adicionado um voltímetro que irá completar a pilha, determinando o valor dessa diferença de potencial.

No concreto armado, são vários os fatores que podem gerar o processo da corrosão, entre eles cita-se: solicitações mecânicas distintas no aço; diferenças de composição química no aço; diferenças de aeração (maior ou menor) no concreto. Assim, com a finalidade de se conhecer o estado atual de corrosão das armaduras de concreto, sujeitas a esses efeitos e sem a necessidade de se quebrar a estrutura, o ensaio de potencial de eletrodo é indicado por ser prático e fácil de ser realizado.

Outra consideração a ser feita é que apreciáveis diferenças de potenciais podem ser observadas em sistemas químicos aquosos, como função exclusivamente da atividade dos íons presentes no meio, ou de uma forma simplificada da concentração desses íons, conforme ATKINS (1990).

A equação de Nernst permite o cálculo da diferença de potencial através da seguinte fórmula:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^0 - (RT/nF) \ln (a_x/a_y) \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta\varepsilon$ = diferença de potencial observada

$\Delta\varepsilon^0$ = diferença de potencial padrão

R = constante universal dos gases: $R = 8,31451 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

T = temperatura absoluta (K)

N = número de elétrons trocados no processo

F = constante de Faraday: $F = 96485 \text{ C. mol}^{-1}$

a_x = atividade da espécie redutora (espécie que sofre oxidação)

a_y = atividade da espécie oxidante (espécie que sofre redução).

A equação de Nernst pode ser simplificada quando se substitui as atividades pelas concentrações, sobretudo no caso de soluções diluídas. Assim, a equação fica:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^0 - (RT/nF) \ln ([R]/[O]), \quad (3.2)$$

onde

[R] = concentração da espécie redutora

[O] = concentração da espécie oxidante

Como pode ser observado através desta equação, mesmo que $\Delta\varepsilon^0$ seja nulo (em virtude de eletrodos iguais, por exemplo) pode haver diferença de potencial em função de diferentes concentrações, gerando assim uma certa margem de erro nas leituras realizadas no concreto.

3.2.3.1 – Caracterização do aço

A armadura do concreto é um elemento de fundamental importância e, no presente caso, alvo do ataque dos cloretos. Sua caracterização é feita através da espessura do cobrimento do concreto, bitola e o tipo de aço.

Existem equipamentos tal como o pacômetro que permitem avaliar a armadura sem a necessidade de se quebrar o concreto permitindo realizar dessa forma um ensaio não destrutivo. Esses equipamentos permitem inclusive avaliar a distribuição das armaduras dentro do concreto.

Para a realização desse estudo efetivou-se a extração de testemunhos e a análise laboratorial da armadura, uma vez que junto com os testemunhos, a armadura também foi cortada.

Como critério de avaliação deve-se observar que as armaduras de bitola inferior a 4 mm são mais suscetíveis de corrosão e por isso mais facilmente seccionáveis.

A medida da perda da seção deve ser feita após a limpeza dessa barra que pode ser feita com escova de aço, medindo-se sua espessura com um paquímetro. Mede-se em várias seções e tira-se a média. A perda da seção também pode ser analisada em função do peso, mas a imprecisão é maior.

O boletim da CEB (1996) apresenta uma tabela onde se caracteriza os níveis de deterioração de acordo com os sintomas visuais, ou seja:

Quadro 3.9 – Classificação dos níveis de deterioração.

Sintomas Visuais	Níveis ou Graus de deterioração				
	Inicial - I	Médio - II	Intenso - III	Forte - IV	Muito forte V
Manchas de corrosão	Visíveis	Visíveis	Visíveis	Visíveis	Visíveis
Fissuras	Longitudinais Poucas	Longitudinais e estribos	generalizada	generalizada	Generalizada
Destacamento do concreto	-	Inicial	generalizado	Até em zonas onde não há armadura	Até em zonas onde não há armadura
Redução de seção	-	- 5%	- 10%	- 25%	Estribos seccionados
Flechas	-	-	-	Possíveis	Visíveis

Fonte: HELENE – Tese livre docência - USP - 1993

Assim com essa tabela é possível definir os níveis ou graus de deterioração das estruturas analisadas.

Outro detalhe importante a ser considerado é que a corrosão devido a presença de cloretos causa os pites e esses por sua vez podem ter uma profundidade nos olhos dos pites até três vezes maior que a profundidade média, conforme observa-se no Quadro 3.8 abaixo. HELENE (1993).

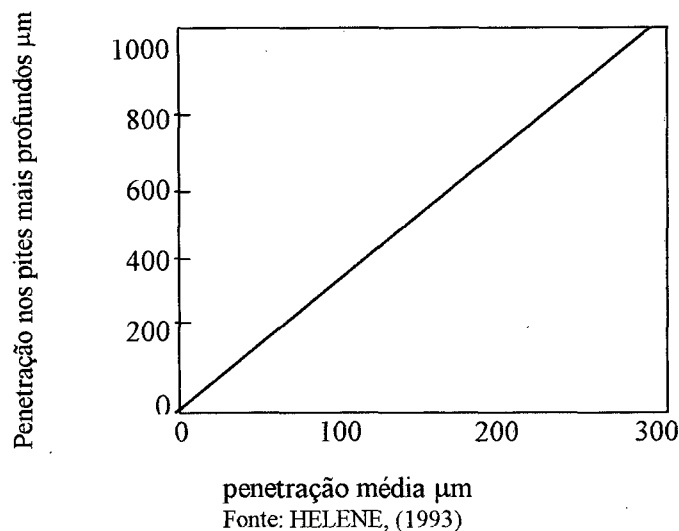


Figura 3.8 – Relação entre a penetração do cloro nos pites e sua penetração no aço

3.2.3.2 - Ensaio de potencial de eletrodo sobre a laje de concreto

A corrosão das armaduras no concreto pode ser detectada visualmente ou empregando-se a técnica de potenciais de corrosão. No caso de observação visual, constitui, segundo CASCUDO (1997), um quadro sintomatológico típico as seguintes situações:

- a) Fissuras de concreto paralelas às armaduras;
- b) Fragmentação e destacamento do cobrimento;
- c) Lascamento do concreto;
- d) Exposição de armaduras corroídas;
- e) Flambagem das armaduras longitudinais de pilares;
- f) Manchamento das superfícies do concreto.

Na realidade os métodos visuais são o primeiro passo para uma inspeção mais detalhada da estrutura, onde pode-se estabelecer qual a seqüência de ensaios a ser adotada.

O ensaio de potencial de eletrodo pode ser realizado utilizando-se para isto o eletrodo de sulfato de cobre saturado, cuja seqüência de execução é a seguinte:

1. Preparar os seguintes materiais:
 - um tubo de vidro com diâmetro de 1 cm na parte superior, 1 mm na parte inferior e altura de 10 cm;
 - Fio de cobre com diâmetro de 1mm;
 - lã de vidro;
 - sulfato de cobre em cristais;
 - água destilada;
 - tampão para a parte superior do tubo.
2. Preparar a solução de sulfato de cobre, colocando os cristais em água destilada, até a saturação. A lã de vidro é socada no fundo do tubo, pois sua finalidade é apenas de servir como ponte salina. Após a solução de sulfato de cobre é colocada dentro do tubo, juntamente com cristais de sulfato de cobre. O fio de cobre, limpo em ácido nítrico e enrolado em uma espiral de 2 cm de altura é introduzido no tubo. A parte superior é vedada com um tampão de borracha.

3. Calibrar o eletrodo assim obtido comparando a diferença de potencial com o eletrodo de hidrogênio que de acordo com a NBR 9106 deve fornecer o valor de + 0,300 V a uma temperatura de 25° C (eletrodo padrão de hidrogênio). No caso de se calibrar com o eletrodo de calomelano saturado a diferença deve ser de +0,060 V (eletrodo padrão de sulfato). Admitiu-se uma tolerância de 0,010 V para cima o para baixo do valor estipulado pela norma. Com o eletrodo assim calibrado e um multímetro com impedância superior a 10 M Ω e precisão de 1 mV, efetua-se as medições na laje das diferenças de potencial.

Dessa forma, retira-se parte do concreto da laje até encontrar a armadura e, neste ponto conecta-se a armadura assim exposta ao polo positivo do multímetro e o eletrodo é conectado ao polo negativo. O ponto onde é feito o contato do eletrodo com o concreto deve ser preparado. Sua preparação consiste em limpar e lixar a superfície do concreto e umedecê-la. Deve-se utilizar um papel filtro ou esponja para ser colocado entre o eletrodo e o concreto. Deve-se aguardar a estabilização do multímetro para se efetuar a leitura definitiva. A Figura 3.9 a seguir mostra os equipamentos utilizados neste ensaio.



Figura 3.9 – Equipamentos utilizados no ensaio de potencial de eletrodo.

Após o levantamento dos dados os potenciais são apresentados em um mapa de linhas equipotenciais, fornecendo assim uma imagem gráfica das áreas onde ocorre a corrosão. A norma ASTM recomenda que se interprete os potenciais de corrosão, conforme Quadro 3.10 abaixo:

Quadro 3.10 - Tabela de valores para comparação

Potencial de corrosão	Interpretação
Valores maiores que -0.20 volts.	Probabilidade maiores que 90% de não haver corrosão na região analisada.
Entre -0.20 volts e $-0,35$ volts.	Existe 50% de chance de haver corrosão de armaduras.
Mais negativo que $-0,35$ volts	Existe a probabilidade de 90% de haver corrosão na região analisada.

Fonte: Rodrigues, J. C. – revista Recuperar – julho/agosto 1995.

3.2.4 - Determinação do perfil de cloretos

A penetração dos cloretos no concreto se dá por difusão de acordo com a lei de Fick, para estimar os coeficientes de difusão. Na realidade outros processos intervêm na difusão dos cloretos como a mudança do estado físico do meio (ora líquido, ora gasoso) bem como as variações de umidade no interior do concreto. Ainda, deve-se considerar também que parte dos cloretos que penetram no concreto, reagem com os componentes do cimento, formando por exemplo o cloroaluminato de cálcio que por sua vez, pode reduzir a taxa de difusão do cloro. FARIAS (1991)

Quando os íons atingem a superfície do aço, dá-se o início ao processo de corrosão. Os efeitos desses íons sobre o aço podem ser explicados de acordo com as seguintes teorias, ou seja:

- A teoria do filme de óxido: os íons cloretos penetram no filme de óxido passivador do aço através dos defeitos neste filme. Ou podem dispersar coloidalmente o filme de óxido facilitando sua penetração e reação com o ferro.
- A teoria da adsorção: os íons cloretos são adsorvidos na superfície do metal em competição com o oxigênio dissolvido ou com os íons hidroxilas.
- A teoria do complexo transitório: os íons cloretos competem com os íons hidroxilas na reação com o ferro formando um complexo solúvel de cloreto de ferro. Esse complexo pode-se difundir a partir do ânodo destruindo a camada protetora.

- A despassivação pelo processo de carbonatação é bem menos complexo que pela presença de cloretos. O motivo desta complexidade é que os íons cloretos causam a formação de pites (ataques localizados). Nesses pites, as concentrações de íons cloretos e hidroxilas, definem o progresso da corrosão do aço.

O teor crítico de íons de cloretos varia conforme o tipo de cimento, de concreto, entre outros fatores. Em geral, conforme HELENE (1993), considera-se 0,4% em relação a massa de cimento ou 0,05% a 0,1% em relação ao peso do concreto. O Quadro 3.11 mostra os limites estabelecidos em norma para diversos países.

Quadro 3.11 – Limites do teor de cloretos

País	norma	Limite máximo de Cl ⁻ para		Limite referido a
		Concreto armado	Concreto protendido	
BRASIL	NBR 6118	0,05%	-	água de amassamento
	NBR 7197	-	0,05%	
	NBR 9062	-	0,05%	
ESPANHA	EH-88	0,40%	-	cimento
	EP-80	-	0,10%	
USA	ACI 222	<0,20%	<0,08%	cimento
	ACI 201	<0,20%	<0,08%	cimento
	ACI 318			cimento
EUROPA	CEB	<0,05%	<0,025%	concreto
	CEB-FIP	<0,40%	<0,20%	cimento
EUROPA	ENV – 206	<0,40%	<0,20%	cimento
INGLATERRA	CP-110	95%<0,35% 100%<0,50%	100%<0,06%	cimento
JAPÃO	JSCE-SP-2	<0,60 kg/m ³	<0,30 kg/m ³	concreto

Fonte: HELENE – Tese livre docência – USP - 1993

No entanto alguns autores consideram a relação entre íons hidroxilas (OH⁻) e íons cloretos (Cl⁻) devido ao fato de que a ação dos íons Cl⁻ é continuamente oposta a dos íons OH⁻ na manutenção da passivação do aço. FARIAS (1991). Hausmann, segundo HELENE (1993) foi o primeiro a estudar sobre esta relação, chegando ao seguinte valor:

$$\frac{C_{Cl^-}}{C_{OH^-}} \leq 0,61$$

Assim, se esta relação tem valor maior que 0,6 indica que está havendo corrosão. Este valor é determinado em laboratório com o aço imerso em solução com pH conhecido. No concreto as condições são menos favoráveis e esta relação pode ter valor inferior a 0,6 e mesmo assim causar a despassivação.

Cabe observar que este valor não pode ser considerado isoladamente pois o processo de corrosão depende do oxigênio disponível, teor de umidade, etc. Esse valor, corresponde a um teor que varia de 0,2 a 2,8 kg de cloretos por m³ de concreto.

A falta de consenso para determinar o valor crítico dos cloretos no concreto pode ser relacionada a algumas razões, entre elas tem-se:

- teor limite varia com o pH do eletrólito;
- Só os cloretos solúveis devem ser considerados relevantes no processo corrosivo;
- Só os cloretos livres devem ser considerados;
- A permeabilidade e a porosidade independem do teor de cloretos.

O resultado dessas dificuldades, também pode ser visualizado através do Quadro 3.12 apresentado por LIMA (1996) onde, o teor crítico de cloretos também tem grandes variações.

É importante a determinação dos cloretos totais pois no concreto existem dois tipos de cloretos: livres e combinados. Isto se deve ao fato de que os cloretos combinados tornarem-se livres pelo processo de carbonatação do concreto. Outro motivo é que o teor total é utilizado pelas diversas normas no meio científico, ficando mais fácil sua comparação.

Apesar de que somente os cloretos livres, que envolvem a armadura são perniciosos, é importante estabelecer um perfil de cloretos dentro da estrutura de concreto, pois isto permite que se determine, ainda que seja aproximadamente, a vida útil restante dessa estrutura.

MARUYA et alii (1993), demonstraram em seu trabalho que existe um equilíbrio entre o cloreto livre e o cloreto ligado e que esta razão pode ser quantificada. Neste trabalho os ensaios realizados permitem apenas a identificação desta relação.

Quadro 3.12 - Teor crítico de cloretos

FONTE	PERCENTUAL	MASSA
ROBERTS	2 A 3%	Massa de cimento
RILEM 12 – CRC COMMITTEE (1976)	0,05%	Massa de cimento
BROWNE (1978)	0,4% < [Cl] < 0,6%	Massa de cimento
BRE 264	< 0,4% baixo risco de 0,4% a 1,0% risco médio > 1% alto risco	Massa de cimento
BRE 264	< 0,02% risco insignificante < 0,05% baixo risco de 0,05 a 0,15% risco médio > 0,15% alto risco	Massa de concreto
BS – 8110 – 1985	0,2 – 0,4% variável de acordo com o cimento utilizado	Massa de cimento
4ACI = committee 222	0,15%	Massa de cimento
JSCE SP-2	> 0,6 kg	M ³ de concreto
ENV 206	> 0,4%	Massa de cimento
CEB-FIP	> 0,4%	Massa de cimento
EH 91	> 0,4%	Massa de cimento
ACI 222	> 0,20%	Massa de cimento
ACI 201	> 0,20%	Massa de cimento
DIAZ 1992	0,73 A 0,91 Kg	M ³ de concreto
ACI committee 318	> 0,5% ambiente normal > 0,15% ambiente c/ cloretos > 1% ambiente seco	Massa de cimento
CEB	> 0,05%	Massa de concreto
EMMONS	0,10% ambiente úmido exposto a cloretos 0,15% ambiente úmido não exposto a cloretos	Massa de cimento

Fonte: LIMA, M. G. – Inibidores de corrosão – Tese – USP - 1996

3.2.5 - Extração de testemunhos

Para se estabelecer o perfil dos cloretos existente no interior da laje de concreto dos reservatórios, extraiu-se inicialmente as amostras desse concreto. No presente caso utilizou-se como equipamento a serra-copo obtendo testemunhos de concreto na medida em que esse equipamento perfura a laje. São três os fatores que justificam a utilização desse equipamento, ou seja:

- A impossibilidade de extração de amostras da parte inferior da laje. Isto ocorre por que não foi possível esvaziar os reservatórios;

- A necessidade de se caracterizar o concreto através de sua resistência atual;
- Manter intacta as principais características do concreto, permitindo também a reconstituição do traço desse concreto;

A relação dos equipamentos utilizados para a extração dos testemunhos é:

- Extrator (220V);
- Parafusos de Pressão;
- Máquina de furar;
- Martelo;
- Serra Cilíndrica;
- Compressor para fixar equipamento na laje;

A instalação desse equipamento sobre a laje deve ser de tal maneira que sua estrutura fique firmemente ligada a laje do concreto para resistir aos esforços criados durante a extração dos testemunhos, onde a forma de fixação pode ser com parafuso e bucha (utilizado no caso de laje inclinada por exemplo) ou por sucção a vácuo, caso a laje seja plana. A serra, para seu funcionamento, deve ser refrigerada a água. A Figura 3.10 abaixo mostra o equipamento utilizado para a extração dos testemunhos.



Figura 3.10 – Equipamento utilizado para extração de testemunhos de concreto.

O avanço da serra é lento e depende muito do tipo de concreto e do estado do equipamento. A média de tempo necessária para a extração foi de 30 minutos. Houve situações em que se levou mais de uma hora por testemunho. (Neste caso 3 fatores colaboraram para a lentidão: o equipamento, a espessura da laje e a quantidade de armadura encontrada).

Como os reservatórios estavam cheios d'água durante a extração, os testemunhos de concreto foram extraídos próximos a tampa de acesso de reservatório, permitindo assim que esses testemunhos fossem coletados com o auxílio de um "puçá" ou seja, uma rede de pequeno porte utilizada para apanhar peixes. A dificuldade principal foi a de evitar que os cilindros caíssem dentro d'água, pois poderiam ser sugados pela tubulação de saída vindo a obstruir a tubulação num ponto de difícil identificação, podendo ocasionar sérios transtornos a população servida pelo reservatório e em consequência a Companhia de saneamento.

Os buracos abertos na laje foram tapados de acordo com os seguintes procedimentos:

- Tampa-se o fundo do buraco com uma chapa cilíndrica de madeira. A fixação dessa chapa é feita por meio de um arame que passa por um furo no meio do cilindro de madeira. O arame é amarrado na parte superior através de uma peça de madeira que fica transversal ao buraco.
- A primeira camada colocada sobre a forma de madeira é de um impermeabilizante próprio para reservatórios.
- As demais camadas foram preenchidas com grout, com elevada resistência.

O desenho abaixo esclarece os procedimentos para tampar os furos.

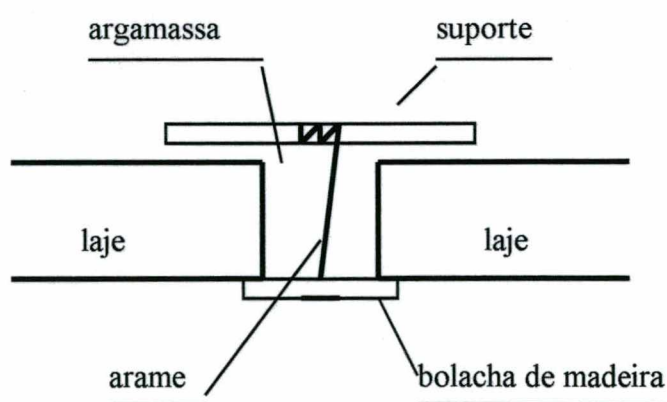


Figura 3.11 – Esquema para vedação dos furos na laje de concreto

As amostras assim obtidas foram catalogados e encaminhados ao laboratório, em sacos plásticos vedados, para a extração do pó de concreto e conseqüente determinação dos cloretos.

A extração do pó foi feita com furadeira de impacto e utilizando brocas de 10 mm de diâmetro. O pó de concreto foi armazenado em tubos, pesados, e hermeticamente fechados. A extração do pó obedeceu aos seguintes critérios: a) extração de 0 a 5 mm de profundidade; b) extração de 5 a 10 mm de profundidade; c) extração de 10 a 15 mm de profundidade; d) extração de 15 a 20 mm de profundidade; procurando assim caracterizar um perfil de cloretos para cada testemunho de concreto. Obtido esse pó de concreto, passou-se aos procedimentos químicos para a extração de cloretos.

3.2.6 - Determinação da resistência do concreto

O concreto por ser um material heterogêneo, formado por agregados graúdos e miúdos numa matriz de cimento, tem um comportamento desfavorável sob o ponto de vista da engenharia civil. A zona de interface entre o agregado e a pasta é uma região fraca onde se iniciam as microfissuras. Essas fissuras podem ser conseqüência do carregamento ou de outros fatores como a diferença térmica ou a variação da umidade através de ciclos de molhagem e secagem.

As fissuras acabam aumentando a permeabilidade do concreto e acarretando como conseqüência uma diminuição da vida útil da estrutura.

SUGIYAMA et alii (1993) desenvolveram um método elétrico com a finalidade de estudar a influência da carga uniaxial aplicada no concreto, sobre a permeabilidade deste concreto aos cloretos, chegando às seguintes conclusões:

- 1 - O método foi eficiente na medição da permeabilidade aos cloretos
- 2 - O efeito da carga não foi significativo até 60% da carga final mas a permeabilidade aumentou significativamente quando a carga passou de 60 para 65% da carga final.

Assim, pode-se inferir que a resistência a compressão do concreto tem importância fundamental na penetração dos cloretos. Conforme citado por FARIAS (1991) sabe-se também que um aumento do consumo de cimento no concreto implica não só no aumento da resistência mas numa diminuição da porosidade e conseqüente

redução da permeabilidade. Isto considerando um concreto com a mesmas condições de execução ou seja: mesmo fator a/c e idêntico procedimento de cura.

A determinação da resistência a compressão dos testemunhos obtidos dos reservatórios de água potável, pode dessa forma fornecer importante subsídios sobre a situação do concreto e juntamente com outros dados permitir que se faça uma projeção da vida útil dessas estruturas.

Atualmente com uma variação maior dos tipos de cimento devido às adições tem-se uma influencia na porosidade e resistência do concreto como observa CAMARINI et alii (1996) em seu trabalho onde concluíram que a escolha do tipo de cimento influi significativamente na resistência a compressão, na absorção por capilaridade e na difusão de cloretos.

HELENE (1993) propõe que além da comparação com os valores de projeto estrutural, os resultados, sob o ponto de vista da durabilidade, tenham a seguinte classificação:

- Concretos duráveis – $f_{ck} > 35 \text{ MPa}$
- Concretos normais – $20 \text{ mpa} < f_{ck} < 35 \text{ MPa}$
- Concretos deficientes: $f_{ck} < 20 \text{ MPa}$.

A resistência é medida através de ensaios a compressão com os cilindros extraídos dos reservatórios. Os cilindros após a obtenção do pó, são cortados em serra especial para concreto, de tal forma que a parte furada é descartada, bem como a proteção mecânica da parte superior do cilindro, conforme Figura 3.10 abaixo:

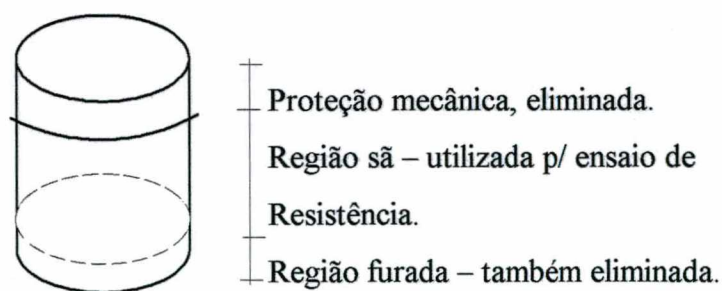


Figura 3.12 - Esquema de corte dos testemunhos de concreto

O cilindro de concreto que sobra, é então capeado com uma mistura de enxofre e cimento, conforme norma NBR 7680 da ABNT. Após o capeamento o cilindro é levado a prensa, e então rompido a compressão.

No ensaio de compressão simples o corpo de prova está submetido a um estado de tensão muito mais complexo do que o estado uniaxial adotado. Surgem esforços de tração entre a placa e o concreto (KLEIN et alii, 1990). O ideal é manter a relação $L/\phi=2$, (onde L é o comprimento e ϕ é o diâmetro) como no presente caso isto não é possível adota-se a tabela da norma NBR 7680 para efetuar a correção dos valores encontrados, conforme apresentado no Quadro 3.13 a seguir:

Quadro 3.13 – Fator de correção para cálculo da resistência a compressão do concreto

Relação L/ ϕ	Fator de correção
2.00	1.00
1.75	0.97
1.50	0.93
1.25	0.89
1.00	0.83
0.75	0.70
0.50	0.50

A prensa utilizada foi de marca AMSLER de 5000 KN, onde a velocidade de carga foi controlada manualmente.

3.2.7 - Reconstituição do traço

Os procedimentos adotados para esse ensaio são semelhantes ao ensaio para determinação de resíduo insolúvel. O primeiro passo consiste em separar amostra de concreto que deve ser saturada de água para preencher todos seus vazios. Assim, deixa-se essa amostra submersa por 24 horas. Pesa-se a amostra, tomando-se o cuidado de retirar a umidade superficial, enxugando-a. Após ao concreto é seco em estufa até constância de peso e depois vai para a mufla onde permanece durante 4 horas a temperatura de 600 °C.

Retirada a amostra da mufla e estando a mesma na temperatura ambiente, faz-se o destorroamento, procurando separar a brita do restante do material. Após o

destorroamento, o que restou do concreto é colocado num vasilhame com ácido clorídrico concentrado, o qual permanece por mais 24 horas.

Lava-se o material com muita água, para eliminar todo o ácido e passa pela peneira 200, (malha 0.078 mm). Feito essa lavagem, leva-se todo o material para a estufa até a constância de peso.

Seco, o material passa pela peneira de malha 4,8 mm procurando separar o agregado graúdo do miúdo. Para certificar-se de que todo o cimento reagiu, pinga-se uma gota de ácido clorídrico no material e observa-se o resultado. Se não houver reação nenhuma, dá-se prosseguimento ao ensaio. Caso haja qualquer sinal de reação coloca-se novamente o material num frasco com o ácido e deixa-se novamente em repouso por 24 horas.

Pesam-se os agregados graúdo e miúdo pela diferença do peso total obtém-se a quantidade de cimento utilizada. Com todos os pesos calculados é possível determinar a proporção de cada um e como consequência, o traço e o consumo de cimento.

Obtido o consumo de cimento e tendo a quantidade de cloro no concreto é possível transformar essa quantidade em função do peso do cimento e efetuando a comparação do teor encontrado com o valor crítico de cloretos estabelecido pelos diversos organismos internacionais.

3.2.8 - Caracterização dos agregados

A forma e o tipo de agregados tem grande importância no concreto. Grãos de formato semelhante a agulha ou lamelar dão um concreto com menor trabalhabilidade além de influírem na permeabilidade do concreto. A melhor forma do agregado graúdo é aquela que se aproxima do cubo com as três dimensões da mesma ordem de grandeza.

Os agregados podem ser caracterizados pelo seu tipo, densidade e tamanho. A massa específica do agregado graúdo é determinada através da balança hidrostática, onde o princípio deste ensaio baseia-se no princípio de Arquimedes “todo corpo imerso num fluido está sujeito a uma força de baixo para cima, igual ao peso do líquido por ele deslocado”. A fórmula utilizada para este cálculo é a seguinte:

$$D = m/(m-m_i), \quad (3.3)$$

onde:

D= massa específica (g/cm^3);

m = massa medida nas condições normais (g/cm^3);

m_i = massa imersa (g);

Para o agregado miúdo a massa específica aparente pode ser determinada pelo processo do picnômetro, cujo valor é dado pela seguinte fórmula:

$$d = m / [P_{ag} - (P_{ag} + a - m)], \quad (3.4)$$

onde:

d = massa específica (g/cm^3);

m = massa do agregado miúdo seco (g);

P_{ag} = peso do picnômetro com água (g);

$P_{ag} + a$ = peso do picnômetro com amostra mais água (g).

4 – DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado um relatório minucioso com todos os dados obtidos na análise dos reservatórios. Parte-se inicialmente da descrição dos reservatórios, resultados de uma visita técnica preliminar, seguindo-se de uma descrição do ambiente externo, e interno onde neste caso o que é apresentado são as características físico-químicas da água.

Após a descrição das estruturas como um todo e do ambiente em que estão inseridas, parte-se para a análise do concreto relacionando-se os resultados da extração dos testemunhos através dos ensaios laboratoriais, ou seja, relaciona-se: a resistência, a carbonatação, a densidade, o perfil de cloretos e as características dos agregados e do aço que compõe este concreto.

A determinação dos cloretos em função da quantidade do cimento, foi realizada com a finalidade de comparar-se com resultados de outros trabalhos.

Foram analisadas 23 estruturas de reservação de água potável, nas regiões de Curitiba e Florianópolis, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo três.

Dessas 23 estruturas vistoriadas, 6 foram selecionadas para a extração dos testemunhos de concreto e posterior análise de sua composição.

4.1 - Características dos reservatórios visitados

Os reservatórios visitados tem características peculiares de acordo com a região em que estão inseridos. Curitiba e Florianópolis são cidades com características distintas entre si. A população da Grande Curitiba é de 2.000.000 hab. estimada para a ano de 1998 enquanto que a grande Florianópolis possui em torno de 500.000 hab.

Curitiba situa-se a 908 m acima do nível do mar com importante polo industrial, onde o clima da região é temperado com temperaturas variando entre 0 °C e 35 °C. Florianópolis, por sua vez, situa-se ao nível do mar. A cidade tem características

administrativas e voltada para o turismo. O clima da região é temperado com temperaturas variando entre 5°C e 36 °C.

As diferenças nos reservatórios devido as características da cidade podem ser observadas através do Quadro 4.1 abaixo.

Quadro 4.1 - Características dos reservatórios visitados

Reservatório	Cidade	Capacidade m ³	Forma	Proteção laje	Início de operação
R1 (Centro)	Florianópolis	2000	cubica	N	1946
R2 (Continente)	Florianópolis	2000	cúbica	N	1950
R4 (Continente)	Florianópolis	4500	Cilíndrica	N	1977
R5 (Agronômica)	Florianópolis	725	Cilíndrica	N	1978
R6 (Trindade)	Florianópolis	1940	Cilíndrica	N	1979
R7 (Trindade)	Florianópolis	2500	Cilíndrica	N	1989
R9 (Trindade)	Florianópolis	5000	Cúbica	N	1989
S. José (2 células)	Florianópolis	2500	Cilíndrica	N	1990
Palhoça (elev.)	Florianópolis	200	Elevado	N	1980
Palhoça	Florianópolis	2500	Cilíndrica	N	1990
Canelinha	Canelinha	500	Cilíndrica	N	1980
São João Batista	S. J. Batista	2500	Cilíndrica	N	1986
Alto da XV	Curitiba	50000	Cúbica	S	1950
Tarumã	Curitiba	4500	Cúbica	S	1995
Corte Branco	Curitiba	28000	Cúbica	S	1977
S. Cândida	Curitiba	750	Cúbica	S	1980
Bacacheri	Curitiba	9000	Cúbica	N	1979
São Braz	Curitiba	12000	Cúbica	S	1988
Mercês	Curitiba	5000	Cúbica	N	1978
C. Comprido	Curitiba	9000	Cúbica	N	1985
Portão	Curitiba	20000	Cúbica	N	1977
S. Efigênia *	Curitiba	300	Cilíndrica	N	1975
S. Felicidade	Curitiba	1000	Cúbica	N	1981

Legenda
S = Sim;
N = Não.

Da tabela é possível inferir, a princípio, que o tamanho dos reservatórios está relacionado com o porte da cidade embora, isoladamente, esse fato não seja significativo. Outro detalhe que pode ser observado é que os reservatórios com maior capacidade tem a forma cúbica, pois esta forma é vantajosa economicamente, o gasto com formas e mão de obra, é menor.

Os reservatórios com maior capacidade tem um maior volume de cloro na água e como consequência um maior volume de cloretos no ar interno desse reservatórios o que torna o ambiente interno mais agressivo. Por exemplo; para um adição de 1,5 ppm de cloro na água, tem-se 1,5 kg de cloro num reservatório de capacidade de 1000 m³ e 30 kg de cloro para um reservatório com capacidade de 20000 m³, conforme recomendações ditadas pela CASAN e SANEPAR. Ou seja: uma maior carga de cloro na água, significa maior quantidade de ions cloretos no ambiente interno e como consequência maior quantidade de cloro no concreto.

Outra característica a ser considerada é a forma de proteção da laje de cobertura de concreto. Com exceção dos reservatórios R1 e R2, cuja cobertura é de concreto pré-moldado em forma de casca, os demais reservatórios de Florianópolis têm a seguinte conformação:

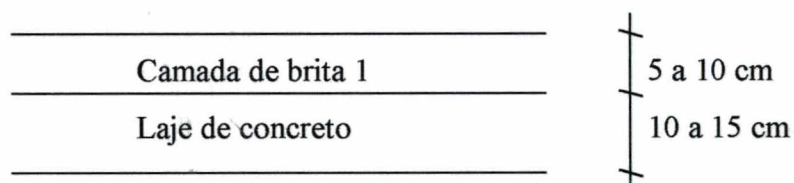


Figura 4.1 – Esquema das camadas nas lajes de concreto dos reservatórios

A brita tem a finalidade de proteção mecânica e térmica, técnica comum utilizada em impermeabilização de lajes. No entanto, não foi encontrada camada de impermeabilizante sobre a laje de cobertura. Cabe observar ainda, que o reservatório R5 (Agrônômica) e R6 (Trindade) tem a cobertura em forma de abóbada e por isso não tem proteção da camada de brita, mas sim uma camada de 1 cm de cimento e areia.

Para os reservatórios da região de Curitiba, a técnica utilizada é a de se executar uma camada de cimento e areia ou então, como ocorre em alguns reservatórios a utilização de blocos cerâmicos, conforme Figura 4.2. No reservatório Mercês foi encontrado concreto leve onde seria o bloco cerâmico e nos reservatórios de Santa Cândida e Santa Efigênia apenas cimento e areia como proteção mecânica.

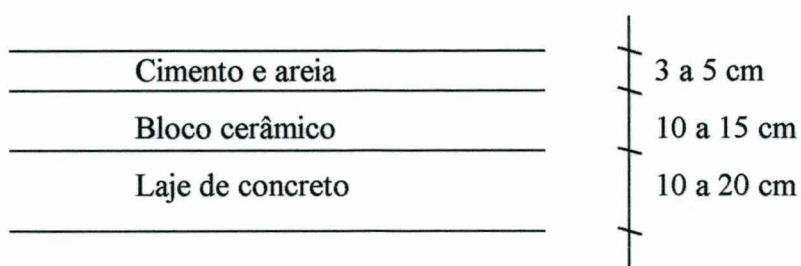


Figura 4.2 - Esquema das camadas das lajes de concreto dos reservatórios - variação

Por questões econômicas foram selecionados três reservatórios de cada cidade para efetuar a extração dos testemunhos. A escolha destes reservatórios foram feitas pelas companhias de saneamento em função da facilidade de acesso. As características dos projetos estruturais dos reservatórios escolhidos estão tabeladas abaixo.

Quadro 4.2 - Dados dos reservatórios obtidos através do projeto estrutural

Reservatório	fck	Data Projeto	Volume Reservatório	Cobri-mento	Aço
	kg/cm ²		m ³	cm	
Bacacheri	150	Abr-74	9000	2	CA 50/60
Santa Cândida	150	Jul-77	750	2	CA 50/60
Santa Efigênia	150	Mar-72	300	2	CA 50/60
Agronômica	150	Fev-78	725	2	CA 50/60
Canelinha	135	Fev-80	200	2	CA 50/60
São João Batista	150	Fev-86	500	2	CA 50/60

Com exceção de Canelinha onde a resistência especificada no projeto estrutural foi de 13,5 MPa, todos os demais reservatórios tem resistência especificada no projeto de 15 MPa (ou 150 kg/cm²) o que ainda é utilizado como consenso entre os projetistas.

Canelinha, de acordo com dados obtidos em entrevistas e visita ao local é um reservatório de pequeno porte mas de grande importância, uma vez que é o único de sua

localidade. Para este reservatório, a produção do concreto foi no local, diferenciando dos demais reservatórios onde o concreto foi usinado.

Essa resistência é típica e utilizada em muitos projetos estruturais, não só de reservatórios mas de edificações também em virtude da economia e facilidade de controle. Atualmente com a difusão de aditivos e o aprofundamento do estudo da microestrutura do concreto, aos poucos vai se adotando resistências maiores como 18 MPa e até 21 MPa, melhorando o desempenho da estrutura como um todo.

Normalmente, a porosidade do concreto é inversamente proporcional a resistência do concreto, pois da mesma forma que ela diminui com o aumento do fator água /cimento, a permeabilidade aumenta com conseqüente aumento da porosidade e isto tem como conseqüência a diminuição da durabilidade do concreto, principalmente em situações agressivas como a dos reservatórios de água potável.

A data citada na tabela é a data da entrega do projeto às concessionárias sendo sua execução variando de 1 a 5 anos após a conclusão desse projeto. A execução da obra é fato de difícil apuração uma vez que em geral as concessionárias guardam os projetos e seus detalhamentos, não se preocupando com os registros que se referem a execução da obra em si, inexistindo também qualquer tipo de “diário de obra” ou seja registro de como foi executada a obra.

Com a finalidade de caracterizar-se a patologia da corrosão de armaduras no concreto, procurou-se, neste trabalho, obter dados de reservatórios cuja execução fosse da década de 70, uma vez que foi nesta época que se iniciou a cloração automática e constante. Assim, ao determinar a quantidade de cloro dentro do concreto da laje de cobertura desses reservatórios e tendo-se o período de operação desses reservatórios e possível inferir sobre os diversos aspectos da durabilidade dessas estruturas com ou sem manutenção.

Dentre os reservatórios visitados, o de Santa Efigênia juntamente com o reservatório de São João Batista, os que apresentaram problemas na armadura, sobretudo, no caso de Santa Efigênia, pelo fato de boa parte das armaduras inferiores da laje de cobertura estarem expostas ou com cobrimento insuficiente.

Excetuando os dois reservatórios acima citados, os demais apresentaram sinais visíveis de corrosão apenas nos componentes, ou seja: na tampa do acesso ao reservatórios e na escada de acesso ao interior do reservatório (do tipo marinho).

A diferença observada entre os volumes relacionados no Quadro 4.5 acima com o citado no quadro 4.3 deve-se ao fato de que os dados do Quadro 4.5 são referentes ao projeto estrutural de um câmara e que o volume total de cada reservatório compõe-se de várias câmaras. A exceção cabe a Canelinha e Santa Efigênia que possuem somente uma unidade de reservação.

O cobrimento adotado foi sempre de dois centímetros o que está dentro da norma em se tratando de edificações, o que deveria ser diferente para o caso das estruturas de reservação. Observa-se mais uma vez que até então, não era dada nenhuma atenção ao aspecto da durabilidade ou seja da agressividade do meio ambiente.

Conforme mostrado por HELENE (1993), a melhor alternativa em termos de custo e durabilidade para a proteção da armadura é o aumento do cobrimento, ainda que se considera todo o tipo de sistemas impermeabilizantes, pinturas, etc.

O aço utilizado foi o aço fornecido no mercado, não havendo nenhuma especificação que diferencie das demais estruturas. A distribuição das armaduras segue o padrão estabelecido pelas normas brasileiras.

Assim constata-se que pouca atenção é dada à execução dos reservatórios. Embora as normas sejam obedecidas, não existe ainda uma preocupação maior com o registro da obra quando de sua execução ou atenção com referência à que se destina a obra.

Uma mudança de postura pode diminuir os custos de manutenção aumentando sua durabilidade. A execução de um manual de manutenção do concreto acompanhado do diário da obra, poderia ser uma alternativa para melhorar o desempenho dessas estruturas.

4.2 - Vistoria dos reservatórios

Os resultados obtidos, após a vistoria de reservatórios, que por sua vez é o primeiro item apresentado no fluxograma da página 16, ou seja: com a utilização dos sentidos humanos, é a caracterização das patologias visíveis dessas estruturas, conforme Quadro 4.3 abaixo:

Quadro 4.3 - Ocorrência de patologias nos reservatórios visitados.

Reservatório	Cidade	Fissuras	Eflorescências	Vazamento	Corrosão Armadura	Corrosão em componentes
R1 (Centro)	Florianópolis	N	N	N	S	S
R2 (Continente)	Florianópolis	S	S	N	N	S
R4 (Continente)	Florianópolis	N	N	N	N	N
R5 (Agrônômica)	Florianópolis	N	N	N	N	N
R6 (Trindade)	Florianópolis	S	N	N	N	N
R7 (Trindade)	Florianópolis	S	S	N	N	S
R9 (Trindade)	Florianópolis	S	S	N	N	S
S. José	Florianópolis	N	N	N	N	N
Palhoça (elev.)	Florianópolis	S	S	S	S	S
Palhoça	Florianópolis	N	N	N	N	N
Canelinha	Canelinha	S	S	N	N	N
São João Batista	S. J. Batista	N	N	N	S	S
Alto da XV	Curitiba	S	S	N	N	S
Tarumã	Curitiba	N	N	N	N	N
Corte Branco	Curitiba	S	S	S	S	S
S. Cândida	Curitiba	N	N	N	N	S
Bacacheri	Curitiba	S	S	S	S	S
São Braz	Curitiba	N	S	N	N	N
Mercês	Curitiba	S	S	N	N	S
C. Comprido	Curitiba	S	S	N	N	N
Portão	Curitiba	N	S	N	N	S
S. Efigênia	Curitiba	S	S	N	S	S
S. Felicidade	Curitiba	N	N	N	N	N
Percentual de Patologias		52%	57%	13%	26%	57%

Legenda
S = Sim;
N = Não.

Observa-se que, embora ocorra um percentual relativamente pequeno (13%) de vazamentos, as outras patologias representam valores bastante expressivos.

Na Figura 4.3, a seguir, é apresentada a incidência, em percentuais, da ocorrência de patologias nos reservatórios vistoriados.

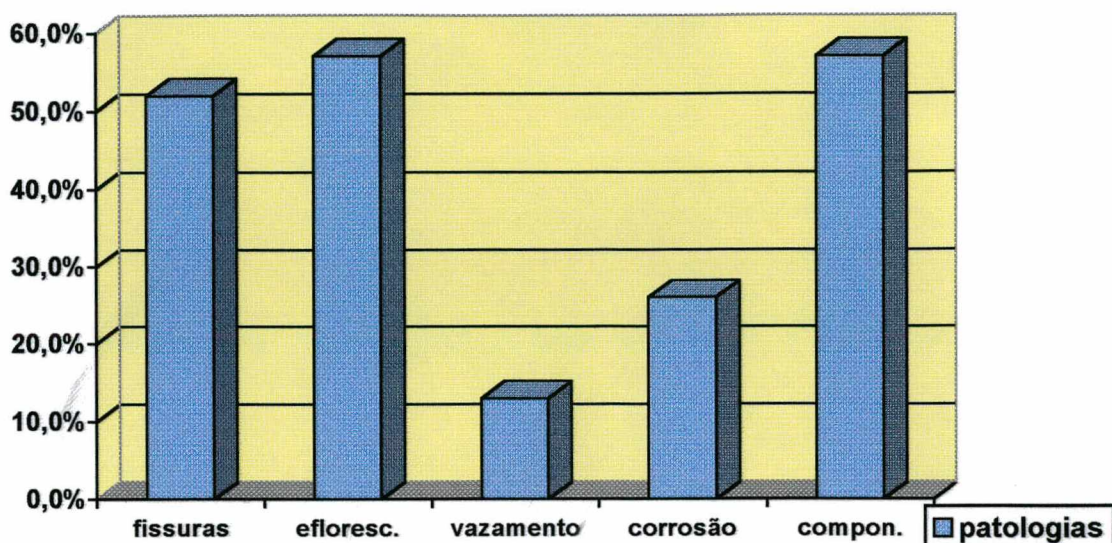


Figura 4.3 - Percentual de ocorrência de patologias

Os dados resultantes dessa vistoria apresentam manifestações patológicas que necessitam de análises mais precisas que indiquem a gravidade da situação. Se a inspeção fosse aqui concluída, a manutenção seria realizada apenas naqueles reservatórios com vazamentos. Assim os ensaios propostos na metodologia, procuram identificar outras necessidades para manutenção preventiva.

4.3 – O ambiente

A análise do meio ambiente, conforme Quadro 3.1, mostra que o concreto dos reservatórios de água potável, situa-se num risco elevado, pois o ambiente além de possuir umidade elevada no interior dos reservatórios (acima de 90%) é contaminado com cloretos. A dosagem média dos cloretos na água varia, para os reservatórios analisados, de 1.0 ppm a 2.0 ppm.

Ao observar-se o Quadro 2.3 apresentado na metodologia na página 36, observa-se que para um ambiente com umidade alta e contaminado com cloretos, a classe de agressividade do ambiente é II, ou seja média.

Por sua vez, de acordo com o Quadro 3.1, o risco de deterioração é alto, o que mais uma vez comprova a agressividade deste ambiente.

Por outro lado com a industrialização, houve um aumento da agressividade com conseqüente degradação do concreto. A emissão de poluentes tais como o CO₂ que é o mais comum, pelos veículos têm colaborado significativamente para esta agressividade.

Considerando ainda que os métodos executivos são mais rápidos, a mão-de-obra é desqualificada, os projetos que só especificam a resistência aos 28 dias e há falta de controle na execução, conclui-se que a durabilidade tende a diminuir.

A cidade de Curitiba se enquadra na situação do aumento da agressividade com conseqüência do aumento da industrialização e do número de veículos em trânsito. O clima da cidade tem umidade elevada durante a maior parte do ano (entre 60 e 85%) e, levando-se em conta que as estruturas de reservação são feitas em concreto aparente, pode-se afirmar que o grau de carbonatação é elevado.

A cidade de Florianópolis, situa-se no litoral e apesar de possuir uma população menor que Curitiba e um grau de industrialização também menor, tem um clima marinho que atua como fator agravante na durabilidade desses reservatórios.

No entanto, cabe observar que os reservatórios da Grande Florianópolis, diferente dos da cidade de Curitiba, não são em concreto aparente, ou seja, são pintados o que a princípio, pode aumentar a proteção, embora essa pintura seja a base de látex o que não garante a impermeabilidade.

O reservatório da Agrônômica é o único que sofre os efeitos da maresia, pois está próximo ao mar. Os reservatórios de Canelinha e São João Batista não tem o problema da maresia ou da industrialização, pois estão afastados em média 30 km de mar, em região sem indústrias e com pintura externa.

4.4 – Caracterização da água armazenada pelos reservatórios

O fato de não ser identificado o meio a que ficarão expostas as estruturas de concreto, ou da agressividade desse meio, levam a um comprometimento da durabilidade dessas estruturas.

O grau de agressividade da água dos reservatórios pode ser conhecido através da confrontação dos parâmetros obtidos em uma análise química com os critérios adotados

nas normas brasileiras ou nas normas internacionais, quando inexisterem normas equivalentes no Brasil.

Existem situações em que para se considerar corretamente o nível de agressividade da água ao concreto, deve-se considerar as implicações de natureza física, como a velocidade da água, pressão, espessura do material, etc. Para o caso dos reservatórios em estudo, como não há movimentação intensa, apenas uma variação de nível, e as pressões não ultrapassam a cinco metros de coluna de água, inexistente esse tipo de agravamento na agressividade da água.

A análise dos dados como o pH, presença de ferro, manganês, alumínio na água, cloro residual e alcalinidade total são dados importantes que auxiliam na determinação da agressividade da água.

A presença de ferro, manganês e alumínio na água dos reservatórios se deve a origem dessa água e ao tratamento que é dado. A agressividade dessas substâncias será caracterizada através da dureza dessa água, ou seja: A dureza da água expressa a concentração de íons polivalentes na água, como cálcio, magnésio, ferro, alumínio, estrôncio, manganês e zinco CINCOTTO, (1997).

A determinação da dureza é feita com sal de EDTA (sal dissódico do ácido etilenodiaminotetracético ou Tritriplex II) sendo necessário a adição de inibidores quando há a presença de alumínio e ferro como é o caso das águas dos reservatórios.

A alcalinidade da água é sua capacidade quantitativa de neutralizar um ácido forte. Sua determinação é feita por titulação em laboratórios apropriados.

Um método para avaliar a agressividade da água de forma mais completa, foi desenvolvido por Langelier em 1936 e aperfeiçoado por Morton, FURNAS Concreto, ensaios e propriedades, (1997). O método calcula o índice de saturação, ou de Langelier LI, que é dado por:

$$LI = \text{pH} + \log C + \log A + 0,025 T - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \quad (4.1)$$

Onde:

LI = índice de Langelier;

pH = pH real da água medida em potenciômetro;

C = Dureza devido ao cálcio;

A = Alcalinidade total da água (em termos de CaCO_3);

T = temperatura em $^{\circ}\text{C}$, onde T situa-se entre 0 e 25°C ;

S = sólidos totais dissolvidos em ppm, onde $S < 1000 \text{ mg/L}$.

Valores negativos de LI indicam que a água apresenta caráter agressivo, valores positivos indicam a tendência da água precipitar carbonato de cálcio e valores iguais a zero indicam tendência mínima de corrosão e incrustação.

Os dados obtidos junto as Companhias de Saneamento da análise físico-química da água dos reservatórios analisados, encontram-se no Quadro 4.4 abaixo onde estão relacionados os valores médios para cada reservatório, referentes aos últimos 12 meses de coleta de dados.

Quadro 4.4 - Média dos resultados de análises físico-químicas dos reservatórios.

Reservatório	pH	Cloro residual (ppm)	Alcalinidade total
Santa Efigênia	6.5	1.20	15.4
Santa Cândida	6.7	1.22	43.41
Bacacheri	6.5	1.62	18.3
Agronômica	7.01	1.54	9.4
Canelinha	6.52	1.66	7.4
São João Batista	7.88	2.02	28.2

Duas considerações importantes devem ser aqui colocadas:

- 1°) A amostragem da água para determinação da quantidade do cloro no reservatório da Agronômica é feita em pontos próximos e após sua saída (em torneiras do consumidor).
- 2°) A amostragem do cloro de Canelinha e São João Batista é feita na saída do reservatório, o mesmo ocorrendo para os reservatórios de Curitiba.

Dessa forma, conclui-se que a dosagem média do reservatório da Agronômica deve ser um pouco maior daquela que consta no Quadro 4.4 que por sua vez deve refletir no cloro que imigrou para o concreto. 3°) Não existe diferença significativa entre a dosagem de cloro para os reservatórios de Curitiba e Florianópolis, uma vez que a diferença de 0,22 ppm entre as médias é bem menor que a variação da quantidade de cloro dentro de um mesmo mês. (Esta variação pode chegar a 100 %).

Sob o aspecto da agressividade da água e considerando que a temperatura média da água pouco varia e que pode ser considerada em torno de 23°C e ainda adotando-se os valores médios acima, tem-se o seguinte cálculo para o índice de Langelier:

Para o reservatório de Santa Efigênia:

$$LI = 6,7 + \log C + \log 15,4 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 7,89 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 4,41$$

Para o reservatório de Santa Cândida:

$$LI = 6,7 + \log C + \log 43,41 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 8,91 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 3,39$$

Para o reservatório do Bacacheri o valor é mais negativo ainda, pois a parcela positiva tem valor menor, ou seja:

$$LI = 6,5 + \log C + \log 18,3 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 8,34 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 3,96$$

Para o reservatório R5 (Agronômica), tem-se:

$$LI = 7,01 + \log C + \log 9,4 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 8,56 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 3,74$$

Para o reservatório da Canelinha

$$LI = 6,52 + \log C + \log 7,4 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 7,96 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 4,34$$

E para São João Batista

$$LI = 7,88 + \log C + \log 28,2 + 0,025 \times 23 - 0,011 S^{1/2} - 12,30, \text{ assim:}$$

$$LI = 9,91 + \log C - 0,011 S^{1/2} - 12,30 \text{ ou}$$

$$LI = \log C - 0,011 S^{1/2} - 2,39$$

Ou seja, apenas para valores muito elevados de C a expressão não é negativa, o que não ocorre na água dos reservatórios já que deve obrigatoriamente ser potável e C é a dureza devido ao cálcio. Donde, conclui-se que o índice de Langelier (LI) é negativo o que caracteriza esta água como sendo de caráter agressivo, o que implica que um tratamento especial deve ser dado tanto ao se projetar um estrutura com a finalidade de reservação de água potável, quanto ao aspecto da manutenção dessas mesmas estruturas.

Cabe a observação de que este índice não leva em consideração a presença do cloro na água, substância esta que reforça seu caráter agressivo, sobretudo no caso dos reservatórios de água potável.

4.5 – Extração de testemunhos de concreto

A extração dos testemunhos de concreto foi feito em várias etapas iniciando-se pela cidade de Curitiba e posteriormente em Florianópolis. Os itens a seguir mostram os resultados dessas extrações e as características principais dos testemunhos.

4.5.1 – Reservatório Santa Efigênia, Curitiba – PR

O reservatório é de pequeno porte (capacidade de 300 m³ de água) onde a laje de cobertura possui impermeabilização na parte externa a base de pintura asfáltica, já bastante degradada. O reservatório foi desativado a um ano e meio em virtude do aumento da demanda e da opção por bombas de recalque para manter a pressão d'água constante na rede. No entanto, ainda é possível reativá-lo.

A espessura da laje é de 11 cm, sendo ampliada devido a proteção mecânica que varia de 2,5 a 5,7 cm devido a necessidade de fornecer uma declividade de no mínimo 1,0 % para escoamento das águas pluviais.

As características geométricas dos testemunhos podem ser verificadas de acordo com tabela abaixo:

Quadro 4.5 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Sta. Efigênia:

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	g	kg/dm ³
1	76,0	129,4	25	587,02	1365	2,325
2	76,0	155,4	47,3	704,97 ²⁾	1577	2,237 ²⁾
3	76,0	167,1	54	758,04	1754	2,314
4	76,0	167,9 ¹⁾	57	761,67 ²⁾	1756 ⁴⁾	2,305 ²⁾
Densidade Média						2,320 ³⁾

¹⁾ Testemunho 4 quebrou em dois pedaços (separando a argamassa do concreto)

²⁾ Testemunhos 2 e 4 com danos => Na realidade volumes são menores e densidades são maiores

³⁾ Densidade Média calculado sem testemunho 2 e 4

⁴⁾ Peso da cobertura: 522 g, peso do concreto: 1234 g.

A densidade aqui calculada tem o intuito apenas comparativo entre os demais reservatórios, uma vez que no volume medido está incluída a camada de proteção mecânica feita de argamassa de cimento e areia no traço 1:3.

4.5.2 - Reservatório Santa Cândida, Curitiba – PR

Este reservatório também é de pequeno porte e com espessura da laje variando de 15.3 a 16.3 cm. Este foi o único reservatório onde foi constatado que a superfície inferior da laje de cobertura foi impermeabilizada, utilizando-se para isto impermeabilizante do tipo semi-flexível, que é uma combinação de cimentos especiais e aditivos inorgânicos. Esta impermeabilização foi feita em meados de 1993 e ainda se encontra em bom estado. Este reservatório por sua vez está em operação desde 1980, portanto a 18 anos, onde durante 13 anos a laje não foi protegida.

Quadro 4.6 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Sta. Cândida:

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	g	kg/dm ³
1	71,1	153,0	22,1	607,47	1408	2,318
2	71,1	159,5	24,1	633,27	1460	2,305
3	71,1	164,8	28,7	654,32	1510	2,308
4	71,1	163,0	18,5	647,17	1502	2,321
Densidade Média						2,313

4.5.3 - Reservatório Bacacheri, Curitiba – PR

Este reservatório foi o que apresentou maior espessura da laje de concreto, chegando a 21 cm sem contar a proteção mecânica. É um reservatório grande, composto de várias células, cada uma com uma capacidade de 5000 m³ de água.

Quadro 4.7 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório Bacacheri

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total Média	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	g	kg/dm ³
1	87,9	208,2	38,3	1263,4	3240	2.564
2	88,8	170,8	44,0	633,27	2942	2,305 *
3	88,4	207,7	82,6	654,32	3254	2,308 *
4	88,4	162,8	78,8	999,2	2630	2.632
Densidade Média						2,313

4.5.4 - Reservatório R5 Agronômica, Florianópolis - SC

Único reservatório com cobertura tipo casca. Faz parte de um sistema de reservatórios que atendem a cidade de Florianópolis.

Quadro 4.8 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório R5 - Agronômica

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total Média	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	g	Kg/dm ³
1	74.6	118.8	14.5	518.63	1161	2.239
2	74.7	106.7	13.8	467.88	1046	2.236
3	74.5	119.2	14.2	519.61	1162	2.236
4	74.4	107.3	14.0	466.48	1043	2.236
Densidade Média						2.237

4.5.5 - Reservatório de Canelinha, Canelinha – SC

Reservatório de pequeno porte, feito com concreto virado em obra, pois o local é de difícil acesso. O clorador fica ao lado do reservatório, diferenciando dos demais por não possuir estação de tratamento de grande porte para sua alimentação.

Quadro 4.9 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório de Canelinha

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total Média	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	G	kg/dm ³
1	74.5	176.7	16.0	770.09	1784	2.317
2	74.4	187.1	20.9	814.26	1819	2234
3	74.6	173.7	25.1	760.02	1708	2247
4	74.5	187.2	19.3	815.06	1777	2180
Densidade Média						2.245

4.5.6 - Reservatório de São João Batista – São João Batista - SC

Da mesma forma que o reservatório de Canelinha, não tem estação de tratamento de grande porte para usa alimentação. A cloração é feita ao lado do reservatório.

Quadro 4.10 - Dimensões dos testemunhos extraídos de reservatório de S. João Batista

Testemunho	Diâmetro Médio	Altura total Média	Altura Prot. Mec.	Volume Total	Peso	Densidade
	mm	mm	mm	cm ³	g	kg/dm ³
1	74.6	156.7	23.0	684.28	1550	2.265
2	74.7	155.8	18.1	682.32	1529	2.241
3	74.6	135.2	0.0	590.92	1358	2.298
4	74.5	136.0	0.0	592.44	1371	2.314
Densidade Média						2.280

Numa primeira análise, observa-se que a densidade dos testemunhos de Santa Catarina é em média 2,28 contra 2,31 da densidade dos testemunhos obtidos nos reservatórios de Curitiba, o que aponta para uma diferença no índice de vazios que por sua vez implica numa porosidade maior com conseqüente aumento da permeabilidade.

A diferença no diâmetro dos testemunhos deve-se ao equipamento utilizado para sua extração. As extrações em Curitiba pela dificuldade e tempo necessário para cada testemunho (em média mais de uma hora) foram feitas em datas diferentes e com serras de diferentes diâmetros. Já em Florianópolis, devido a locação do equipamento e para minorar seu custo, as extrações foram feitas num mesmo dia.

Com exceção do reservatório R5 (Agrônômica), cuja cobertura é tipo casca e tem espessura média de 11,30 cm, as espessuras da laje tem em média 16,55 cm com pequena variação devido a proteção mecânica.

4.6 – A carbonatação do concreto da laje de cobertura

Apesar de em alguns reservatórios ser notória a despassivação e conseqüente corrosão das armaduras, a carbonatação encontrada foi mínima ou nula em alguns casos., como pode ser observado na Figura 4.4 onde observa-se o resultado de um desses ensaios.

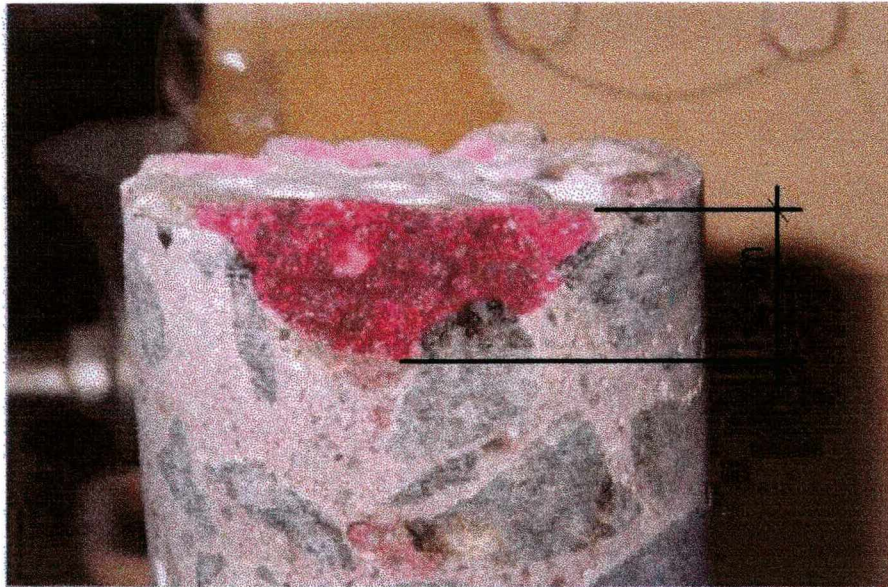


Figura 4.4 - Resultado do ensaio de carbonatação

Isto torna claro que a carbonatação não é uma das causas desse tipo de patologia (corrosão das armaduras). Isto pode ser justificado pelo fato de que no interior dos reservatórios a umidade relativa do ar está por volta de 90 a 95 % o que pode causar uma saturação dos poros, inibindo assim a difusão do CO_2 .

Outro motivo pode estar no fato de que a renovação do ar interno dos reservatórios observados é mínima, limitando-se aos poucos respiros, quando existentes e ao acesso. E, finalmente, a localização desses reservatórios, geralmente em regiões altas e pouco poluídas, também pode ser motivo do baixo grau de carbonatação, não apresentando uma tendência de seu agravamento, e portanto, não sendo nesse caso, responsável pela corrosão das armaduras. O resultado da carbonatação pode ser observado nas tabelas a seguir:

Quadro 4.11 - Resultados dos ensaios de carbonatação para os reservatórios da região de Curitiba

Testemunho	Santa Efigênia	Santa Cândida	Bacacheri
1	1 -2 mm	nulo	nulo
2	1 -2 mm	nulo	nulo
3	1 -2 mm	nulo	nulo
4	1 -2 mm	nulo	nulo

Quadro 4.12 - Resultados dos ensaios de carbonatação para os reservatórios da região de Florianópolis

Testemunho	Agrônômica	Canelinha	S. J. Batista
1	10 -12 mm	3 - 5 mm	15 - 20 mm
2	10 -12 mm	3 - 5 mm	15 - 20 mm
3	10 -12 mm	5 - 8 mm	15 - 20 mm
4	10 -12 mm	5 - 8 mm	15 - 20 mm

No entanto, apesar das considerações anteriores, observa-se para os reservatórios da região de Florianópolis o fenômeno da carbonatação.

A consideração que deve ser feita é o fato de que o ensaio foi realizado no laboratório, após 14 dias da extração desses testemunhos, o que poderia afetar o resultado. No entanto, para os testemunhos de Curitiba, cujo ensaio foi realizado em média 60 dias após a extração não houve carbonatação.

É possível assim avaliar que o concreto dos reservatórios é mais poroso e por isso mesmo, mais sujeito a carbonatação. Existe também outra variável a ser considerada que é o tipo de cimento usado nessas estruturas. No caso a variável assume duas situações: ou o cimento é pozolânico e por isso mesmo, menos sujeito ao fenômeno da carbonatação ou o cimento é o Portland comum.

O fato de inexistirem registros que forneçam esse tipo de informação ou o diário de obra, impede que se descubra se o cimento utilizado, tinha adições. Sabe-se que na época da concretagem desses reservatórios o cimento mais usual era o Portland comum e que as adições se tornaram mais comuns a partir da década de 80.

Outro aspecto importante que deve ser registrado é o fato de que a carbonatação libera o cloro que inicialmente estava combinado com o cimento formando o

cloroaluminato de cálcio. Assim, para o caso dos reservatórios o fenômeno da corrosão é agravado por essa liberação, uma vez que além da despassivação que a carbonatação causa na armadura, os cloretos assim liberados irão atacar o aço.

Finalmente, é importante considerar que o ensaio aqui realizado é a determinação do grau de carbonatação com a utilização da fenolftaleína pelo fato de ser amplamente utilizada para esta finalidade. No entanto esse indicador químico subestima a carbonatação, conforme indicado através da Figura 3.6.

4.7 - Resultados do ensaio de potencial de eletrodo

O ensaio de potencial de eletrodo para o reservatório analisado, mostra que existem apenas regiões localizadas de corrosão de armaduras, passíveis de serem protegidas através de tratamento específico. Cabe considerar aqui, que o presente ensaio foi realizado na cobertura da laje deste reservatório e considerando apenas a armadura superior (ou positiva). Há a necessidade de se realizar ensaios na parte inferior dessa laje, o que não foi feito no momento pois deve-se aguardar época propícia para entrar no reservatório, uma vez que eles estão em operação.

O eletrodo de cloreto, utilizado para a determinação dos íons de cloretos consiste num elemento sensível, dentro de um recipiente de vidro. Quando este elemento entra em contato com a solução de íons de cloretos, uma diferença de potencial se estabelece através desse elemento. Esse potencial que depende do nível de íons de cloretos livres na solução, é medido através de um eletrodo de referência de potencial conhecido ou utilizando equipamento específico. A medida desse potencial corresponde a um determinado nível de íons de cloretos na solução descritos pela equação de Nernst, ou seja:

$$E = E_0 + s \log(a), \quad (4.2)$$

onde:

E = valor do potencial de eletrodo;

E_0 = Potencial de referencia (constante);

a = Quantidade de íons cloretos na solução (mol/l);

s = declinação do eletrodo (em torno de 57 mV por década);

conforme GENTIL (1985).

Este ensaio foi realizado na cobertura dos reservatórios de Santa Cândida, Bacacheri, Mercês e Portão, devido a facilidade de acesso, inclusive à armadura, pelo fato desses reservatórios possuírem apenas camada de proteção mecânica, com armadura expostas em alguns casos.

Os resultados deste ensaio são mostrados através dos mapas apresentados no Anexo 2 realizado nos reservatórios, onde podem ser observado a identificação das regiões que indicam existir 95% de probabilidade de estar havendo o processo de corrosão.

Para o reservatório de Santa Cândida, observa-se duas regiões distintas, com potencial inferior a 350 mV, indicando a probabilidade de estar havendo corrosão da armadura. Considerando que apenas parte da laje foi medida, cabe a proposta de que o ensaio seja refeito para toda a extensão da laje, com equipamento apropriado para medir grandes extensões.

A existência de pequenas regiões que apontem para a existência de corrosão não implica em adotar medidas de manutenção imediatas, mas sim a necessidade de se monitorar com maior frequência esta estrutura.

O reservatório do Bacacheri não apresentou em nenhum local, medidas que indicassem a existência de corrosão, exceto num ponto, onde a armadura estava exposta.

Este fato por outro lado, não significa que a armadura esteja em perfeito estado, pois este ensaio tem suas limitações, entre elas a umidade (quando está muito seco, não há migração de elétrons, falseando o resultado) pode influir no resultado. Esse fato também ocorre para o reservatório do Portão.

Já o reservatório das Mercês apresentou toda a área com armadura corroída, o que também mostra mais uma limitação deste ensaio. O que ocorre é que a proteção mecânica deste reservatório foi feita com concreto leve e poroso, com espessura média de 15 cm. Este concreto por sua vez encontra-se saturado de água. E é claro, num meio saturado a migração de elétrons é facilitada e ocorre por outros caminhos além da armadura de aço, o que também compromete o resultado, cujos valores observados extrapolaram a faixa usual de potencial de corrosão conforme é apresentada na Figura 3.7 através do diagrama de Pourbaix.

Finalmente, outra dificuldade encontrada para a realização deste ensaio, foi quebrar o concreto com ponteiros até encontrar a armadura. É fácil imaginar o esforço necessário para quebrar um concreto com 80 MPa de resistência.

Assim, chega-se a conclusão de que as limitações deste ensaio são grandes, sobretudo quando se utiliza equipamento desenvolvido em laboratório. O indicado é a utilização de um detetor de corrosão com computador acoplado e que dispensam a necessidade de se quebrar o concreto.

Mesmo com esse tipo de equipamento, o detetor de corrosão este ensaio só tem validade se feito sob a laje de concreto o que só é viável quando o reservatório entra em manutenção, já que com o mesmo deve ficar vazio para se ter acesso.

4.8 - Características do concreto da laje dos reservatórios

4.8.1 - Resultados da resistência dos testemunhos

A proposta do ensaio de resistência a compressão, é comparar com a resistência especificada no projeto estrutural. A norma brasileira NBR 7680 (extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto) especifica com detalhes os procedimentos adotados. De acordo com a norma o número mínimo aceitável é de 6 testemunhos podendo-se aceitar até 2 testemunhos em situações especiais. Para o caso em estudo, foram extraídos 4 testemunhos de cada laje de cobertura dos diversos reservatórios, entretanto, não foi possível a realização do ensaio de compressão em todos os testemunhos devido aos seguintes fatores:

- Alguns testemunhos quebraram durante a extração, comprometendo o ensaio. (Santa Efigênia).
- Como o objetivo era a determinação dos cloretos no concreto, a prioridade foi dada para a extração de pó desses testemunhos e durante essa extração também houve quebra de alguns testemunhos (Santa Efigênia)

- Pelo menos 4 testemunhos foram reservados para o ensaio de absorção por imersão e fervura com a finalidade de determinar a porosidade do concreto. (Canelinha e São João Batista).
- Ocorreram dificuldades no capeamento do concreto pelo fato de que os diâmetros dos testemunhos tem diâmetro diverso daqueles usuais para o capeamento do concreto, e pela altura ser em media de 10 cm.

Outra dificuldade também, foi que o disco de corte não permite um corte perfeitamente paralelo entre as faces do cilindro de concreto. Procurou-se garantir esse paralelismo no capeamento. Ainda, algumas vezes o disco de corte acabou tirando pedaços do concreto, o que fez com que o enxofre desse capeamento preenchesse o vazio.

Todas essas dificuldades levam a uma redução da resistência final do testemunho de concreto, exceto pelo fato de que em alguns testemunhos haviam pedaços de ferro, no entanto, por estarem no sentido transversal, não levam a nenhuma alteração significativa.

Entretanto surgiram alguns valores elevados nestas resistências, como pode-se observar nos quadros abaixo.

Quadro 4.13 - Resultados dos ensaios de resistência para os reservatórios da região de Curitiba em Mpa.

Testemunho	Santa Efigênia	Santa Cândida	Bacacheri
1	34.7	75.1	61.3
2	-	49.7	36.3
3	-	83.6	63.6
4	-	52.1	40.1
Média	34.7	65.1	50.3
Desvio padrão	-	16.82	14.12

Quadro 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência para os reservatórios da região de Florianópolis em Mpa.

Testemunho	Agronômica	Canelinha	S. J. Batista
1	22.3	26.1	22.4
2	33.4	25.2	28.6
3	21.3		
4	23.4		
Média	25.1	25.7	25.5
Desvio padrão	5.6	0.64	4.38

Quadro 4.15 - Desvio padrão e coeficiente de variação para os reservatórios de Curitiba e Florianópolis.

	Curitiba	Florianópolis
Média	55.62	25.31
Desvio padrão	15.73	3.78
Coeficiente de variação	28.28%	14.93%

Analisando apenas o aspecto resistência, observa-se que os reservatórios de Santa Cândida e Bacacheri possuem valores altos e que os reservatórios da Agrônômica, Canelinha e São João Batista, possuem valores relativamente baixos. Nada pode-se afirmar de Santa Efigênia, pois apenas um testemunho pode ser ensaiado.

Apesar de todos os testemunhos atenderem ao que foi projetado, ou seja resistência superior a 15 Mpa, a expectativa era de que valores acima de 30 Mpa fossem encontrados, pois esses concretos tem idades que variam de 10 a 25 anos.

Apesar da resistência média ser superior para os testemunhos extraídos em Curitiba, o coeficiente de variação é bem maior (o dobro) que o mesmo coeficiente para os testemunhos de Florianópolis, mostrando que há uma maior uniformidade nesta última amostra.

Ao comparar-se os resultados do ensaio de resistência a compressão, com os resultados do ensaio de carbonatação, verifica-se que há congruência entre os mesmos. Ou seja: é esperado que um concreto com menos resistência sofra o fenômeno da carbonatação mais intensamente que os concretos mais resistentes, conforme mostrado na Figura 2.10.

4.8.2 - Resultado da densidade do concreto dos reservatórios

A densidade aparente ρ_0 , também conhecida como massa específica aparente no estado seco, expressa a razão entre a massa do concreto seco e o seu volume total, sua fórmula é:

$$\rho_0 = M_s/V_t, \text{ (g/cm}^3\text{)}, \quad (4.3)$$

onde

M_s é a massa aparente do concreto seco em gramas e V_t é o seu volume total em cm^3 . A relação com a porosidade é dada mediante a fórmula: (YUNES, 1992)

$$\rho_0 = \rho_s (1 - \eta), \quad (4.4)$$

onde

ρ_s é a massa específica da matriz sólida e η é a porosidade. Dessa forma pode-se observar que uma densidade elevada implica em baixa porosidade e vice-versa.

Nos Quadros 4.5 a 4.10 foram determinadas as densidades dos cilindros, pesando-os e calculando os volumes através de medidas obtidas com paquímetro. Nos Quadros 4.16 e 4.17 abaixo tem-se os resultados da densidade obtidos pelo volume de água deslocado, o que dá maior precisão.

Quadro 4.16 - Resultados da determinação da densidade para os reservatórios da região de Curitiba (kg/dm^3).

Testemunho	Santa Efigênia	Santa Cândida	Bacacheri
1	2.45	2.49	2.64
2	2.50	2.42	2.73
3	2.46	2.39	2.54
4	2.31	2.46	2.57
Média	2.43	2.44	2.59
Desvio padrão	0.08	0.04	0.14

Quadro 4.17 - Resultados da determinação da densidade para os reservatórios da região de Florianópolis (kg/dm^3).

Testemunho	Agronômica	Canelinha	S. J. Batista
1	2.39	2.40	2.31
2	2.44	2.36	2.46
3	2.47	2.47	2.30
4	2.50	2.39	2.32
Média	2.45	2.41	2.35
Desvio padrão	0.05	0.05	0.08

Verifica-se assim que com exceção do reservatório do Bacacheri, onde os valores foram mais altos, os demais permanecem na mesma faixa. O fato do Bacacheri ter sido mais elevado é que nos dois primeiros cilindros havia barras de aço. Assim, ao se

eliminar esses dois valores a media passa a ser de $2,55 \text{ kg/dm}^3$ o que esta dentro da margem de erro de 10 %.

4.8.3 - Características dos agregados

A caracterização dos agregados se deu basicamente através de dois ensaios, o primeiro para identificar se o agregado graúdo, no caso a brita, era ou não de origem alcalina. Para isto foi feita a aplicação de ácido clorídrico sobre a pedra. O resultado foi que para todos os reservatórios, não houve reação, isto é a brita não é de origem alcalina.

O segundo ensaio foi uma inspeção visual que permite identificar o tipo de rocha que originou essa brita, cujo resultado está especificado no Quadro 4.18. E finalmente foi determinado a densidade desse agregado que confirma a sua caracterização.

Quadro 4.18 - Caracterização dos agregados para região de Curitiba

Reservatório	Agregado graúdo	Classificação	Densidade Brita t/m^3	Agregado miúdo	Densidade Agregado miúdo t/m^3
Santa Efigênia	Origem granítica	Brita 1	2.56	Areia Média	2.38
Santa Cândida	Origem granítica	Brita 1 e 2	2.69	Areia Média	2.61
Bacacheri	Origem granítica	Brita 1 e 2	2.80	Areia média	2.54

Quadro 4.19 - Caracterização dos agregados para região de Florianópolis

Reservatório	Agregado graúdo	Classificação	Densidade Brita t/m^3	Agregado miúdo	Densidade agregado miúdo t/m^3
Agronômica	Origem granítica	Pedrisco	2.73	Areia Média	2.48
Canelinha	Origem granítica	Brita 1	2.67	Areia Média	2.51
São João Batista	Origem granítica	Brita 1	2.73	Areia média	2.42

Assim, observa-se que o agregado utilizado é o agregado encontrado comumente na região sul do Brasil, onde nota-se que não há diferença significativa entre as densidades dos agregados de Curitiba ou Florianópolis. Cabe citar que o reservatório da Agrônômica, teve a utilização de pedrisco, possivelmente pelo fato de sua cobertura ser em forma de casca e com espessura em torno de 10 cm, facilitando dessa também a concretagem.

A separação dos agregados graúdos e miúdos foi feita através da peneira 4,8 mm, não utilizando outras peneiras pelo fato de que a massa total dos agregados ser muito pequena.

4.8.4 - Caracterização do aço

O aço está caracterizado pela sua especificação no projeto, o que por sua vez informa sua resistência característica a tração. Nas barras obtidas, junto com a extração de testemunhos, foram medidos o diâmetro e o seu peso, procurando confrontar com o peso determinado pela norma, verificando assim se houve alguma perda por corrosão. Verificou-se também sua posição relativa ao fundo da laje, considerando que quanto mais próximo estiver da superfície, mais sujeito estará ao fenômeno da corrosão. Os Quadros 4.20 e 4.21, abaixo resumem os dados observados.

Quadro 4.20 - Caracterização do aço dos reservatórios para região de Curitiba

Reservatório	Tipo do aço	Bitola medida	Posição relativa ao fundo da laje	Situação
Santa Efigênia	CA 50	3,4 mm	0 a 2 cm	Exposto c/corrosão
Santa Cândida	CA 50	3,4 mm	4 cm	Sem corrosão
Bacacheri	CA 50	3,4 a 12,5 mm	4 a 8 cm	Sem corrosão

Quadro 4.21 - Caracterização do aço dos reservatórios para região de Florianópolis

Reservatório	Tipo do aço	Bitola medida	Posição relativa ao fundo da laje	Situação
Agrônômica	CA 50	3,4 mm	3 a 4 cm	Sem corrosão
Canelinha	CA 50	3,4 mm	1 a 2 cm	Sem corrosão
São João Batista	CA 50	3,4 a 8,0 mm	2 cm	Com corrosão

A bitola do aço medida foi a cortada pelo equipamento de extração não significando que existe somente esse diâmetro das barras de aço. A posição relativa ao fundo da laje é também referente aos testemunhos extraídos, não sendo um valor médio ou que possa ser generalizado.

O fato dessas barras de aço apresentarem ou não corrosão, não pode ser analisado isoladamente. Mostra apenas que naquele ponto existe ou não a corrosão. O que deve ser considerado é que outros ensaios mais abrangentes devem ser realizados para verificar a extensão da corrosão, ou se realmente não há problema com a armadura.

A presença de cloro e o perfil desses cloretos irá caracterizar de fato a necessidade ou não de outros ensaios.

4.9 - O perfil de cloretos

A determinação do perfil de cloretos é o ponto fundamental para que se possa determinar qual a influência que a cloração da água desses reservatórios exerce sobre a armadura da laje de concreto desses reservatórios.

Esse perfil de cloretos assim determinado, serve para demonstrar a validade do experimento, uma vez que a forma da curva deste perfil já é conhecida, como observa-se através das Figuras 2.8 e 2.12.

A análise é realizada através de duas métodos distintos. O primeiro método utilizado é o químico, com a utilização de equipamento específico que mede a quantidade de íons (no caso cloretos) dentro de uma solução obtida pela dissolução do pó de concreto em água deionizada ou destilada.

O segundo método utiliza equipamento da Oxford Instruments, o MDX1000, que mede a energia dissipada após incidência de raio X sobre a amostra do pó de concreto, devidamente compactado.

A proposta que leva a utilização de ambos os métodos é a de permitir uma comparação de resultados, identificar as divergências e procurar alternativas ou mesmo mostrar caminhos para que esses ensaios possam ser repetidos.

4.9.1 - O método químico

Para a realização do ensaio químico os seguintes equipamentos e substâncias foram utilizados:

Quadro 4.22 - Relação de equipamentos utilizados – ensaio químico

Equipamento usado:	- Pipeta Volumétrica de 50 ml
- Béquers	- Medidor de íons
- Balança com precisão de ± 0.1 mg	- Eletrodo de cloreto de prata
- Espátulas	- Funil de vidro
- Magnetos	Substâncias usadas:
- Agitador Magnético	- Água destilada
- Aquecedor	- Solução de Nitrato de Sódio (5M NaNO ₃)
- Proveta de 100 ml	- Soluções de Cloreto de Sódio (NaCl)
- Papel Filtro	0,0001M = 3,54 ppm
- Funil de Buchner	0,001M = 35,4 ppm
- Kitasato	0,01M = 354 ppm
- Balões Volumétricos	0,1M = 3540 ppm
- Picete com água destilada	
- Bastão de Vidro	

Os procedimentos para a realização do ensaio conforme ASTM C1218-92 foram os seguintes:

1. Encher um béquer com aproximadamente 10 g da amostra em pó com espátula.
2. Pesar a amostra e anotar o peso exato.
3. Acrescentar um magneto.
4. Aquecer água destilada (100 ml para cada amostra) até 60 °C.
5. Entornar 100 ml da água aquecido no béquer com a amostra.
6. Colocar o béquer no agitador magnético por 5 minutos no mínimo.
7. Molhar papel filtro num funil de buchner com água destilada.
8. Colocar o funil de buchner encima do kitasato que deve ser conectado com aparelho que gera vácuo para acelerar a filtração.

9. Tirar o béquer do agitador e entornar o conteúdo no funil de buchner com papel filtro com o auxílio de um bastão de vidro.
10. Passar o béquer bem por água destilada para não perder nada de amostra.
11. Transvazar o filtrado num balão volumétrico de 250 ml e abastecer com água destilada exatamente a 250 ml.
12. Encher 4 béqueres com exatamente 50 ml de soluções de cloreto de sódio (NaCl) de 0.0001M, 0.001M, 0.01M e 0.1M com o auxílio de uma pipeta volumétrica. Os padrões são utilizadas para calibração.
13. Abastecer outro béquer com exatamente 50 ml do filtrado com o auxílio de uma pipeta volumétrica.
14. Acrescentar exatamente 1 ml da solução de nitrato de sódio (NaNO_3) para cada béquer.
15. Medir as diferenças dos potenciais com o auxílio do eletrodo de cloreto de prata. A amostra deve ser agitada com um agitador magnético durante a medição.
16. Efetuar leitura dos resultados.

As soluções com molalidade variando de 10^{-4} a 10^{-1} tem a finalidade de calibrar o equipamento, para permitir as leituras do concreto. O intervalo adotado é aquele em que o gráfico concentração x diferença de potencial é uma reta, o que permite uma interpolação com precisão sobretudo ao considerar que as concentrações existentes no concreto estão dentre desse intervalo, não havendo interesse nenhum em concentrações menores que 10 ppm. A adição do nitrato de sódio tem a finalidade de ajustar a força iônica da amostra e dos padrões utilizados para calibrar o aparelho.

O equipamento utilizado para medir a quantidade de íons na solução de concreto, fornece os resultados em ppm (parte por milhão). Como o valor obtido é o equivalente a um litro, divide-se por quatro para encontrar o valor equivalente a 250 ml que é a quantidade que foi completada com água destilada no balão volumétrico. Obtém-se assim a quantidade em miligramas de cloro na solução. Dividindo esse valor por mil, obtém-se a quantidade de cloro em gramas. A Figura 4.5 mostra o equipamento utilização na leitura dos íons de cloro.

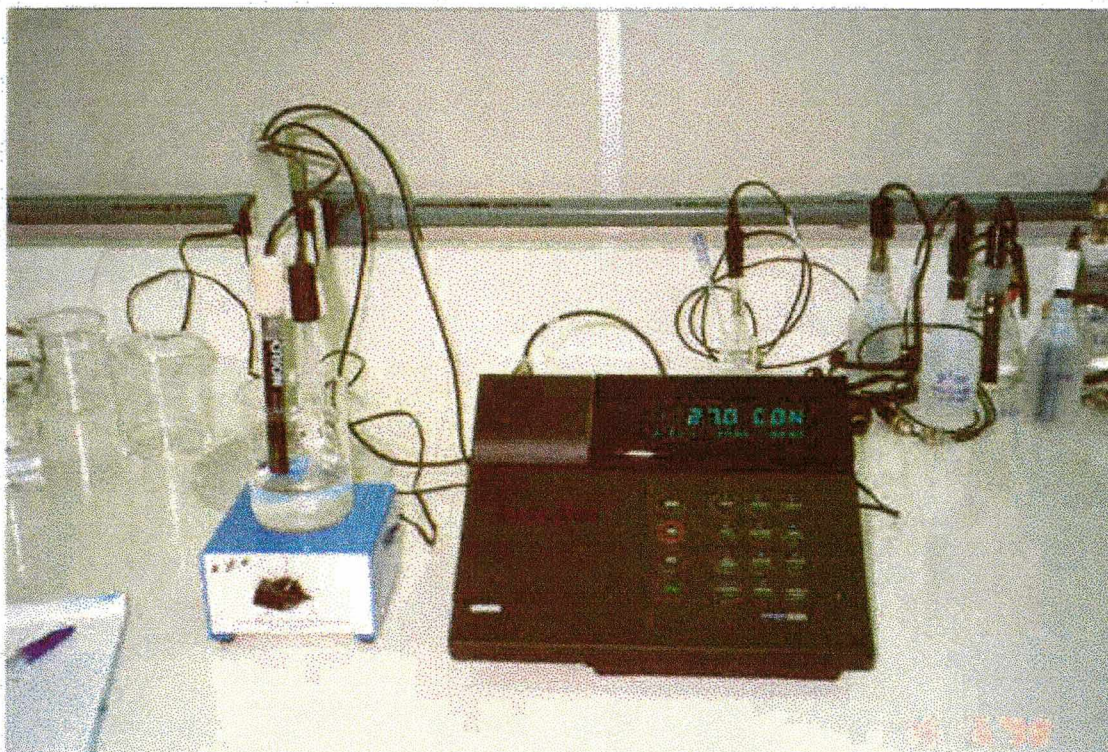


Figura 4.5 - Equipamento utilizado para medir a quantidade de íons.

Multiplicando o valor assim obtido, por 100 e dividindo-o pela quantidade de pó fornecida pelo ensaio, tem-se o percentual de cloro no concreto para a profundidade analisada.

Exemplo:

- Para o reservatório de Santa efigênia, na profundidade de 5 mm foi fornecido 10,0319 gramas de pó de concreto.
- A leitura do aparelho teve como valor: 9,79 ppm
- Dividindo este valor por 4, pelo fato de que foi utilizado 250 ml na dissolução do pó de concreto, tem-se 2,4475 miligramas de cloro na solução, (ou 0,0024 gramas).
- Dividindo 0,0024 gramas por 10,0319 gramas de pó (utilizadas no ensaio) e multiplicando por 100, obtém-se: 0,024% de cloro. Onde este é o valor do cloro encontrado no concreto do reservatório de Santa Efigênia a uma profundidade de 5 mm.

Os resultados obtidos com este ensaio foram:

4.9.1.1 - Reservatório Santa Efigênia

Quadro 4.23 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - Santa Efigênia

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.024 %	0.016 %	0.020 %	200.0
10 mm	0.014 %	0.014 %	0.014 %	140.0
15 mm	0.012 %	0.014 %	0.013 %	135.0
20 mm	0.011 %	0.012 %	0.012%	125.0

Graficamente pode-se estabelecer um perfil de cloretos, que para este testemunho, fica:

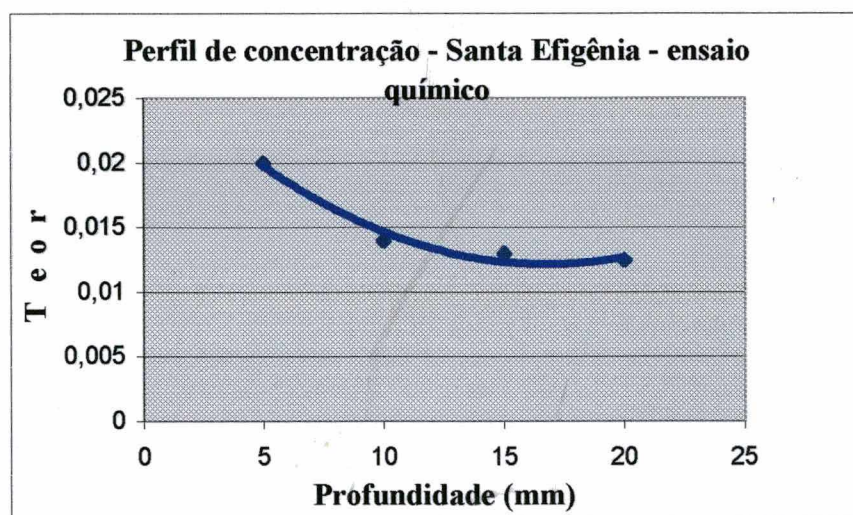


Figura 4.6 - Perfil de cloretos - Santa Efigênia - ensaio químico

Este perfil está dentro das expectativas, pois tem um teor maior para menores profundidades decrescendo até a profundidade de 20 mm que é a espessura de cobrimento prevista nos projetos estruturais.

O teor apresentado é baixo e apenas para a profundidade de 5 mm é que seria crítico, conforme Quadro 3.12, pois o teor de 0,024 % corresponde a 0,6 kg por m³ de concreto, ou poderia de acordo com a mesma tabela como médio risco.

Cabe a consideração de que este reservatório está desativado a 2 anos e que por isso deixou de ter água clorada em seu interior, sendo médio apenas o cloro que já havia penetrado no concreto.

4.9.1.2 - Reservatório de Santa Cândida

Quadro 4.24 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto – ensaio químico - Santa Cândida

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.012 %	0.019 %	0.016 %	160.0
10 mm	0.012 %	0.010 %	0.011 %	110.0
15 mm	0.012 %	0.010 %	0.010 %	100.0
20 mm	0.010 %	0.009 %	0.009 %	095.0

Graficamente, tem-se

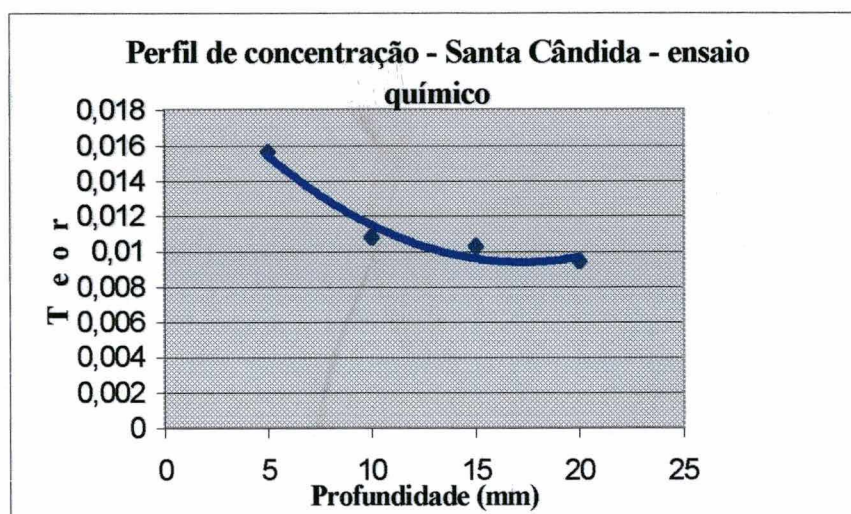


Figura 4.7 - Perfil de cloretos – Santa Cândida – ensaio químico

Neste gráfico observa-se que não há um decréscimo rápido entre as profundidades de 5 e 10 mm e que também não mostra uma tendência a estabilizar a queda. Entre os motivos que alteraram o comportamento desta curva, deve-se citar que este é o único reservatório que teve a face inferior da laje de cobertura impermeabilizada a 5 anos, ou seja, a princípio a alimentação de cloro também cessou, como em Santa Efigênia, ficando como medida apenas o cloro que já havia penetrado no concreto. Por outro lado, o ensaio de carbonatação foi nulo e a resistência a mais elevada de todas, o que mostra a baixa porosidade deste concreto.

O teor apresentado é baixo e a princípio não apresenta risco de corrosão devido ao ataque do cloro.

4.9.1.3 - Reservatório Bacacheri

Quadro 4.25 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto – ensaio químico - Bacacheri

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.013 %	0.023 %	0.018 %	180.0
10 mm	0.009 %	0.014 %	0.012 %	120.0
15 mm	0.009 %	0.013 %	0.011 %	110.0
20 mm	0.007 %	0.015 %	0.011 %	110.0

Graficamente tem-se:

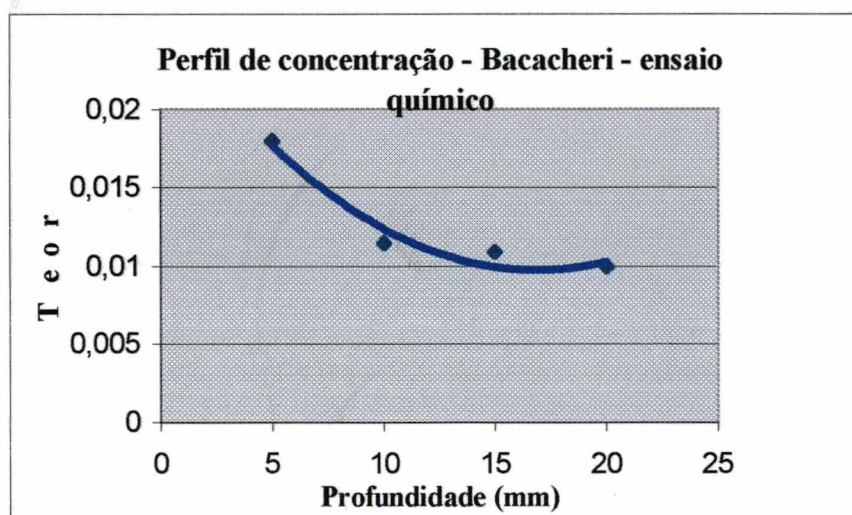


Figura 4.8 - Perfil de cloretos - Bacacheri - ensaio químico

Neste reservatório, também se observa teores baixos de cloretos, sobretudo se considerarmos a dosagem do cloro na água e o tempo de operação deste reservatório. No entanto deve-se observar que este foi o concreto mais denso encontrado entre todos os reservatórios amostrados, o que, como foi dito anteriormente, implica numa baixa porosidade e conseqüente menor penetração de cloretos.

Ainda, o ensaio de carbonatação desse reservatório também mostrou-se nulo, o que mostra a qualidade do concreto e finalmente, a resistência deste concreto foi bastante elevada, o que mais uma vez mostra sua baixa porosidade, comprovada pelo baixo teor de cloretos.

O teor de cloro é baixo e a princípio, como no reservatório de Santa Cândida, não apresenta riscos de corrosão da armadura pelo ataque do cloro.

4.9.1.4 - Reservatório Agrônômica

Quadro 4.26 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - Agrônômica

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.043 %	0.009 %	0.026 %	259.0
10 mm	0.017 %	0.006 %	0.012 %	119.0
15 mm	0.013 %	0.010 %	0.012 %	117.0
20 mm	0.012 %	0.001 %	0.006 %	064.0

Graficamente tem-se:

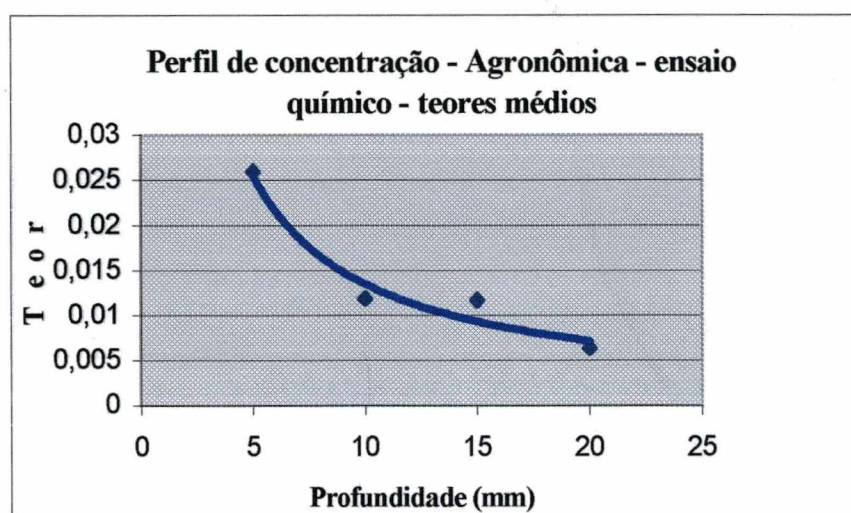


Figura 4.9 - Perfil de cloretos - Agrônômica - ensaio químico

Neste reservatório, os teores foram relativamente baixos apesar de que para a profundidade de 5 mm a quantidade já caracteriza um teor crítico de cloreto de acordo algumas normas internacionais, como a JSCE-SP-2 por exemplo. O que deve-se considerar aqui é que o concreto deste reservatório apresentou carbonatação, fenômeno este que libera o cloro que está ligado ao cimento, e apresentou resistências um pouco menores que a expectativa, o que poderia levar a maiores teores de cloro, pela porosidade desse concreto.

Ainda, vale sempre lembrar que o cloro aqui medido é o cloro livre, e não o combinado que pode ser liberado pela carbonatação. Esse fato mostra que o teor de cloro apresentado por este reservatório é no mínimo preocupante e merece monitoração adequada.

4.9.1.5 - Reservatório Canelinha

Quadro 4.27 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - Canelinha

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.028 %	0.009 %	0.018 %	182.0
10 mm	0.026 %	0.005 %	0.015 %	155.0
15 mm	0.018 %	0.002 %	0.010 %	103.0
20 mm	0.015 %	0.002 %	0.009 %	088.5

Graficamente, tem-se:

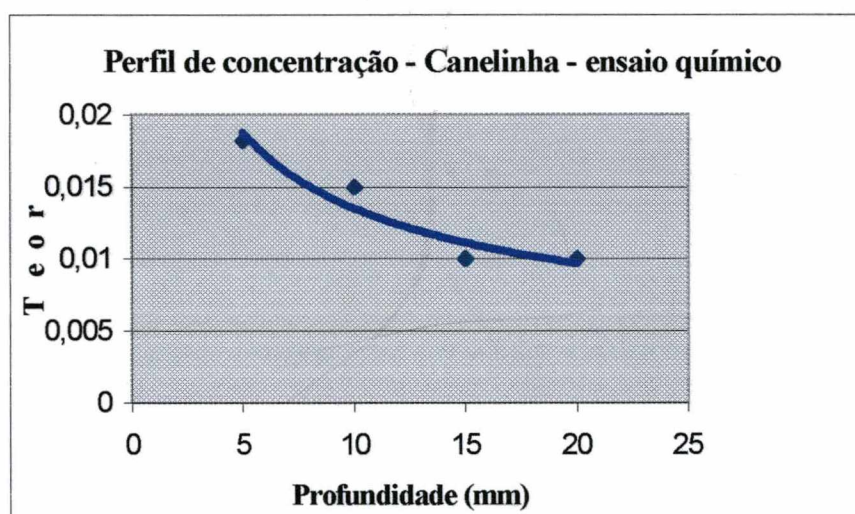


Figura 4.10 - Perfil de cloretos - Canelinha - ensaio químico

Neste reservatório a quantidade de cloro encontrada é pequena e não apresenta teor crítico de cloreto para qualquer profundidade de acordo com normas internacionais.

Por sua vez, este reservatório apresentou pouca espessura de carbonatação o que pode justificar a baixa quantidade de cloro, pois a pequena carbonatação indica um concreto pouco poroso e pouco permeável se comparado com o mesmo concreto do reservatório da Agronômica.

Assim, mesmo que não haja uma monitoração constante desse reservatório devido ao local de difícil acesso, no mínimo recomenda-se uma impermeabilização sob a laje a fim de estancar a migração de cloro para a laje de concreto armado.

4.9.1.5 - Reservatório São João Batista

Quadro 4.28 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio químico - São João Batista

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.360 %	0.083 %	0.221 %	2215.0
10 mm	0.300 %	0.081 %	0.190 %	1905.0
15 mm	0.280 %	0.065 %	0.172 %	1725.0
20 mm	0.270 %	0.052 %	0.161 %	1610.0

Graficamente, tem-se:

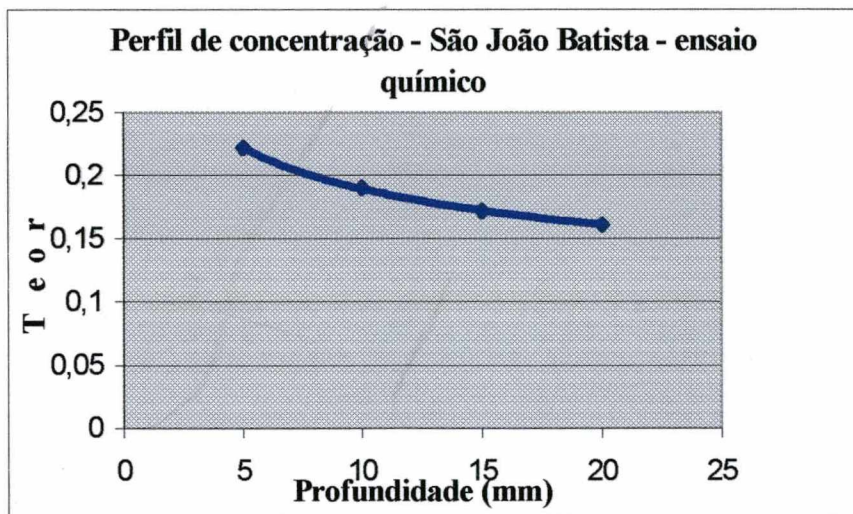


Figura 4.11 - Perfil de cloretos - São João Batista - ensaio químico

Este reservatório apresenta, neste ensaio, índices elevadíssimos de cloro no concreto. Isto significa que a uma profundidade de 5 mm ter-se-ia 5,1 kg de cloro por metro cúbico de concreto. Mesmo que se considere que haja algum erro nas medidas feitas para o testemunho 1, e considerando-se apenas o testemunho 2, ainda assim os índices são elevados e ultrapassam o limite crítico de quase todas as normas relacionadas no Quadro 3.13.

O que pode justificar estes elevados valores do teor de cloro é o fato de que este reservatório foi o que apresentou o maior índice de carbonatação e os menores valores de resistência a compressão, o que mostra, a princípio um concreto poroso e altamente permeável. Por outro lado, este concreto apresentou em todos os seus testemunhos,

matéria orgânica, em forma de caroço de frutas. Considerando que os testemunhos foram extraídos aleatoriamente e em regiões distintas, no mínimo, há a necessidade de se efetuar novos ensaios para verificar este fato. E, finalmente, num dos testemunhos extraídos deste reservatório foi encontrada armadura com uma seção inferior a 50 % de sua seção original, ou seja, altamente corroída.

Mais uma vez, não só justifica-se o alto teor de cloro como conclui-se pela necessidade urgente de nova inspeção, não só para confirmar resultados mas para adotar atitudes que eliminem esse tipo de patologia.

4.9.2 - O método da espectrometria de raios X

Este método utiliza equipamento ED2000 da Oxford Instruments para medir a dispersão da energia emitida de cada tipo de substância após incidência de feixe de raio X. A Figura 4.12 mostra o equipamento utilizado para determinar a quantidade de cloro no pó de concreto.

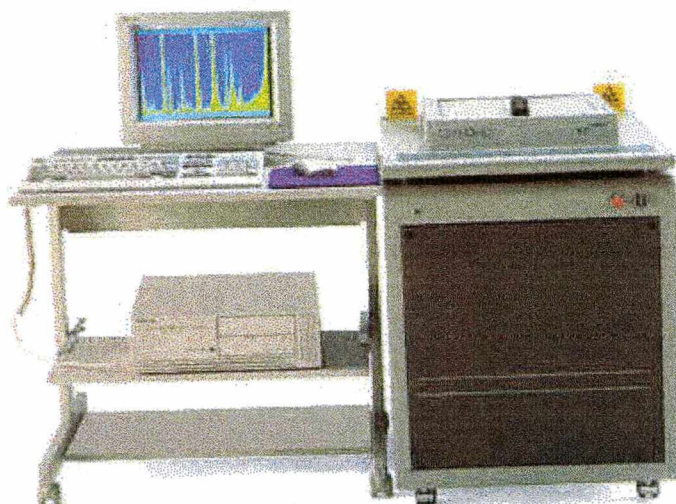


Figura 4.12 – Aparelho utilizado para a determinação do cloro no concreto.

A seqüência deste ensaio, obedece os seguintes passos:

- pó coletado para análise deve ser seco em estufa a 100 °C durante 24 horas. A quantidade desejável é de 12 gramas, devido ao tamanho das pastilhas onde o pó é prensado.

- Parte do pó é separada para efetuar-se o ensaio de perda ao fogo, onde o pó é calcinado a 1000 °C durante uma hora. Mede-se o peso antes e após a calcinação e calcula-se a diferença. A tabela deste ensaio pode ser vista no anexo II deste trabalho.
- Transporte desse pó deve ser feito em invólucro hermeticamente fechado e com sílica-gel para evitar qualquer tipo de umidade.
- O pó assim preparado é prensado com uma carga de 25 toneladas em pastilhas de alumínio com diâmetro de 4 cm e altura de 5 mm.
- As pastilhas são colocadas no aparelho (Oxford instruments modelo ED 2000) onde é criado vácuo e é feito resfriamento até atingir a temperatura de 198 °C negativos, quando então é emitido o raio X. Antes dar o início ao ensaio, são digitadas no computador ligado ao aparelho os dados da pastilha, (reservatório e profundidade) e a perda ao fogo correspondente.
- Comparando a energia liberada, após na emissão do feixe de raio X e de acordo com dados previamente armazenados, o computador, acoplado ao equipamento, identifica algumas substâncias e os óxidos, quantificando-as ao mesmo tempo.
- Finalmente é emitido um relatório através da impressora. Esses relatórios contém a relação de todas as substâncias encontradas com o respectivo percentual encontrado, ou ppm quando a quantidade for muito pequena.

Analisando a quantidade de cloro determinada através deste ensaio, tem-se as seguintes planilhas:

4.9.2.1 - Reservatório Santa Efigênia

Quadro 4.29 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Santa Efigênia

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.029 %	0.027 %	0.028 %	280.0
10 mm	0.026 %	0.018 %	0.022 %	220.0
15 mm	0.025 %	0.018 %	0.021 %	215.0
20 mm	0.026 %	0.025 %	0.025 %	254.0

Graficamente, tem-se:

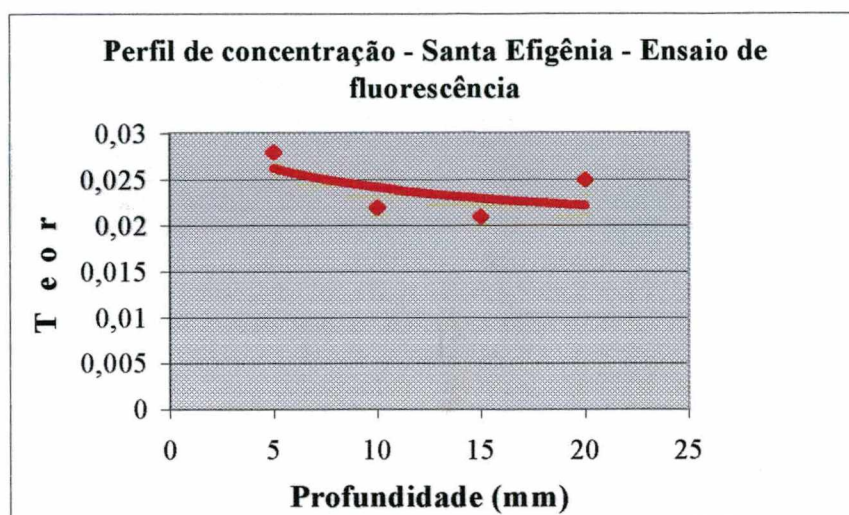


Figura 4.13 - Perfil de cloretos Santa Efigênia - ensaio por fluorescência

Este gráfico mostra que apenas o último ponto está fora da tendência normal. Isto pode ser pelo fato de que a coleta de pó apresentar algumas falhas como por exemplo a coleta de pó de profundidades inferiores pois quando se atinge uma profundidade maior começa-se a escariar as paredes laterais do furo e com isso vem o pó de profundidades menores junto. Outro fator é a quantidade de brita atingida, pois quanto mais pó de pedra obtido menor a quantidade de cloro, já que esse íon não se reage com o material do agregado, no caso a sílica. Finalmente, a troca na classificação do pó é perfeitamente viável, uma vez que o pó passa por 5 tratamentos que requerem nova identificação. Ou seja, a probabilidade de erro na manipulação é elevada.

Ainda, observa-se uma semelhança de resultados com os obtidos pelo ensaio químico, apesar das diferentes características desses ensaios e dos valores superiores acima apresentados.

4.9.2.2 - Reservatório Santa Cândida

Quadro 4.30 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Santa Cândida

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.068 %	0.110 %	0.089 %	890.0
10 mm	0.058 %	0.053 %	0.056 %	560.0
15 mm	0.052 %	0.068 %	0.055 %	550.0
20 mm	0.060 %	0.057 %	0.058 %	580.0

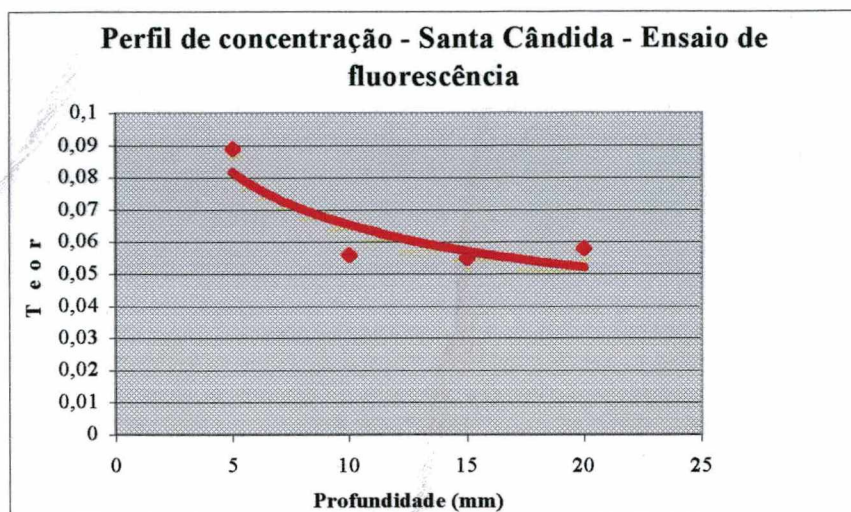


Figura 4.14 - Perfil de cloretos - Santa Cândida - ensaio de fluorescência

Neste gráfico, assim como ocorre para este mesmo reservatório, no ensaio químico, observa-se que não há um decréscimo rápido entre as profundidades de 5 e 10 mm e que também mostra uma tendência a estabilizar a quantidade de cloro detectada. O teor aqui apresentado é mais elevado que o teor apresentado pelo ensaio químico e mostra uma quantidade crítica para todas as profundidades.

No entanto, cabe observar aqui que, entre as diferenças entre estes ensaios, a principal é a do procedimento de preparação da amostra. No ensaio químico, o pó de concreto é lavado e por isso todo o cloro livre ou adsorvido passa para a solução aquosa. Procedimento este de acordo com a norma ASTM C114-92. Assim, isto leva a crer que o cloro que está ligado ao cimento formando o cloroaluminato, permanece ligado, mesmo após a lavagem desse concreto, assim esta leitura, determine, a princípio o cloro livre total.

Para o ensaio de energia dispersiva, o pó do concreto é prensado e assim é levado para o equipamento, onde incide o raio X, tendo como resultado, emissão de ondas de diversos comprimentos emitindo também energia. Cada elemento, ou composto tem sua energia liberada característica sendo essa energia que fornece a medida inicial que irá identificar e quantificar o elemento da amostra. Assim, todo o cloro, livre ou ligado emitirá energia, e influenciará a quantidade final. Logo, este ensaio determina o cloro

total, tanto livre, quanto o cloro ligado. Este é o motivo da diferença, podendo ficar o reservatório de Santa Efigênia, como medida estatisticamente descartável.

4.9.2.3 - Reservatório Bacacheri

Quadro 4.31 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Bacacheri

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.063 %	0.028 %	0.046 %	457.0
10 mm	0.053 %	0.028 %	0.041 %	405.0
15 mm	0.049 %	0.029 %	0.039 %	392.0
20 mm	0.044 %	0.025 %	0.035 %	347.0

Graficamente, tem-se:

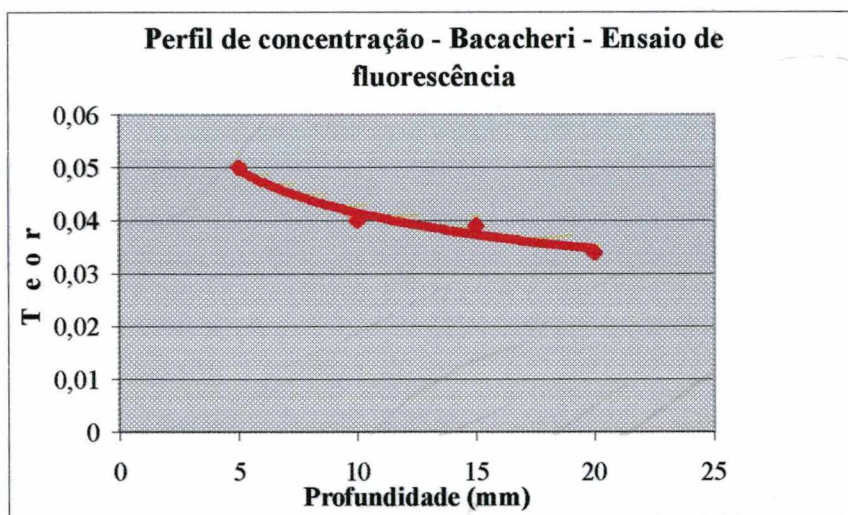


Figura 4.15 - Perfil de cloretos - Bacacheri - ensaio de fluorescência

Neste reservatório, também se observa teores elevados de cloretos, em valores bem superiores aos encontrados para este mesmo reservatório, no ensaio químico, cabendo as mesmas observações feitas anteriormente. Esse teor elevado, apresenta risco de corrosão em todas as profundidades, mostrando que o cloro já atingiu a profundidade de cobertura da armadura. Em comparação com o reservatório de Santa Efigênia, este reservatório tem maior quantidade de cloro, em todas as profundidades. Isto se deve ao

fato da desativação do reservatório de Santa Efigênia, e possivelmente da diferença de volumes de água armazenados. Quanto mais água, maior a quantidade de cloro no ambiente interno destes reservatórios, como é o caso do Bacacheri.

4.9.2.4 - Reservatório Agronômica

Quadro 4.32 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Agronômica

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.050 %	0.150 %	0.100 %	1000.0
10 mm	0.041 %	0.092 %	0.066 %	660.0
15 mm	0.039 %	0.068 %	0.054 %	540.0
20 mm	0.033 %	0.050 %	0.042 %	420.0

Graficamente, tem-se:

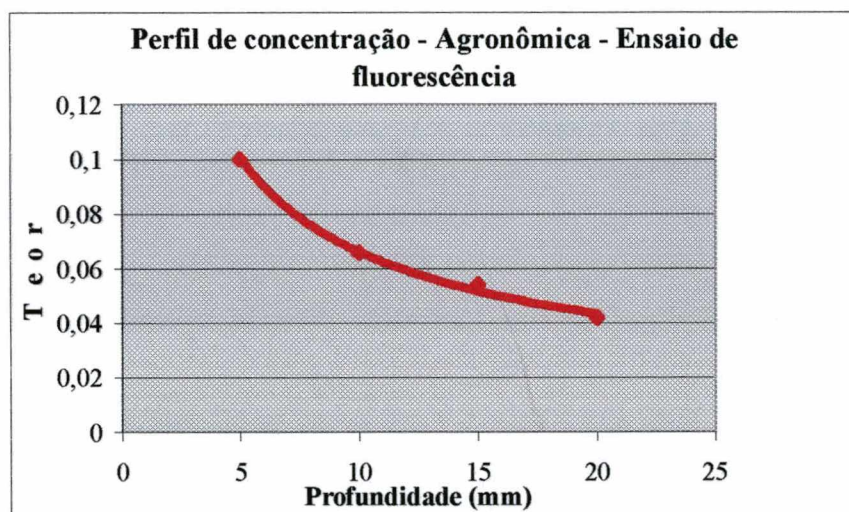


Figura 4.16 - Perfil de cloretos - agronômica - ensaio de fluorescência

Neste reservatório, também se observa teores de cloretos, em valores muito superiores aos encontrados para este mesmo reservatório, no ensaio químico o que justifica, no mínimo uma repetição desses ensaios.

4.9.2.5 - Reservatório Canelinha

Quadro 4.33 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - Canelinha

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.077 %	0.057 %	0.067 %	671.0
10 mm	0.061 %	0.046 %	0.054 %	536.0
15 mm	0.046 %	0.049 %	0.047 %	474.0
20 mm	0.048 %	0.049 %	0.048 %	486.0

Graficamente, tem-se:

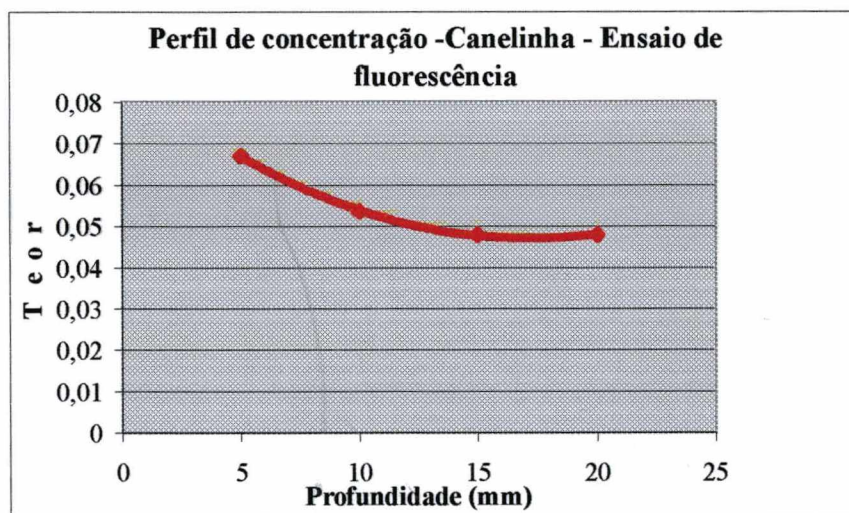


Figura 4.17 - Perfil de cloretos - Canelinha - ensaio de fluorescência

Já para este reservatório, pode-se observar teores bastante elevados de cloro para seu tamanho reduzido, o que mostra ser este concreto mais permeável que os demais e por isso mesmo com necessidade de tratamento impermeabilizante sobre a face inferior desta laje.

4.9.2.6 - Reservatório São João Batista

Quadro 4.34 - Teor de cloretos em relação a massa de concreto - ensaio de fluorescência - São João Batista

Profundidade	Testemunho 1	Testemunho 2	Média	mg/kg de concreto
5 mm	0.087 %	0.045 %	0.066 %	660.0
10 mm	0.084 %	0.041 %	0.063 %	630.0
15 mm	0.063 %	0.041 %	0.052 %	520.0
20 mm	0.045 %	0.047 %	0.046 %	460.0

Graficamente, tem-se:

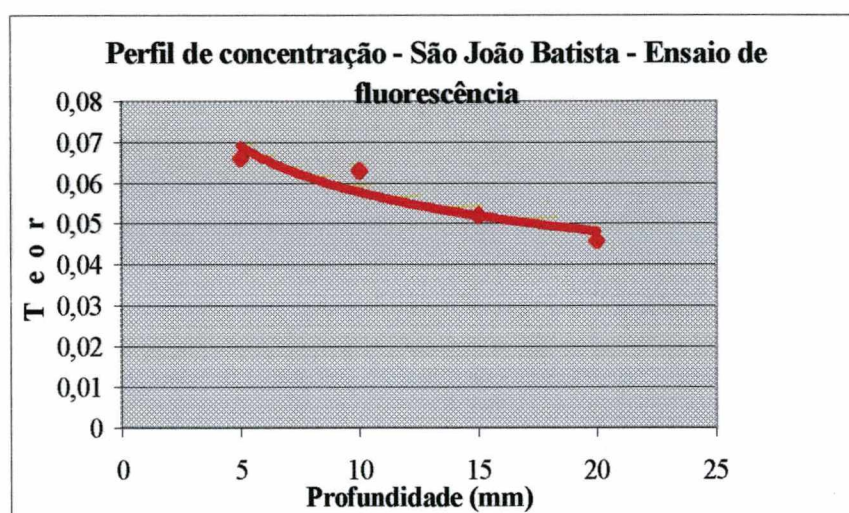


Figura 4.18 - Perfil de cloreto São João Batista - Ensaio de fluorescência

No caso deste reservatório, observa-se os teores mais elevados de cloretos, não só neste ensaio, mas também no ensaio químico, o que prova que o cloro não só já ultrapassou o limite crítico mas possui teores de cloro muito superior a todos os reservatórios analisados. O que demonstra que este é o que possui maior presença em seu tratamento.

4.9.3 – Comparação entre ensaios

A partir desse ponto são apresentados os gráficos mostrando os resultados de ambos ensaios permitindo assim sua comparação.

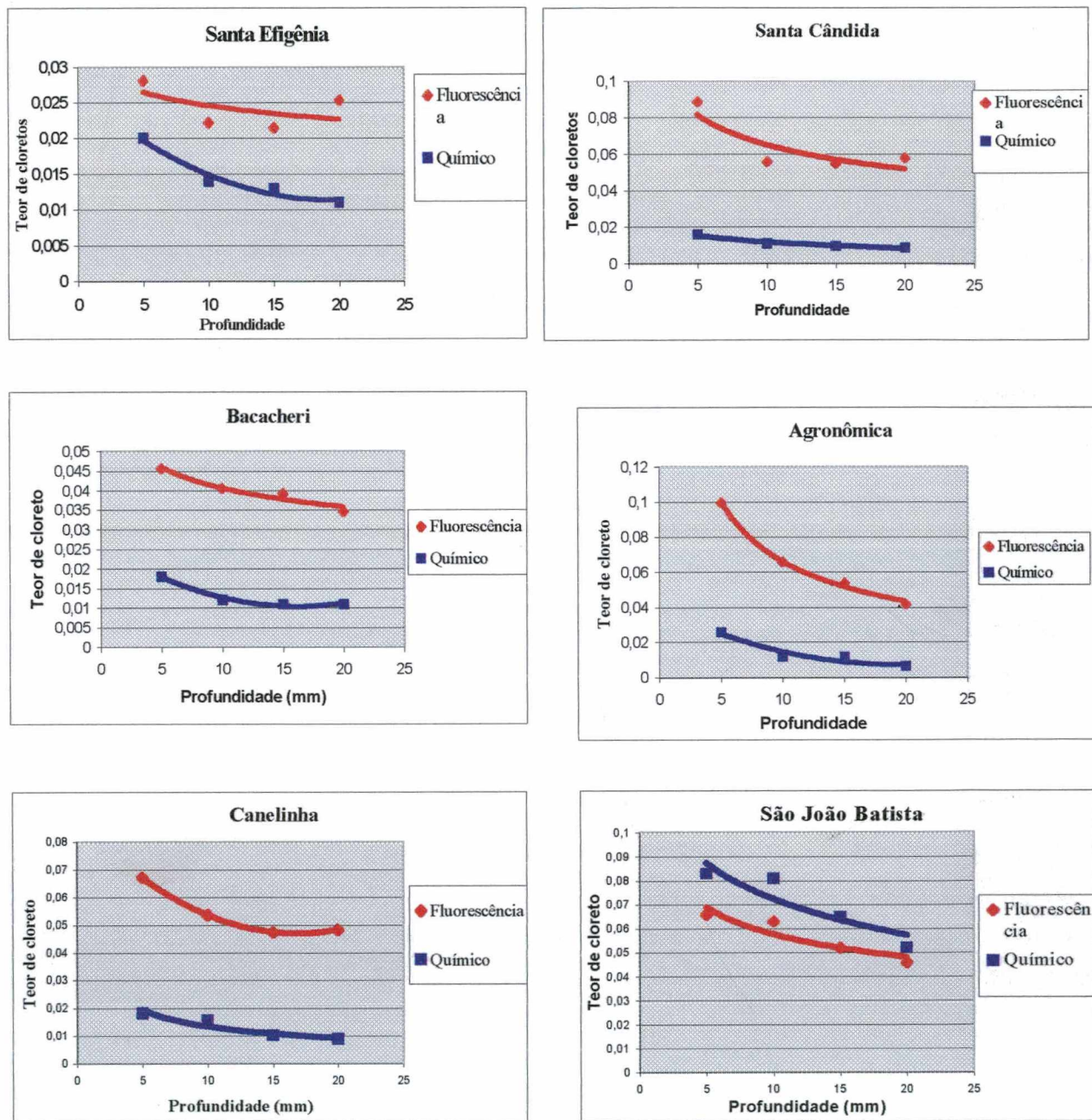


Figura 4.19 - Comparação de perfis de cloro - químico vs. fluorescência

Analisando os gráficos da Figura (4.16) observa-se que com exceção do reservatório São João Batista, todos os demais tem no ensaio de fluorescência, valores mais altos, possivelmente devido a forma de determinação do cloro, que é diferente para cada método de ensaio.

Fica demonstrado aqui a diferença marcante entre os ensaios químico e o ensaio de fluorescência onde este último determina os cloretos livres e ligados enquanto que o ensaio químico determina apenas o cloreto que é lixiviado durante a lavagem do pó de concreto.

A tendência de crescimento para profundidade maiores, que alguns gráficos mostram (por exemplo, no ensaio de fluorescência para o reservatório de Santa Efigênia), demonstra apenas a necessidade de se efetuar uma maior quantidade de ensaios, obtendo dessa forma valores médios mais próximos da realidade.

4.9.4 – A reconstituição de traço

Buscando reconstituir o traço do concreto com o intuito de determinar a quantidade de cimento por m^3 de concreto e também caracterizar o agregado, é realizado o seguinte ensaio, conforme PETRUCCI (1980):

- Deixa-se o cilindro de concreto (ou parte deste cilindro) imerso em água durante no mínimo 24 horas.
- Após esse período pesa-se o cilindro, tomando o cuidado de enxuga-lo superficialmente levando-se em seguida a estufa a temperatura de 105 °C durante mais 24 horas.
- Pesa-se novamente o cilindro de concreto. O objetivo é determinar qual a quantidade de água absorvida pelo concreto tendo assim um ponto de partida para a reconstituição do traço.
- Leva-se o cilindro de concreto para a mufla onde é aquecido a uma temperatura de 600 °C durante uma hora, facilitando assim o detorroamento do concreto e eliminando toda a água.
- Após tirado da mufla o concreto é moído manualmente de tal forma a não quebrar ou moer o agregado graúdo.

- O concreto é então colocado num vasilhame e sobre ele é adicionado ácido clorídrico (com concentração mínima de 10%) e deixado em repouso durante 24 horas.
- Após esse período o concreto é lavado e filtrado, de tal forma a permitir que todo o ácido escoe, bem como o produto resultante da reação do ácido com o cimento.
- O produto resultante (agregados miúdo e graúdo) é então secado em estufa e pesado.
- Calcula-se a diferença de peso antes e após o ataque com ácido. Essa é a quantidade de cimento existente na amostra.
- Passa-se o material restante na peneira 4,8 mm, procurando separar o agregado miúdo do graúdo e pesa-se esse material. Tem-se assim a participação da areia e da brita sobre o total da amostra.
- Determina-se a densidade da brita pelo método do deslocamento de volume de água e a densidade da areia com a utilização do picnômetro.

Utilizando-se a fórmula:

$C = 1000 / (1/d_c + a/d_a + p/d_p + x)$, onde:

- d_c = densidade do cimento (g/cm^3);
- a = quantidade de areia (g);
- d_a = densidade da areia (g/cm^3);
- p = quantidade de brita (g);
- d_p = densidade da brita (g/cm^3);
- x = fator água/cimento

tem-se a quantidade de cimento por m^3 .

Algumas restrições devem ser feitas sobre este método:

- Esse método só tem validade para concretos que utilizem o cimento portland comum, não sendo útil para qualquer outro tipo de cimento com adições, pois o material geralmente adicionado não reage com o ácido.
- A densidade do cimento de $3,15 g/cm^3$ foi adotada, conforme bibliografia consultada, no entanto essa densidade varia conforme o fabricante e a época de fabricação.
- O fator água/cimento é obtido da diferença entre o cilindro de concreto saturado e esse cilindro seco em estufa, o que também é uma aproximação.

- O ácido utilizado é bastante diluído e a verificação se houve ou não reação completa é apenas visual. Ou seja, após o material restante (mistura de agregado graúdo e miúdo) estar seco na estufa, é pingado uma gota de ácido e observa-se o resultado. Se houver reação o material sofre novo banho de ácido. Se não houver reação, dá-se como encerrado o ensaio.
- No entanto, este método traz a grande vantagem da simplicidade, rapidez e baixo custo, o que justifica sua adoção.

Os resultados obtidos utilizando-se o método descrito, estão relacionados no Quadro 4.35 a seguir:

Quadro 4.35 - Planilha de cálculo para reconstituição de traço

Reservatório	Peso Saturado	Peso seco mufla	Peso após ácido	Cimento	Retido peneira 4,8	Retido peneira 200	Densidade brita	Densidade areia	Densidade Cimento	Teor de umidade	Trço água	Trço areia	Trço brita	Consumo De cimento
	g	g	g	%	g	g	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	%				kg
S.Efigênia	373,28	345,63	300,53	13,05	159,01	141,52	2,56	2,38	3,15	8,00	0,61	3,14	3,53	275,8
S.Cândida	502,52	457,20	393,38	13,96	216,10	177,28	2,69	2,61	3,15	9,91	0,71	2,78	3,39	298,4
Bacacheri	1407,50	1315,80	1153,40	12,34	741,10	412,30	2,80	2,54	3,15	6,97	0,56	2,54	4,56	284,8
Agronômica	352,94	320,85	275,21	14,22	139,05	136,16	2,73	2,48	3,15	10,00	0,70	2,98	3,05	299,5
Canelinha	378,34	361,70	319,08	11,78	200,48	118,60	2,67	2,51	3,15	4,60	0,39	2,78	4,70	279,5
S. J. Batista	429,02	397,98	350,48	11,94	171,10	179,38	2,73	2,42	3,15	7,80	0,65	3,78	3,60	259,7

O resultado apresentado na reconstituição de traço de Santa Efigênia, Santa Cândida e Bacacheri, mostram um consumo variando de 275,80 kg a 298,40 kg de cimento por m³, de concreto o que está dentro das expectativas, já que este é o consumo médio de cimento indicado para este tipo de obra.

O valor encontrado está dentro da expectativa, pois de acordo com a resistência medida, com a resistência especificada no projeto estrutural, o consumo mínimo de cimento esperado é de 300 kg/m³. Os valores encontrados para esses reservatórios, apesar de mais baixos ainda estão dentro da margem de erro do ensaio.

A quantidade excessiva de matéria orgânica (sementes, etc.) encontrada nos testemunhos do reservatório de São João Batista é um indicador da falta de qualidade desse concreto. Este é mais um motivo pelo qual deve-se dar continuidade às análises desse reservatório em particular.

4.9.5 – Determinação da quantidade do cloro em função da massa de cimento

Várias normas internacionais e também alguns trabalhos têm apresentado o teor crítico de cloretos em função da massa de cimento utilizada no concreto. Com a finalidade de comparar com esses valores é feita a transformação da quantidade de cloro por kg de concreto na quantidade de cloro por kg de cimento, obtendo-se os seguintes resultados:

Quadro 4.36 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Santa Efigênia (profundidade de 20 mm)

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	0.115 g/kg	0.10 %	0.09 %
Ensaio Fluorescência	0.254 g/kg	0.22 %	0.20 %

Quadro 4.37 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Santa Cândida (profundidade de 20 mm).

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	0.10 g/kg	0.08 %	0.08 %
Ensaio Fluorescência	0.58 g/kg	0.47 %	0.46 %

Quadro 4.38 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Bacacheri (profundidade 20 mm).

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	0.066 g/kg	0.06 %	0.05 %
Ensaio Fluorescência	0.347 g/kg	0.29 %	0.28 %

Quadro 4.39 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Agronômica (profundidade de 20 mm)

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	0.117 g/kg	0.09 %	0.09 %
Ensaio Fluorescência	0.420 g/kg	0.34 %	0.32 %

Quadro 4.40 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - Canelinha (profundidade de 20 mm)

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	0.089 g/kg	0.08 %	0.07 %
Ensaio Fluorescência	0.483 g/kg	0.41 %	0.39 %

Quadro 4.41 - Teor de cloro em função do consumo de cimento - São João Batista (profundidade de 20 mm)

Método de ensaio	Quantidade de cloro em relação ao concreto Valores médios	Teor de cloro em relação ao cimento calculado.	Teor de cloro em relação ao cimento c/ consumo de 300 kg/m ³ .
Ensaio químico	1.61 g/kg	1.48 %	1.28 %
Ensaio Fluorescência	0.46 g/kg	0.43 %	0.37 %

Com exceção de Roberts, citado por LIMA (1996), que prevê teor crítico de no mínimo 6 kg de cloro por m³ de concreto (supondo um consumo 300 kg de cimento) o que é muito elevado, os demais órgãos normativos, estabelecem teores de no máximo 0,4 % ou o equivalente a 1,2 kg de cloro por m³ de concreto com o consumo de cimento acima citado. Lembrando que órgãos como o ACI (American Concrete Institut) estabelece como teor crítico um valor acima de 0,2 %.

Adotando porém, um limite mais tolerante, ou seja 0,4 % em relação a massa de cimento, tem-se o seguinte quadro dos reservatórios:

Quadro 4.42 - Resumo do conteúdo de cloro por reservatório – teor crítico de 0,4 %

Reservatório	Ensaio químico	Fluorescência
Santa Efigênia	Não crítico	Não crítico
Santa cândida	Não crítico	Crítico
Bacacheri	Não crítico	Não Crítico
Agronômica	Não crítico	Não crítico
Canelinha	Não crítico	Crítico
São João Batista	Crítico	Crítico

Analisando os resultados observa-se que para o ensaio químico, apenas o reservatório São João Batista apresenta teores críticos de cloro. Já para o ensaio de fluorescência, 50 % dos reservatórios apresentam teores críticos. Vale lembrar que estas normas fazem referência ao cloro total e não apenas ao cloro livre, como é aquele determinado pelo ensaio químico.

Na realidade apenas S. João Batista tem o cloro já atacando a armadura, os demais reservatórios tem um potencial para o ataque que depende da carbonatação, como o que está ocorrendo com Canelinha e Agronômica.

Vale lembrar que o teor aqui determinado é para a profundidade de 20 mm, e que para a profundidade de 5 mm o teor é crítico para todos os reservatórios, neste índice de 0,4 %, no ensaio de fluorescência e em pelo menos 50% para o ensaio químico. Ou seja, há uma alimentação do cloro e se nada for feito, para que não se atinja o teor crítico a uma profundidade de 20 mm é apenas questão de tempo para haver danos mais sérios.

Ao considerar-se o teor de 0,2 %, conforme as normas japonesas e americanas, tem-se o seguinte quadro:

Quadro 4.43 - Resumo do conteúdo de cloro por reservatório – teor crítico de 0,2 %

Reservatório	Ensaio químico	Fluorescência
Santa Efigênia	Não crítico	Crítico
Santa cãndida	Não crítico	Crítico
Bacacheri	Não crítico	Crítico
Agronômica	Não crítico	Crítico
Canelinha	Não crítico	Crítico
São João Batista	Crítico	Crítico

Neste caso 100 % dos reservatórios tem um teor total de cloro a um nível crítico, enquanto 17 % tem um teor crítico de cloro livre.

Assim, justifica-se plenamente a urgência de se efetuar um tratamento impermeabilizante sob a laje de concreto com vistas a coibir a penetração dos íons de cloro.

Para o reservatório de São João Batista, além do tratamento de proteção, é importante um acompanhamento da armadura analisando seu estado real em toda a laje de cobertura. Esse reservatório realmente merece atenção especial sobretudo se for considerada sua idade que é de 12 anos, ou seja o mais novo dos reservatórios analisados.

A média de idade desses reservatórios é de 18,33 anos ou ainda 20 anos para os reservatórios de Curitiba e 17,7 anos para os reservatórios de Florianópolis. O que se observa é que este tempo é muito pequeno em termos de vida útil do concreto para ter um nível de cloro tão elevado. Se nada for feito para preservar estas estruturas e imaginando que sua vida útil seja de 50 anos, a estimativa é que em 10 ou 15 anos já se tenha sinais de deterioração muito severa o que pode implicar em sua desativação por um certo período de tempo.

É possível realizar também um estudo de viabilidade econômica para a retirada do cloro, pelo menos parte, daquela que está no interior do concreto. Existem equipamentos e métodos como o proposto por ISHIBASHI et al. (1995) que permitem este processo.

A revisão bibliográfica deixa claro algumas propostas para procedimentos de recuperação de estruturas, como pode ser visto na Figura 2.2, deste trabalho. Os fluxogramas apresentados no capítulo dois também podem servir de orientação para elaborar um plano de manutenção.

É comum entre os profissionais da área de engenharia civil, classificar um concreto bem proporcionado, misturado, lançado, como tendo por si só boa impermeabilidade. Ora, esta afirmação é incompleta, pois esses fatores não são suficientes para caracterizar um concreto impermeável. Ainda, cabe a pergunta: impermeável a que ? Um concreto não deve ser impermeável somente a líquidos, no caso de reservatórios a água. O concreto, como demonstrado

neste trabalho deve ser impermeável, também aos gases, ou seja, impermeável o suficiente para reduzir a carbonatação e impermeável o suficiente para impedir a penetração dos íons de cloro.

Dessa forma, uma atualização do manual de obras e saneamento com respeito a como obter um concreto impermeável, é um passo importante para garantir a durabilidade das estruturas de reservação.

4.9.6 – Análise estatística

A primeira análise que deve ser realizada é verificar se os dados tem distribuição normal, permitindo assim que se faça inferências a respeito desses dados. Para esta análise os dados foram agrupados conforme o tipo de ensaio (químico ou espectrometria de raio X) e conforme a profundidade amostrada (5mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm). Dessa forma verifica-se os seguintes dados:

- Os resultados do ensaio de espectrometria de raio X, tem distribuição normal para todas as profundidades.
- Os resultados do ensaio químico tiveram a hipótese de distribuição normal inicialmente rejeitada, a existência de valores espúrios.
- Eliminando-se os valores espúrios (no caso os resultados do reservatório São João Batista), os dados apresentaram distribuição normal.
- Existe uma correlação forte entre os dados obtidos pelo ensaio químico e ensaio de espectrometria de raio X, conforme pode ser observado na figura 4.17 abaixo.

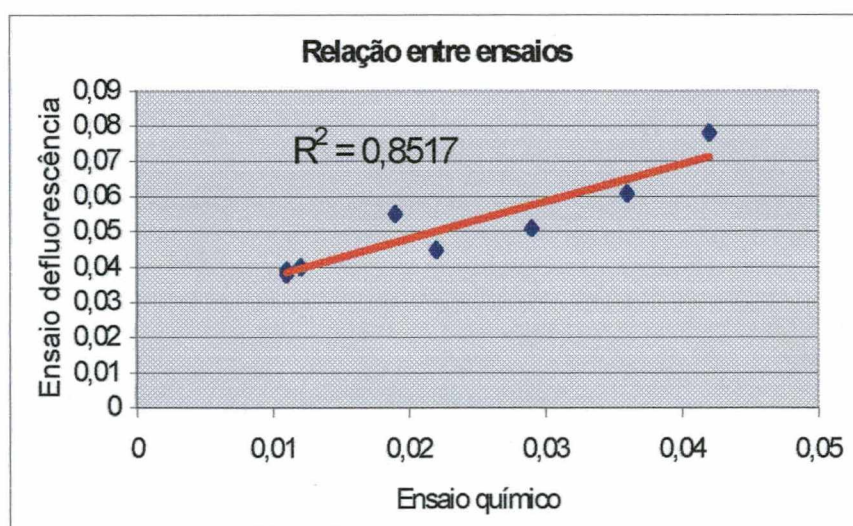


Figura 4.20 – Relação entre ensaios químico e de fluorescência

- Não existe correlação significativa entre a quantidade de cloro adicionado a água e o teor de cloro encontrado no interior do concreto conforme pode se observar pelas figuras 4.18 e 4.19. Isto pode significar que não importa a quantidade de cloro adicionada a água, até por que sempre há um desprendimento desse cloro para a atmosfera dos reservatórios e daí para o interior do concreto. Possivelmente a quantidade de cloro adicionada a água irá influir apenas na velocidade da assimilação desses íons cloreto pelo concreto. Deve se considerar no presente caso o pequeno número de reservatórios amostrados.

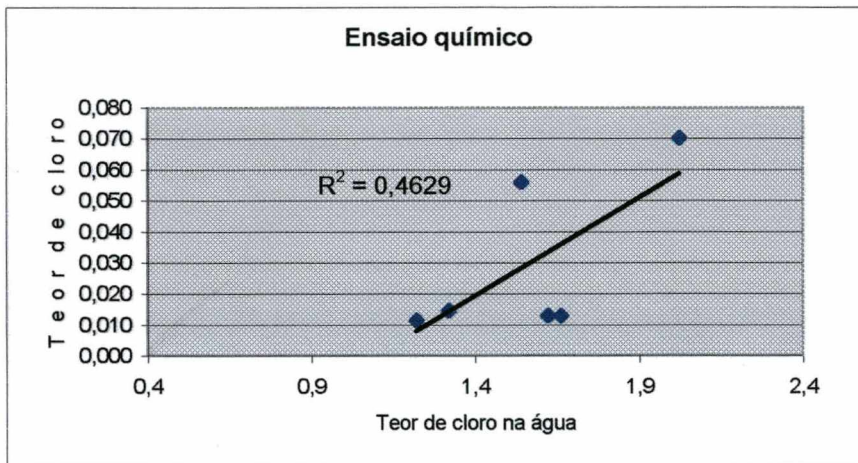


Figura 4.21 - Relação entre o teor de cloro na água e o teor de cloro encontrado no concreto. – Ensaio químico.

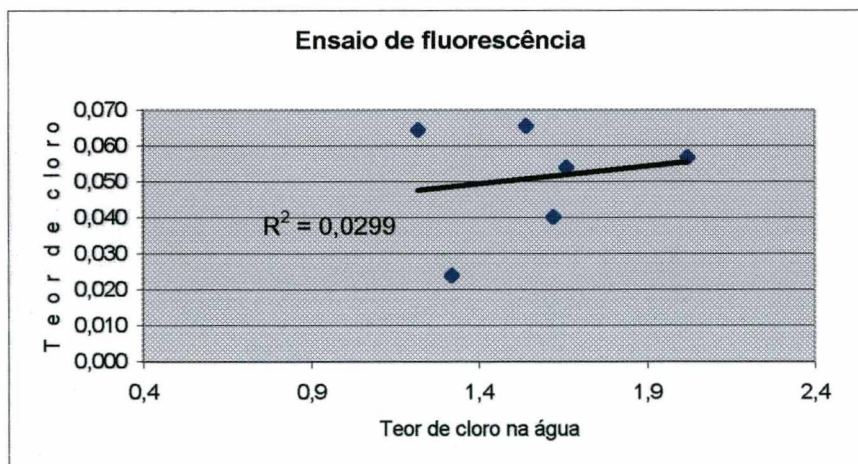


Figura 4.22 - Relação entre o teor de cloro na água e o teor de cloro encontrado no concreto. – Ensaio de Fluorescência.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – Conclusões da pesquisa

A pesquisa elaborada a respeito dos reservatórios de água potável mostrou a realidade das patologias que atingem essas estruturas. Apesar da aparente simplicidade que uma estrutura desse tipo apresenta, a análise global de todos os efeitos deletérios que elas sofrem requer um volume muito grande de informações cujo escopo foge deste trabalho, sobretudo ao considerar-se a grande quantidade de tipos de reservatórios existentes.

Assim, procurou-se limitar o estudo das patologias sobre os reservatórios apoiados ou semi-enterrados e especificamente sobre a laje de cobertura dessas estruturas, mesmo tendo ciência de que problemas idênticos afetam as paredes dessas estruturas. Não foi abordada tampouco a questão dos pequenos reservatórios (com volume inferior a 300 m^3).

A vistoria, ainda que apenas visual, destes reservatórios revelou uma quantidade significativa de fissuras e eflorescências (mais de 50%), que demonstram por sua vez, a existência de percolação d'água através das paredes, o que leva a crer que a impermeabilização desta parede, quando existente, não mais funciona, e 13 % com vazamento visível, isto é, com o concreto já deteriorado.

A corrosão de armaduras foi constatada apenas onde era visível a olho nu, bem como a de componentes, onde esta última é esperada, uma vez que o ferro desses componentes está em contato direto com o cloro desprendido da água.

Esta vistoria mostra que existem uma série de patologias que devem ser tratadas de forma conjunta, pois a sinergia que existe entre as elas leva a um aumento da velocidade da deterioração.

Há que se considerar que estas estruturas são relativamente novas, já que 18,3 anos de idade média para essas estruturas é um tempo curto, para apresentar esse nível de deterioração. O esperado é no mínimo 50 anos de utilização sem grandes interrupções. Para isto basta observar que reservatórios construídos na primeira metade deste século ainda estão em operação. A diferença era que o método construtivo da época era lento e custoso, o que é proibitivo nos dias de hoje, daí as atuais estruturas delgadas.

O ambiente em que estão inseridos estes reservatórios tem sua maior problemática na parte interna, ou seja no ar que fica preso entre a superfície livre d'água e a laje de cobertura. Externamente, pelo fato de se situarem em locais geograficamente mais elevados, não sofrem tanto com a poluição, sobretudo no caso de Florianópolis e região.

O dimensionamento adequado dos respiros durante o projeto dessas estruturas pode garantir uma melhoria deste ambiente interno com conseqüente diminuição de sua agressividade.

Adotando-se o índice de Langelier para classificar a água desses reservatórios, verifica-se que esta é reconhecidamente agressiva para o concreto, isto sem considerar a quantidade de cloro adicionada para sua desinfecção. Ou seja, este é mais um aspecto a ser considerado pelos projetistas na elaboração do projeto estrutural e executivo dos reservatórios de água potável e estruturas similares.

A extração dos testemunhos dos reservatórios revelou-se custosa e demorada. No entanto este detalhe pode ser facilmente contornado se a amostra de concreto for obtida com o reservatório vazio e com a permissão de acesso ao seu interior durante pelo menos 4 horas. Assim, ao invés de se extrair corpos cilíndricos de concreto, pode-se extrair bolachas de concreto com 2 ou 3 cm de espessura e diâmetro de 10 cm por exemplo, os custos e o tempo serão substancialmente reduzidos.

A presença da carbonatação em dois reservatórios, mostrou um concreto poroso e permeável, o que implica na necessidade premente de se impermeabilizar ou re-impermeabilizar a face inferior da laje de cobertura desses reservatórios. Esta necessidade se justifica pelo fato de que a carbonatação além de despassivar a armadura, dando origem ao processo de corrosão, também libera o cloro que está ligado ao aluminato de cálcio.

O ensaio de potencial de eletrodo é relativamente simples, mas tem algumas dificuldades que por sua vez podem ser contornadas com a utilização de equipamento próprio que efetua a leitura sem a necessidade de se descobrir parte da armadura e diminui consideravelmente a margem de erro.

A grande dificuldade para a realização deste ensaio foi a de encontrar a armadura para fazer parte da conexão do eletrodo, tendo em vista as resistências superiores a 60 MPa do concreto. Por outro lado a impossibilidade de se acessar essas lajes pela face inferior, fez com que este ensaio perdesse sua finalidade neste trabalho. Mesmo assim, com todas as limitações deste ensaio e naqueles reservatórios onde foi realizada essa medição, encontrou-se regiões de corrosão de armadura. Este fato significa que pelo menos outros ensaios devem ser feitos, pois, se a

armadura superior, teoricamente a mais protegida, encontra-se em regiões de corrosão, o que se pode afirmar da armadura inferior ?

O ensaio de resistência desse concreto, só pode ser realizado pelo fato de ser ter extraído testemunhos e não bolachas de concreto e, mostrou que todas as lajes estão com a resistência a compressão superior a do projeto, mas em alguns, a exemplo do reservatório de São João Batista essa resistência é inferior àquela esperada para um concreto de 15 a 25 anos.

As resistências mais baixas foram encontradas justamente nos reservatórios que apresentaram o fenômeno da carbonatação, o que está dentro das expectativas.

A densidade do concreto está dentro do esperado, ou seja: 2,47 t/m³ para os reservatórios da região de Curitiba e 2,40 t/m³ para os reservatórios da região de Florianópolis.

Os agregados encontrados, são comuns na região onde se situam esses reservatórios, ou seja o agregado graúdo é o granito e a areia média também é comum nesta região.

O aço utilizado é o CA50A, especificado nos projetos e em apenas um reservatório encontrou-se sinais de corrosão severa, com mais de 50% da seção comprometida. Nos demais reservatórios apenas sinais de início de corrosão. Cabe ressaltar que as armaduras foram encontradas com cobertura variando de zero (armadura exposta) a 4 cm. Esse cobertura de 4 cm deve-se a outros fatores e não o que foi especificado no projeto. Os projetos dos reservatórios analisados, sempre estabelecem cobertura de armadura de 2 cm, mostrando um certo desconhecimento da agressividade do ambiente a que está submetido o concreto desses reservatórios.

A quantidade de cloro encontrada nos reservatórios variou bastante de acordo com o método utilizado para sua determinação. O ensaio químico, o mais comumente utilizado, mostrou que existe cloro em todos os reservatórios examinados e que o teor crítico a uma profundidade de 2 cm (equivalente ao cobertura de projeto das armaduras) foi encontrado em apenas um deles, aliás com percentual absurdamente elevado, ou seja 1610 ppm em média.

Lembrando ainda que o teor crítico varia de país para país e o adotado aqui para comparação foi de 250 ppm ou 0,25 g de cloro por quilograma de concreto ou ainda 2 g por quilograma de cimento. Considerando a idade dessas estruturas e a expectativa de vida útil, esse teor mostra uma tendência de crescimento.

A diferença do ensaio químico para o ensaio de fluorescência, é que o ensaio químico determina apenas o cloro que pode ser lavado pela água deionizada (destilada), ou seja o cloro livre, que é o cloro que ataca a armadura. O ensaio de fluorescência, por sua vez, determina o cloro livre o cloro ligado (que forma o cloroaluminato de cálcio). A importância desse fato fica

notória enquanto existir o fenômeno da carbonatação que, libera o cloro, transformando-o em íons livres.

Apesar destas diferenças, existe forte e diretamente proporcional relação entre os ensaios químico e de fluorescência (ou espectrometria de Raio X), ou seja quando o ensaio químico indica forte presença de íons livres no concreto, o ensaio de fluorescência também faz a mesma indicação, apesar dos valores apontados serem maiores.

Ainda, o teor crítico a que as normas internacionais se referem é ao cloro total e não apenas ao cloro livre. Assim, se considerarmos o cloro total, pode-se afirmar que todas as estruturas de reservação têm um teor crítico de cloro a profundidade de 2 cm.

Fica aqui registrado que o fato dessas estruturas terem um teor crítico de cloro a esta profundidade, não significa em hipótese nenhuma que estão condenadas ou com a vida útil esgotada. Significa sim, que o cloro já iniciou seu processo de corrosão e que medidas preventivas devem ser adotadas, sob pena de se correr um risco elevado de acidentes que apesar de não serem fatais, geram um custo social relativamente elevado. Basta para isso imaginar um reservatório sendo interditado por apenas uma semana para sua manutenção.

Considere como agravante, o fato de não existir um programa específico de manutenção preventiva e muito menos uma preocupação constante com o monitoramento da situação dessas estruturas.

5.2 – Medidas preventivas para ampliar a vida útil dos reservatórios

5.2.1 – Para as estruturas existentes

Considera-se aqui como medidas preventivas, aquelas que permitem um prolongamento da vida útil dos reservatórios e que são tomadas antes do colapso dessa estrutura. Assim, para os reservatórios existentes, propõe-se:

- a) Elaboração de um plano de manutenção a curto e médio prazos, conforme modelos de fluxogramas apresentados.
- b) Execução de ensaios que permitam verificar o estado de corrosão de armaduras.
- c) Elaboração de ensaios periódicos para monitorar o crescimento da quantidade de cloro no interior da laje de concreto, mesmo estando estas impermeabilizadas.
- d) Impermeabilizar ou re-impermeabilizar imediatamente todas as faces inferiores das lajes de coberturas desses reservatórios.

- e) Dar atenção especial para o caso do reservatório de São João Batista, pois apresentou um alto grau de patologias.
- f) Elaborar tratamento de recuperação das armaduras corroídas naqueles reservatórios que apresentam este problema.
- g) Medir e monitorar a quantidade de cloro livre na atmosfera interna dos reservatórios.

5.2.2 – Para novos projetos de estruturas de reservação

- a) Adotar f_{ck} mínimo de 25 MPa para essas estruturas. (O ideal seria 45 MPa).
- b) Prever nos projetos estruturais um cobrimento mínimo de 4 cm para a face inferior das lajes e a parte interna das paredes laterais.
- c) Redimensionar os respiros dos reservatórios a fim de melhorar a ventilação interna.
- d) Prever impermeabilização semi flexível para o teto, piso e todas as paredes internas desses reservatórios.
- e) Adotar cimentos que possibilitem obtenção de concreto resistente aos ataques dos cloretos tais como os especificados no Quadro 1.3 deste trabalho.

5.3 – Continuidade da pesquisa

As pesquisas realizadas tiveram uma séria de limitações, sobretudo na utilização de equipamentos, assim essa pesquisa pode ter continuidade sob os seguintes aspectos:

- a) Extrair uma quantidade maior de amostras de concreto, obtendo-se bolachas e não testemunhos (assim se reduz o custo), para a determinação dos cloretos totais no concreto desses reservatórios, adotando uma quantidade de reservatórios maior, medindo inclusive a quantidade de cloro livre no ambiente interno dos reservatórios.
- b) Utilizar o ensaio de porosimetria a mercúrio para caracterizar a porosidade e possibilitar a estimativa da permeabilidade desse concreto, utilizando também o microscópio de varredura eletrônica para identificar e caracterizar o cloro no interior do concreto.
- c) Efetuar tratamento eletroquímico em amostras desse concreto com a finalidade de remover o cloreto de seu interior, verificando sua eficiência.

- d) Realizar estudos dos efeitos deletérios do cloro sobre o concreto das paredes dos reservatórios de água potável.
- e) Estudar o comportamento de diversos impermeabilizantes frente a água clorada, submetendo-os a ambientes com teores usuais de gás carbônico.
- f) Estudar a reconstituição de traço para o concreto feito com cimento pozolânico, uma vez que o método da dissolução em ácido clorídrico não serve para este tipo de cimento. Pode-se partir da proposta de se analisar a quantidade de componentes no concreto, na brita e na areia, subtraindo a quantidade desses compostos do total.

Neste trabalho foram realizadas uma série de pesquisas que esclarecem de modo parcial os efeitos negativos do cloro sobre a estrutura de concreto desses reservatórios. A plena aplicação desses resultados depende, entretanto, dos esforços feitos para integrar as diversas pesquisas que estão sendo realizadas.

6 – BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test method for water-soluble chloride in mortar and concrete* - C 1218-92 Annual Book of ASTM standards. Philadelphia - 1995. 3p.
- *Standard test for chemical analysis of hydraulic cement* - C 114-94 - Annual Book of ASTM standards. Philadelphia - 1994. 28p.
- ANDRADE, M. C. - *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras* - São Paulo, Pini - 1992. 104p.
- ANDRADE, J., DAL MOLIN, D. - *Considerações quanto aos trabalhos de levantamento de manutenção patologia e formas de recuperação em estruturas de concreto armado*. IV congresso Ibero Americano de patologia das construções – Anais –VI p. 321-328 Porto Alegre - RS - 1997.
- ANDRADE, J., DAL MOLIN, D. - *Influência da agressividade ambiental nas patologias em estruturas de concreto armado nas cidades de Porto Alegre e Recife*. Anais - Workshop - Durabilidade das construções – p.127-134 - São Leopoldo - RS - 1997.
- ARANHA, P. e DAL MOLIN, D. C. C. - *Procedimentos inadequados nas diversas etapas do processo construtivo que contribuem para redução do tempo de vida útil das estruturas de concreto*. Anais da 37ª reunião do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto p. 323-336 - Goiânia GO - 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - *Barras e fios de aço destinados a armaduras para o concreto armado* - NBR 7480 - RJ - 1996. 7p.
- *Convenções, grandezas e unidades de medidas aplicáveis a ensaios eletroquímicos de corrosão* - NBR 9106 - RJ - 1995. 9p.
- *Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto*. NBR 7680 - RJ - 1983. 8p.
- *Projeto e execução de obras de concreto armado* - NBR 6118 RJ - 1978. 53p.
- *Projeto de estruturas de concreto armado protendido. Procedimentos*. - NBR 7197 RJ - 1989. 71p.
- *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Procedimentos* - NBR 9062 - RJ - 1995.36p.

- ATKINS, P. W. - *Physical chemistry* - 4ª edição - Oxford University Press - England - 1990.
- AZEVEDO NETTO, J. M. - Reservatórios de Distribuição. Limpeza e Desinfecção. Conversação e Segurança - *Operação e Manutenção de Sistemas de Distribuição de Água* p.279-292- USP São Paulo SP - 1973
- BALAYSSAC, J. P. - *Relations entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons* - Thèse doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse - França - 1992. 136p.
- BAUER, E. - *Análise comparativa do comportamento de concretos adicionados com escória frente a corrosão de armaduras* - Anais do congresso brasileiro de cimento p.5-19- Associação Brasileira de Cimento Portland São Paulo SP - 1996.
- BROOMFIEL, J. P. *Corrosion of steel in concrete - understanding, investigation and repair* - E&FN Spon - London SE1HN - UK - first edition - 1997
- CAMARINI, g. ET ALII - *Cura térmica - característica do início de hidratação dos cimentos com escória* - Anais do congresso brasileiro de cimento Portland p.21-26 Associação brasileira do cimento portland - São Paulo SP - 1996.
- CAMPITELI, V. C. - *A porosidade do concreto e a sua modificação com o uso de algumas adições* - USP - Dissertação engenharia civil - São Paulo SP - 1985. 111p.
- CARRIO, J. M. - *Patologia de cerramientos y acabados arquitectonicos* - Munilla- Leria - Madrid - Espanha - 1997. 398p.
- CASCUDO, O - *O controle da corrosão de armaduras em concreto - Inspeção e técnicas eletroquímicas* - editora Pini - São Paulo SP - 1997. 237p.
- CERON, C. - *Estudo da durabilidade de cimentos* relatório - Cia de Cimento Portland Rio Branco - Rio Branco do Sul PR - 1998.
- CINCOTTO, M. A, - *Águas agressiva ao concreto parte 1 mecanismos de deterioração de concretos* apostila USP engenharia civil - 1998. 13p.
- COSTA E SILVA, Jr., *A Indústria da água como atividade econômica* - revista Bio da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES - Ano VIII, número 1, jan/mar 1996. Curitiba - PR - 1992.
- DAL MOLIN, D. C. C. - *Fissuras em estruturas de concreto armado - análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul* - Dissertação engenharia civil - UFRGS Porto Alegre RS - 1988. 220p.
- CETESB - Cia de tecnologia de saneamento ambiental - *Determinação do grau de agressividade do meio aquoso ao concreto* - procedimento - L1.007 - São Paulo SP - dez/1988. 11p.

- CONCRETO, *ENSAIOS E PROPRIEDADES* - compêndio editado por Furnas Centrais elétricas S/A capítulo 18 - agentes agressivos ao concreto- 1997. 25p.
- DOCOL - *Seminário Nacional da Construção Civil*. Palestra proferida pela Docol - setembro 1994 - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Curitiba - PR.
- FARIAS, R. F. S. - *Corrosão das armaduras do concreto, mecanismos de controle* - Dissertação mestrado engenharia civil USP - SP - 1991. 117p.
- FIGUEIREDO, E. P. - *As técnicas eletroquímicas e o estudo da durabilidade do concreto armado*. Workshop - durabilidade das construções p. 93-106 - Anais - São Leopoldo - RS - 1997.
- FIGUEIREDO, E. P. - *Concreto com armaduras corroídas: avaliação de reparos através de técnicas eletroquímicas* anais Seminário da qualidade e durabilidade de estruturas de concreto p.34-48 - Porto Alegre - RS - 1993.
- GENTIL, V. - Corrosão - editora Guanabara Dois - Segunda edição - 1985 - Rio de Janeiro - RJ.
- GEYER, A. L., e GREVEN, H. A. - *A diminuição da permeabilidade do concreto mediante o uso de uma manta geotextil como revestimento interno das formas* anais - Seminário da qualidade e durabilidade de estruturas de concreto p.97-108 - Porto Alegre - RS - 1993.
- GEYER, A. L. B. et ali - *Permeabilidade do concreto como um dos principais fatores determinantes da durabilidade dos reservatórios de água* - Anais da 37ª reunião do IBRACON p.1005-1016 - Instituto Brasileiro do Concreto - Goiânia - 1995.
- GARBOCZI, E. -J. - *Microstructure and transport properties of concrete* - RILEM - Technical committee TC-116 - Performance and concrete criteria as a criterion of its durability. P.198-213 - Chapman Hall - first edition - London - 1995.
- GONZÁLEZ, J. A. et al. - Some questions on the corrosion of steel in concrete - part I: *when, how and how much steel corrodes* - Matériaux et constructions, vol. 29. p.40-46 Jan/feb 1996.
- GONZÁLEZ, J. A. et al. - Some questions on the corrosion of steel in concrete - part II: *Corrosion mechanism and monitoring, service life prediction and protection methods* - Matériaux et Constructions, vol. 29.p.97-104 - Jan/feb 1996.
- HELENE, P. R. - *Corrosão em armaduras para concreto armado* - Editora Pini, IPT - Instituto de pesquisas tecnológicas de São Paulo 47p. - SP - 1997.
- Introdução a durabilidade no projeto das estruturas de concreto - Workshop - Durabilidade das construções p.31-42 - São Leopoldo - RS - 1997.

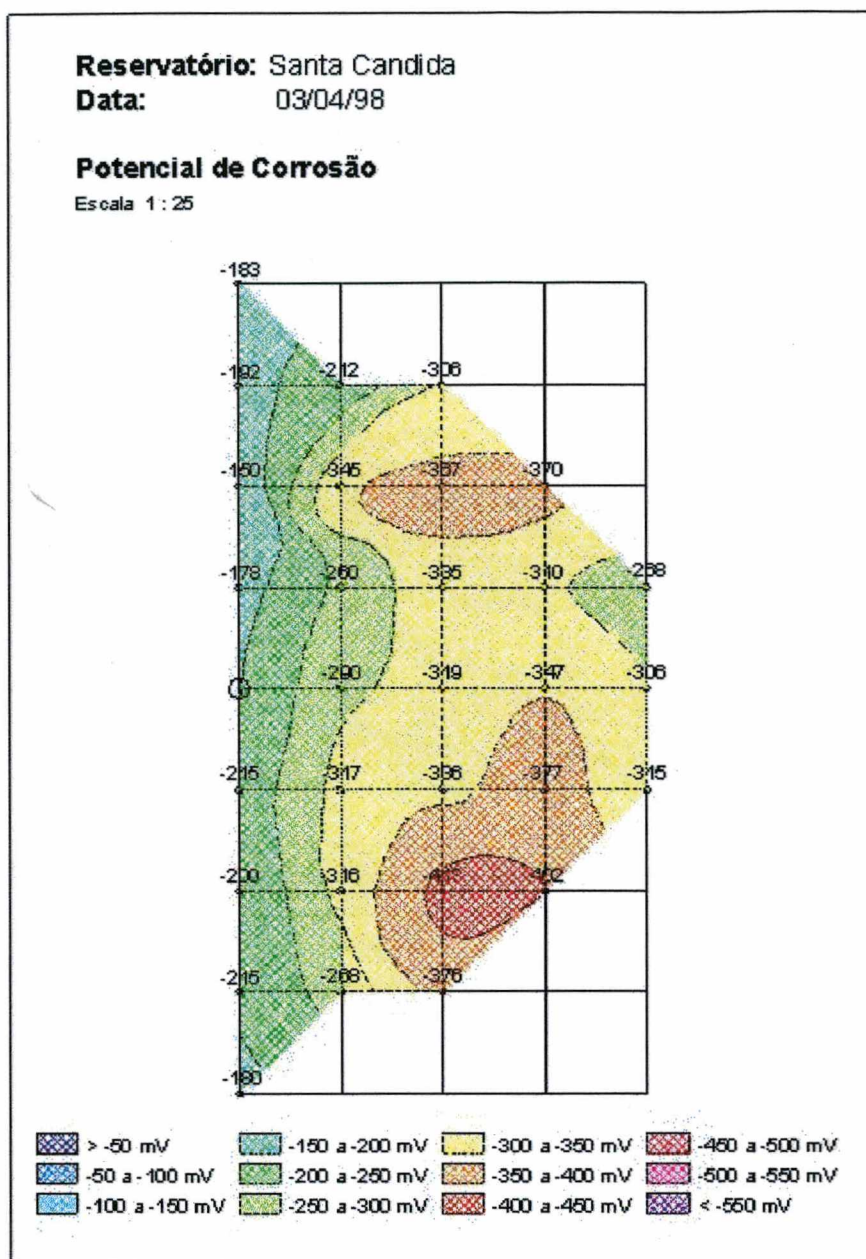
- Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado - Tese de livre docência - USP - SP - 1993. 231p.
- HENRIKSEN, C. F. - *Prediction of service life and choice of repair strategy - Durability of Building Materials and Components* p.1100-1106 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon - 1993.
- ISHIBASHI, K. et al.; - *Chloride removal from reinforced concrete by means of electrochemical treatment* - p.615-624 *Concrete under severe conditions: environment and loading* - Tokio - Japão - 1995.
- JOHN, V. M. E TUDISCO, M. - *Durabilidade e carbonatação do concreto na revisão da NBR 6118* - anais Seminário de qualidade e durabilidade das estruturas de concreto p.62-74 - Porto Alegre - RS - 1993
- KAZMIERCZAK, C. S. - *Contribuição para análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra carbonatação* - USP - Tese engenharia civil - SP - 1995. 168p.
- KLEIN, D. L. E NANNI, L. F. - *Tecnologia do microconcreto - estudo da influência do tamanho do corpo de prova nas resistências f_{cj} e f_{tj}* - caderno da engenharia - CE- 33/90 - Curso de pós-graduação em engenharia civil - UFRGS - Porto Alegre - RS - 1990. 84p.
- KROPP, J. *Relations between transport characteristics and durability* - RILEM - Technical committee TC-116 - Performance and concrete criteria as a criterion of its durability.p.97-138 Chapman - Hall - first edition - London - 1995.
- KROPP et al. *Transport mechanisms and definitions* - RILEM - Technical committee TC-116 - Performance and concrete criteria as a criterion of its durability. P.4-15 Chapman - Hall - first edition - London - 1995.
- LASKAR, A.I., KUMAR, R., BHATTACHARJEE, B. - *Some aspects of evaluation of concrete through mercury intrusion porosimetry*. Cement and Concrete Research - vol. 27 n. 1 - p. 93 - 105 - 1997.
- LETSCH, R. H. - *Indication of Free Chlorine ions in concrete - Durability of Building Materials and Components* p.289-294 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon - 1993.
- LIMA, M. G. - *Inibidores de corrosão - Avaliação da eficiência frente a corrosão de armaduras provocada por cloretos* - tese engenharia civil - USP - SP - (1996)

- MARUYA T. et alii - *Simulation of chloride ion movement in hardened concrete – Durability of Building Materials and Components* p.953-963 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- McGRATH e HOOTON, R. D. - *Influence of voltage on chloride diffusion coefficients from chloride migration tests* - Cement and Concrete Research - vol. 27 número 1 p.1239-1244 - USA - 1996.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, J.M. - *Concreto, Propriedades, estruturas e materiais* - editora Pini - 1994 - São Paulo - SP. 573p.
- MELO, E. B. - *O índice de sazonalidade aplicado – revisão da oferta e demanda da água – SANARE – Revista Técnica da SANEPAR, V3 – N3 – Curitiba – PR – 1995.*
- MENDES, N. - *Modelos de previsão da transferência de calor e umidade em elementos porosos de edificações* - Tese engenharia mecânica - UFSC - 1997.
- MIYAKE, E. T.; DJANIKIAN, J. G.; *Permeabilidade do concreto a gases* - Anais da 37ª reunião do IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto– Goiânia - 1995. 13p.
- NAKURA et alii - *Evaluation method for long term watertightness of concrete structures considering deterioration* - Durability of Building Materials and Components - p. 1125-1132 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- NEVILLE, A. M. - *Maintenance and durability of structures* – Concrete International vol.19 n.11p. 52-56 nov/1977 USA
- *Propriedades do concreto*, 2a. ed. - Editora Pini 827p. - São Paulo - SP - 1997.
- NILSSON, L.O. e LUPING, T. - *Relations between different transport parameters* - Technical committee TC-116 - Performance os concrete criteria as a criterion of its durability.p.15-31 Chapman - Hall - first edition - London - 1995.
- NILSSON, O. E TANG, L. - *A study of the relashionship between air permeability and chloride diffusivity in concrete* – Durability of Building Materials and Components p.249-258 Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa – E & FN Spon.- 1993.
- OLIVEIRA, W. E. et alii. - *Técnica de abastecimento e tratamento de água* - Vol.1 Abastecimento de água - 2ª ed. - Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Defesa do Meio Ambiente - CETESB - São Paulo - 1978.
- OLLIVIER, J. et al. - *Durability of Concrete* Boletim técnico da EPUSP - T/PCC/192 - USP – São Paulo - 1998. 130p.

- OLLIVIER, J. et al. - *Parameters influencing transport characteristics* - Technical committee TC-116 - Performance of concrete criteria as a criterion of its durability. p.33-97 - Chapman - Hall - first edition - London - 1995.
- OSHIRO, T.; YAMADA, Y.; TANIKAWA, S.; GOTO, N.; - *Deterioration of RC building under marine environment* p.523-532 - Concrete under severe conditions: environment and loading - Proceedings of the international conference on concrete- CONSEC'95 Tokyo - Japão - 1995.
- PETRUCCI, E. G.R. - *Concreto armado de cimento portland* - 7ª ed. - Editora Globo - Porto Alegre - RS - 1980.
- PRUDÊNCIO Jr., L. R. - *Contribuição a dosagem do concreto projetado* - Universidade de São Paulo - Tese doutorado engenharia civil - SP - 1993a.
- *Durabilidade do concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos* anais - Seminário de qualidade e durabilidade das estruturas de concreto p.1-13 - Porto Alegre - RS - 1993b.
- RECOMENDACIONES Y MANUALES TÉCNICOS - *Estructuras y edificación* (E-2) Durabilidad de estructuras de Hormigón - Guia de Diseño CEB - GEHO-CEB Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Espanha - 1993. 164p.
- RODRIGUES, J. C. - *Detectando a corrosão com os potenciais semi-pilha*. Revista Recuperar p. 4 -9, julho/agosto 1995.
- SANJUÁN, M. A. e MUÑOZ MARTIALAY R., - *Variability of the concrete air permeability coefficient with the time*. - Building and Environment, vol. 32, n. 1 p.51-55 - 1997.
- SARKIS et ali - *Alternativa para estrutura de reservatórios resistentes a patologias de origem térmica* - IV congresso Ibero americano de patologia das construções - Anais p.295-305 - Porto Alegre - RS.
- SASAY, S. e SEKIGUCHI, T. - *Research on degree of deterioration of RC slabs suffering from chloride damage and protective measures* - Durability of Building Materials and Components p.1285-1293 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- SILVA, P. F. A - *Permeabilidade do concreto uma medida de durabilidade* - revista do IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto, ano III, n.8 - 1993.
- SILVA, P. F. A. , DJANIKIAN, J. G. - *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana* - Boletim técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de engenharia de construção civil - BT/PCC/109 - São Paulo - 1993

- SILVA, F. L. C. P. - *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito de permeação de água e da adição de microssilica* - Dissertação mestrado engenharia civil - UFRGS - Porto Alegre - RS - 1994. 143p.
- SOUZA, V. C. M. Et alii - *As normas brasileiras e a durabilidade das estruturas. Comparações com o B. I. Número 183 da CEB* - Anais do Encontro nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Florianópolis - SC - 1995.
- SJÖSTRÖM, C. - CIB W80/RILEM 140 TSL - *On service life prediction methodologies and research needs*. anais Workshop durabilidade das construções - UNISINOS p.13-17 - São Leopoldo RS - 1997.
- SUGIYAMA, T. Et alii - *Effect of stress on chloride permeability in concrete* - Durability of Building Materials and Components p.239-248 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- TUMIDAJASKI, P. J. e CHAN, G. W. - *Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity* - Cement and Concrete Research - vol. 27 n. 1 - p. 551 - 556 - 1996.
- WANG, X. M. e ZHAO, H. Y. - *The residual service life prediction of RC structures* - Department of civil engineering, Tsinghua University, Beijing, China - Durability of Building Materials and Components - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- YOSHIZAKI, Y. Et alii - *Chloride migration in concrete* - Durability of Building Materials and Components p.259-268 - Edited by S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa - E & FN Spon.- 1993.
- YUNES, P. R. - *Determinação da distribuição de poros de uma argamassa de cimento e cal usando as isotermas de equilíbrio e dados de microscopia eletrônica* - Dissertação engenharia mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis - 1992.123p.

A N E X O I: Resultados do ensaio de potencial de eletrodo.



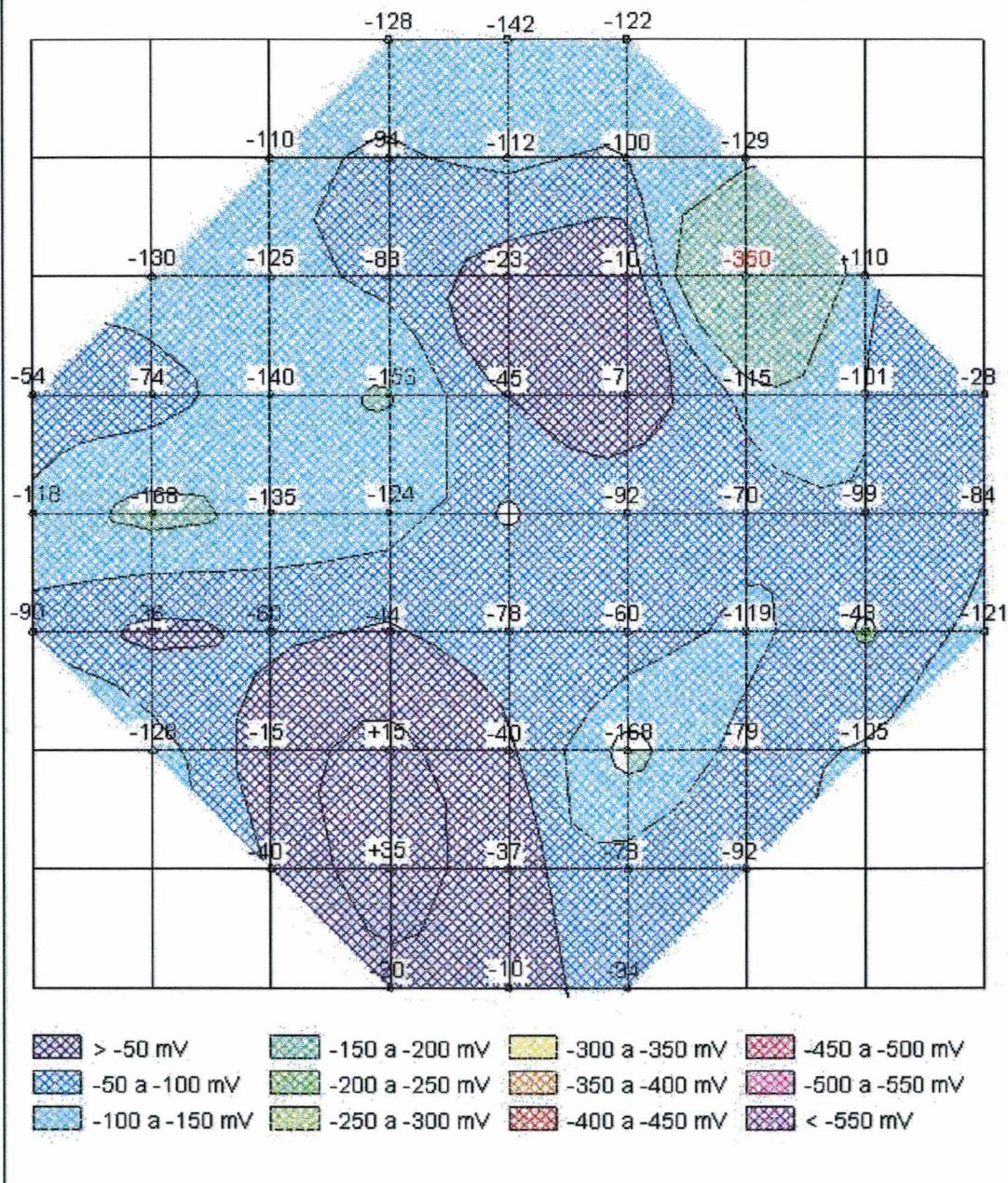
Esta imagem mostra os resultados do ensaio do potencial de eletrodo para o reservatório de Santa Cândida, onde os pontos mais escuros (em vermelho) indicam que nesta área há uma probabilidade de 95% de estar havendo corrosão na armadura.

Reservatório: Bacacheri

Data: 22/04/98

Potencial de Corrosão

Escala 1 : 25



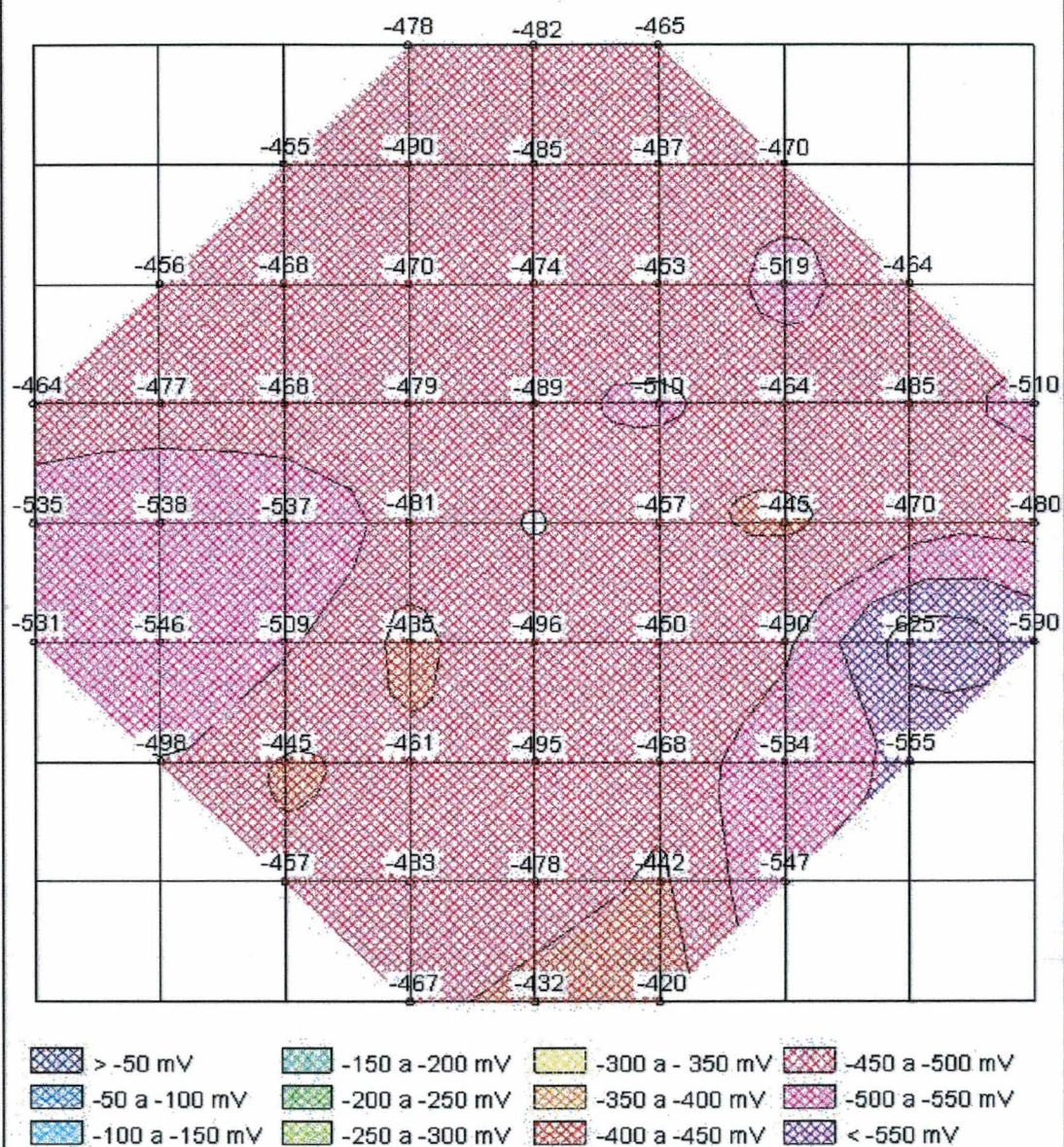
Diferente do reservatório Santa Cândida, o mapa de potencial do Bacacheri, não acusou nenhuma probabilidade de estar havendo corrosão de armaduras.

Reservatório: Mercês

Data: 27/04/98

Potencial de Corrosão

Escala 1 : 25



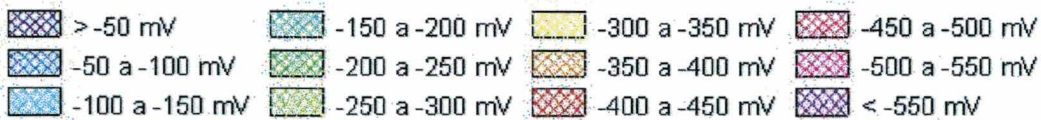
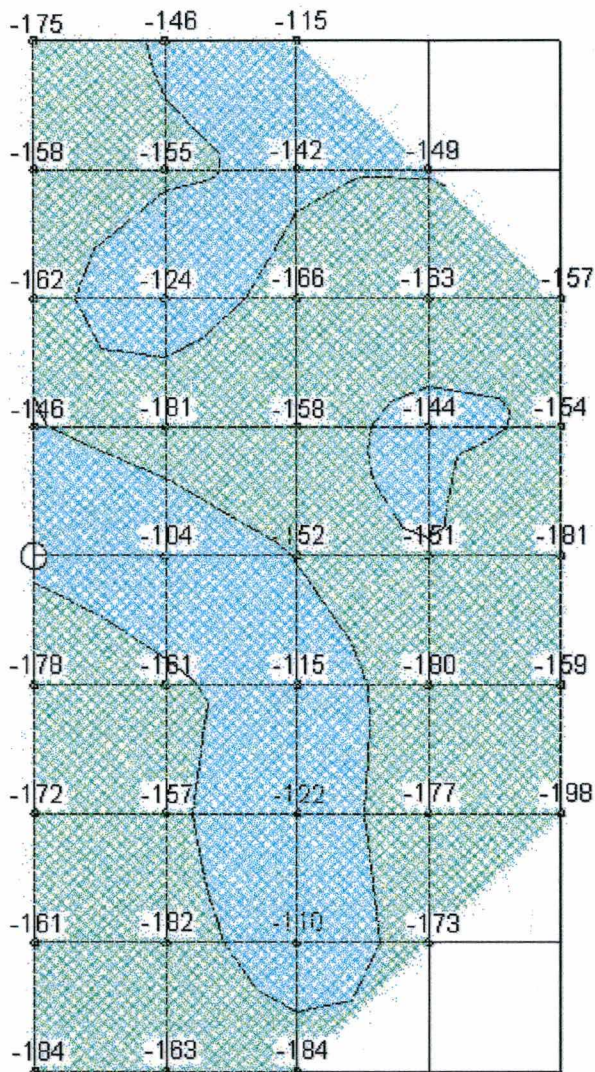
Para o caso do reservatório Mercês, o problema ocorrido foi a excessiva umidade que causou uma transferência de elétrons através da água, mascarando o resultado ao acusar corrosão em 100 % da área.

Reservatório: Portão

Data: 30/04/98

Potencial de Corrosão

Escala 1 : 25



Assim como o reservatório do Bacacheri, este reservatório não acusou nenhuma probabilidade de estar havendo corrosão das armaduras.