



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Hazen Willian Bezerra Pereira**

**IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES GERAIS DE  
CONSERVAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS INTEGRANTES  
DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE NATAL**

**Natal**

**2014**

Hazen Willian Bezerra Pereira

**IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES GERAIS DE  
CONSERVAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS INTEGRANTES  
DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE NATAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Co-orientador: Prof. Dr. José Neres da Silva Filho

Natal

2014

Biblioteca Pública Câmara Cascudo

Catálogo de Publicação na Fonte

(RN): UFRN,	P436i	Pereira, Hazen Willian Bezerra.
Almeida de Sá		Identificação das condições gerais de conservação nos Reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de água de Natal / Hazen Willian Bezerra Pereira. - Natal
em		2014.
do Norte,		154 p. : il. (Arquivo do autor – fotografia)
		Orientador: Prof. <sup>a</sup> . Dr. <sup>a</sup> . Maria das Vitórias Vieira
		Co-Orientador: Prof. Dr. José Neres da Silva Filho Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
		Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande
		como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em
		Engenharia Civil.
		Inclui Referências
		1. Água – Reservatórios. 2. Água Natal (RN) – Conservação de Reservatórios. 3. Reservatórios – Recuperação. 4. Patologia – Durabilidade. 5. Recuperação – Concreto. I. Título. II. Orientador.
	2014/06 CDU 628(813)	

Hazen Willian Bezerra Pereira

# **IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES GERAIS DE CONSERVAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS INTEGRANTES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE NATAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Presidente e Orientadora  
(UFRN)

---

Prof Dr. José Neres da Silva Filho – Co-orientador (UFRN)

---

Prof Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza – Examinador Externo  
(UFRN)

---

Prof Dr. José Getúlio Gomes de Souza – Examinador Externo (UNIVASF)

# IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES GERAIS DE CONSERVAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS INTEGRANTES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE NATAL

Hazen Willian Bezerra Pereira

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Co-orientador: Prof. Dr. José Neres da Silva Filho

## RESUMO

As obras de infraestrutura englobam áreas estratégicas para o desenvolvimento da sociedade. Neste âmbito as obras de saneamento são de suma importância para o desenvolvimento social. Com o fornecimento de água em quantidade suficiente e qualidade satisfatória, juntamente com a coleta e o devido tratamento dos efluentes domésticos, a sociedade torna-se menos susceptível às doenças de veiculação hídrica. Tanto o Sistema de Abastecimento de Água quanto o de Esgotamento Sanitário dependem, para seu perfeito funcionamento, de reservatórios, seja para o acúmulo de água para atendimento da população, seja para a devida retenção e tratamento dos efluentes domésticos. Essas estruturas apresentam características bem específicas de utilização, porque o microclima criado em seu entorno caracteriza-se pela elevada umidade relativa do ar e pela presença de substâncias danosas ao concreto, como os íons cloretos presente na água. Os reservatórios que integram o Sistema de Abastecimento de Água de Natal foram, em sua maioria, construídos entre as décadas de 1970 e 1980, período em que o meio técnico-científico não dispunha de estudos aprofundados sobre o mecanismo de deterioração do concreto armado. Por isso, esses reservatórios sofrem com o processo acelerado de degradação, apresentando diversas manifestações patológicas visivelmente identificáveis. Diante dessa problemática este trabalho visa identificar as condições gerais de conservação dos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal. Objetivando desenvolver um plano de recuperação para esses reservatórios, neste trabalho realizou-se o levantamento das manifestações patológicas apresentadas em

cada um dos reservatórios, com a realização de visitas *in loco*, registro fotográfico das manifestações e a realização de ensaios de campo. A etapa posterior consistiu na aplicação da metodologia GDE/UnB – reformulada por Fonseca (2007). Na etapa de visita técnica a cada um dos reservatórios foram avaliadas a profundidade de carbonatação, por meio da aspersão de solução de fenolftaleína a uma concentração de 1%; avaliação da contaminação por cloretos, por meio da aspersão de solução de nitrato de prata a uma concentração de 1%, e a avaliação das aberturas de fissuras. Após a realização dos ensaios, constatou-se que os reservatórios objeto deste estudo encontram-se em avançado estado de deterioração, apresentando como manifestações patológicas recorrentes a presença de fissuração inaceitável, manchas e eflorescências e corrosão das armaduras, devido, principalmente à carbonatação, e em alguns casos, a contaminação por cloretos. Após a obtenção dos resultados e a realização de sua concatenação, foi possível hierarquizar, por meio da aplicação da metodologia GDE/UnB, a ordem que os reservatórios devem sofrer intervenções para recuperação de sua vida útil e condições iniciais de segurança.

**Palavras-chave:** patologia, durabilidade, concreto.

# IDENTIFICATION OF CONDITIONS OF CONSERVATION OF THE RESERVOIR MEMBERS OF WATER SUPPLY SYSTEM OF NATAL

Hazen Willian Bezerra Pereira

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria das Vitórias Vieira Almeida DE SÁ

Co-orientador: Prof. Dr. José Neres da Silva Filho

## ABSTRACT

Infrastructure works are included in strategic areas for the social development. For that matter that all of the investments are very important for the social development. When the population has enough water and an acceptable quality, and it includes a wastewater gathering and its treatment, the whole society became less susceptible to the water diseases. Even the Water Supply and the Sewage depend for its perfect operation of reservoirs, or of the accumulation of water to provide the popular necessity, either due to retention or for the treatment wastewater. These structures present very specific environmental conditions, because the microclimate created around them, like high environmental humidity and for the existence of many harmful substances for the concrete, such as chloride ions presents in water. The reservoir that compose the System of Water Supply of Natal were built between 1970s and 1980s, a period whom the technical and scientific community did not have in-depth studies about the reinforced concrete mechanism of deterioration. Therefore, these reservoirs have been suffered accelerated deterioration progress, and they have been shown many pathological manifestations strikingly visible. In front of all these problems this academic work aims to identify the generally conditions of conservation of all the reservoirs components of the Water Supply System of Natal. This academic work objectives to develop a recuperation plan for use in these reservoirs, in this academic work it was achieved all the survey of pathological manifestation existing in each reservoir. It was made with local visits, photographic recorders of all manifestations

and realization of *in loco* tests. The other step consisted in a application of GDE/UnB metodolgy – reformulated by Fonseca (2007). In the step of local visits in each reservoir it was evaluated carbonation depth, by spreading a phenolphthalein solution with 1% of concentration; evaluation of contamination of chlorides, by spreading silver nitrate solution with 1% of concentration, and evaluation of width cracks. After the conclusion of all the testings, it was established that all reservoir, studied in this academic work, have showed an advanced deteriorating condition. It's presents prevalent pathological manifestations as unacceptable cracks, spots, efflorescence and reinforcement corrosion, and in some cases, chlorides contamination. After the conclusion of the testings and its concatenation it was able to implementing, using GDE/UnB methodology, the order of the restoration its service life and initial safety conditions.

**Keywords** : pathology, durability, concrete

Valeu a pena? Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena.  
Quem quer passar além do Bojador  
Tem que passar além da dor.  
Deus ao mar o perigo e o abismo deu,  
Mas nele é que espelhou o céu.

***Fernando Pessoa***

Estar decidido, acima de qualquer coisa, é o segredo do êxito.  
**Henry Ford**

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida, por guiar os meus passos, me dar força, sabedoria e serenidade para navegar por mares nunca dantes navegados.

Aos meus pais, Romildo e Gerusa, a minha irmã Hannaly por todo o apoio e força dado desde o momento que decidi iniciar minha caminhada no mestrado. Foram de suma importância para que, após um longo dia dividido entre as aulas e o trabalho, eu pudesse encontrar forças para estudar em noites insones e dias a fio.

A Juliana Farias, minha namorada, por ter sido capaz de dividir seu tempo com as atividades acadêmicas, e por diversos finais de semana de ausência.

Aos familiares e amigos que foram capazes de respeitar minha ausência, e mesmo estando distantes se fizeram presentes e essenciais para a conclusão do trabalho.

Aos meus orientadores, Professora Vitória e Professor Neres, que me apoiaram em momentos decisivos e inesperados que surgiram ao longo desta caminhada.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) que participaram direta e indiretamente desta empreitada.

A Vanderson Kleyton, aluno de graduação em Engenharia Civil, responsável por todo o trabalho de campo essencial para atingir os objetivos do trabalho.

A CAERN, principalmente na pessoa do Engenheiro Ricardo Varela, Diretor Técnico, por ter permitido o acesso às instalações da Companhia e vislumbrar a importância desta pesquisa para a empresa.

Agradeço, também, aos amigos da Gerência de Projetos, nas pessoas de Josildo Lourenço e Simone Freire, por terem permitido me ausentar durante o expediente para frequentar as aulas e desenvolver a pesquisa.

As pessoas de Jacques Pinheiro, Francisco Nunes, Man Cheng e João Maria por terem sido bastantes prestativos em acompanhar Vanderson durante a visita realizada em cada um dos reservatórios, sendo responsáveis, inclusive pelo deslocamento entre as unidades estudadas.

A todos os companheiros que se fizeram presentes e foram responsáveis por me estimular a concluir esta pesquisa. Esses estímulos do fizeram-se extremamente importantes, motivando-me a atingir as metas traçadas.

## Lista de Figuras

Figura 2-1 - Ciclo de vida de uma edificação. Fonte: Tutikian B. & Pacheco, M. (Adaptada) .	5
Figura 2-2 - Gráfico da Lei de Sitter. Fonte: (ANDRADE, T.,2006) - ADAPTADA .....	8
Figura 2-3 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras. Fonte: (ANDRADE, 2008) .....	14
Figura 2-4 - Causas básicas da deterioração do concreto. Fonte: (MEHTA, 2005) – Adaptada .....	16
Figura 2-5 Desgaste superficial acentuado em um trecho da parede de concreto do canal de água bruta da ETA Extremoz. Fonte: Laudo Técnico de Engenharia Relativo às Condições de Conservação da ETA Extremoz (Floculador, Decantador e Filtro), 2012.....	17
Figura 2-6 - Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. A: ataque de água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; B (I) solução ácida formando componentes solúveis de cálcio, como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio ou bicarbonato de cálcio; B(II): soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; B(III): ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição de $Ca^{2+}$ por $Mg^{2+}$ ; C: ataque por sulfato formando etringita e gesso, reação álcali-agregado, corrosão da armadura no concreto, hidratação de MgO e CaO cristalinos. Fonte: (MEHTA, 2005) - Adaptada .....	19
Figura 2-7 - Sequência de formação do biofilme. Fonte: (SILVA & PINHEIRO,2006) .....	21
Figura 2-8- Tipos de Fissuras. FONTE: ARYA & WOOD (2003) Adaptada .....	23
Figura 2-9 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009) .....	24
Figura 2-10 – Fissuração por retração do concreto. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009).....	26
Figura 2-11 - Formação de semipilha em meio de concreto armado. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009) .....	27
Figura 2-12 – Célula de Corrosão no meio concreto armado. Fonte (SOUZA & RIPPER, 2009) .....	28
Figura 2-13 - Esforços produzidos que levam à fissuração e ao destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras. Legenda: P – Esforços radiais; C – Produto da corrosão; F fissura; D – destacamento do concreto. Fonte: (CASCUDO, 2006).....	29
Figura 2-14 - Laje de cobertura apresentando total deterioração do cobrimento do concreto e estado generalizado de corrosão de armaduras. ....	29
Figura 2-15 - Relação entre o cobrimento do concreto e a concentração de cloreto de sódio no concreto. FONTE: Dong <i>et al</i> (2010). Adaptada.....	31

Figura 2-16 - Carbonatação condicionada pela fissuração. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009)	34
Figura 3-1 - Fluxograma para avaliação do grau de deterioração de estruturas de concreto da metodologia GDE/UnB. Adaptada (Fonseca,2007)	40
Figura 4-1 – Reservatórios integrantes do SAA de Natal, ilustrando os reservatórios pesquisados (azul) e aqueles que foram mantidos fora do escopo da pesquisa (vermelho). FONTE: Google Earth (Março/2014)	59
Figura 5-1 - Vista geral do reservatório R-4.1.	63
Figura 5-2 - Manchas amareladas na laje de fundo, indicando deficiência no sistema de impermeabilização.	64
Figura 5-3 - Ponto na laje de fundo em que houve a desagregação do reboco e da camada de cobertura do concreto, deixando a armadura exposta.	64
Figura 5-4 - Ponto de desagregação do concreto no topo do pilar.	65
Figura 5-5 - Detalhe da fotografia anterior. É possível visualizar a armadura exposta.	65
Figura 5-6 - Fissuração na base do pilar.	66
Figura 5-7 - Medição da abertura de fissura.	66
Figura 5-8 - Ocorrência de fissura devido à oxidação da armadura da viga.	67
Figura 5-9 - Vista do reservatório R-4.2	73
Figura 5-10- Presença de manchas escuras no corpo do reservatório.	74
Figura 5-11- Manchas amarelas, indicando deficiências no sistema de impermeabilização.	74
Figura 5-12 - Manchas amareladas na laje de fundo.	75
Figura 5-13 - Exposição da armadura na viga do nível 01 devido à deficiência no revestimento.	75
Figura 5-14 - Exposição dos estribos do pilar devido à deficiência no revestimento.	76
Figura 5-15 - Perda do revestimento em um dos pilares.	76
Figura 5-16 - Fissura no vértice do pilar, devido à ocorrência de corrosão das armaduras.	77
Figura 5-17 - Fissura no vértice do pilar, devido à ocorrência de corrosão nas armaduras.	77
Figura 5-18 - Precipitação de sais de prata em um dos pilares.	78
Figura 5-19 - Aspersão de solução de fenolftaleína para verificação da frente de carbonatação.	78
Figura 5-20- Manchas amareladas no fundo do reservatório.	80
Figura 5-21 - Formação de estalactites no fundo do reservatório.	80
Figura 5-22 - Laje de cobertura em avançado estado de deterioração. Pode-se visualizar a ocorrência de desagregação do concreto e corrosão de maneira generalizada.	81
Figura 5-23 - Detalhe das manifestações patológicas generalizadas na laje de cobertura.	81
Figura 5-24 - Fissuração em pilar do reservatório.	82
Figura 5-25 - Fissuração no vértice do pilar.	82

Figura 5-26 - Corrosão nas lajes e vigas do R-5.2.....	83
Figura 5-27 - Estado de corrosão nas vigas e lajes. ....	83
Figura 5-28 - Detalhe de desagregação do concreto devido à corrosão das armaduras nas vigas do reservatório. ....	84
Figura 5-29 - Vista do reservatório R-6 Apoiado. ....	86
Figura 5-30 - Pontos de infiltração nas paredes do reservatório.....	86
Figura 5-31 - Ponto de infiltração na parede do reservatório. ....	87
Figura 5-32 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,2 mm. ....	87
Figura 5-33 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,8 mm. ....	88
Figura 5-34 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,4 mm. ....	88
Figura 5-35 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 1,2 mm. ....	89
Figura 5-36 - Localização da junta de dilatação (Adaptada). Fonte: Google Earth (jan/2014) .....	89
Figura 5-37 - Vista externa da junta de dilatação. ....	90
Figura 5-38 - Vista interna da junta de dilatação. ....	90
Figura 5-39 - Fissuração longitudinal na face superior da laje de cobertura. ....	91
Figura 5-40 - Medição da abertura de fissura.....	91
Figura 5-41 - Deslocamento do concreto com exposição da armadura de flexão e a existência de eflorescências na face interna da laje superior. ....	92
Figura 5-42 - Eflorescências na viga. ....	92
Figura 5-43 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura da viga devido à corrosão. .....	93
Figura 5-44 - Estado de um dos pilares do reservatório. Pode-se observar o desgaste superficial do revestimento. ....	93
Figura 5-45 - Vista geral do reservatório .....	96
Figura 5-46 - Corrosão das armaduras e deslocamento do concreto no vigamento.....	96
Figura 5-47 - Detalhe do estado de corrosão da viga. ....	97
Figura 5-48 - Deslocamento do revestimento, cobrimento e exposição das armaduras do pilar. ....	97
Figura 5-49 - Redução da seção transversal das armaduras.....	98
Figura 5-50 - Laje de fundo do reservatório apresentando manchas amareladas. ....	98
Figura 5-51 - Vista geral do reservatório R-9 .....	100
Figura 5-52 - Fissuração em um dos pilares do reservatório. ....	101
Figura 5-53 - Deslocamento da argamassa e do cobrimento do concreto.....	101
Figura 5-54 - Medição da abertura de fissuras.....	102
Figura 5-55 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura da viga. ....	102
Figura 5-56 - Fissura na região inferior da viga devido à corrosão da armadura.....	103

Figura 5-57 - Vista do reservatório R-10.1 .....	104
Figura 5-58 - Presença de manchas em toda a extensão do corpo do reservatório.....	105
Figura 5-59 - Fissura devido à ocorrência de corrosão.....	105
Figura 5-60 - Fissura na base do pilar devido à corrosão .....	106
Figura 5-61 - Medição da abertura de fissura no vértice do pilar.....	106
Figura 5-62 - Oxidação da armadura de uma das vigas do reservatório.....	107
Figura 5-63 - Ocorrência de fissuras devido à corrosão das armaduras.....	107
Figura 5-64 - Manchas amareladas na laje de fundo .....	108
Figura 5-65 - Vista geral do reservatório .....	109
Figura 5-66 - Desprendimento do reboco em todo o reservatório.....	110
Figura 5-67 - Fissuração em uma das vigas de fundação.....	111
Figura 5-68 - Desagregação do concreto e do revestimento no vigamento do primeiro nível .....	111
Figura 5-69 - Fissuração no vértice do pilar .....	112
Figura 5-70- Medição da abertura de fissura.....	112
Figura 5-71 - Vista do reservatório R-11 .....	114
Figura 5-72 - Desplacamento do concreto no vértice do pilar, expondo sua armadura .....	115
Figura 5-73 - Manchas escuras na viga do primeiro nível.....	115
Figura 5-74 - Desplacamento do concreto no vigamento do nível 01 .....	116
Figura 5-75 - Manchas características de infiltração na laje de fundo .....	116
Figura 5-76 - Manchas no corpo do reservatório.....	117
Figura 5-77 - Vista geral do reservatório .....	119
Figura 5-78 - Fissuração no vértice do pilar devido ao aumento de volume devido à oxidação .....	119
Figura 5-79 - Medição da abertura de fissuras.....	120
Figura 5-80 - Fissuras no concreto devido ao aumento de volume da armadura .....	120
Figura 5-81 - Manchas escuras na parede do reservatório.....	121
Figura 5-82 - Manchas escuras na laje em balanço - nível 02.....	121
Figura 5-83 - Desplacamento do concreto e exposição da armadura na laje de fundo do reservatório.....	122
Figura 5-84 - Mancha amarelada na laje de fundo devido à deficiências no sistema de impermeabilização.....	122
Figura 5-85 - Aspersão de solução de nitrato de prata e sedimentação dos sais de prata, indicando a presença de cloretos .....	123
Figura 5-86 - Vista da fachada do reservatório .....	124
Figura 5-87 - Manchas decorrentes de infiltração .....	125
Figura 5-88 - Detalhe da ocorrência de infiltrações.....	125

Figura 5-89 - Junta de dilatação sem com o material comprometido.....	126
Figura 5-90 - Face interna da parede do reservatório.....	127
Figura 5-91 - Desgaste superficial na face interna da parede do reservatório.....	127
Figura 5-92 - Estado da face interna da laje de cobertura.....	128
Figura 5-93 - Estado das vigas de cobertura do reservatório.....	128
Figura 5-94 - Desplacamento do concreto e exposição da armadura na viga.....	129
Figura 5-95 - Presença de manchas na superfície do reservatório.....	129
Figura 5-96 - Fissura vertical no encontro concreto alvenaria.....	130
Figura 5-97 - Desgaste superficial no pilar interno.....	131
Figura 5-98 - Vista geral do reservatório.....	135
Figura 5-99 - Manchas escuras em toda a superfície do reservatório.....	135
Figura 5-100 - Desplacamento do concreto e exposição da armadura na base do pilar....	136
Figura 5-101 - Fissura no vértice do pilar devido aos esforços causados devido ao aumento de volume da armadura oxidada.....	136
Figura 5-102 - Indicativos da realização de pequenas intervenções no pilar.....	137
Figura 5-103 - Existência de corrosão pontual no reservatório. É possível perceber a existência de manchas escuras e de eflorescências no corpo do reservatório.....	137
Figura 5-104 - Gráfico representativo das principais manifestações patológicas encontradas nos reservatórios do Sistema de Abastecimento de Água de Natal, que foram objeto desta pesquisa.....	144
Figura 5-105 - Grau de Deterioração calculado para os reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal.....	145

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Classes de Agressividade Ambiental. Fonte: NBR 6118:2007 .....	13
Tabela 2-2 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental. FONTE: ABNT NBR 6118:2007 .....	25
Tabela 2-3- Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação. Adaptada. Fonte: Kazmierczak (1995)apud Figueiredo (2005) .....	36
Tabela 3-1 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007) .....	46
Tabela 3-2 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007) .....	47
Tabela 3-3 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007) .....	48
Tabela 3-4- Classificação dos níveis de deterioração dos elementos. Fonte: Fonseca (2007) .....	50
Tabela 3-5- Classificação dos níveis de deterioração dos elementos. Fonte: Fonseca (2007) .....	51
Tabela 3-6 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura (adaptada). FONTE: Fonseca (2007).....	52
Tabela 4-1 - Identificação e localização dos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal. ....	58
Tabela 4-2- Reservatório objeto da pesquisa.....	60
Tabela 4-3 - Dados de projeto.....	61
Tabela 5-1- Cálculo do Fi para o pilar P1 .....	68
Tabela 5-2 - Cálculo do Fi para o pilar P2.....	68
Tabela 5-3 - Cálculo do Fi para o pilar P3.....	68
Tabela 5-4 - Cálculo do Fi para o pilar P4.....	69
Tabela 5-5 - Cálculo do Fi para o pilar P5.....	69
Tabela 5-6 - Cálculo do Fi para o pilar P6.....	69
Tabela 5-7 - Cálculo do Fi para o pilar P7.....	70
Tabela 5-8 - Cálculo do Fi para o pilar P8.....	70
Tabela 5-9 - Cálculo do Fi para a laje de fundo.....	70
Tabela 5-10 - Cálculo do Fi para a laje de cobertura .....	71
Tabela 5-11 - Cálculo do Fi para o corpo do reservatório .....	71
Tabela 5-12 - Cálculo do Fi para a viga do nível 01 .....	71

Tabela 5-13 - Cálculo do Fi para a viga do nível 02.....	72
Tabela 5-14 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-4.1.....	72
Tabela 5-15 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-4.1 .....	73
Tabela 5-16 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-4.2.....	79
Tabela 5-17 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-4.2.....	79
Tabela 5-18 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-5.2.....	84
Tabela 5-19 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-5.2.....	85
Tabela 5-20 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-6 Apoiado.....	94
Tabela 5-21 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Apoiado .....	95
Tabela 5-22 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-6 Elevado.....	99
Tabela 5-23 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado .....	99
Tabela 5-24 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-9.....	103
Tabela 5-25 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado .....	104
Tabela 5-26- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.1.....	108
Tabela 5-27 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado .....	109
Tabela 5-28 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.2.....	113
Tabela 5-29 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-10.2..	113
Tabela 5-30- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-11 .....	117
Tabela 5-31 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-11 .....	118
Tabela 5-32 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-13.....	123
Tabela 5-33 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-13.....	124
Tabela 5-34 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Apoiado (Continua).....	132
Tabela 5-35 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Apoiado.....	133
Tabela 5-36 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-14 Apoiado .....	134
Tabela 5-37- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Elevado.....	138
Tabela 5-38 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-14 Elevado .....	138
Tabela 5-39 - Manifestações patológicas nos reservatórios analisados .....	143
Tabela 5-40 - Grau de Deterioração dos Reservatórios.....	145
Tabela 5-41 - Ordem de realização de intervenções nos reservatórios do SAA de Natal ..	147

## Lista de Equações

Equação 2-1 .....	27
Equação 2-2 .....	27
Equação 2-3 .....	27
Equação 2-4 .....	34
Equação 3-1 .....	49
Equação 3-2 .....	49
Equação 3-3 .....	49
Equação 3-4 .....	50
Equação 3-5 .....	51

## Lista de símbolos e abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcio
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
D	Dano
e <sup>-</sup>	Elétron
ELS	Estado Limite de Serviço
ELS - D	Estado Limite de Serviço - Deformações Excessivas
ELS - F	Estado Limite de Serviço - Vibrações Excessivas
ELS-W	Estado Limite de Serviço - Abertura de Fissuras
ELU	Estado Limite Último
Fator a/c	Fator água cimento
Fe	Ferro
Fe(OH) <sub>2</sub>	Dióxido de ferro
Fe <sup>3+</sup>	Íon ferro
F <sub>i</sub>	Fator de Intensidade do Dano
F <sub>r</sub>	Fator de Relevância Estrutural
F <sub>p</sub>	Fator de Ponderação do Dano
G <sub>d</sub>	Grau de Deterioração
GDE	Metodologia de Cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura
G <sub>de</sub>	Grau de Deterioração do Elemento
G <sub>df</sub>	Grau de Deterioração de uma Família de Elementos
H <sub>2</sub> O	Água
IBAPE-SP	Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – Seccional São Paulo
ISO	Internatonal Organization for Standardization
MPa	Megapascal
NaOH	Hidróxido de Sódio
NB	Norma Brasileira (nomenclatura em desuso)
NBR	Norma Brasileira
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OH <sup>-</sup>	Ânion Hidroxila
pH	Potencial Hidrogeniônico

## Sumário

Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas .....	iv
Lista de Equações .....	iv
Lista de símbolos e abreviaturas .....	v
1 Introdução e Relevância da Pesquisa.....	1
1.1 Justificativa .....	1
1.2 Objetivo Geral.....	2
1.3 Objetivos Específicos .....	2
1.4 Estrutura do trabalho.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
2 Vida Útil das Estruturas de Concreto .....	4
2.1 Conceito de Vida Útil e Durabilidade das Estruturas de Concreto .....	4
2.2 Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado segundo as Prescrições Normativas Atuais.....	6
2.3 A NBR 6118:2007 e a Ênfase em Durabilidade .....	10
2.4 Conceito de Vida Útil.....	13
2.5 Mecanismos de Envelhecimento e Deterioração das Estruturas de Concreto .....	15
2.5.1 Fenômenos Físicos de Deterioração das Estruturas de Concreto .....	15
2.5.1.1 Desgaste Superficial (Abrasão e Erosão) .....	16
2.5.1.2 Cavitação .....	18
2.5.2 Fenômenos Químicos de Degradação das Estruturas de Concreto .....	19
2.5.3 Fenômenos Biológicos .....	20
2.5.4 Principais manifestações patológicas das estruturas de concreto .....	21
2.5.4.1 Fissuração .....	21
2.5.4.2 Corrosão das Armaduras .....	26
2.5.4.2.1 Corrosão devido ao ataque por cloretos .....	31
2.5.4.3 Corrosão por Carbonatação.....	33
2.5.4.4 Manchas e Eflorescências .....	36

CAPÍTULO 3.....	38
3 Metodologia de Quantificação do Grau de Deterioração.....	38
3.1 Metodologia GDE/UnB Castro (1994) para quantificação do grau de deterioração das estruturas de concreto .....	39
3.1.1 Metodologia reformulada por Lopes (1998) .....	41
3.1.2 Metodologia reformulada por Boldo (2002) .....	42
3.1.3 Metodologia reformulada por Fonseca (2007) .....	43
3.2 Fundamentação Teórica da Metodologia Aplicada no Trabalho .....	44
3.2.1 Fator de Ponderação do Dano ( $F_p$ ) .....	45
3.2.2 Fator de Intensidade do Dano ( $F_i$ ).....	45
3.2.3 Grau do Dano (D), Grau de Deterioração de um elemento ( $G_{de}$ ), Grau de Deterioração de uma Família de Elementos ( $G_{df}$ ) e Grau de Deterioração da Estrutura ( $G_d$ ).....	49
3.3 Norma de Inspeção Predial – IBAPE/SP-2011 .....	53
3.3.1 Classificação das Inspeções Prediais .....	53
CAPÍTULO 4.....	55
4 Aplicação da Metodologia GDE/UnB .....	55
4.1 Metodologia Proposta.....	55
4.1.1 Etapa 1 – Pesquisa nos arquivos e catalogação das informações de projeto ....	55
4.1.2 Etapa 2 – Inspeção Preliminar .....	55
4.1.3 Etapa 3 – Realização de ensaios de campo .....	56
4.1.4 Etapa 4 – Aplicação da metodologia GDE/UnB.....	57
4.1.5 Etapa 5 – Elaboração do plano de manutenção dos reservatórios .....	57
4.2 Os reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal ....	57
4.3 Dificuldades durante a vistoria .....	61
CAPÍTULO 5.....	63
5. Discussão dos Resultados.....	63
5.1 Reservatórios Analisados.....	63
5.1.1 Reservatório R- 4.1 .....	63
5.1.2 Reservatório R- 4.2 .....	73
5.1.3 Reservatório R- 5.2 .....	80

5.1.4	Reservatório R- 6 Apoiado .....	85
5.1.5	Reservatório R- 6 Elevado .....	95
5.1.6	Reservatório R- 9 .....	100
5.1.7	Reservatório R- 10.1 .....	104
5.1.8	Reservatório R- 10.2 .....	109
5.1.9	Reservatório R- 11 .....	114
5.1.10	Reservatório R- 13 .....	118
5.1.11	Reservatório R- 14 Apoiado .....	124
5.1.12	Reservatório R- 14 Elevado .....	134
5.2	Discussão dos Resultados .....	139
CAPÍTULO 6.....		148
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	148
Referências Bibliográficas .....		150

## CAPÍTULO 1

# 1 Introdução e Relevância da Pesquisa

## 1.1 Justificativa

As obras de infraestrutura são as responsáveis por dar o suporte necessário ao desenvolvimento das sociedades. Esses tipos de obras englobam áreas estratégicas tanto do ponto de vista econômico, como o setor de produção e distribuição de energia elétrica, a construção de rodovias – quanto do ponto de vista social, por meio da distribuição de água e coleta e tratamento de esgotos.

Na área de saneamento especificamente, as estruturas são submetidas a condições extremas de utilização. Além de estarem inseridas em ambiente urbano, sujeitas à ação dos poluentes atmosféricos, há a formação de um microclima caracterizado pela elevada umidade relativa do ar e pela ação de íons danosos ao concreto, como os íons cloretos presente na água.

Somente após quase vinte anos de vigência a NB 1/1978 pode passar por um processo de revisão, tendo como resultado final a NBR 6118, cuja vigência iniciou-se em 2004. As maiores inovações apresentadas pela NBR 6118/2004 quando comparada com a NB 1/1978 foi com relação à durabilidade das estruturas.

A NBR 6118/2004 adotou parâmetros de durabilidade bem mais restritivos que os adotados na NB 1/1978. Os principais parâmetros que objetivaram o aumento da vida útil das estruturas consistiram na adoção de classes de agressividade ambiental, sendo recomendado para cada uma delas um cobrimento mínimo – em função dos elementos estruturais; uma resistência mínima a ser obedecida e a adoção de parâmetros para o estado limite de serviço correspondentes à cada uma das classes.

Entretanto, os reservatórios que integram o Sistema de Abastecimento de Água de Natal foram, em sua maioria, construídos entre as décadas de 1970 e 1980. Nessa

época ainda não se dispunha de estudos aprofundados sobre o mecanismo de deterioração do concreto armado. Consequentemente, as Normas vigentes não apresentavam parâmetros que objetivassem a durabilidade dos elementos estruturais.

Por isso, tais reservatórios sofrem com o processo acelerado de degradação, apresentando diversas manifestações patológicas visivelmente identificáveis. Tais manifestações variam desde manchas devido à poluição até desagregação do concreto, corrosão das armaduras, podendo apresentar perda de seção transversal e fissuração.

## **1.2 Objetivo Geral**

Identificação das principais manifestações patológicas presentes em doze reservatórios de concreto armado do Sistema de Abastecimento de Água de Natal, propondo intervenções, considerando a quantificação do grau de deterioração.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Identificação dos parâmetros e considerações realizadas nos projetos estruturais;
- Identificar as principais manifestações patológicas presentes nos reservatórios;
- Realizar ensaios de avaliação da frente de carbonatação, abertura de fissuras e contaminação por cloretos;
- Utilizar a metodologia GDE/UnB para quantificação do grau de deterioração das estruturas de concreto;
- Desenvolver um plano de recuperação para os reservatórios utilizados como objeto deste estudo.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O *Capítulo 1* faz a *Introdução e Relevância da Pesquisa*, cujo objetivo é o de situar o leitor sobre o objeto desta pesquisa com as devidas justificativas.

No *Capítulo 2, Vida Útil das Estruturas* é realizada uma introdução sobre os conceitos acerca do tema, inclusive sob o ponto de vista de prescrições normativas vigentes. Em seguida são abordados os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto.

No *Capítulo 3* realiza-se a apresentação da *Metodologia de Quantificação do Grau de Deterioração*, por meio da aplicação da metodologia GDE/UnB. Nele são definidos o tipo de inspeção realizada e realiza-se, também, uma abordagem sobre a metodologia GDE/UnB, desenvolvida por Castro (1994) e suas posteriores reformulações, propostas por Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007). Realiza-se também explanação sobre os parâmetros de entrada, e o processo de determinação do grau de deterioração da estrutura.

O *Capítulo 4* apresenta a *Aplicação da Metodologia GDE/UnB aos Reservatórios*, cujo fundamento realiza-se na aplicação da referida metodologia nos reservatórios propriedade da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e que integram o Sistema de Abastecimento de Água de Natal.

No *Capítulo 5* realiza-se a *Discussão dos Resultados* por meio da concatenação, tratamento e interpretação dos dados obtidos após a aplicação da metodologia GDE/UnB.

Por fim, o *Capítulo 6* apresenta as *Conclusões*, realiza-se o fechamento do trabalho, como também sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# 2 Vida Útil das Estruturas de Concreto

## 2.1 Conceito de Vida Útil e Durabilidade das Estruturas de Concreto

Sabe-se que qualquer bem, seja ele móvel ou imóvel é projetado para um período de uso pré-determinado, denominado de vida útil. Para que seja possível utilizar esse bem por todo período estimado faz-se necessário obedecer a certas restrições impostas pelas características dos materiais, e sempre que preciso avaliar a necessidade de se realizar intervenções com o objetivo de restaurar a condição satisfatória de utilização.

O conceito de durabilidade das estruturas começou a ganhar notoriedade no meio técnico à medida que obras com pouco tempo de utilização, ou em certos casos, recém-construídas começaram a apresentar desgaste prematuro. Devido a essa situação começou-se a realizar estudos com o objetivo de compreender as verdadeiras razões que motivam tais ocorrências (ANDRADE J. O., 2008).

Segundo disposto na NBR 6118/2007, em seu item 5.1.2.3, a durabilidade de uma edificação é definida como sendo a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

O Comitê 201 do *American Concrete Institute* (ACI), em prescrição normativa de mesmo número, denominada “*Guide to Durable Concrete*” apresenta uma definição mais abrangente sobre vida útil. No referido texto a vida útil das estruturas de concreto de cimento Portland é definida como sendo sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao ambiente de trabalho (ACI, 2002).

Conforme Pauletti (2004) o conceito de durabilidade é entendido como o tempo em que as estruturas devam ser projetadas, construídas e operadas de forma que mantenham sua segurança, utilidade e aparência aceitável, sob as influências ambientais esperadas, durante um período de tempo, sem a necessidade de altos custos de manutenção e reparo.

As manifestações patológicas são originadas por falhas que incidem durante a realização de uma ou mais atividades do processo de construção civil. Conforme (TUTIKIAN & PACHECO, 2013) *apud* “Red Rehabilitar”, o processo de construção e uso pode ser dividido em cinco etapas: planejamento, projeto, fabricação dos materiais e componentes fora do canteiro, execução e uso. As etapas iniciais dispõem de um tempo relativamente curto em relação à última, que é a fase de uso, etapa mais longa e que envolve a operação e manutenção das edificações.

Assim, na vida útil de uma edificação, pode-se observar que seu ciclo de vida é composto pela etapa de produção e uso, conforme explicitado na Figura 2-1.

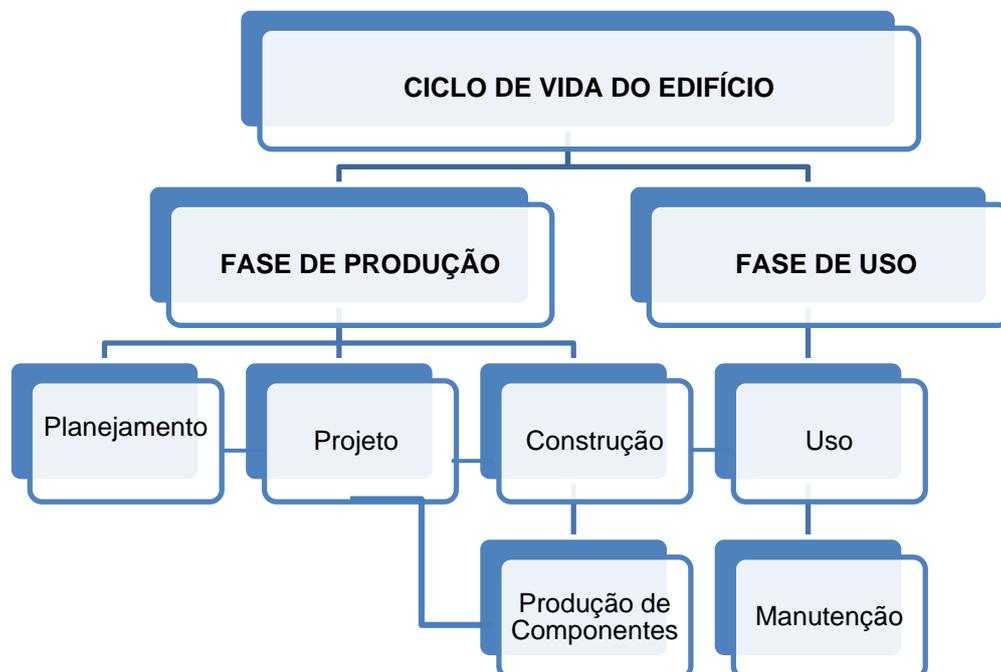


Figura 2-1 - Ciclo de vida de uma edificação. Fonte: Tutikian B. & Pacheco, M. (Adaptada)

## **2.2 Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado segundo as Prescrições Normativas Atuais**

Apesar de o concreto armado ser um material de elevada durabilidade, inevitavelmente a estrutura perderá essa característica ao longo do tempo pela forte interação com o meio ambiente. Por isso, há a necessidade de avaliar-se periodicamente se o desempenho da estrutura atende aos requisitos mínimos de durabilidade e segurança. Caso tais requisitos não sejam atendidos faz-se necessário a realização de intervenções para que a estrutura reestabeleça suas condições iniciais (ANDRADE T. , 2006).

Apesar de apresentar boa durabilidade, a própria interação com o meio ambiente, por si só, é responsável pelo início do processo de degradação do concreto provocando seu envelhecimento, cujos primeiros sintomas são a perda gradativa do desempenho estético, e seu ápice quando se atinge a situação de ruína.

O fato de diversas estruturas de concreto terem apresentado rendimento abaixo do esperado também ocorre devido à quantidade de fatores externos que podem atuar no processo de produção das estruturas de concreto armado. Essa influência ocorre desde o processo de dosagem do concreto, pelo processo de lançamento e condições de cura. Conforme Costa & Appleton (2002) isso possibilita um elevado grau de variabilidade no produto, dificultando a obtenção de um sistema de produção com a menor variabilidade possível.

Fatores como a má dosagem do concreto, adensamento ineficiente, falta de homogeneidade, e espessura do cobrimento contribuem de maneira bastante significativa para a redução da vida útil dos elementos de concreto (VERA, VILLARROEL, CARVAJAL, VERA, & ORTIZ, 2008)

Aliada à variabilidade e as deficiências do processo executivo, também contribuem para o processo de deterioração precoce, o conhecimento pouco preciso a respeito do funcionamento dos mecanismos de deterioração, juntamente com a ausência de uma etapa eficiente de planejamento e, em alguns casos, pela subestimação das condições ambientais (COSTA & APPLETON, 2002).

Por isso, é preciso que haja um melhor entendimento das implicações socioeconômicas da durabilidade, pois o custo de reparo e substituição das estruturas por falhas nos materiais tornou-se uma parte substancial dos custos de operação e manutenção das estruturas de concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

No que diz respeito à maneira de tornar estruturas mais duráveis Angst *et al* (2012) defendem que devem ser adotados critérios bastante específicos para cada condição, tanto climática quanto geográfica, em que a estrutura será implantada.

A Lei de Sitter mostra a importância que se deve dar à qualidade nas etapas de projeto e construção, e à realização de manutenções preventivas, frente às ações de manutenções corretivas ou de renovação (ANDRADE T. , 2006).

O gráfico da Lei de Sitter estratifica a vida útil da estrutura em quatro etapas, identificadas pelas seguintes fases: (A) correspondente à fase de projeto e construção; (B) corresponde à fase de manutenção da estrutura; (C) correspondendo à etapa de reparo e manutenção e, por fim, a etapa (D) correspondente à etapa de renovação da estrutura.

Na Figura 2-2 o autor associa um valor simbólico de custo 1 às ações tomadas durante a fase de projeto e construção A para que a estrutura atinja uma vida útil ( $t_2$ ). Caso as ações sejam tomadas no período B, ao invés de A associa-se um custo 5. Caso a intervenção seja feita apenas na fase C, a estrutura já apresentará um custo associado de 25 para se manter a mesma vida útil ( $t_2$ ). E se nenhuma intervenção for tomada nas fases A, B ou C, a estrutura deverá ser submetida a ações de recuperação generalizada, associando um custo simbólico de 125 (ANDRADE T. , 2006).

O gráfico da Lei de Sitter, mostrado na Figura 2-2, representa de modo simbólico, a curva de custos associada ao dano corrosão das armaduras em função do período em que há a identificação da manifestação patológica. Nela, define-se um ponto de perda crítica da funcionalidade, caracterizado pela ocorrência generalizada de corrosão nas armaduras de aço.

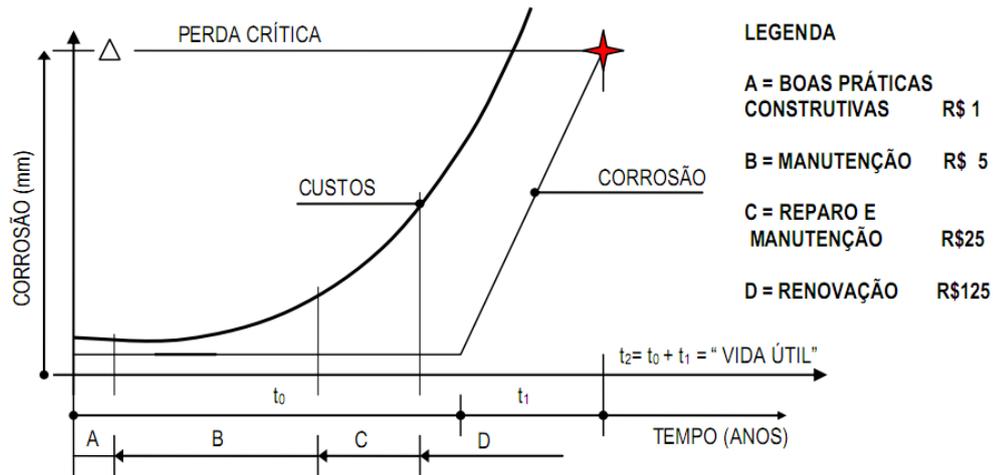


Gráfico da lei dos cinco (SITTER, 1983).

Figura 2-2 - Gráfico da Lei de Sitter. Fonte: (ANDRADE, T.,2006) - ADAPTADA

A Lei de Sitter demonstra claramente os impactos econômicos que elementos duravelmente mal concebidos podem gerar. Dessa maneira, a confiabilidade do concreto estrutural, no que diz respeito à durabilidade, só pode ser garantida quando se possibilita as condições necessárias para tal fim, além de eventuais sistemas redundantes que possibilitem uma menor interação com o meio ambiente (COSTA & APPLETON, 2002).

Diversas entidades responsáveis pelas normatizações, como ABNT; ACI; ISO e Eurocode têm buscado um denominador comum a respeito dos parâmetros de durabilidade que devem ser adotados, de modo a minimizar a influência dos agentes deletérios nas estruturas de concreto armado.

O Eurocode 2 exige, como parâmetros necessários para se garantir uma condição de vida útil satisfatória, que sejam atendidos uma resistência mínima à compressão, que é função do grau de agressividade ambiental ao qual a estrutura estará submetida. Para garantir a obtenção da resistência necessária, há a limitação do fator água/cimento e do cobrimento mínimo das peças (ODRIOZOLA & GUTIÉRREZ, 2007).

Esses mesmos parâmetros que foram adotados pelo Eurocode também foram adotados pela ABNT, na NBR 6118/2007, sendo abordados principalmente em seus itens 6 – Diretrizes para a Durabilidade das Estruturas de Concreto – e 7 – Critérios de Projeto que visam a Durabilidade.

Visando garantir maior durabilidade às estruturas empregadas na área de saneamento ambiental, como as estruturas de reservação – existentes tanto em sistemas de abastecimento de água quanto os de esgotamento sanitário, o ACI recomenda que seja utilizada, como complemento às prescrições existentes na ACI-318, a norma complementar ACI 350-R - *Code Requirements for Enviromental Engineering Concrete Structures*.

A norma ACI 350-R adota parâmetros de durabilidade (fator a/c; cobrimento mínimo, limite de abertura de fissuras, dentre outros) bem mais restritivos do que a norma ACI 318. Sob uma ótica generalista, a norma ACI 350-R aborda os mesmos parâmetros que a ACI 318, porém com valores bem mais compatíveis com a classe de agressividade ambiental. Há uma menor tolerância no que diz respeito à abertura de fissuras, sendo garantido pela limitação do tamanho das armaduras – respeitando-se a devida análise estrutural; maior camada de cobrimento, cuidados especiais de execução (principalmente quando da necessidade de juntas de execução), e critérios para a dosagem do concreto.

Apesar de todos esses parâmetros adotados, essas prescrições normativas não são capazes de estimar, de maneira precisa, o quanto de vida útil àquela estrutura disporá, até que seja necessária a realização de alguma intervenção.

As prescrições normativas, objetivando reduzir a subjetividade existente nos parâmetros de durabilidade, adotaram uma abordagem determinística, cuja utilização é amplamente difundida no meio técnico-científico. De acordo com essa abordagem, os parâmetros de durabilidade são obtidos em função da qualificação da agressividade ambiental - que pode ser entendido como um fator subjetivo.

Um dos parâmetros que não é levado em consideração em nenhum dos métodos, mesmo exercendo grande influência na determinação da durabilidade das estruturas de concreto, é o fator tempo. Mesmo sendo o responsável pela condução do processo de deterioração, sua mensuração é bastante complexa devido à variedade e aleatoriedade dos mecanismos envolvidos. Por isso, para afirmar-se que

um concreto é durável, faz-se necessário que seja definido um desempenho<sup>1</sup> mínimo aceitável para o material, em um determinado intervalo de tempo, que se deseje alcançar, dentro de um meio ambiente que sempre interage com a estrutura de concreto (ANDRADE T. , 2006).

### **2.3 A NBR 6118:2007 e a Ênfase em Durabilidade**

De acordo com a Norma ISO 6240:1980 - *Performance Standards in Building - Contents and Presentation*, atrelados ao conceito de durabilidade estão os conceitos de desempenho e vida útil, estando relacionado ao comportamento de um produto em relação ao seu uso (PAULETTI,2004).

Antes da vigência da NBR 6118/2007, os projetos de estruturas eram baseados pela NB 1/1978, e conforme prescrito no texto realizava-se primeiramente a classificação do ambiente, para no passo seguinte escolher-se a qualidade do concreto para um dado valor de cobertura.

Atualmente as normas prescritivas têm, de maneira geral, adotado como critério determinante para a durabilidade das estruturas de concreto requisitos determinísticos, como por exemplo, valores pré-estabelecidos para recobrimento mínimo, fator água/cimento, consumo mínimo de cimento (FERREIRA, 2006).

Na concepção do projeto é fundamental que se atendam todas as solicitações a que a estrutura será submetida durante a vida útil. Questões tais como desempenho e durabilidade devem ser bem analisadas levando-se em consideração o ambiente a qual a estrutura será submetida (AMORIM,2010).

Além desses fatores, a NBR 6118/2007 recomenda que deva ser evitada a presença ou acúmulo de água proveniente de chuva ou decorrente de água de

---

<sup>1</sup> O desempenho de um material é entendido como seu comportamento relacionado ao uso, que pode ser: desempenho mecânico; acústico; estético; químico; entre outros. (ANDRADE T. , 2006)

limpeza e lavagem, sobre as superfícies das estruturas de concreto (ABNT NBR 6118, 2007).

Todas as áreas expostas diretamente à ação da água ou que constituam locais em potencial para infiltrações (como juntas de dilatação ou de movimentação) devem apresentar a devida impermeabilização, de modo a torna-las estanques à percolação da água.

Para o caso de partes da estrutura cuja vida útil seja inferior ao todo, faz-se necessário que o projeto considere o devido acesso para a inspeção e manutenção. Isso se faz necessário para os casos em que se utilizem aparelhos de apoio, juntas de dilatação, impermeabilizações, etc. (ABNT NBR 6118, 2007).

Esses cuidados não devem ser tomados apenas na fase de projeto, mas também, na fase de execução. Faz-se necessário que seja realizado um controle tecnológico do concreto, controlando a fator  $a/c$  e o consumo mínimo de cimento exigido. Se tais medidas não forem realizadas de forma eficiente podem-se obter peças com elevada porosidade, alta permeabilidade, o que facilita a difusão de agentes agressivos para o interior das peças, acarretando, a redução da vida útil da estrutura (FERREIRA, 2006).

Em seu item 6 – Diretrizes para a Durabilidade das Estruturas de Concreto – a NBR 6118/2007 recomenda que as estruturas de concreto devam ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil<sup>2</sup>.

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e de outras previstas no dimensionamento (ABNT NBR 6118, 2007).

---

<sup>2</sup> A vida útil do projeto é compreendida como o período durante o qual se mantêm as características das estruturas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como dos reparos necessários decorrentes e danos acidentais. (ABNT NBR 6118, 2007)

A classe de agressividade ambiental (CAA) é dividida, de maneira bastante simplificada, mas suficiente para utilização em projetos correntes, em quatro categorias, descritas na Tabela 2-1, extraída da Norma Brasileira, e mostrada a seguir.

Tabela 2-1 - Classes de Agressividade Ambiental. Fonte: NBR 6118:2007

CAA	AGRESSIVIDADE	CLASSIFICAÇÃO GERAL DO TIPO DE AMBIENTE PARA EFEITO DE PROJETO	RISCO DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1) 2)</sup>	Médio
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1) 2)</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>1) 3)</sup>	Elevado
		Respingos de Maré	

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

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

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

Sempre que a NBR 6118/2007 refere-se aos cobrimentos nominais e mínimos serão sempre medidos tomando-se como base a superfície da armadura externa.

Para garantir a qualidade na execução das estruturas, evitando a formação de nichos de concretagem, a dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto não pode superar em 20% a espessura nominal do revestimento.

Em condições de exposição adversas devem ser tomadas medidas especiais de proteção e conservação, como por exemplo: aplicação de revestimentos hidrofugantes e pinturas impermeabilizantes sobre as superfícies do concreto, revestimentos de argamassas, de cerâmicas ou outros, galvanização da armadura, proteção catódica, dentre outros.

## 2.4 Conceito de Vida Útil

O processo de degradação é dividido em dois estágios, sendo um de iniciação, em que ocorre a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto – sem causar danos efetivos ao elemento estrutural; e o estágio de propagação, em que as primeiras manifestações de dano começam a ser evidenciadas na estrutura de concreto. Diante disso, pode-se fracionar a vida útil do elemento em quatro etapas distintas, mostradas na Figura 2-3.

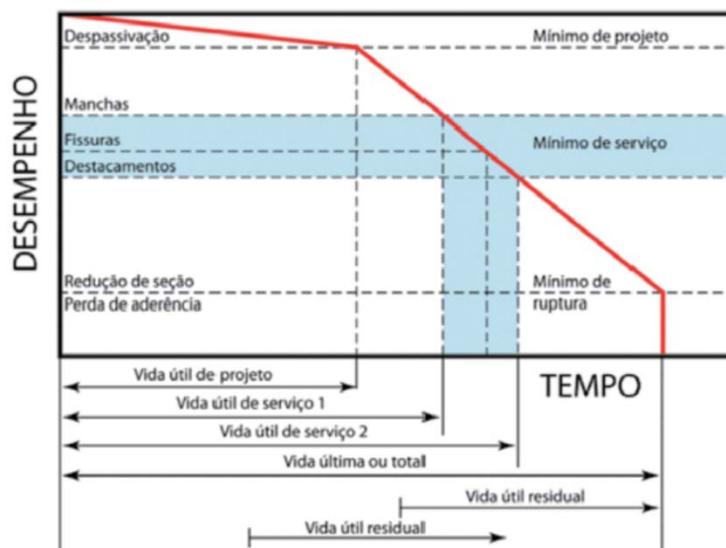


Figura 2-3 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras. Fonte: (ANDRADE, 2008)

Andrade (2008) divide a vida útil da estrutura em quatro períodos distintos, que se encontram descritos por letras na figura mostrada anteriormente.

a) Corresponde a **vida útil de projeto**, ou período de iniciação, nesta etapa os agentes agressivos (cloretos,  $\text{CO}_2$ , sulfatos, entre outros) ainda estão passando através da rede de poros do cobrimento, sem causar danos efetivos à estrutura. Para as estruturas usuais este período é de aproximadamente 50 anos.

b) Equivale a **vida útil de serviço**, correspondendo ao período de tempo em que os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar. Esta etapa é variável para cada caso, pois para certas estruturas não se admite determinados tipos de manifestações.

c) Corresponde a **vida útil total**, definida como o período de tempo correspondente à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura;

d) A **vida útil residual** corresponde ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções, contado após a realização de uma vistoria e/ou intervenção.

## **2.5 Mecanismos de Envelhecimento e Deterioração das Estruturas de Concreto**

Andrade (2006) afirma que a velocidade em que ocorre a perda de desempenho dependerá das ações e dos cuidados a serem adotados nas fases de projeto, execução, uso e manutenção.

A forma de atuação dos mecanismos de degradação dá-se de maneira extremamente complexa e aleatória. Além de haver a possibilidade da ocorrência combinada de mais de um agente, o que impossibilita determinar o modo que a estrutura se degradará, não se pode determinar o intervalo de tempo que esse fato consumir-se-á, principalmente em meios de extrema agressividade (ANDRADE, 2006).

Os mecanismos de deterioração classificam-se conforme os fenômenos que as originam, podendo ser de origem física, química ou biológica. Alguns autores, como Mehta & Monteiro (2008), afirmam que a distinção entre os fenômenos físicos e químicos são puramente arbitrárias, visto que há uma superposição entre as consequências e o efeito das duas.

Um exemplo bastante didático diz respeito ao fenômeno da corrosão, que apesar de ser de origem química, apresenta consequências físicas, como o deslocamento da massa de concreto.

### **2.5.1 Fenômenos Físicos de Deterioração das Estruturas de Concreto**

As causas físicas de deterioração são aquelas resultantes da ação de variação da temperatura externa, da insolação, do vento, da água, esta última sob a forma de chuva, gelo e umidade, podendo ainda incluir as eventuais solicitações mecânicas ou acidentes ocorridos durante a fase de execução da estrutura (SOUZA & RIPPER, 2009).

Os fenômenos físicos de deterioração das estruturas de concreto mais comuns, e responsáveis pelo desgaste superficial, são a abrasão, a erosão e a cavitação.

O desgaste superficial do concreto não está associado à perda do desempenho mecânico da estrutura, mas sim, à redução de sua capacidade funcional, sendo suas principais ocorrências devido à abrasão, erosão e cavitação.



Figura 2-4 - Causas básicas da deterioração do concreto. Fonte: (MEHTA, 2005) – Adaptada

### 2.5.1.1 Desgaste Superficial (Abrasão e Erosão)

Mehta & Monteiro (2008) afirmam que o termo abrasão geralmente se refere ao atrito seco, como no caso do desgaste sofrido por pisos e pavimentos industriais. Para os casos em que o desgaste decorra da ação de fluidos em movimento contendo partículas sólidas em suspensão é comum a utilização do termo erosão.

Independentemente da origem do desgaste superficial, seja devido ao atrito seco ou devido à movimentação de fluidos, a erosão e abrasão apresentam sintomatologias semelhantes. Esse fenômeno pode ser bastante danoso para o concreto, sendo sua ocorrência mais comum em barragens, calhas de vertedouros, canais de irrigação, pilares de pontes, dentre outros.

A Figura 2-5, mostrada a seguir, exemplifica o desgaste superficial devido à erosão ocorrido em uma das paredes do canal de água bruta da ETA Extremoz.



**Figura 2-5** Desgaste superficial acentuado em um trecho da parede de concreto do canal de água bruta da ETA Extremoz. Fonte: Laudo Técnico de Engenharia Relativo às Condições de Conservação da ETA Extremoz (Floculador, Decantador e Filtro), 2012

Segundo Neville (2004) o grau de agressividade do desgaste superficial é função da quantidade, tamanho, velocidade e dureza das partículas transportadas. Além desses fatores, alguns fenômenos hidráulicos, como os vórtices, possibilitam o aumento da erosão, principalmente no concreto situado nas proximidades das saídas dos reservatórios.

A resistência ao desgaste superficial é regida por vários fatores, como a dosagem e a natureza do aglomerante, o fator água/cimento, as características do agregado graúdo (natureza petrográfica, dimensão máxima, granulometria e sua proporção na dosagem do concreto) e ainda pela aderência entre os agregados e a pasta de cimento (VIECILI, 2004).

Viecili (2004) afirma que também são fatores que interferem na questão as características do concreto quando no estado fresco (segregação, exsudação, trabalhabilidade e teor de ar incorporado), a compactação, a cura e o acabamento e o tratamento superficial.

Não há uma maneira de se evitar a ocorrência da abrasão em estruturas de concreto armado, sendo possível apenas atenuar seus efeitos. Essa atenuação pode ser realizada de forma mais eficiente realizando-se uma dosagem racional para o concreto, principalmente com agregados de diâmetros maiores e que apresentem boa dureza (NEVILLE, 2004).

Quando existem condições severas de erosão ou abrasão recomenda-se que além do uso de agregados de alta dureza, o concreto deva ser dosado para desenvolver resistência à compressão aos 28 dias de, no mínimo, 41 MPa e curado adequadamente antes da exposição ao ambiente agressivo (VIECILI, 2004).

### **2.5.1.2 Cavitação**

A cavitação, conforme definido por Mehta & Monteiro (2008), consiste na perda de massa do concreto devido à formação de bolhas de vapor, o que gera uma súbita mudança de direção em águas que fluem rapidamente.

Os danos devido à cavitação ocorrem com maior frequência em canais abertos e cujo líquido apresenta velocidade de escoamento superior a 12 m/s. Para o caso de canais fechados, o fenômeno pode ocorrer em velocidades menores, desde que haja modificação brusca de pressão (NEVILLE, 2004).

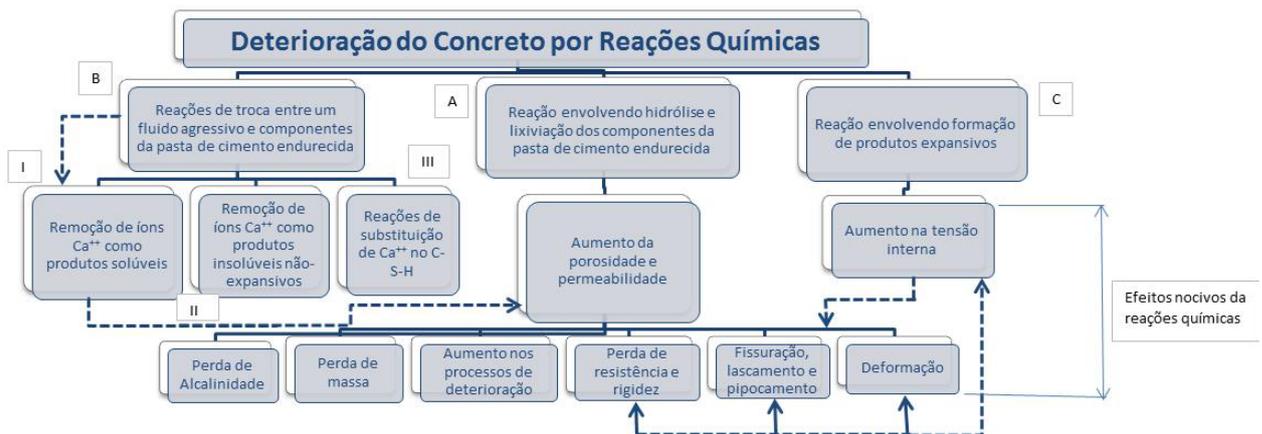
Os danos causados pela cavitação não se dão de maneira uniforme. Usualmente, há um período de ocorrência inicial com ocorrência de pequenos danos, seguida de rápida deterioração (NEVILLE, 2004).

Como forma de se atenuar o impacto da cavitação no concreto armado, recomenda-se que o concreto especificado apresente boa resistência à compressão; o tamanho máximo do agregado seja limitado a 20 mm, porque este fenômeno tende a remover grandes partículas. Por ser um fenômeno originário das características hidráulicas do escoamento, a melhor forma de se evitar danos a estruturas consiste em se fornecer condições hidráulicas que dificultem a ocorrência deste fenômeno. O uso de adições no concreto, como polímeros e fibras de aço, possibilitam um aumento da resistência à cavitação, consistindo uma maneira de se atenuar a ocorrência desse fenômeno (NEVILLE, 2004).

## 2.5.2 Fenômenos Químicos de Degradação das Estruturas de Concreto

Conforme já fora descrito, a fronteira que define os processos físicos e químicos de deterioração é bastante tênue, visto que as alterações químicas sofridas pelo concreto causam efeitos físicos na estrutura, como aumento de volume e deslocamento da massa de concreto devido ao acréscimo de volume sofrido pela barra de aço oxidada – fenômeno químico.

Os principais fenômenos químicos que afetam as estruturas de concreto armado, descritos por Mehta & Monteiro (2008) e que tem sido objeto constante de estudos é a corrosão, devido principalmente à carbonatação; e a reação álcali-agregado (RAA).



**Figura 2-6 - Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. A: ataque de água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; B (I) solução ácida formando componentes solúveis de cálcio, como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio ou bicarbonato de cálcio; B(II): soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; B(III): ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição de  $Ca^{2+}$  por  $Mg^{2+}$ ; C: ataque por sulfato formando etringita e gesso, reação álcali-agregado, corrosão da armadura no concreto, hidratação de MgO e CaO cristalinos. Fonte: (MEHTA, 2005) - Adaptada**

### 2.5.3 Fenômenos Biológicos

Os fenômenos biológicos da deterioração do concreto ocorrem em estruturas que estão em contato direto com esgotos sanitários. Este tipo de degradação do concreto ocorre devido à ação de bactérias sulfo-oxidantes (*Thiobacillus spp*).

Conforme Siva & Pinheiro (2006) o concreto é considerado um material biorreceptivo<sup>3</sup> ao ataque microbiológico, devido, principalmente às suas condições de rugosidade, porosidade, umidade e composição química, as quais combinadas com as condições ambientais, como a presença de água, a temperatura e a luminosidade adequadas, podem promover a biodeterioração do concreto.

A dinâmica do mecanismo de biodeterioração ocorre de forma interativa, entre as condições ambientais, a natureza do material e a comunidade microbiológica presente.

A biodeterioração do concreto é subdividida em quatro categorias, de acordo com Silva & Pinheiro (2006), sendo elas: biodeterioração física ou mecânica, quando há a ruptura do material devido à pressão exercida sobre sua superfície pelo microrganismo; biodeterioração estética, caracterizada pela presença de manchas na estrutura, o que causa aversão psicológica aos usuários; biodeterioração química assimilatória, decorrente quando há alteração do substrato, devido à atividade dos microrganismos e, por fim, biodeterioração química não assimilatória, quando, devido à atividade microbiológica há a formação de compostos prejudiciais à composição do substrato.

O mecanismo mais comum de biodeterioração são decorrentes do ataque de ácidos, gerados no processo de degradação da matéria orgânica; tensões ocasionadas pelo acúmulo de sais, que são rejeitos microbacterianos e que podem ocasionar estados de tensão desfavoráveis ao concreto, além de sua esfoliação (SILVA & PINHEIRO, 2006).

---

<sup>3</sup> A biorreceptividade de um material é definida como a capacidade oferecida por ele de ser colonizado por um ou mais grupos de organismos vivos. (SILVA & PINHEIRO, 2006)

Segundo Silva & Pinheiro (2006) *apud* Lewandowski & Cunningham (1998) uma outra maneira de ocorrer a biodeterioração do concreto consiste na formação de biofilme, que são ecossistemas microbianos que apresentam-se sob a forma de uma película. A formação do biofilme inicia-se com a adsorção de macromoléculas de proteínas, ácidos nucleicos, lipídeos e poluentes sobre a superfície do material, a qual é modificada por essa substância. Uma vez aderidos ao material, os microorganismos passam a se multiplicar e a produzir uma substância adesiva, estabelecendo assim, a formação do biofilme. Depois de estabelecido, o biofilme pode propiciar a fixação de outros microrganismos e a adesão de outras partículas, bem como se destacar da superfície, criando microambientes com concentrações de pH e oxigênio diferenciados.

A Figura 2-7 representa o ciclo de formação do biofilme em uma superfície de concreto.

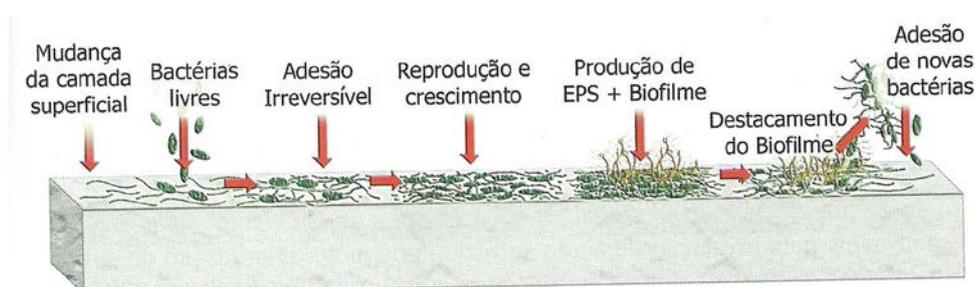


Figura 2-7 - Sequência de formação do biofilme. Fonte: (SILVA & PINHEIRO,2006)

## 2.5.4 Principais manifestações patológicas das estruturas de concreto

### 2.5.4.1 Fissuração

A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável devido à grande variabilidade e à baixa resistência que o material apresenta quando submetidos aos esforços de tração.

Mesmo sob as ações de serviço (utilização) valores críticos de tensões de tração são atingidos. Visando obter bom desempenho relacionado à proteção das

armaduras quanto à corrosão e à aceitabilidade sensorial dos usuários a NBR 6118/2007 estabelece limites para a abertura dessas fissuras (ABNT NBR 6118, 2007).

A NBR 6118/2007 define de maneira bastante clara o fenômeno de fissuração, explicitando que sua ocorrência é inevitável, ou seja, a origem do processo de fissuração é intrínseca à reologia do concreto.

As fissuras podem representar a extensão total de um dano, ou ser apenas o indício de problemas de maior magnitude. A avaliação da extensão da fissuração e sua importância dependem da utilização da estrutura, assim como da natureza do processo de fissuração. Por exemplo, um estado de fissuração considerado tolerável em uma edificação pode não ser aceitável em um reservatório, visto que passa a ser um ponto para a ocorrência de infiltrações (ACI - American Concrete Institute, 2007).

Em geral, cada causa produz um tipo de fissuração, de maneira que, conhecendo-se uma causa, é possível prever o quadro de fissuras que será formado e determinar suas possíveis consequências. A posição das fissuras no elemento estrutural, sua abertura, sua trajetória, seu espaçamento, etc., podem servir para nos indicar a causa ou as causas que as motivaram (CÁNOVAS, 1998).

Cánovas (1998) classifica os graus de fissuração em dois, sendo um estado de microfissuração inicial e um outro estado, caracterizado pela ocorrência de uma macrofissuração. As microfissuras não são perceptíveis aos técnicos, pois, em geral, só aparecem ao exterior quando se convertem em macrofissuras.

A Figura 2-8, mostrada a seguir, classifica, esquematicamente os tipos de fissuras em função de sua origem.

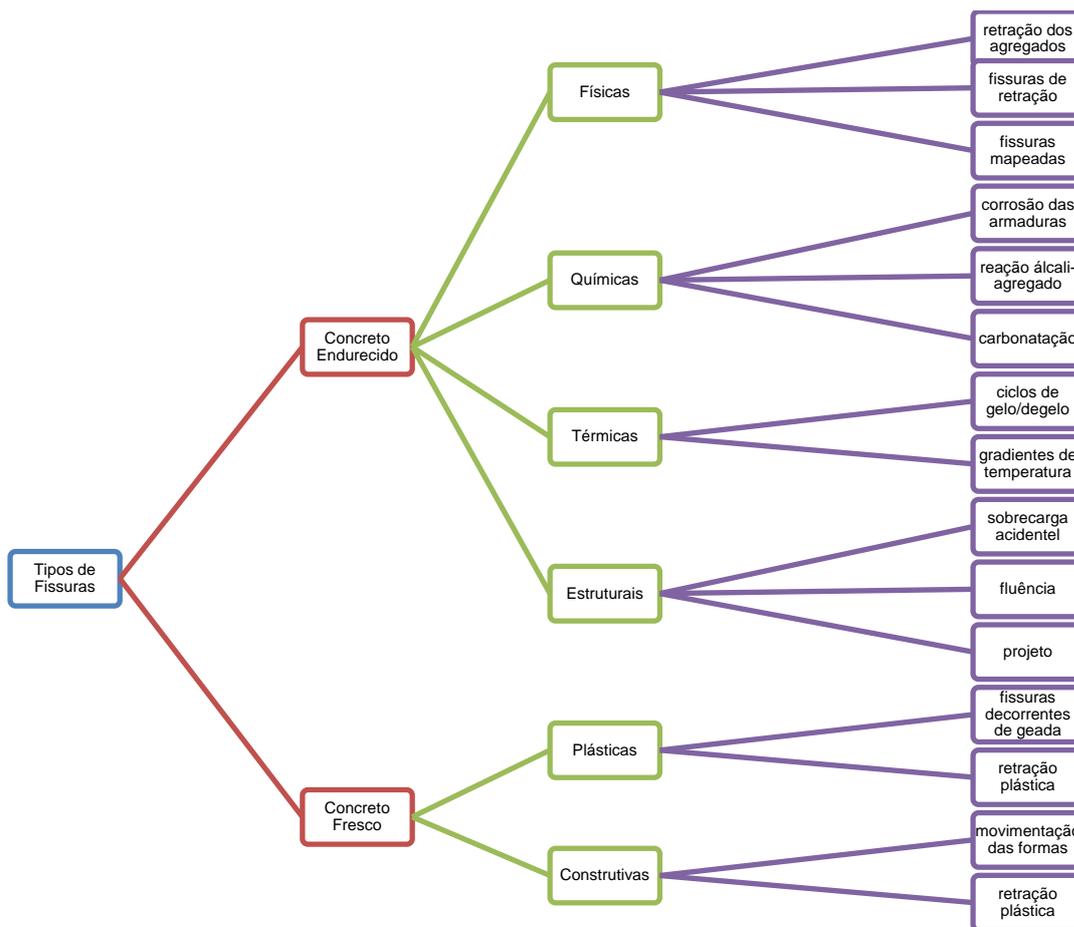


Figura 2-8- Tipos de Fissuras. FONTE: ARYA & WOOD (2003) Adaptada

Além do aspecto antiestético e da sensação de insegurança que se atribui à peça fissurada, o principal perigo que elas representam e passaram a ser pontos frágeis para a corrosão das armaduras. É por esse motivo que a abertura máxima está limitada de acordo com o ambiente ao qual está exposta a estrutura e com sua utilização (CÁNOVAS, 1998).

Arya & Wood (2003) caracterizaram a influência da direção da abertura de fissuras na degradação das estruturas de concreto, desenvolvendo dois modelos para a fissuração dos elementos de concreto. O primeiro modelo considera que as fissuras reduzem significativamente a vida útil da estrutura, permitindo o acesso de agentes deletérios às barras de aço, ocasionado, assim, a iniciação mais rápida do processo de oxidação.

O segundo modelo do estudo desenvolvido por Arya & Wood (2003) considera que as fissuras aceleram o início do processo de corrosão, entretanto, dá-se em uma área confinada no local em que as fissuras atravessam as barras.

Dentro do escopo dessas duas teorias estudadas por Arya & Wood (2003) e citada por Souza & Ripper (2009), pode-se constatar dois tipos de fissuras: o primeiro tipo caracteriza-se pela coincidência entre o paralelismo existente entre a direção de sua abertura e a maior dimensão das barras<sup>4</sup> – denominadas de fissuras coincidentes; e o segundo tipo são aquelas que possuem abertura ortogonalmente à maior dimensão das barras.

No caso do primeiro modelo, permite-se que haja a ocorrência mais rápida do processo de deterioração, visto que fragiliza a película passivadora da armadura em diversos pontos, por meio do ingresso do oxigênio. No caso dessas fissuras que enquadram-se no segundo modelo, mesmo havendo o ingresso de oxigênio em maiores taxas, a formação da pilha eletroquímica dar-se-á pontualmente, o que não gera, em um primeiro momento, um processo generalizado de corrosão.

A Figura 2-9, mostrada a seguir, representa os modelos apresentados por Arya & Wood (2003), em que exemplifica-se a ocorrência das fissuras com direção paralela à maior dimensão da barra de aço, correspondendo ao primeiro modelo; a às fissuras com direção perpendicular à armadura, conforme descrito no segundo modelo.

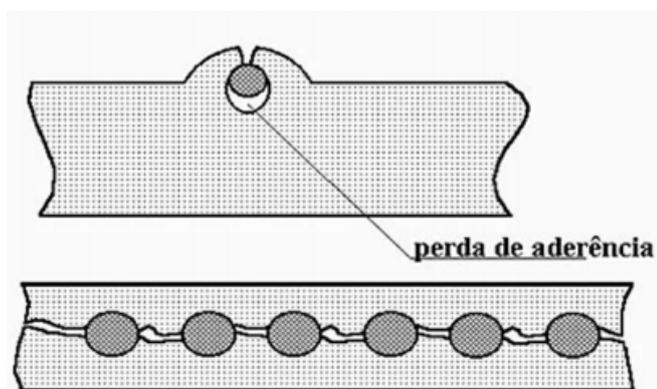


Figura 2-9 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009)

A NBR 6118/2007 impõe limites para a abertura de fissuras, descritos em seu item 13.4.2 e mostrados na Tabela 2-2.

---

<sup>4</sup> Estas direções não possuem qualquer relação com a armadura (se é armadura principal ou secundária) para combate de momentos flettores positivos ou negativos. Esta referência é tomada com relação à maior ou menor direção das barras.

**Tabela 2-2 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental. FONTE: ABNT NBR 6118:2007**

Tipo de concreto Estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto Simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II a CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pre-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pre-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>(1)</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pre-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>(1)</sup>	Combinação quase permanente
<p>1. A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com <math>a_p \geq 25</math> mm</p> <p>NOTAS:</p> <p>1 As definições ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2</p> <p>2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na área de sua ancoragem.</p>			

Outra configuração das fissuras consiste no panorama gerado pela retração plástica do concreto. O fenômeno da retração plástica consiste na deformação sofrida pelo concreto, ainda fresco, devido às ações internas geradas pela perda de água por evaporação.

O quadro de fissuração desenvolvido pela retração plástica apresenta um direcionamento indefinido, sendo denominadas, também de fissuras mapeadas. Os principais fatores que influenciam no aparecimento desse tipo de fissura são: consumo de aglomerante, porcentagem de finos existentes na mistura e teor de água de amassamento (THOMAZ, 2001) e (SOUZA & RIPPER, 2009).

A Figura 2-10, mostrada a seguir, ilustra o formato e a distribuição das fissuras mapeadas.



Figura 2-10 – Fissuração por retração do concreto. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009)

Para evitar que o concreto perca água rapidamente faz-se necessário que a cura seja bem executada. IBRAHIM *et al* (2013) comprovaram que a metodologia aplicada na cura do concreto, principalmente quando ocorrida em climas quentes possui influência direta tanto nos valores finais de resistência à compressão quanto nos índices de durabilidade (absorção de água e susceptibilidade ao ataque por cloretos).

#### **2.5.4.2 Corrosão das Armaduras**

A corrosão é uma das principais manifestações patológicas responsáveis pelo aumento da velocidade de degradação das estruturas de concreto armado. Segundo Cascudo (2005) a corrosão consiste na transformação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra.

A corrosão das barras de aço é o principal fator responsável pela deterioração das estruturas de concreto, seja a curto ou em longo prazo. Normalmente a corrosão inicia-se devido ao ataque de agentes agressivos, sejam eles os íons cloretos – fortemente presente em áreas litorâneas - ou o dióxido de carbono – presente na poluição atmosférica urbana (ABOSRRA, ASHOUR, & YOUSEFFI, 2011).

O processo corrosivo que ocorre no aço inserido na massa de concreto armado é um fenômeno complexo quando comparado à corrosão do aço exposto isoladamente às condições ambientais. Tal complexidade depende diretamente da

variabilidade das condicionantes envolvidas no mecanismo formador da corrosão. (DONG, LIN, HU, LI, & DU, 2010).

Sabe-se que a corrosão da armadura é de natureza eletroquímica havendo, no interior da massa de concreto a formação de pilhas, caracterizadas pela existência de uma área de aço anódica, onde há a oxidação; e de uma área de aço catódica, onde ocorrem as reações de redução de oxigênio (CASCUDO, 2005).

A Figura 2-11 mostra o esquema da formação de uma pilha eletroquímica.

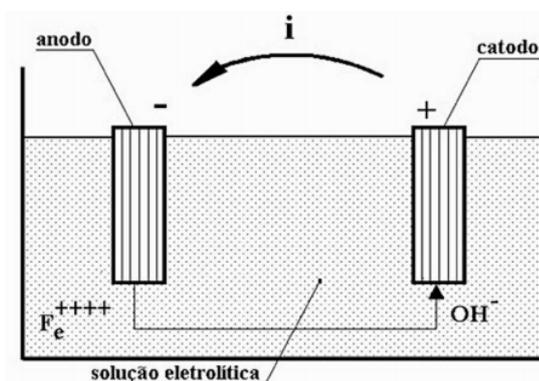


Figura 2-11 - Formação de semipilha em meio de concreto armado. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009)

Nas zonas anódicas (corroídas) ocorrem reações de dissolução do ferro (oxidação):



Nas zonas catódicas (não corroídas) ocorrem as reações de redução do oxigênio:



A partir deste momento, os íons  $\text{Fe}^{2+}$  migram pelo eletrólito em direção ao cátodo e os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) migram em direção ao ânodo. Em uma região intermediária eles se encontram e precipita-se o hidróxido ferroso, de acordo com a seguinte reação:



A Figura 2-12 mostra como se processa o mecanismo da corrosão das armaduras na massa de concreto.

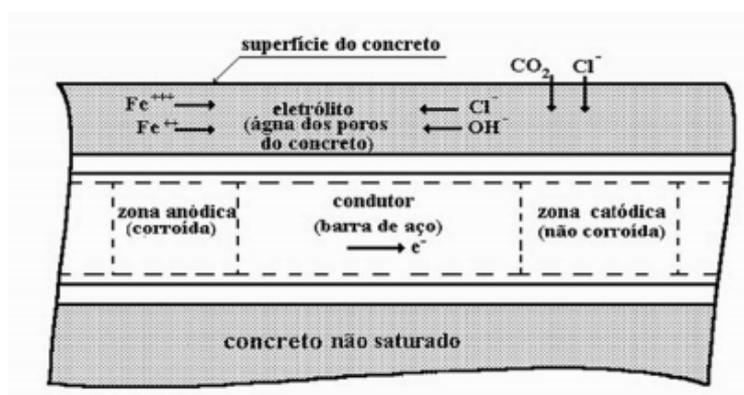


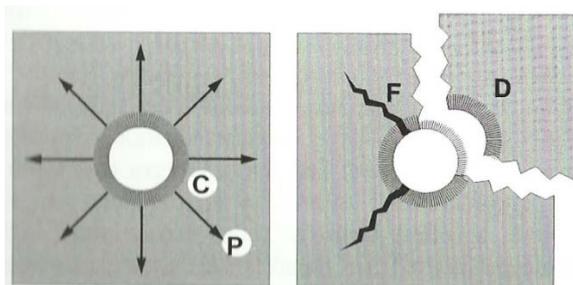
Figura 2-12 – Célula de Corrosão no meio concreto armado. Fonte (SOUZA & RIPPER, 2009)

De todos os mecanismos de deterioração do concreto, a corrosão tem sido um dos mais estudados ao longo dos tempos. O aprofundamento no estudo deste mecanismo decorre dos efeitos deletérios causados nas estruturas, porque além acarretar o aparecimento de fissuras nos elementos, há a redução da seção de aço, que dependendo do seu grau de perda pode levar à ruína da estrutura.

Além das implicações ligadas à segurança e estabilidade – requisitos a serem atendidos correspondentes ao Estado Limite Último (ELU) - a corrosão também gera um efeito psicológico negativo nos usuários, podendo tornar a estrutura no todo ou em partes inaceitável com relação ao Estado Limite de Serviço (ELS).

Na medida em que se instala o processo de corrosão, a transformação do aço metálico em óxido é acompanhada de um incremento de volume que pode atingir 600% do volume inicial, dependendo do estágio de oxidação encontrado. Isso decorre porque os produtos da oxidação formados na superfície da barra tendem a ocupar os poros do concreto. À medida que o processo de corrosão avança, o volume dos poros torna-se insuficiente para armazenar o volume gerado pelos produtos da oxidação, gerando assim, tensões de tração, que ao excederem a resistência à tração do concreto rompem o poro, possibilitando a formação de fissuras. O aparecimento das fissuras pode acelerar o processo de corrosão enquanto as condições eletroquímicas da interface aço-concreto forem favoráveis (AVELDAÑO & ORTEGA, 2010).

A Figura 2-13 exemplifica a trajetória dos esforços de tração no concreto devido ao aumento de volume da barra de aço.



**Figura 2-13 - Esforços produzidos que levam à fissuração e ao destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras. Legenda: P – Esforços radiais; C – Produto da corrosão; F fissura; D – destacamento do concreto. Fonte: (CASCUDO, 2006)**

Os estudos têm mostrado que o fenômeno da oxidação tem seu início na medida em que ocorre a despassivação da armadura. O concreto apresenta um pH bastante básico – com valores da ordem de 13.5 – entretanto, à medida que ocorre a penetração dos íons cloreto ou o avanço da frente de carbonatação, este pH tende a sofrer redução, até que inicia-se a oxidação da armadura – quando o pH apresenta valores da ordem de 11.5 (AHMAD, 2003).

Diversos fatores influenciam no processo de corrosão, sendo função principal das propriedades do concreto, do tempo de exposição aos agentes deteriorantes, condições da superfície da barra de aço. Àqueles concretos que apresentam um baixo fator água/cimento em sua composição apresenta maior resistência à penetração dos íons cloreto, promovendo assim, uma barreira contra a penetração do oxigênio (ABOSRRA, ASHOUR, & YOUSEFFI, 2011).



**Figura 2-14 - Laje de cobertura apresentando total deterioração do cobrimento do concreto e estado generalizado de corrosão de armaduras.**

Song *et al* (2003) analisaram os mecanismos de degradação de vinte e dois cais de portos situados no sudeste da China, construídos entre a década de 1970 e 1990. Foi possível constatar que todos os cais avaliados apresentavam manifestações patológicas semelhantes, sendo as vigas e lajes os elementos mais deteriorados.

Mesmo o trabalho supracitado tendo sido realizado para estruturas de concreto inseridas em ambientes marinhos, pode-se encontrar características microclimáticas semelhantes tanto no ambiente marinho quanto no ambiente dos reservatórios. Os dois sistemas apresentam elevada umidade relativa do ar; as estruturas estão submetidas a ciclos de molhagem e secagem, além de a água das duas situações, tanto no reservatório quanto a água do mar, apresentam íons nocivos à durabilidade das estruturas de concreto.

Conforme Song *et al* (2003) os fatores que afetam a corrosão das estruturas analisadas podem ser divididos em efeitos ambientais, qualidade da construção, espessura do revestimento, propriedade do concreto – enquanto material de construção, e a localização do elemento na estrutura.

Os elementos situados na zona de respingo da maré apresentaram níveis de corrosão mais avançados que aquelas áreas que estavam completamente submersas ou fora da zona de respingo. Pontos críticos de construção, como revestimento com espessura inadequada, juntas de concretagem executadas sem o devido esmero, falhas na concretagem (“nichos”) e locação das barras no local errado constituem falhas executivas que possibilitam a aceleração do processo de degradação das estruturas (SONG *et al*, 2003).

Com relação ao revestimento, os resultados obtidos em ensaios realizados por Dong *et al* (2010) mostraram que para espessuras situadas entre 3 cm e 4 cm, tanto a taxa de perda de massa quanto a de oxidação da armadura podem sofrer redução de até 91%, após seis ciclos de molhagem e secagem.

A Figura 2-15, mostrada a seguir, correlaciona a concentração de cloreto de sódio em função de diferentes espessuras de revestimento aplicadas em peças de concreto armado.

Percebe-se que na medida em que há o aumento da espessura da camada de revestimento a redução da concentração de cloretos sofre um decréscimo considerável.

Entretanto, por questões construtivas, não se pode aumentar a espessura do revestimento demasiadamente sem adotar-se medidas cautelares, objetivando garantir a aderência da camada de concreto.

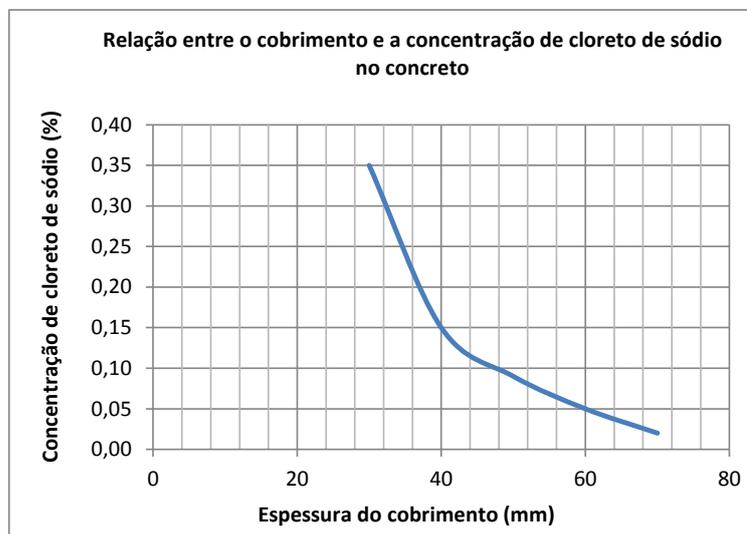


Figura 2-15 - Relação entre o revestimento do concreto e a concentração de cloreto de sódio no concreto. FONTE: Dong *et al* (2010). Adaptada

O fato da resistência à compressão e durabilidade apresentarem uma relação direta decorre do próprio processo de dosagem. Concretos mais duráveis apresentam, em sua dosagem, um consumo maior de cimento, fato este que reduz a porosidade do material. Estudos realizados por Geiker (2012) & Asborra *et al* (2011) comprovaram que tanto a resistência à compressão quanto o uso de adições, como cinzas volantes e sílica, possibilitam obter um produto mais resistente aos agentes deletérios.

Ainda não se formou no meio técnico-científico um consenso sobre a maneira mais precisa de se mensurar o fenômeno da corrosão, de maneira que seja possível obter o tempo em que ocorrerá a despassivação da armadura.

#### 2.5.4.2.1 Corrosão devido ao ataque por cloretos

Uma das principais causas da deterioração das estruturas de concreto tem como origem sua exposição a ambientes prejudiciais que podem ser encontrados no ambiente, como por exemplo: determinados tipos de águas subterrâneas, efluentes industriais e efluentes domésticos. Esses ambientes apresentam íons cloreto e sulfatos que danificam as estruturas de concreto (HUANG, BAO, & YAO, 2004).

O processo de corrosão devido à indução por íons cloreto inicia-se com a penetração dos respectivos íons na massa de concreto, devido, principalmente, aos seguintes fatores:

- Emprego de aceleradores de pega que contenham  $\text{CaCl}_2$ ;
- Contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados);
- Contaminação através da névoa salina;
- Contato direto com a água do mar;
- Através de determinados processos industriais.

Não se observou a existência de um consenso dentro da comunidade científica sobre o teor de cloretos que pode provocar a despassivação da armadura. Isso ocorre devido à grande quantidade de fatores que influenciam os fenômenos de transporte e absorção de cloretos no concreto, como a dosagem, a temperatura, a umidade relativa, o pH da solução dos poros, o teor de cloretos solúveis, a quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento, a fonte de cloretos e as características metalúrgicas da armadura atingida (ANDRADE J. d., 2001). (GJORV, 2011) (HUANG, BAO, & YAO, 2004)

Na presença dos íons  $\text{Cl}^-$ , há a combinação entre os íons de cálcio, presentes no hidróxido de cálcio, causando assim a precipitação de sais e a alteração da fase sólida do concreto. O cloreto dissolvido na água aumenta a taxa de lixiviação da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ ), ocasionando o aumento da porosidade do concreto, que por sua vez ocasiona perda de rigidez e da resistência do elemento estrutural (HUANG, BAO, & YAO, 2004).

Conforme Huang *et al* (2004) Entretanto, o processamento das reações químicas ocorre de maneira mais veloz que a taxa de difusão, por isso, o processo de deterioração por cloretos é regido pela taxa de difusão de um dos elementos integrantes desta reação química (reagentes ou produtos).

Segundo Figueiredo (2005) o mecanismo de penetração dos íons cloreto através do concreto, na forma de cloretos livres, que seja capaz de desencadear o processo corrosivo, depende de uma série de fatores relacionados, como por exemplo: tipo de acesso ao concreto (antes ou depois de endurecido), presença de outro ânion como o sulfato, tipo de cimento empregado na produção do concreto, o fator água/cimento, estado de carbonatação do concreto, umidade ambiental (condições de saturação dos poros) e teor de cimento.

Castro (1994) e Safehian & Ramezaniapour (2013) constataram a existência de duas zonas de concentração dos íons cloreto. Uma zona interna que se encontra sempre com elevada umidade e outra zona externa submetida a ciclos de molhagem e secagem.

As condições climáticas apresentam bastante influência na taxa de difusão dos íons cloreto. Tal fato foi constatado por Safehian & Ramezaniapour (2013) e Song *et al* (2003), que compararam tal taxa em três regiões distintas (Reino Unido, Venezuela e Japão). O estudo concluiu que aquelas estruturas edificadas em clima tropical são mais susceptíveis ao ataque por cloretos, devido, principalmente à elevada umidade relativa do ar, fator que propicia maior penetração dos íons cloreto.

As condições ambientais influenciam a penetração dos íons cloreto de forma diferente da maneira como influencia a penetração do CO<sub>2</sub>. Enquanto para esse composto a difusão dá-se melhor em situações cuja água preenche parcialmente os poros, no caso dos cloretos essa situação ótima ocorre nas situações em que a água encontra-se estagnada – ocorrendo o transporte por difusão; e por sucção capilar sendo esta última situação corrente em estruturas de concreto submetidas a ciclos de umedecimento, como é o caso dos reservatórios. (FIGUEIREDO, 2005)

#### **2.5.4.3 Corrosão por Carbonatação**

Define-se como carbonatação um complexo processo físico-químico onde os compostos de cimento, hidratados ou não, são geralmente substituídos por carbonatos, através de reações com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases como o dióxido de enxofre (H<sub>2</sub>S) (PAULETTI, 2004).

Como resultado da carbonatação tem-se a redução do pH do concreto a valores inferiores a 9,0. Nesta faixa de pH os compostos hidratados do cimento susceptíveis à carbonatação são o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos (FIGUEIREDO, 2005).

A Figura 2-16 mostra como ocorre a desp passivação da armadura imersa no concreto devido à penetração da frente de carbonatação.

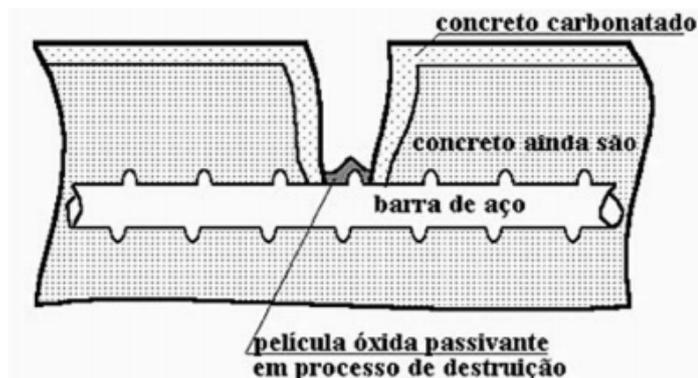


Figura 2-16 - Carbonatação condicionada pela fissuração. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 2009)

Este processo ocorre lentamente segundo a reação principal, apresentada na equação 4:



Os mecanismos que envolvem o processo de carbonatação do concreto dividem-se em:

- Difusão do  $\text{CO}_2$  da atmosfera na fase gasosa dos poros do material e posterior dissolução na água dos poros;
- Dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  sólido na água dos poros e difusão do  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido das regiões de maior para as de menor alcalinidade;
- Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido na água dos poros;
- Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o C-S-H e os compostos não hidratados ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ) da pasta de cimento endurecida;
- Redução do volume dos poros devido à precipitação dos produtos de carbonatação.

Segundo Figueiredo (2005) a velocidade e a profundidade de carbonatação dependem de fatores relacionados com o meio ambiente e com as características finais do concreto endurecido.

São fatores condicionantes no avanço da profundidade da frente de carbonatação: a concentração de  $\text{CO}_2$ , a umidade relativa do ar e a temperatura do meio conforme, que estão diretamente relacionados à condição de exposição da estrutura; e, relacionadas às características do concreto são fatores influentes a composição química do cimento, o traço utilizado na dosagem, o tipo de cimento e a qualidade da execução.

A Tabela 2-3, mostrada a seguir, concatena os fatores condicionantes e as características influenciadas por tais fatores.

Tabela 2-3- Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação.  
Adaptada. Fonte: Kazmierczak (1995)apud Figueiredo (2005)

	<b>Fatores Condicionantes</b>	<b>Características Influenciadas</b>
<b>Condições de Exposição</b>	Concentração de CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mecanismo físico-químico</li> <li>• Velocidade de carbonatação</li> </ul>
	Umidade Relativa do Ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grau de saturação dos Poros</li> <li>• Velocidade de Carbonatação</li> </ul>
	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de Carbonatação</li> </ul>
<b>Características do Concreto</b>	Composição química do cimento <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características do clínquer</li> <li>▪ Teor de adições</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade da pasta carbonatada</li> <li>• Reserva alcalina</li> </ul>
	Traço	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade</li> </ul>
	Qualidade de Execução <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Defeitos</li> <li>▪ Cuidados coma cura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade</li> <li>• Grau de hidratação</li> </ul>

#### 2.5.4.4 Manchas e Eflorescências

A ocorrência de manchas nas estruturas de concreto pode ter sua origem ligada a diversos tipos de causas. Aquelas decorrentes de poluição e devido à ação de intempéries, a ação da chuva, por exemplo.

As manchas decorrentes da retenção de umidade na estrutura apresentam coloração escura, podendo ocorrer devido à presença de fungos e mofos. Quando a origem das manchas é a corrosão das armaduras, apresentam coloração marrom avermelhada ou esverdeada na superfície do elemento estrutural, devido à lixiviação dos produtos de corrosão (FONSECA, 2007).

A eflorescência consiste no depósito de sais na superfície do concreto devido ao carreamento dos sais originários da hidratação do cimento. Geralmente ocorrem em locais onde a percolação da água é facilitada, como em regiões que abrigam juntas ou apresentam a ocorrência de fissuras (SUPRENANT, 1992).

Conforme Suprenant (1992) há três maneiras de se controlar a ocorrência de eflorescências: redução da capacidade de percolação do concreto, redução da concentração de sais na mistura e, por fim, a conversão de compostos solúveis em compostos insolúveis.

A redução da capacidade de percolação do concreto pode ser obtida por meio do uso eficiente de impermeabilizantes, selantes nas juntas de dilatação e reparo nas trincas e fissuras existentes. Pode-se reduzir a concentração de sais na mistura com a aplicação de areias e água que possuam baixas concentrações de sais. O uso de adições no concreto, como as pozolanas e cinzas volantes, diminuem a ocorrência das eflorescências devido à sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, transformando os compostos solúveis resultantes do processo de hidratação do cimento em compostos insolúveis (SUPRENANT, 1992).

Como conclusão da revisão verifica-se que a durabilidade das estruturas de concreto, apesar do grande avanço ocorrido nos últimos tempos, ainda representa um grande campo passível de exploração e descobertas.

Na atual fase de desenvolvimento percebe-se que a comunidade científica apresenta consenso em certos pontos enquanto que em outros ainda há diversos conceitos a serem entendidos.

É de conhecimento comum ao meio técnico-científico que o concreto deve atender a padrões mínimos para que se garantam as condições mínimas aceitáveis de durabilidade. Entre esses fatores pode-se destacar a necessidade de um padrão executivo satisfatório; utilização de concretos bem dosados, com o atendimento de vários parâmetros além da resistência à compressão – como absorção, porosidade e etc.; influência do ambiente em que a estrutura será inserida.

Com relação aos conceitos que ainda não possuem um entendimento comum na comunidade técnico-científica pode-se destacar como principal fator a aleatoriedade que os parâmetros apresentam, além da existência de diversas possibilidades de combinações entre si. Essa característica dificulta o desenvolvimento de modelos universalmente aceitos em que se possa projetar o comportamento das estruturas frente aos diversos cenários passíveis de ocorrência ao longo de sua vida útil.

## CAPÍTULO 3

# 3 Metodologia de Quantificação do Grau de Deterioração

Esta metodologia consiste na quantificação do grau de deterioração de estruturas de concreto, tendo sido desenvolvida por Castro (1994), e desde sua publicação tem sido amplamente utilizada no meio técnico e científico em várias regiões do Brasil.

Desde a concepção e definição da metodologia realizada por Castro (1994), já houveram vários trabalhos publicados objetivando remodelá-la, tornando-a coerente com a profundidade que o estudo dos fenômenos patológicos nas edificações tem alcançado. As principais remodelações foram realizadas nas pesquisas de Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007).

A necessidade de reformulações na metodologia desenvolvida por Castro (1994) causou maior impacto em seu roteiro de inspeção, e foi decorrente das modificações nas conceituações dos danos mais frequentes em estruturas de concreto armado e à utilização da norma de concreto vigente (FONSECA, 2007).

A inspeção é necessária para o diagnóstico do estado de conservação das construções, a verificação da estabilidade e da segurança das estruturas, a previsão de vida residual e o projeto das intervenções de restauração (BERTOLINI, 2010).

Nesta pesquisa a inspeção foi realizada utilizando-se os conceitos e recomendações indicadas pela Norma de Inspeção Predial – IBAPE/SP-2011. A quantificação do grau de deterioração da estrutura foi realizada em conformidade com a metodologia desenvolvida na Universidade de Brasília (UnB), e denomina-se modelo do Grau de Deterioração – conhecida pela sigla GDE/UnB, sendo aplicada a reformulação mais recente, proposta por Fonseca (2007).

### 3.1 Metodologia GDE/UnB Castro (1994) para quantificação do grau de deterioração das estruturas de concreto

A metodologia desenvolvida por Castro (1994) consiste na realização de inspeções estruturais realizadas com base em uma matriz, a ser preenchido pelos responsáveis pela inspeção, onde constam, além das informações básicas sobre a estrutura, diversas matrizes que reúnem dados necessários ao desenvolvimento do fluxograma .

A estrutura da edificação é dividida em famílias de elementos estruturais típicos. Na matriz de um elemento deve ser atribuída uma pontuação que classifica o nível de gravidade de uma determinada manifestação de dano naquele elemento, denominado Fator de Intensidade do Dano ( $F_i$ ), segundo o qual se pode inferir a evolução da deterioração estrutural.

Dessa forma, os fatores de ponderação dos danos são comuns para uma família de elementos enquanto os fatores de intensidade vão depender da situação física específica e da gravidade dos danos em cada um dos elementos da família.

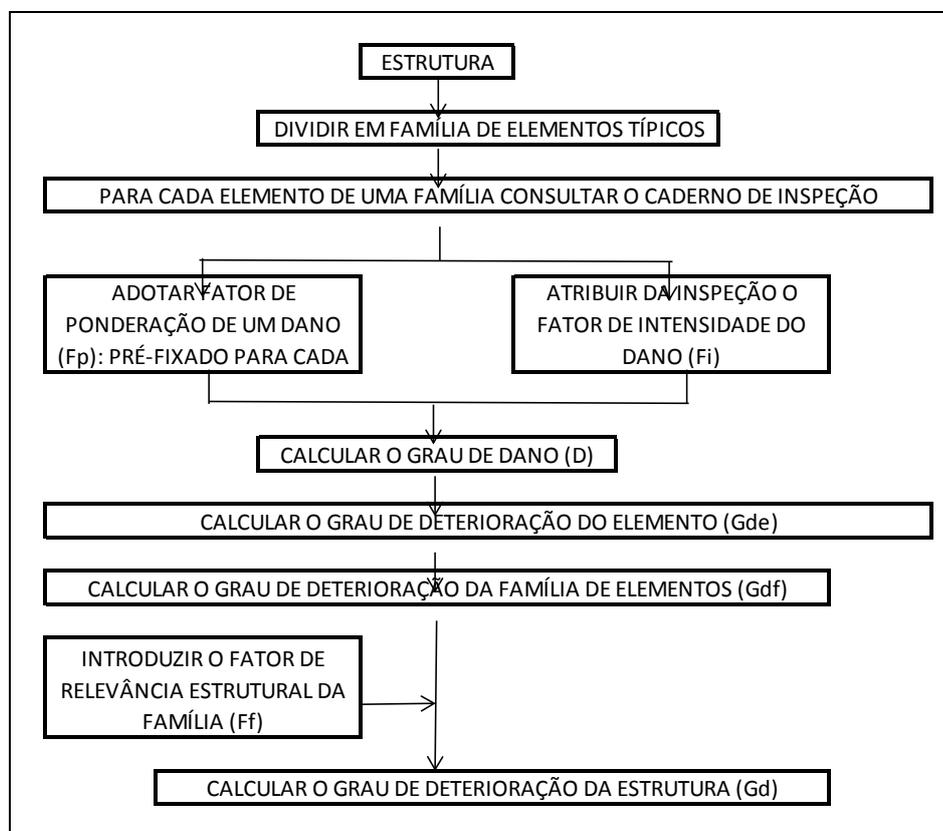
Para cada elemento de uma família é elaborada uma matriz onde são listadas as possíveis manifestações de danos, específicas daquela família, com o respectivo Fator de Ponderação do Dano ( $F_p$ ). Este fator, previamente estabelecido na matriz visa quantificar a importância relativa de um determinado dano no que se refere às condições gerais de estética, funcionalidade e segurança do elemento.

Após o levantamento dos dados em campo, determina-se, para cada elemento de uma família, um Grau de Deterioração ( $G_d$ ) individual e o consequente Grau de Deterioração da Família de elementos ( $G_{df}$ ) que compõem a estrutura e entrando com um Fator de Relevância Estrutural da Família ( $F_r$ ), previamente estabelecido segundo a importância na funcionalidade e segurança estrutural, por fim determina-se, através de uma formulação matemática o Grau de Deterioração da Estrutura ( $G_{de}$ ).

A Figura 3-1, mostrada a seguir, esquematiza o roteiro de cálculo para avaliação do grau de deterioração das estruturas de concreto. O primeiro passo para

aplicação da metodologia consiste na subdivisão da estrutura em família de elementos típicos.

Em seguida deve-se consultar o caderno de encargo de inspeção, devendo-se adotar um fator de ponderação e outro de intensidade para cada tipo de dano. Em seguida deve-se calcular o Grau de Dano (D), o Grau de Deterioração do Elemento ( $G_{de}$ ) e o Grau de Deterioração da Família de Elementos ( $G_{df}$ ). Como penúltimo passo aplica-se o fator de relevância estrutural e, por fim, calcula-se o Grau de Deterioração da Estrutura ( $G_d$ ).



**Figura 3-1 - Fluxograma para avaliação do grau de deterioração de estruturas de concreto da metodologia GDE/UnB. Adaptada (Fonseca, 2007)**

### 3.1.1 Metodologia reformulada por Lopes (1998)

Segundo Lopes (1998) apud Fonseca (2007) durante a aplicação da metodologia GDE/UnB, ainda em sua primeira versão, em seis prédios de uso comercial de propriedade do Banco do Brasil S.A. foi constatada a necessidade de algumas pequenas alterações na metodologia, visando uma maior abrangência e facilidade de sua aplicação. Inicialmente, observou-se a necessidade de se alterar a nomenclatura das famílias, o acréscimo de alguns outros danos e a realização de alguns ensaios.

A remodelação sugerida por Lopes (1998) atingiu as estratificações das famílias de elementos, relação de danos, inclusão de ensaios na inspeção e a definição dos novos fatores de ponderação dos danos. Também foi constatada a necessidade de alimentação do sistema com o maior número possível de informações. Por isso, houve a inserção de alguns danos que contribuem para o desenvolvimento ou aceleração do processo de degradação.

Na família de elementos houve a retirada do item juntas devido à dificuldade de identificação dos elementos durante a inspeção. Por ser um elemento inserido em pilares, vigas e lajes, ao se atribuir um índice de danos poder-se-ia incorrer no erro de não assinalá-los em todos os elementos que a conformam, e que são afetados por seus danos. Assim, todos os danos referentes às juntas foram englobados sob a denominação de junta danificada.

Sob a mesma justificativa houve a alteração dos danos referentes à recalques e a deslocamentos na estrutura sob a denominação de recalque/deslocamento; e os danos referentes à corrosão, antes denominados de mancha de corrosão, foi alterado para apenas corrosão, abrangendo todos os seus estágios, desde o surgimento de machas até a perda total da seção da armadura.

A inclusão de ensaios na metodologia decorreu da necessidade da investigação mais minuciosa da estrutura, como nos casos de cobertura deficiente, profundidade de carbonatação e da presença de cloretos (LOPES,1998).

Neste trabalho também foi sugerida a utilização de uma quantidade mínima de ensaios por elemento, permitindo tratar os dados estatisticamente.

Devido à alteração da metodologia fez-se necessário reanalisar os fatores de ponderação dos danos, sendo necessário o estudo e ajuste dos valores com a finalidade de se obter uma harmonização com aqueles já existentes na metodologia.

### **3.1.2 Metodologia reformulada por Boldo (2002)**

Boldo (2002) apud Fonseca (2007) também encontrou dificuldades na aplicação da metodologia GDE/UnB, já após a reformulação proposta por Lopes (1998). A primeira alteração foi a substituição do nome “Caderno de Inspeção para Estruturas de Concreto” por “Roteiro de Inspeção para Estruturas de Concreto”. Segundo o autor, esta alteração objetivou enfatizar a importância de usá-lo rigorosamente nas inspeções.

As alterações subsequentes visaram dotar a metodologia de informações suficientes para a execução de vistorias, sem a necessidade de consulta adicional a outros documentos.

Segundo Boldo (2002), as alterações propostas consistiram nas seguintes alterações: o dano esfoliação passou a ser chamado deslocamento, para não ser confundido com desagregação, pois este último é resultado de ataques químicos ao concreto.

O dano segregação também teve sua nomenclatura modificada, passando a ser chamado de falhas de concretagem (nichos ou ninhos de segregação).

A abordagem dos danos fissuração inaceitável e flechas excessivas foram modificados, passando a se adotar os parâmetros em relação à Norma NBR 6118/2003<sup>5</sup>.

Os danos infiltração e infiltração na base passam a ser chamados, respectivamente, umidade e umidade na base, visto que ambos indicam a penetração de água ou a presença desta em elementos estruturais.

---

<sup>5</sup> À época do desenvolvimento do trabalho por Boldo (2002) encontrava-se em tramitação na ABNT o projeto de reformulação da NB 1/1978. A NBR 6118 somente entrou em vigência a partir de 31 de março de 2004.

Nesta reformulação os danos manchas e umidade foram incluídos na tabela referente a elementos de composição arquitetônica.

O fato de ter ocorrido o aprimoramento da metodologia da inspeção, não impossibilitou que os projetos fossem consultados, com o objetivo principal de melhorar a profundidade da vistoria.

À época do desenvolvimento do estudo, ainda não vigorava o texto atual da NBR 6118/2004, entretanto, houve a incorporação das exigências referentes à durabilidade, visto que o texto conclusivo do projeto de revisão da NB-1 já estava finalizado.

Houve também a redução da quantidade de itens a serem vistoriados no elemento junta de dilatação, passando a ter apenas a infiltração e a obstrução da junta como danos associados, sendo aplicado um fator de ponderação igual a 10 para ambos os casos.

O dano manchas passou a ter três fatores de intensidade do dano, atribuídos em função do percentual da área visível afetada do elemento estrutural. A alteração tem por finalidade tentar classificar mais os danos numericamente (BOLDO,2002).

### **3.1.3 Metodologia reformulada por Fonseca (2007)**

Fonseca (2007) melhorou a definição das manifestações patológicas que podem levar à corrosão do concreto, cuja origem pode ocorrer devido à carbonatação, ataque por cloretos e cobrimento deficiente.

Na pesquisa desenvolvida por Fonseca (2007) foi realizada uma análise pormenorizada da Tabela de Classificação dos Danos e Fatores de Intensidade ( $F_i$ ) do roteiro de inspeção proposto por Boldo (2002). Fonseca (2007) concluiu que haveria a necessidade de melhorar a forma de apresentação e quantificar melhor os danos associados à corrosão.

Fonseca (2007) desvinculou a correlação do dano fissuração inaceitável das fissuras consequentes de ataques químicos, responsáveis por degradação e

corrosão, e os valores toleráveis para as aberturas de fissuras foram mantidos dentro dos limites preconizados pela NBR 6118:2004.

Quando a carbonatação, localizada ou generalizada, atinge a armadura, na presença de umidade, há o risco de se iniciar o processo de corrosão. Nesse caso, foram definidos fatores de intensidade ( $F_i$ ) de 3 e 4, respectivamente. (FONSECA,2007).

Quando a causa da corrosão das armaduras decorre devido a presença de cloretos deve-se adotar fatores de intensidade ( $F_i$ ) iguais a 2 e 3, respectivamente, para elementos no interior e exterior, sem a presença de umidade. Quando existe a presença de cloretos em ambientes úmidos, o fator de intensidade a ser adotado é  $F_i=4$ .

Se um elemento apresenta cobrimento de concreto deficiente menor que o previsto na norma atual, e ainda permitindo a localização visual e exposição da armadura em pequenas ou grandes extensões, essa armadura corre o risco de corrosão recebendo um fator de intensidade ( $F_i$ ) igual a 2 e 3, respectivamente.

### **3.2 Fundamentação Teórica da Metodologia Aplicada no Trabalho**

A metodologia utilizada nesta pesquisa consiste na utilização da metodologia de quantificação do grau de deterioração das estruturas, proposta por Castro (1994) e reformulada por Fonseca (2007).

A pesquisa consiste na determinação sequencial dos graus dos danos existentes, por meio de fatores de ponderação, em cada um dos elementos constituintes da estrutura, dos graus de deterioração dos elementos e das famílias de elementos de mesma natureza, e, por fim, do grau de deterioração da estrutura.

### 3.2.1 Fator de Ponderação do Dano ( $F_p$ )

Fator que visa quantificar a importância relativa de um determinado dano, no que se refere às condições gerais de estética, funcionalidade e segurança dos elementos de uma família, tendo em vista as manifestações patológicas passíveis de serem detectadas.

Para sua definição são estabelecidos os problemas mais relevantes quanto aos aspectos de durabilidade e segurança estrutural. Assim, para cada manifestação patológica, e em função da família de elementos que apresentam o problema, foi estabelecido um grau numa escala de 1 a 10. Uma determinada manifestação patológica pode ter fatores de ponderação diferentes de acordo com as características da família onde o elemento se insere, dependendo das consequências que o dano possa acarretar.

### 3.2.2 Fator de Intensidade do Dano ( $F_i$ )

Este fator classifica a gravidade e evolução de uma manifestação de dano em um determinado elemento, segundo uma escala de 0 a 4, mostrada a seguir:

- Elemento sem lesões:  $F_i = 0$
- Elemento com lesões leves:  $F_i = 1$
- Elemento com lesões toleráveis:  $F_i = 2$
- Elemento com lesões graves:  $F_i = 3$
- Elemento em estado crítico:  $F_i = 4$

As Tabela 3-1, Tabela 3-2 e Tabela 3-3, apresentam os fatores de intensidades associados a cada manifestação patológica.

Tabela 3-1 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007)

<b>Tipos de Danos</b>	<b>Fi</b>	<b>Tipos de Manifestação</b>
Carbonatação	1	Localizada com algumas regiões com pH < 9, sem atingir a armadura
	2	Localizada, atingindo a armadura, em ambiente seco
	3	Localizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido
	4	Generalizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido
Cobrimento deficiente	1	Menores que os previstos em norma sem, no entanto, permitir a localização da armadura
	2	Menor que o previsto em norma, permitindo a localização visual da armadura ou armadura exposta em pequenas extensões
	3	Deficiente com armaduras expostas em extensões significativas
Contaminação por cloretos	2	Em elementos no interior, sem umidade
	3	Em elementos no exterior sem umidade
	4	Em ambientes úmidos
Corrosão de armaduras	2	Manifestações leves
	3	Grandes manchas e/ou fissuras de corrosão
	4	Corrosão acentuada na armadura principal, com perda relevante de seção
Desagregação	2	Início de manifestação
	3	Manifestações leves
	4	Por perda acentuada de seção e esfrelamento do concreto
Deslocamento por empuxo	3	Deslocamento lateral da cortina no sentido horizontal, estável
	4	Deslocamento lateral da cortina no sentido horizontal, instável
Desvios de geometria	2	Pilares e cortinas com excentricidade $\leq h/100$
	3	Pilares e cortinas com excentricidade $h/100 \leq e < h/50$
	4	Pilares e cortinas com excentricidade $\geq h/50$
Eflorescências	1	Início de manifestações
	2	Manchas de pequenas dimensões
	3	Manchas acentuadas, em grandes extensões
	4	Grandes formações de crostas de carbonato de cálcio

Tabela 3-2 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007)

<b>Tipos de Danos</b>	<b>Fi</b>	<b>Tipos de Manifestação</b>
Esfoliação	2	Pequenas escamações de concreto
	3	Lascamento de grandes proporções, com exposição de armadura
	4	Lascamento acentuado com perda relevante de seção
Fissuras	1	Aberturas menores do que as máximas previstas em normas
	2	Estabilizadas, com abertura de até 40% acima dos limites de norma
	3	Aberturas excessivas, estabilizadas
	4	Aberturas excessivas, não estabilizadas
Flechas	1	Não perceptíveis a olho nu
	2	Perceptíveis a olho nu, dentro dos limites previstos em norma
	3	Superiores em até 40% às previstas em norma
	4	Excessivas
Impermeabilização Deficiente	2	Danos da camada protetora e/ou perda de elasticidade do material da impermeabilização
	3	Descontinuada, degradada em alguns pontos (pontos de infiltração)
	4	Degradação acentuada, com perda relevante de estanqueidade
Infiltração	1	Indícios de umidade
	2	Pequenas manchas
	3	Grandes manchas
	4	Generalizada
Infiltração na base	3	Indícios de vazamento em tubulações enterradas que podem comprometer as fundações
	4	Vazamentos em tubulações enterradas causando erosão aparente junto às fundações
Manchas	2	Manchas escuras de pouca extensão, porém significativas (<50% da área visível do elemento estrutural)
	3	Manchas escuras de grande extensão (>50%)
	4	Manchas escuras em todo o elemento estrutural (100%)
Obstrução das juntas de dilatação	2	Perda de elasticidade do material da junta, início de fissuras paralelas às juntas nas lajes adjacentes
	3	Presença de material não compressível na junta, grande incidência de fissuras paralelas às juntas de lajes adjacentes
	4	Fissuras em lajes adjacentes às juntas, com prolongamento em vigas e/ou pilares de suporte

Tabela 3-3 - Classificação dos danos e fatores de intensidade (Fi). FONTE: Fonseca (2007)

<b>Tipos de Danos</b>	<b>Fi</b>	<b>Tipos de Manifestação</b>
Recalques	2	Indícios de recalque pelas características das trincas na alvenaria
	3	Recalque estabilizado com fissuras em peças estruturais
	4	Recalque não estabilizado com fissuras em peças estruturais
Segregação no concreto	1	Superficial e pouco significativa em relação às dimensões da peça
	2	Significante em relação à peça
	3	Profunda em relação às dimensões da peça, com ampla exposição da armadura
	4	Perda relevante de seção da peça
Sinais de esmagamento do concreto	3	Desintegração no concreto na extremidade superior do pilar, causada por sobrecarga ou movimentação da estrutura, fissuras diagonais isoladas
	4	Fissuras de cisalhamento bidiagonais, com intenso lascamento e/ou esmagamento do concreto devido ao cisalhamento e a compressão, com perda substancial de material; deformação residual aparente; exposição e início de flambagem de barras da armadura;
Vazamentos em reservatórios	2	Indícios de umidade de paredes e fundo
	3	Umidade significativa nas paredes de fundo
	4	Ocorrência generalizada

### 3.2.3 Grau do Dano (D), Grau de Deterioração de um elemento ( $G_{de}$ ), Grau de Deterioração de uma Família de Elementos ( $G_{df}$ ) e Grau de Deterioração da Estrutura ( $G_d$ )

O grau de cada dano no elemento estrutural é calculado em função do fator de ponderação ( $F_p$ ) e respectivo fator de intensidade ( $F_i$ ), atribuídos conforme disposto na metodologia de cálculo.

O Grau de Dano (D) apresenta as seguintes formulações, mostradas nas Equação 3-1 e Equação 3-2:

$$D = 0,4F_iF_p \quad \text{Para } F_i \leq 2 \quad \text{Equação 3-1}$$

$$D = (6F_i - 14)F_p \quad \text{Para } F_i > 2 \quad \text{Equação 3-2}$$

Em que:

- D – Grau de Dano;
- $F_i$  – Fator de Intensidade;
- $F_p$  – Fator de Ponderação

Após o cálculo do Grau de Dano (D) realiza-se o cálculo do Grau de Deterioração de um elemento ( $G_{de}$ ), por meio da Equação 3-3, mostrada a seguir:

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^n D_i - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^n D_i} \right] \quad \text{Equação 3-3}$$

Sendo:

- $G_{de}$  – Grau de Deterioração de um Elemento;
- $D_{m\acute{a}x}$  – Valor máximo para o Grau de Dano;
- $D_i$  – Grau de Dano correspondente a cada uma das manifestações patológicas avaliadas;
- n – Número de manifestações patológicas avaliadas

Com a determinação do Grau de Deterioração do Elemento ( $G_{de}$ ), pode-se correlacionar os valores obtidos para cada um dos elementos com os intervalos mostrados na Tabela 3-4:

Tabela 3-4- Classificação dos níveis de deterioração dos elementos. Fonte: Fonseca (2007)

Nível de Deterioração	G <sub>de</sub>	Ações a serem adotadas
Baixo	0 – 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva
Médio	15 – 50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 2 anos)
Alto	50 – 80	Definir prazo/natureza para realização de inspeção detalhada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano)
Crítico	>80	Inspeção emergencial. Planejar intervenção imediata.

Para o cálculo do Grau de Deterioração de uma Família de Elementos tomam-se apenas aqueles elementos em que G<sub>de</sub> fosse maior que 15. Para tal cálculo utiliza-se a Equação 3-4 mostrada a seguir

$$G_{df} = G_{de,máx} \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{de(máx)}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}} \right] \quad \text{Equação 3-4}$$

Sendo:

- G<sub>df</sub> – Grau de Deterioração da Família de Elementos
- G<sub>de(i)</sub> – Grau de Deterioração para cada um dos elementos
- G<sub>de(máx)</sub> – Valor máximo para o Grau de Deterioração dos Elementos
- m – Índice que representa o Grau de Deterioração para cada um dos elementos

O Fator de Relevância Estrutural (F<sub>r</sub>) é um fator ponderador que leva em consideração a importância daquele elemento para a segurança estrutural. Dessa maneira, este fator possui a seguinte divisão:

- Elementos de composição arquitetônica: F<sub>r</sub> = 1,0
- Reservatório Superior: F<sub>r</sub> = 2,0
- Escadas, rampas, reservatório inferior, cortinas, lajes secundárias, juntas de dilatação: F<sub>r</sub> = 3,0
- Lajes, fundações, vigas secundárias, pilares secundários: F<sub>r</sub> = 4,0
- Vigas e pilares principais: F<sub>r</sub> = 5,0

Por fim, para o cálculo do Grau de Deterioração da Estrutura utiliza-se a Equação 3-5, mostrada a seguir.

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_{r(i)} \times G_{df(i)}}{\sum F_{r(i)}} \quad \text{Equação 3-5}$$

Sendo:

- $G_d$  – Grau de Deterioração da Estrutura
- $F_r$  – Fator de Relevância Estrutural
- $G_{df(i)}$  – Grau de Deterioração para cada uma das famílias de elementos

Após a aplicação da metodologia GDE/UnB será possível classificar o nível de deterioração dos elementos conforme a Tabela 3-6.

**Tabela 3-5- Classificação dos níveis de deterioração dos elementos. Fonte: Fonseca (2007)**

<b>Nível de Deterioração</b>	<b><math>G_d</math></b>	<b>Ações a serem adotadas</b>
Baixo	0 – 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva
Médio	15 – 40	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 2 anos)
Alto	40 – 60	Definir prazo/natureza para realização de inspeção detalhada. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 1 ano)
Crítico	>60	Inspeção emergencial. Planejar intervenção imediata.

Tabela 3-6 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura (adaptada). FONTE: Fonseca (2007)

Nível de Deterioração	Principais manifestações apresentadas	Ações a serem adotadas
Baixo	- Sem manifestações patológicas	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	- Pequenas manifestações patológicas	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em médio prazo (máximo 2 anos).
Alto	- Desagregação por ataque químico; - Mancha de corrosão de armadura; - Destacamento localizado no elemento; - Exposição da armadura localizada no elemento	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em curto prazo (máximo 1 ano).
Crítico	- Fissuração excessiva; - Destacamento generalizado do elemento; - Exposição da armadura generalizada no elemento; - Redução de seção da armadura;	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Evolução das manifestações patológicas  


Correa (2013) define cada um dos níveis de deterioração da seguinte maneira:

- O nível BAIXO (Verde) caracterizará aquelas estruturas que não apresentam problemas estruturais ou de durabilidade, com padrão de construção visivelmente satisfatório, porém não isentas de vistorias para assegurar sua durabilidade e vida útil.
- O nível MÉDIO (Amarelo) são aquelas estruturas sem indícios de problemas estruturais, mas com presença de anomalias de pequena monta e de fácil recuperação que, se não forem tratadas, tendem a causar problemas maiores no futuro.
- O nível ALTO (Laranja) abrangerá aquelas estruturas em estado de durabilidade duvidosa, com presença de anomalias reveladas em que seria recomendável uma avaliação pormenorizada, podendo ser programada em médio prazo. Representa a fase em que a estrutura atingiu algum limite de serviço ou possui manifestações patológicas.

- O nível CRÍTICO (Vermelho) será composto por aquelas estruturas com evidências nítidas de problemas estruturais de durabilidade, necessitando de verificação imediata ou em curto prazo. Representa a proximidade com a vida útil última da estrutura, com manifestações patológicas graves e comprometimento estrutural.

### 3.3 Norma de Inspeção Predial – IBAPE/SP-2011

Esta norma fixa as diretrizes, conceitos, terminologia, convenções, notações, critérios e procedimentos relativos à inspeção predial. Durante sua aplicação é necessário consultar e atender à legislação pertinente.

A Norma de Inspeção Predial – IBAPE/SP-2011 classifica a natureza da edificação, institui a terminologia, convenções e as notações a serem utilizadas, define a metodologia básica aplicável, estabelece os critérios a serem empregados nos trabalhos, prescreve diretriz para apresentação de laudos e pareceres técnicos.

A análise de risco consiste na classificação das anomalias e falhas identificadas nos diversos componentes de uma edificação, quanto ao seu grau de urgência, relacionado com fatores de conservação, depreciação, saúde, segurança, funcionalidade, comprometimento de vida útil e perda de desempenho.

#### 3.3.1 Classificação das Inspeções Prediais

A norma classifica as inspeções prediais em três níveis, descritos a seguir:

- **Nível 1:** Identificação das anomalias e falhas aparentes, elaborada por profissional habilitado;
- **Nível 2:** Vistoria para a identificação de anomalias e falhas aparentes eventualmente identificadas com o auxílio de equipamentos e/ou aparelhos, bem como análises de documentos técnicos específicos, consoante à complexidade dos sistemas construtivos existentes;
- **Nível 3:** Equivalente aos parâmetros para a inspeção nível 2, acrescida de auditoria técnica conjunta ou isolada de aspectos técnicos, de uso ou de manutenção

predial empregada no empreendimento, além de orientações para a melhoria e ajuste dos procedimentos existentes no plano de manutenção.

## CAPÍTULO 4

# 4 Aplicação da Metodologia GDE/UnB

## 4.1 Metodologia Proposta

A pesquisa foi realizada nos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal que não sofreram qualquer tipo de intervenção no período compreendido entre 2011 e 2013.

### 4.1.1 Etapa 1 – Pesquisa nos arquivos e catalogação das informações de projeto

Foram realizadas busca e pesquisa nos arquivos de projetos da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), objetivando resgatar todas as informações dos reservatórios catalogando as características de projeto adotadas.

Nesta etapa foram identificados os reservatórios, para poder se determinar o espaço amostral, e traçar o plano de diagnósticos, objetivando a realização dos ensaios de campo.

### 4.1.2 Etapa 2 – Inspeção Preliminar

Esta etapa teve como objetivo a identificação, cadastro e classificação quanto ao nível de manifestações patológicas presentes nos reservatórios.

### 4.1.3 Etapa 3 – Realização de ensaios de campo

A realização dos ensaios de campo foi feita juntamente com a Etapa 2. Esses ensaios visam identificar parâmetros para obtenção dos dados de entrada para o algoritmo de cálculo. Foram realizados ensaios de avaliação da frente de carbonatação, por meio da aspersão de solução de fenolftaleína com concentração de 1%; avaliação da presença de cloretos, por meio da aspersão de solução de nitrato de prata com concentração de 1%.

Antes de aspergir-se a solução de fenolftaleína na estrutura, foi necessário realizar a retirada do cobrimento do concreto em uma pequena fração da estrutura, objetivando-se deixar parte da armadura exposta, procedendo-se, em seguida a aspersão da solução de fenolftaleína.

Após a evaporação do álcool existente na solução, se a superfície não se encontra carbonatada a superfície do concreto assumirá uma coloração rósea, caso contrário, a solução apresenta-se incolor. Se a frente de carbonatação ainda não tiver atingido a armadura, procede-se a medição da profundidade da frente de carbonatação.

Assim como na realização do ensaio de avaliação da frente de carbonatação, o ensaio de contaminação por cloretos consistiu na aspersão da solução de nitrato de prata em uma fração da superfície da estrutura, por meio da retirada de parte do cobrimento, deixando a armadura exposta. Em seguida realizou-se a aspersão da solução de nitrato de prata e, se houver a contaminação por cloretos, haverá a deposição de sais de prata na superfície do concreto, caso tal deposição não seja visualizada, indica que não há a contaminação por cloretos.

A avaliação da abertura de fissuras deu-se pela utilização de fissurômetro, realizando-se a medida perpendicularmente à abertura das fissuras. Para o caso de fissuras que apresentaram grandes extensões, a medição foi realizada em mais de um ponto.

#### **4.1.4 Etapa 4 – Aplicação da metodologia GDE/UnB**

Após a conclusão das etapas (2) e (3) procedeu-se a aplicação da metodologia GDE/UnB – reformulada por Fonseca (2007), para determinação do grau de deterioração dos reservatórios objetos desta pesquisa.

#### **4.1.5 Etapa 5 – Elaboração do plano de manutenção dos reservatórios**

Após a finalização da Etapa 4, procedeu-se o desenvolvimento do plano de manutenção para recuperação dos doze reservatórios.

### **4.2 Os reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal**

O Sistema de Abastecimento de Água de Natal, atualmente compõe-se por 19 reservatórios, dos quais sete são do tipo apoiado e os demais elevados. Todos foram executados em estrutura de concreto armado moldado *in loco*.

Com exceção do reservatório R-1, que foi o primeiro reservatório construído em Natal, por volta da década de 1940, os demais foram construídos entre as décadas de 1970 e 1980, período em que foram realizadas grandes obras de melhorias no Sistema de Abastecimento de Água de Natal.

Na Tabela 4-1 são apresentados os reservatórios que compõem o Sistema de Abastecimento de Água de Natal. Nessa tabela consta também o endereço e a capacidade de armazenamento de cada um deles.

**Tabela 4-1 - Identificação e localização dos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal.**

ITEM	RESERVATÓRIO	ENDEREÇO	VOL. (m <sup>3</sup> )
01	R-1	Av. Deodoro da Fonseca – Petrópolis	2500
02	R-2	Av. Getúlio Vargas – Petrópolis	800
03	R-3	Av. Senador Salgado Filho – Tirol	3100
04	R-4.1	Rua Araguari – Alecrim	1000
05	R-4.2	Rua Araguari – Alecrim	2700
06	R-5.1	Av. Miguel Castro – Lagoa Nova	1000
07	R-5.2	Av. Miguel Castro – Lagoa Nova	1700
08	R-6 Apoiado	Av. Prudente de Moraes – Candelária	5000
09	R-6 Elevado	Av. Prudente de Moraes – Candelária	600
10	R-7	Travessa São Pedro – Mãe Luiza	800
11	R-8	Rua Construtor Severino Bezerra – Potengi	4500
12	R-9	Rua José Vicente – Felipe Camarão	100
13	R-10.1	Rua Rio do Fogo – Ponta Negra	700
14	R-10.2	Rua Praia de Camboinhas – Ponta Negra	200
15	R-11	Rua Morro do Pilar - Neópolis	200
16	R-12	Avenida dos Xavantes – Cidade Satélite	3300
17	R-13	Rua da Lagoa Nova - Guarapes	200
18	R-14 Apoiado	Av. Bal. Tomaz Landim – Parque dos Coqueiros	1200
19	R-14 Elevado	Av. Bal. Tomaz Landim – Parque dos Coqueiros	1000

Dentre os dezenove reservatórios, componentes do espaço amostral, alguns já sofreram algum tipo de recuperação ou encontram-se em fase de recuperação. Dentre os que se encontram em tal situação tem-se: R-2, R-5.2, R-8 e R-12.

Devido à recuperação ter sido realizada no período compreendido entre 2010 e 2012, com até mesmo alguns reservatórios encontrarem-se em fase de execução de obras de recuperação, não houve a contabilização deles nesta pesquisa. Dessa maneira, o universo disponível para análise constitui-se de doze unidades.

A Figura 4-1 mostra, em vermelho, os reservatórios que não foram objeto de análise devido aos motivos descritos anteriormente, e em azul estão representados os reservatórios que foram analisados.



Figura 4-1 – Reservatórios integrantes do SAA de Natal, ilustrando os reservatórios pesquisados (azul) e aqueles que foram mantidos fora do escopo da pesquisa (vermelho). FONTE: Google Earth (Março/2014)

A Tabela 4-2 indica os reservatórios que tiveram sua estrutura analisada.

**Tabela 4-2- Reservatório objeto da pesquisa**

ITEM	RESERVATÓRIO
01	R-4.1
02	R-4.2
03	R-5.1
04	R-6 Apoiado
05	R-6 Elevado
06	R-9
07	R-10.1
08	R-10.2
19	R-11
10	R-13
11	R-14 Apoiado
12	R-14 Elevado

Na etapa de pesquisa dos projetos estruturais dos referidos reservatórios, objetivou-se encontrar as recomendações para execução da estrutura, como por exemplo: fator água/cimento,  $f_{ck}$ , recobrimento das armaduras e data de execução.

Após a conclusão desta etapa constatou-se a inexistência de diversos projetos dos reservatórios, principalmente os mais antigos. Dentre os doze reservatórios objeto desta análise foi possível localizar os projetos estruturais de seis deles.

O reservatório R-3.2, situado no bairro Tirol, teve seu projeto estrutural desenvolvido em 1977, tendo sido recomendada a utilização de um concreto com resistência mínima de 15 MPa. No projeto não constam a indicação do fator a/c nem dos recobrimentos mínimos a serem respeitados.

O reservatório R-4.2, situado no bairro Alecrim, teve seu projeto desenvolvido em 1972, e o concreto recomendado para sua execução foi de 13,5 MPa. Também não houve recomendações quanto ao cobrimento mínimo a ser respeitado nem a indicação do maior valor recomendado para o fator a/c.

Os reservatórios existentes no bairro Ponta Negra, R-10.1 e R-10.2, tiveram seus projetos desenvolvidos no ano de 1976. Ambos apresentam como recomendação para execução apenas o  $f_{ck}$  de 15 MPa. Nas diversas pranchas que

compõem o projeto não constam quaisquer recomendações a respeito do cobrimento mínimo e do fator  $a/c$ .

Tanto o reservatório R-14 Apoiado quanto o reservatório R-14 Elevado, situados no Conjunto Parque dos Coqueiros, tiveram seus projetos estruturais desenvolvidos entre junho de 1989 e janeiro de 1990.

No R-14 Apoiado foi adotado um concreto com  $f_{ck}$  mínimo de 18 MPa. Não houve indicação do fator  $a/c$  máximo recomendado, e diferentemente dos demais projetos encontrados, houve a indicação no projeto dos cobrimentos mínimos a serem respeitados. No projeto consta que deve haver um cobrimento mínimo de 4 cm em suas paredes e pilares e de pelo menos 2,5 cm nas lajes.

Para o R14 elevado o concreto recomendado foi com resistência mínima de 15 MPa, e também não houve a indicação de cobrimento mínimo a ser respeitado nem do limite máximo para o fator  $a/c$ .

A Tabela 4-3 resume as recomendações existentes nos projetos estruturais encontrados dos seis reservatórios já mencionados.

Tabela 4-3 - Dados de projeto

Reservatório	$f_{ck}$	Relação $a/c$	Data do Projeto	Recobrimento
R-3.2 Apoiado	15 MPa	N.I.	março/1977	N.I.
R-4.2 Elevado	13,5 MPa	N.I.	abril/1972	N.I.
R-10.1 Elevado	15 MPa	N.I.	outubro/1976	N.I.
R-10.2 Elevado	15 MPa	N.I.	agosto/1976	N.I.
R-14 Apoiado	18 MPa	N.I.	junho/1989	4cm / 2,5cm
R-14 Elevado	15 MPa	N.I.	janeiro/1990	N.I.

N.I. – Não indicados

### 4.3 Dificuldades durante a vistoria

Durante a realização da parte de campo da pesquisa deparamo-nos com duas dificuldades: a precariedade do acesso à parte superior dos reservatórios elevados, e a impossibilidade de esvaziamento dos reservatórios apoiados para visualização das condições de durabilidade em seu interior.

Ainda na etapa de realização das visitas exploratórias constatou-se que as escadas de acesso aos reservatórios não apresentam condições seguras de utilização e acesso. Excetuando-se os reservatórios R-10.2 e o R-4.1, cujas escadas são em concreto armado, engastadas no corpo do reservatório, os demais reservatórios possuem o acesso à parte superior por meio de escadas tipo marinheiro.

Essas escadas são constituídas apenas pelos degraus, não havendo guarda-corpo e patamares intermediários, representando, assim, condições inseguras para acesso à parte superior. Além do que já fora relatado com relação às condições de segurança das escadas, elas apresentam-se danificadas devido, principalmente, à corrosão de alguns degraus, e conseqüente má fixação na estrutura.

A metodologia GDE/UnB utiliza como parâmetro base de entrada o Fator de Intensidade do Dano ( $F_i$ ), utilizado nas Equação 3-1 e Equação 3-2. Entretanto, devido à impossibilidade de avaliar a integridade dos elementos situados no interior dos reservatórios elevados os valores de  $F_i$ , referente a esses elementos, tiveram atribuídos o valor zero.

Ao atribuir-se um valor nulo para o  $F_i$ , utilizar-se-á a Equação 3-1 para cálculo do Grau de Dano (D), que, por sua vez, também apresentará valor nulo.

No que diz respeito ao acesso ao interior dos reservatórios apoiados, foi possível o acesso ao interior dos reservatórios R-6 e R-14, devido à coincidência entre o período de realização dos estudos e a realização de manutenção periódica. No caso dos reservatórios R-1 e R-3 não houve a possibilidade de coincidir o período de realização dos estudos com a realização de manutenções periódicas.

## CAPÍTULO 5

# 5. Discussão dos Resultados

## 5.1 Reservatórios Analisados

### 5.1.1 Reservatório R- 4.1

Situa-se na Rua Araguari, bairro Alecrim. Foi executado em estrutura de concreto armado moldado *in loco*. Seu corpo é sustentado por oito pilares e apresenta dois níveis de vigamento. O primeiro para contraventamento dos pilares e o segundo para apoio de sua estrutura superior.

A Figura 5-1 apresenta a visão geral do reservatório.



Figura 5-1 - Vista geral do reservatório R-4.1.

No lado externo da laje de fundo é possível verificar pontos em que houve a desagregação do reboco e da camada de cobrimento do concreto devido à corrosão das armaduras, que se encontram expostas, além da presença de manchas amareladas, cuja origem tem ligação direta com deficiências no sistema de impermeabilização, conforme pode ser visto nas Figura 5-2 e Figura 5-3, mostradas a seguir.



**Figura 5-2 - Manchas amareladas na laje de fundo, indicando deficiência no sistema de impermeabilização.**



**Figura 5-3 - Ponto na laje de fundo em que houve a desagregação do reboco e da camada de cobrimento do concreto, deixando a armadura exposta.**

A estrutura dos pilares e da viga de contraventamento apresenta diversos pontos com o concreto já desagregado ou em processo avançado de fissuração devido à corrosão, conforme pode mostrado nas Figura 5-4 e Figura 5-5.



**Figura 5-4 - Ponto de desagregação do concreto no topo do pilar.**



**Figura 5-5 - Detalhe da fotografia anterior. É possível visualizar a armadura exposta.**

Neste reservatório foram constatadas algumas fissuras nos pilares, com abertura variando entre 0,8 mm e 1,0 mm. Entretanto, tal estado de fissuração não caracteriza a ocorrência de danos estruturais.

Ela tem ocorrido nos vértices dos pilares, com irradiação para seu corpo. As Figura 5-6 e Figura 5-7, mostram a fissuração e a medição de sua abertura.



**Figura 5-6 - Fissuração na base do pilar.**



**Figura 5-7 - Medição da abertura de fissura.**

Na viga de contraventamento do reservatório também se pode encontrar fissuras com características semelhantes às aquelas encontradas nos pilares: no canto superior da viga, próximo à armadura superior e acompanhando a direção das armaduras principais, conforme mostrado na Figura 5-8.

Essa ocorrência dá-se devido à existência de esforços de tração, devido ao aumento de volume das armaduras, que tendem a expulsar a camada de revestimento do concreto. Por haver, em todo o reservatório, uma camada com espessura de aproximadamente 3,0 cm, de argamassa de cimento e areia, essas fissuras tendem a apresentarem-se mais acentuadas, porém restringem-se à camada de revestimento.



**Figura 5-8 - Ocorrência de fissura devido à oxidação da armadura da viga.**

No local em que houve o total desprendimento da camada de revestimento há a ocorrência de sons cavos quando são realizadas pequenas batidas nos elementos.

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

Tomando como base a reformulação proposta por Fonseca (2007) para a metodologia GDE/UnB, a implementação do roteiro de cálculo foi realizada no software Microsoft Excel® e aplicada em todos os reservatórios. A Tabela 5-1 à Tabela 5-13, mostradas a seguir, ilustram a metodologia utilizada nos reservatórios.

O Fator de Ponderação ( $F_p$ ) tem os mesmos valores sugeridos por Fonseca (2007). Os valores referentes ao  $F_i$  foram obtidos mediante a realização de vistorias em cada um dos reservatórios. O valor do Grau de Dano (D) e do Grau de Deterioração do Elemento ( $G_{de}$ ) são calculados automaticamente.

Tabela 5-1- Cálculo do Fi para o pilar P1

ELEMENTO	Pilar P1			
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	5	1	4	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	10	2	16	
Desagregação	7	2	11,2	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>				
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>				<b>5</b>

Tabela 5-2 - Cálculo do Fi para o pilar P2

ELEMENTO	Pilar P2			
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	2	11,2	
Desagregação	7	2	11,2	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>				
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>				<b>5</b>

Tabela 5-3 - Cálculo do Fi para o pilar P3

ELEMENTO	Pilar P3			
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>				
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>				<b>5</b>

Tabela 5-4 - Cálculo do Fi para o pilar P4

ELEMENTO	Pilar P4			Observações
Danos	Fp	Fi	D	
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	2	11,2	
Desagregação	7	2	11,2	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>84,59</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-5 - Cálculo do Fi para o pilar P5

ELEMENTO	Pilar P5			Observações
Danos	Fp	Fi	D	
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	2	11,2	
Desagregação	7	2	11,2	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>84,59</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-6 - Cálculo do Fi para o pilar P6

ELEMENTO	Pilar P6			Observações
Danos	Fp	Fi	D	
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>96,63</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-7 - Cálculo do Fi para o pilar P7

ELEMENTO	Pilar P7			Observações
Danos	Fp	Fi	D	
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>96,63</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-8 - Cálculo do Fi para o pilar P8

ELEMENTO	Pilar P8			Observações
Danos	Fp	Fi	D	
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	2	8	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	5	1	4	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>96,63</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-9 - Cálculo do Fi para a laje de fundo

Laje de Fundo				Observações	
Local	Danos	Fp	Fi		D
	Carbonatação	7	3	56	
	Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
	Contaminação por Cloretos	10	1	8	
	Corrosão de Armaduras	7	3	56	
	Desagregação	7	4	140	
	Desplacamento	8	1	6,4	
	Eflorescência	5	3	40	
	Fissuras	3	1	2,4	
	Impermeabilização deficiente	9	4	180	
	Manchas	7	3	56	
	Infiltração	9	4	180	
	<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>250,34</b>	
	<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-10 - Cálculo do Fi para a laje de cobertura

ELEMENTO	Laje de Cobertura			
Local				
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	1	5,6	1) Não foi possível avaliar devido à falta de segurança apresentada pela escada
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	1	8	
Corrosão de Armaduras	7	1	5,6	
Desagregação	7	1	5,6	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	1	4	
Fissuras	3	1	2,4	
Flechas	9	1	7,2	
Manchas	7	1	5,6	
Umidade	9	1	7,2	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>14,55</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>4</b>	

Tabela 5-11 - Cálculo do Fi para o corpo do reservatório

ELEMENTO	Corpo do Reservatório				
Local					
Danos	Fp	Fi	D	Observações	
Carbonatação	7	1	5,6		
Combrimento Deficiente	6	1	4,8		
Contaminação por Cloretos	10	1	8		
Corrosão de Armaduras	7	1	5,6		
Desagregação	7	1	5,6		
Desplacamento	8	1	6,4		
Eflorescência	5	1	4		
Fissuras	3	1	2,4		
Impermeabilização deficiente	9	1	7,2		
Vazamento	9	1	7,2		
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>14,87</b>		
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>14,33</b>		

Tabela 5-12 - Cálculo do Fi para a viga do nível 01

ELEMENTO	Viga - Nível 01			
Local				
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	2	11,2	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	2	16	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	1	4	
Fissuras	3	2	4,8	
Manchas	7	1	5,6	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>			<b>88,39</b>	
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>			<b>5</b>	

Tabela 5-13 - Cálculo do Fi para a viga do nível 02

ELEMENTO	Viga - Nível 02			
Local				
Danos	Fp	Fi	D	Observações
Carbonatação	7	3	56	
Combrimento Deficiente	6	1	4,8	
Contaminação por Cloretos	10	2	16	
Corrosão de Armaduras	7	3	56	
Desagregação	7	3	56	
Desplacamento	8	1	6,4	
Eflorescência	5	3	40	
Fissuras	3	1	2,4	
Manchas	7	3	56	
<b>Grau de Deterioração do Elemento</b>	<b>97,54</b>			
<b>Fator de Relevância Estrutural</b>	<b>5</b>			

A Tabela 5-14, mostrada a seguir, calcula o grau de Deterioração para o reservatório R-4.1.

Tabela 5-14 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-4.1.

CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA					
PILARES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	Gd
Pilar P1	85,51	180,40	5,00	901,98	163,93
Pilar P2	84,59				
Pilar P3	96,63				
Pilar P4	84,59				
Pilar P5	84,59				
Pilar P6	96,63				
Pilar P7	96,63				
Pilar P8	96,63				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	88,39	143,91	5,00	719,55	
Viga - Nível 02	97,54				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	250,34	250,34	4,00	1001,36	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo	14,87	0,00	2,00	0,00	

O valor do  $G_{de}$  para o corpo do reservatório apresentou valor inferior a 15, e conforme descrito na metodologia, este valor não foi contabilizado no cálculo do  $G_{df}$ .

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R - 4.1 estão mostradas na Tabela 5-15.

Tabela 5-15 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-4.1

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-4.1	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável
	Infiltração
	Manchas

### 5.1.2 Reservatório R- 4.2

Situa-se, também, na Rua Araguari, bairro Alecrim no mesmo lote em que se encontra o R-4.1. Foi executado em estrutura de concreto armado moldado *in loco*. Seu corpo é sustentado por vinte pilares e apresenta dois níveis de vigamento. O primeiro situa-se no nível do terreno e o segundo apoia todo o corpo do reservatório – lajes de fundo e cobertura e paredes.

A Figura 5-9 mostra uma visão panorâmica do reservatório.



Figura 5-9 - Vista do reservatório R-4.2

O corpo do reservatório apresenta manchas escuras, porém sem compreender toda a sua extensão, conforme verificado na Figura 5-10.



**Figura 5-10- Presença de manchas escuras no corpo do reservatório.**

Há também a presença de manchas amareladas, decorrentes da percolação de água do interior para o exterior do reservatório, conforme pode ser visto na Figura 5-11. Essas manchas indicam que o sistema de impermeabilização encontra-se deficiente.



**Figura 5-11- Manchas amarelas, indicando deficiências no sistema de impermeabilização.**

A laje de fundo do reservatório também apresenta manchas amareladas, porém sem atingir grandes dimensões. A Figura 5-12 ilustra algumas dessas manchas.

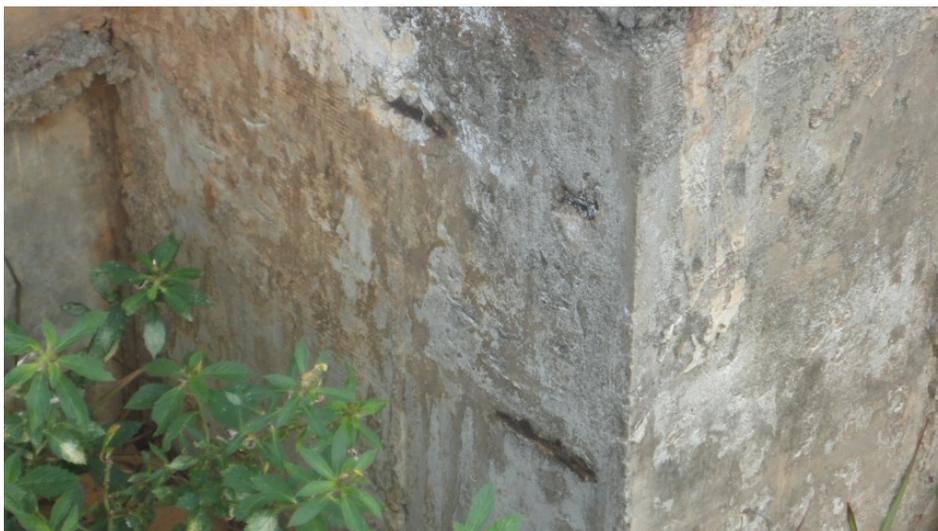


**Figura 5-12 - Manchas amareladas na laje de fundo.**

É possível visualizar em alguns pontos da viga do nível 01, situada no nível do terreno natural, e de alguns pilares deficiência no cobrimento. Nestes pontos percebe-se que não houve o respeito ao cobrimento recomendado em projeto, e a armadura tangenciou a forma, conforme pode ser visto na Figura 5-13 e Figura 5-14.



**Figura 5-13 - Exposição da armadura na viga do nível 01 devido à deficiência no cobrimento.**



**Figura 5-14 - Exposição dos estribos do pilar devido à deficiência no cobrimento.**

Este reservatório também apresenta uma camada de revestimento executada com argamassa de cimento e areia, projetada em seus pilares e em todo o corpo. A Figura 5-15 mostra a perda do revestimento na base de um dos pilares.



**Figura 5-15 - Perda do revestimento em um dos pilares.**

Em diversos pilares há a presença de fissuras em seus vértices. A abertura dessas fissuras varia desde 0,8 mm a 2,0 mm, em estado semelhante às que foram encontradas no R-4.1. Ao avaliar melhor essas fissuras percebe-se a ocorrência de sons cavos quando são realizadas pequenas batidas nos elementos. Tal característica nos permite avaliar que tais fissuras são superficiais, atingindo a camada de revestimento e, possivelmente, uma camada superficial do concreto.

O fato de essas fissuras ocorrerem nos vértices decorrem devido ao aumento de volume da barra de aço, que causam esforços de tração, ocasionando empuxo ao vazio, expulsando a pequena camada de revestimento existente. As Figura 5-16 e Figura 5-17 mostram as características dessas fissuras.



**Figura 5-16 - Fissura no vértice do pilar, devido à ocorrência de corrosão das armaduras.**



**Figura 5-17 - Fissura no vértice do pilar, devido à ocorrência de corrosão nas armaduras.**

Foram realizadas aspersões de soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata. Constatou-se que há a presença de cloretos na estrutura – devido à precipitação dos sais de prata no concreto, conforme pode ser visualizado na Figura 5-18



**Figura 5-18 - Precipitação de sais de prata em um dos pilares.**

Com a aspersão da solução de fenolftaleína constatou-se que o avanço da frente de carbonatação atingiu a armadura em determinados pontos, conforme pode ser visto na Figura 5-19.



**Figura 5-19 - Aspersão de solução de fenolftaleína para verificação da frente de carbonatação.**

A Tabela 5-16, mostrada a seguir, calcula o grau de Deterioração para o reservatório R-4.2.

Tabela 5-16 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-4.2

CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA					
PILARES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	Gd
Pilar P1	114,55	241,03	5,00	1205,13	157,33
Pilar P2	113,49				
Pilar P3	113,49				
Pilar P4	113,49				
Pilar P5	111,81				
Pilar P6	111,81				
Pilar P7	113,49				
Pilar P8	111,81				
Pilar P9	111,81				
Pilar P10	111,81				
Pilar P11	111,52				
Pilar P12	123,96				
Pilar P13	83,18				
Pilar P14	111,81				
Pilar P15	111,81				
Pilar P16	111,81				
Pilar P17	111,81				
Pilar P18	111,81				
Pilar P19	111,81				
Pilar P20	111,81				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 00	124,76	187,14	5,00	935,70	
Viga - Nível 01	124,76				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	94,10	94,10	4,00	376,40	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	0,00	0,00	2,00	0,00	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R - 4.2 estão mostradas na Tabela 5-17.

Tabela 5-17 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-4.2

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-4.2	Carbonatação
	Cobrimento deficiente
	Contaminação por cloretos
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável
	Manchas

### 5.1.3 Reservatório R- 5.2

Localizado na Avenida Miguel Castro, Lagoa Nova, foi executado em estrutura de concreto armado moldado *in loco*. Seu corpo é sustentado por vinte pilares e apresenta cinco níveis de vigamento. O primeiro situa-se há aproximadamente 3,00 m acima do nível do terreno, sendo o quinto nível o que suporta todo o corpo do reservatório – lajes de fundo, cobertura e paredes.

Este reservatório apresenta sérios problemas de infiltração. Além da presença de manchas amareladas há, em determinados pontos, a formação de estalactites, conforme ilustram as Figura 5-20 e Figura 5-21.



Figura 5-20- - Manchas amareladas no fundo do reservatório.

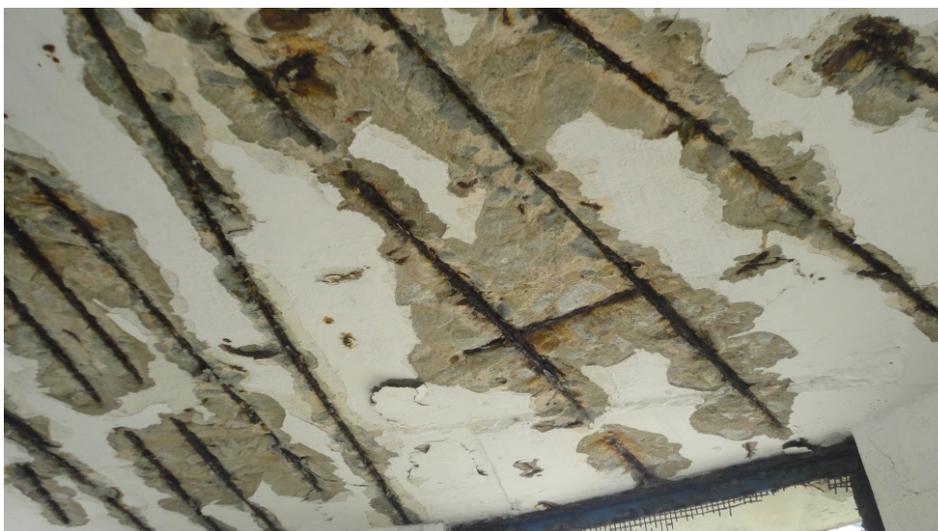


Figura 5-21 - Formação de estalactites no fundo do reservatório.

A laje de cobertura deste reservatório encontra-se em avançado estado de deterioração. Todas suas armaduras encontram-se expostas e em processo de corrosão. As Figura 5-22 e Figura 5-23 mostra o estado de deterioração da laje de cobertura. Pode-se perceber que há a desagregação do concreto e manifestações de corrosão generalizadas.



**Figura 5-22 - Laje de cobertura em avançado estado de deterioração. Pode-se visualizar a ocorrência de desagregação do concreto e corrosão de maneira generalizada.**



**Figura 5-23 - Detalhe das manifestações patológicas generalizadas na laje de cobertura.**

Os pilares externos não apresentam manifestações patológicas consideráveis, principalmente nos dois primeiros pavimentos. Nesses dois pavimentos funcionam alguns departamentos da empresa, havendo, portanto, uma atenção maior a qualquer tipo de manifestação patológica que venha a ocorrer.

Nos três níveis acima os pilares externos apresentam manifestações patológicas de pequena extensão, como a presença de alguns locais com pontos de corrosão e desagregação do concreto.

Os pilares internos, que estão inseridos em ambiente com elevada umidade relativa do ar apresentam-se bem mais deteriorados. Eles apresentam elevado grau de fissuração, havendo o deslocamento do concreto, conforme pode ser visualizado nas Figura 5-24 e Figura 5-25.



**Figura 5-24 - Fissuração em pilar do reservatório.**



**Figura 5-25 - Fissuração no vértice do pilar.**

Este reservatório também apresenta uma camada de revestimento em argamassa de cimento e areia. Essas fissuras ocorrem nos vértices devido ao

aumento de volume da barra de aço, causando esforços de tração, e conseqüentemente geram empuxo no vazio, expelindo, assim, as camadas de cobrimento – do concreto e da argamassa - existente.

No interior da câmara, as principais manifestações patológicas encontradas são a corrosão, e conseqüentemente a desagregação do concreto, além da ocorrência de estalactites, conforme ilustra a Figura 5-26.



**Figura 5-26 - Corrosão nas lajes e vigas do R-5.2**

A corrosão atinge a laje de cobertura e suas vigas de sustentação. Na laje de cobertura quase que a totalidade das armaduras encontram-se expostas, não havendo mais camada de cobrimento, conforme pode ser visto na Figura 5-27.



**Figura 5-27 - Estado de corrosão nas vigas e lajes.**

A Figura 5-28 detalha a desagregação do concreto devido à corrosão das armaduras.



**Figura 5-28 - Detalhe de desagregação do concreto devido à corrosão das armaduras nas vigas do reservatório.**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R - 5.2 estão mostradas na Tabela 5-18.

**Tabela 5-18 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-5.2**

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-5.2	Carbonatação
	Cobrimento deficiente
	Corrosão das armaduras
	Eflorescências
	Fissuração Inaceitável
	Manchas

A Tabela 5-19 mostra o Grau de Deterioração para o reservatório.

Tabela 5-19 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-5.2

CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA					
PILARES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	Gd
Pilar P1	28,48	179,90	5,00	899,51	166,65
Pilar P2	28,32				
Pilar P3	28,32				
Pilar P4	28,32				
Pilar P5	28,05				
Pilar P6	28,05				
Pilar P7	28,32				
Pilar P8	28,05				
Pilar P9	28,05				
Pilar P10	28,05				
Pilar P11	28,00				
Pilar P12	83,39				
Pilar P13	20,31				
Pilar P14	28,28				
Pilar P15	28,28				
Pilar P16	28,28				
Pilar P17	123,96				
Pilar P18	123,96				
Pilar P19	123,96				
Pilar P20	123,96				
VIGAS	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	
Vigamento - Nível 01	76,36	155,93	5,00	779,67	
Vigamento - Nível 02	76,36				
Vigamento - Nível 03	19,50				
Vigamento - Nível 04	89,34				
Vigamento - Nível 05	89,34				
LAJES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	
Laje de Fundo	18,65	185,94	4,00	743,75	
Laje de Cobertura	169,14				
RESERVATÓRIO	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	
Corpo do Reservatório	121,72	121,72	2,00	243,44	

#### 5.1.4 Reservatório R- 6 Apoiado

Localizado na Avenida Prudente de Moraes, Candelária, do tipo apoiado. Toda sua estrutura (paredes, lajes de fundo e cobertura, vigas e pilares) foi executada em concreto armado. Sua laje de cobertura é sustentada por vinte pilares, apoiados em sapatas, e oito vigas (em direções ortogonais).

A Figura 5-29 ilustra uma vista panorâmica externa do reservatório.



**Figura 5-29 - Vista do reservatório R-6 Apoiado.**

A parte externa do reservatório apresenta alguns pontos com a presença de manchas características de infiltração, conforme pode ser visto nas Figura 5-30 e Figura 5-31. Devido à ocorrência dessas infiltrações, há a presença de eflorescências.

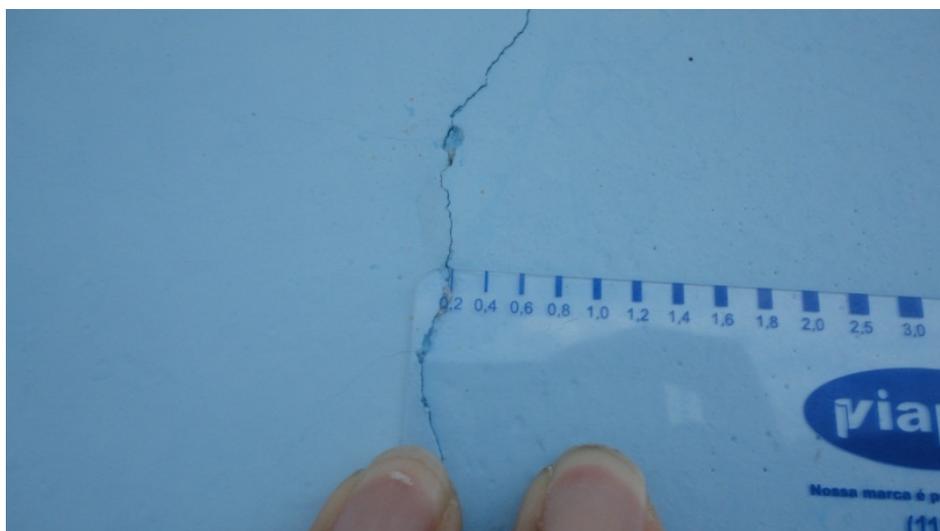


**Figura 5-30 - Pontos de infiltração nas paredes do reservatório.**

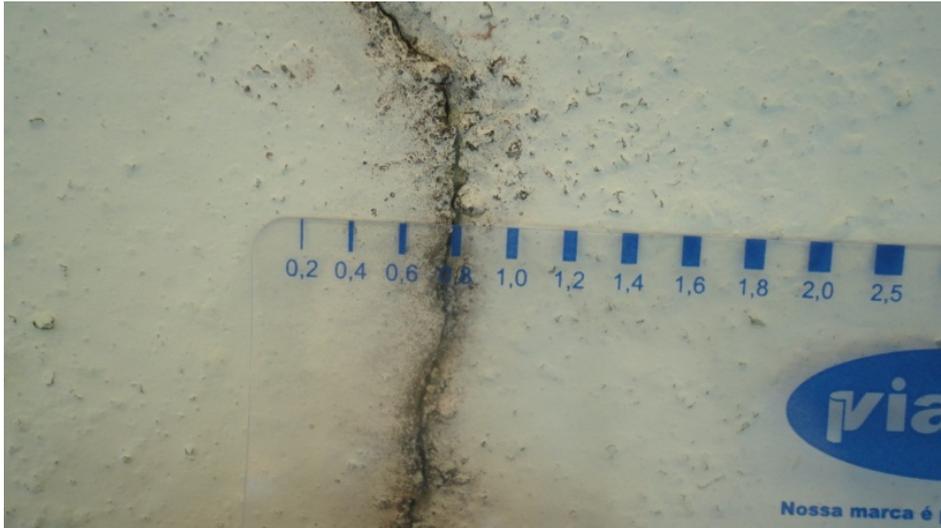


**Figura 5-31 - Ponto de infiltração na parede do reservatório.**

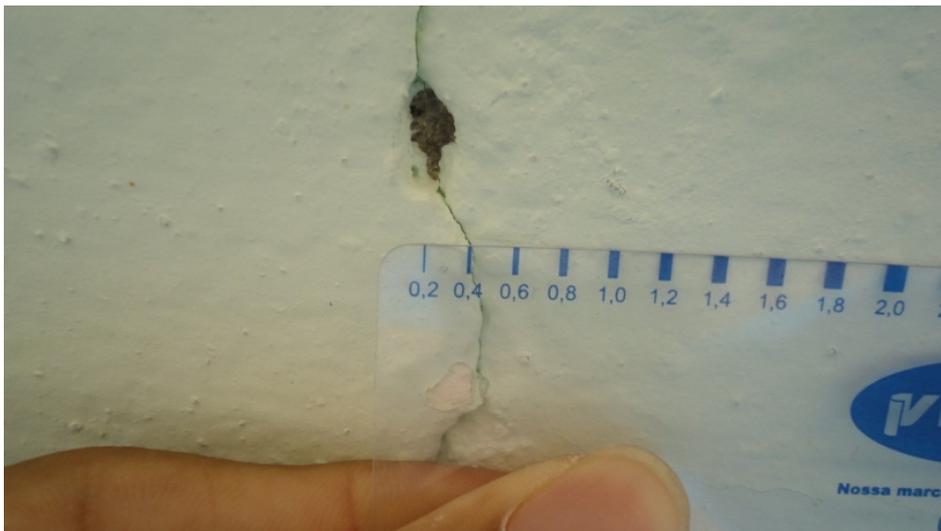
Em determinados pontos, a ocorrência das infiltrações coincide com a presença de fissuras externas. Essas fissuras aparecem em mais de um local, sempre nas paredes laterais, e com orientação vertical. Dentre as analisadas, as aberturas variam entre 0,2 e 1,2 mm, conforme mostram a Figura 5-32 a Figura 5-35.



**Figura 5-32 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,2 mm.**



**Figura 5-33 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,8 mm.**



**Figura 5-34 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 0,4 mm.**



**Figura 5-35 - Fissura na parede do reservatório com abertura de 1,2 mm.**

O reservatório apresenta uma junta de dilatação, em seu sentido transversal, estendendo-se pelas paredes e pela laje de fundo. A Figura 5-36 mostra a localização da junta de dilatação no reservatório.



**Figura 5-36 - Localização da junta de dilatação (Adaptada). Fonte: Google Earth (jan/2014)**

O material elástico da junta encontra-se deteriorado, possibilitando a ocorrência de infiltrações. As Figura 5-37 e Figura 5-38 mostram as condições da junta de dilatação, tanto na face interna quanto externa da parede.

Internamente as paredes encontram-se em bom estado, havendo apenas fissuração no revestimento – executado em argamassa de cimento e areia.



**Figura 5-37 - Vista externa da junta de dilatação.**



**Figura 5-38 - Vista interna da junta de dilatação.**

A laje de cobertura, em sua face superior, também apresenta fissuras longitudinais, com abertura média de 0,8 mm. Essa fissuração apresenta abertura uniforme ao longo de sua extensão, e acompanha a armadura longitudinal, sendo um indicativo de fissuração devido à oxidação das armaduras. As Figura 5-39 e Figura 5-40 mostram, respectivamente, as características das fissuras e a realização da medição de sua abertura.



**Figura 5-39 - Fissuração longitudinal na face superior da laje de cobertura.**



**Figura 5-40 - Medição da abertura de fissura.**

A face inferior da laje de cobertura apresenta algumas fissuras com as características semelhantes às encontradas na face superior (longitudinais e de abertura uniforme), algumas delas apresentando eflorescências com a formação de estalactites.

É possível constatar a ocorrência de deslocamento do concreto devido à oxidação das armaduras, conforme pode ser visto na Figura 5-41.



**Figura 5-41 - Deslocamento do concreto com exposição da armadura de flexão e a existência de eflorescências na face interna da laje superior.**

As vigas superiores, de maneira geral, encontram-se em bom estado de conservação. Pontualmente, elas apresentam manchas, devido principalmente à ocorrência de eflorescências. Algumas vigas apresentam deslocamento do concreto devido à corrosão, e exposição de pequenas parcelas das armaduras.

As Figura 5-42 e Figura 5-43 mostram as manchas e eflorescências em uma das vigas do reservatório.



**Figura 5-42 - Eflorescências na viga.**



**Figura 5-43 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura da viga devido à corrosão.**

O reservatório apresenta vinte pilares, com seção quadrada, e de dimensões aproximadas de 30 cm x 30 cm. Eles apresentam uma camada de revestimento executada com argamassa de cimento e areia. Os pilares não apresentam quaisquer tipos de manifestações patológicas, nem mesmo na região submetida à oscilação do nível da água.

Apenas o revestimento apresenta algumas fissuras superficiais, e o desgaste superficial, devido à oscilação do nível do reservatório, conforme representado na Figura 5-44 .



**Figura 5-44 - Estado de um dos pilares do reservatório. Pode-se observar o desgaste superficial do revestimento.**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despассивando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

A Tabela 5-20, mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o reservatório R-6 Apoiado.

**Tabela 5-20 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-6 Apoiado**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	56,19	<b>109,64</b>	<b>5,00</b>	<b>548,21</b>	<b>82,87</b>
Pilar P2	56,19				
Pilar P3	56,19				
Pilar P4	56,19				
Pilar P5	56,19				
Pilar P6	56,19				
Pilar P7	56,19				
Pilar P8	56,19				
Pilar P9	56,19				
Pilar P10	56,19				
Pilar P11	56,19				
Pilar P12	56,19				
Pilar P13	56,19				
Pilar P14	56,19				
Pilar P15	56,19				
Pilar P16	56,19				
Pilar P17	56,19				
Pilar P18	56,19				
Pilar P19	56,19				
Pilar P20	56,19				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga 01	80,39	<b>142,84</b>	<b>5,00</b>	<b>714,18</b>	
Viga 02	80,39				
Viga 03	27,29				
Viga 04	27,29				
Viga 05	79,05				
Viga 06	18,75				
Viga 07	19,70				
Viga 08	27,29				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	0,00	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>20,00</b>	
Laje de Cobertura	5,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Paredes	21,80	<b>21,80</b>	<b>2,00</b>	<b>43,60</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 6 Apoiado estão mostradas na Tabela 5-21.

**Tabela 5-21 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Apoiado**

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-6 Apoiado	Carbonatação
	Eflorescências
	Fissuração Inaceitável
	Obstrução das juntas de dilatação
	Vazamentos

### 5.1.5 Reservatório R- 6 Elevado

Localizado na Avenida Prudente de Moraes, Candelária – no mesmo lote em que está inserido o R-6 Apoiado. Este reservatório é do tipo elevado, sendo sua estrutura executada em concreto armado.

Sua estrutura é composta por oito pilares que sustentam todo o corpo do reservatório. Ele apresenta cinco níveis de vigamento, sendo o primeiro ao nível do solo e o último o responsável pelo apoio de todo o corpo do reservatório (lajes de cobertura e de fundo e paredes laterais).

Em todo o reservatório foi aplicada uma camada de revestimento em argamassa de cimento e areia.

A Figura 5-45 mostra uma visão geral do reservatório.



**Figura 5-45 - Vista geral do reservatório**

Devido à corrosão houve o deslocamento da camada de cobrimento e do revestimento tanto nos pilares quanto em todos os níveis do viga, conforme pode ser visto nas Figura 5-47 e Figura 5-49.



**Figura 5-46 - Corrosão das armaduras e deslocamento do concreto no viga.**



**Figura 5-47 - Detalhe do estado de corrosão da viga.**

Todos os pilares apresentam pontos com avançado estado de deterioração, com a ocorrência de deslocamento do concreto, corrosão das armaduras, com alguns locais apresentando redução da seção das barras de aço. A Figura 5-49 mostra o deslocamento da camada de concreto, do cobrimento e exposição das armaduras, já em avançado processo de corrosão.



**Figura 5-48 - Deslocamento do revestimento, cobrimento e exposição das armaduras do pilar.**

A Figura 5-49 mostra a redução da seção transversal de algumas armaduras.



**Figura 5-49 - Redução da seção transversal das armaduras.**

A laje de fundo do reservatório não apresenta indícios de corrosão pontualmente. Há a presença de manchas amareladas em toda a sua extensão, sendo um indicativo de deficiências no sistema de impermeabilização, conforme pode ser visto na Figura 5-50.



**Figura 5-50 - Laje de fundo do reservatório apresentando manchas amareladas.**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

A Tabela 5-22, mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o reservatório R-6 Elevado.

**Tabela 5-22 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-6 Elevado**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	163,45	<b>306,47</b>	<b>5,00</b>	<b>1532,34</b>	<b>266,46</b>
Pilar P2	163,45				
Pilar P3	163,45				
Pilar P4	163,45				
Pilar P5	163,45				
Pilar P6	163,45				
Pilar P7	163,45				
Pilar P8	163,45				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	132,51	<b>238,52</b>	<b>5,00</b>	<b>1192,59</b>	
Viga - Nível 02	132,51				
Viga - Nível 03	132,51				
Viga - Nível 04	132,51				
Viga - Nível 05	132,51				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	316,53	<b>316,53</b>	<b>4,00</b>	<b>1266,12</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	136,12	<b>136,12</b>	<b>2,00</b>	<b>272,24</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado estão mostradas na Tabela 5-23.

**Tabela 5-23 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado**

<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS</b>
R-6 Elevado	Carbonatação
	Cobrimento deficiente
	Corrosão das armaduras
	Eflorescências
	Esfoliação
	Fissuração Inaceitável
	Impermeabilização deficiente
	Manchas
	Vazamentos

### 5.1.6 Reservatório R- 9

Localizado na Rua José Vicente, Felipe Camarão, este reservatório é do tipo elevado, sendo sua estrutura executada em concreto armado. Ele é composto por cinco pilares, que sustentam o corpo do reservatório (parede e lajes de tampa e de fundo) e três níveis de vigamentos, sendo o primeiro no nível do terreno, e o segundo e terceiro apresentam espaçamento da ordem de 3,0 m.

A Figura 5-51 mostra uma visão geral do reservatório.

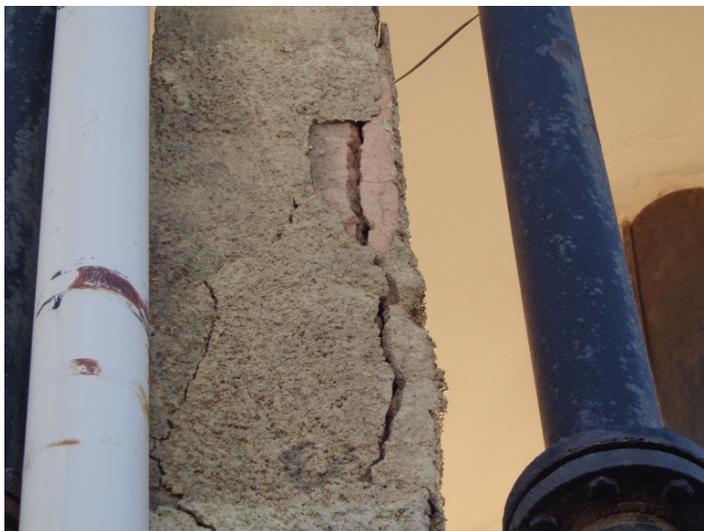


**Figura 5-51 - Vista geral do reservatório R-9**

O corpo do reservatório apresenta, em sua face externa, manchas escuras que cobrem quase toda sua superfície. A laje de fundo não apresenta manchas amareladas, que caracterizam a ocorrência de infiltrações. Não se constatou a ocorrência de eflorescências em sua superfície.

Toda a superfície externa do reservatório foi recoberta com uma camada de argamassa com espessura aproximada de 3,0 cm.

Todos os pilares apresentam fissuras devido à corrosão, havendo o deslocamento do concreto e da camada de revestimento. As Figura 5-52 e Figura 5-53 ilustram a situação descrita.



**Figura 5-52 - Fissuração em um dos pilares do reservatório.**



**Figura 5-53 - Deslocamento da argamassa e do revestimento do concreto.**

A fissuração devido à corrosão apresenta em alguns pontos abertura da ordem de 2,0 mm, conforme retratado na Figura 5-54 e Figura 5-55.



**Figura 5-54 - Medição da abertura de fissuras.**

Nas vigas também há regiões com deslocamento do concreto em alguns locais deixando a armadura exposta, e em outros há a presença de fissuras características de corrosão, conforme pode ser visto nas Figura 5-55 e Figura 5-56.



**Figura 5-55 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura da viga.**

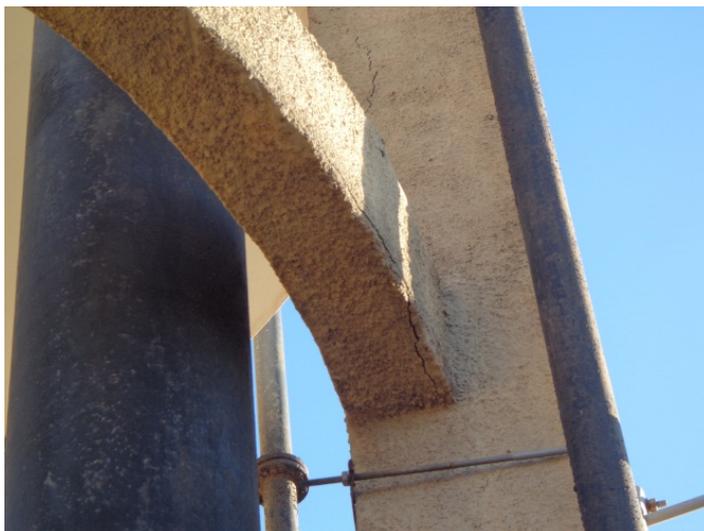


Figura 5-56 - Fissura na região inferior da viga devido à corrosão da armadura.

Após a aspersão das soluções de fenoltaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

A Tabela 5-24, mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o reservatório R-9.

Tabela 5-24 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-9.

CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA					
PILARES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	Gd
Pilar P1	113,22	401,49	5,00	2007,43	193,38
Pilar P2	244,24				
Pilar P3	113,22				
Pilar P4	244,24				
Pilar P5	113,22				
Pilar P6	30,13				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	120,78	181,17	5,00	905,85	
Viga - Nível 02	120,78				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	30,02	30,02	4,00	120,08	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	30,33	30,33	2,00	60,66	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 9 estão mostradas na Tabela 5-25.

**Tabela 5-25 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-6 Elevado**

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-9	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável
	Manchas

### 5.1.7 Reservatório R- 10.1

Localizado na Rua Rio do Fogo, Ponta Negra, este reservatório é do tipo elevado, sendo sua estrutura executada em concreto armado. Ele é composto por cinco pilares, que sustentam o corpo do reservatório (parede e lajes de tampa e de fundo) e cinco níveis de vigamentos, sendo o primeiro no nível do terreno, e o segundo e terceiro apresentam espaçamento da ordem de 3,0 m. No quarto nível de vigamento o reservatório apresenta uma laje em balanço.



**Figura 5-57 - Vista do reservatório R-10.1**

O reservatório apresenta manchas escuras em toda a sua superfície, conforme mostra a Figura 5-58.



**Figura 5-58 - Presença de manchas em toda a extensão do corpo do reservatório.**

Todo o reservatório foi revestido com uma camada de argamassa, cuja espessura é de aproximadamente 3,0 cm.

Há indícios de corrosão em todos os pilares. Apesar de não haver armaduras expostas, em determinados locais já houve o deslocamento da camada de cobertura e do revestimento, além de haver a presença de fissuras.

As Figura 5-59 e Figura 5-60 mostram as características das fissuras.



**Figura 5-59 - Fissura devido à ocorrência de corrosão.**



**Figura 5-60 - Fissura na base do pilar devido à corrosão**

Foi realizada a medição da abertura de fissuras, e na base do pilar sua dimensão é da ordem de 0,6 mm, conforme pode ser visto na Figura 5-61.



**Figura 5-61 - Medição da abertura de fissura no vértice do pilar.**

As vigas de todos os níveis apresentam problemas de oxidação nas armaduras. As principais manifestações patológicas encontradas consistem na desagregação do concreto e ocorrência de fissuras.

Tais manifestações estão mostradas nas Figura 5-62 e Figura 5-63, mostradas a seguir.



**Figura 5-62 - Oxidação da armadura de uma das vigas do reservatório.**



**Figura 5-63 - Ocorrência de fissuras devido à corrosão das armaduras**

A laje de fundo apresenta manchas amareladas, caracterizando a deficiência no sistema de impermeabilização, conforme pode ser visto na Figura 5-64.



**Figura 5-64 - Manchas amareladas na laje de fundo**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

A Tabela 5-26, mostrada a seguir, refere-se ao cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.1.

**Tabela 5-26- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.1**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	107,02	<b>183,58</b>	<b>5,00</b>	<b>917,91</b>	<b>150,87</b>
Pilar P2	27,49				
Pilar P3	27,49				
Pilar P4	107,02				
Pilar P5	107,02				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	121,90	<b>182,85</b>	<b>5,00</b>	<b>914,25</b>	
Viga - Nível 02	121,90				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	104,73	<b>104,73</b>	<b>4,00</b>	<b>418,92</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	81,38	<b>81,38</b>	<b>2,00</b>	<b>162,76</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 10.1 estão mostradas na Tabela 5-27.

**Tabela 5-27 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-10.1**

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-10.1	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável
	Infiltração
	Impermeabilização deficiente
	Manchas

### 5.1.8 Reservatório R- 10.2

O reservatório situa-se na Rua Praia de Cambinhas, Ponta Negra. Sua arquitetura é diferenciada, sendo constituída por dez pilares de seção retangular, que apoiam as vigas em balanço, com quantidade igual a dos pilares. Seu formato assemelha-se a um sólido de revolução de formato losangular. Ao longo de toda a sua altura há apenas dois níveis de contraventamento: um a aproximadamente 3,0 m de altura e o segundo no topo dos pilares, servindo como sustentação para todo o corpo do reservatório.

A Figura 5-65 mostra uma visão geral do reservatório.



**Figura 5-65 - Vista geral do reservatório**

Todo o corpo do reservatório foi revestido com argamassa, apresentando uma espessura média de 3,0 cm. Em diversos locais do reservatório há o desprendimento do reboco, conforme pode ser visto na Figura 5-66.



**Figura 5-66 - Desprendimento do reboco em todo o reservatório**

Em diversos locais há a presença de manchas escuras e a desagregação da pintura – realizada com cal.

As vigas de sustentação da laje de fundo apresentam indícios de corrosão. Em diversos locais há a desagregação do concreto e do revestimento, deixando a armadura exposta, e em outros pontos há a presença de fissuras. A Figura 5-67 mostra o efeito da corrosão das armaduras em uma das vigas. Pode-se visualizar a desagregação do concreto e da camada de revestimento, juntamente com a exposição da armadura.



**Figura 5-67 - Fissuração em uma das vigas de fundação**

O vigamento do primeiro nível também apresenta desagregação do concreto e do revestimento devido a corrosão, e com a exposição da armadura, conforme mostra a Figura 5-68.



**Figura 5-68 - Desagregação do concreto e do revestimento no vigamento do primeiro nível**

Em diversos pilares há a presença de fissuras em seus vértices. A abertura dessas fissuras varia desde 0,2 mm a 4,0 mm. Ao avaliar melhor essas fissuras percebe-se a ocorrência de sons cavos quando são realizadas pequenas batidas nos elementos. Tal característica permite avaliar que as fissuras são superficiais, atingindo a camada de revestimento e, possivelmente, uma camada superficial do concreto.

As Figura 5-69 e Figura 5-70 mostram, respectivamente, fissuração na base do pilar e a medição da abertura de uma das fissuras.



**Figura 5-69 - Fissuração no vértice do pilar**



**Figura 5-70- Medição da abertura de fissura**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos.

A Tabela 5-28, mostrada a seguir, mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.2.

**Tabela 5-28 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-10.2**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	103,26	<b>196,19</b>	<b>5,00</b>	<b>980,97</b>	<b>120,90</b>
Pilar P2	103,26				
Pilar P3	103,26				
Pilar P4	103,26				
Pilar P5	103,26				
Pilar P6	103,26				
Pilar P7	103,26				
Pilar P8	103,26				
Pilar P9	103,26				
Pilar P10	103,26				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	80,39	<b>120,59</b>	<b>5,00</b>	<b>607,93</b>	
Viga - Nível 02	80,39				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	78,21	<b>78,21</b>	<b>4,00</b>	<b>312,84</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	18,84	<b>18,84</b>	<b>2,00</b>	<b>37,68</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 10.2 estão mostradas na Tabela 5-29.

**Tabela 5-29 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-10.2**

<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS</b>
R-10.2	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Esfoliação
	Fissuração Inaceitável
	Infiltração
	Manchas
	Vazamentos

### 5.1.9 Reservatório R- 11

O reservatório situa-se na Rua Morro do Pilar, Neópolis. Sua estrutura constitui-se de seis pilares de seção retangular, havendo três níveis de vigas, com espaçamento aproximado de 3,20 m, a viga do segundo nível possui uma passarela apoiada e com um trecho em balanço para acesso à parte superior do reservatório.

A Figura 5-71 mostra uma visão panorâmica do reservatório.



Figura 5-71 - Vista do reservatório R-11

Os pilares do reservatório, de maneira geral, não apresentam sintomatologia que caracterize a ocorrência de fissuração de armaduras. Há a presença de uma pequena porção da armadura exposta, conforme pode ser visto na Figura 5-72.



**Figura 5-72 - Deslocamento do concreto no vértice do pilar, expondo sua armadura**

As vigas apresentam a ocorrência de manchas, conforme Figura 5-73, mostrada a seguir.

No vigamento do nível 01 há a presença de manchas escuras, caracterizando a ocorrência de escoamento de águas pluviais, conforme pode ser visualizado na Figura 5-73.

Ainda no vigamento do nível 01 há a presença de corrosão em apenas um ponto, em que há o deslocamento da camada de cobertura do concreto, deixando a armadura exposta à ação das intempéries. Tal situação está mostrada na Figura 5-74.



**Figura 5-73 - Manchas escuras na viga do primeiro nível**



**Figura 5-74 - Deslocamento do concreto no vigamento do nível 01**

A laje de fundo apresenta manchas amareladas – características de deficiências no sistema de impermeabilização. Essas manchas são mais evidentes nos locais onde o concreto foi perfurado para a instalação de tubulações. A Figura 5-75 retrata a situação descrita.



**Figura 5-75 - Manchas características de infiltração na laje de fundo**

Externamente a parede do reservatório não apresenta pontos de corrosão, não sendo possível identificar a olho nu a ocorrência de fissuras ou quaisquer outros tipos de manifestações associadas à corrosão.

Conforme mostrado na Figura 5-76, há a presença de manchas escuras, características do escoamento de águas pluviais associadas à poluição urbana.



**Figura 5-76 - Manchas no corpo do reservatório**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução indicou que não houve contaminação por cloretos.

A Tabela 5-30 mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o reservatório.

**Tabela 5-30- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-11**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	22,86	<b>45,46</b>	<b>5,00</b>	<b>980,97</b>	<b>82,13</b>
Pilar P2	22,86				
Pilar P3	24,89				
Pilar P4	22,86				
Pilar P5	24,89				
Pilar P6	24,89				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	80,39	<b>120,59</b>	<b>5,00</b>	<b>602,93</b>	
Viga - Nível 02	80,39				
Viga - Nível 03	80,39				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	111,11	<b>78,21</b>	<b>4,00</b>	<b>444,44</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	19,70	<b>19,70</b>	<b>2,00</b>	<b>39,40</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 11 estão mostradas na Tabela 5-31.

**Tabela 5-31 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-11**

<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS</b>
R-11	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Esfoliação
	Infiltração
	Manchas
	Vazamentos

### **5.1.10 Reservatório R- 13**

O reservatório situa-se na Rua da Lagoa Nova, Guarapes. Sua estrutura constitui-se de cinco pilares de seção retangular, havendo três níveis de vigas, com espaçamento aproximado de 3,20 m, a viga do segundo nível possui uma passarela apoiada e com um trecho em balanço para acesso à parte superior do reservatório.

No primeiro nível do reservatório foi realizado o fechamento com alvenaria e a instalação de esquadrias (portas, janelas com as respectivas grades), possibilitando seu funcionamento como depósito. A Figura 5-77 mostra uma visão geral do reservatório.



**Figura 5-77 - Vista geral do reservatório**

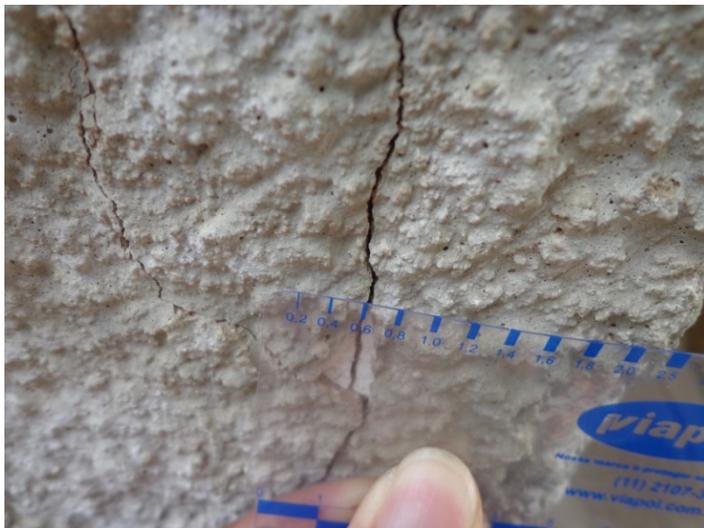
Em todos os pilares do reservatório, independentemente do nível, constata-se a ocorrência de fissuras devido à corrosão. As fissuras causaram o deslocamento do concreto e da camada de revestimento – realizado com argamassa e espessura média de 3,0 cm.

A Figura 5-78 mostra a ocorrência de fissuração no vértice do pilar, devido ao aumento de volume das barras de aço, causado pela oxidação.



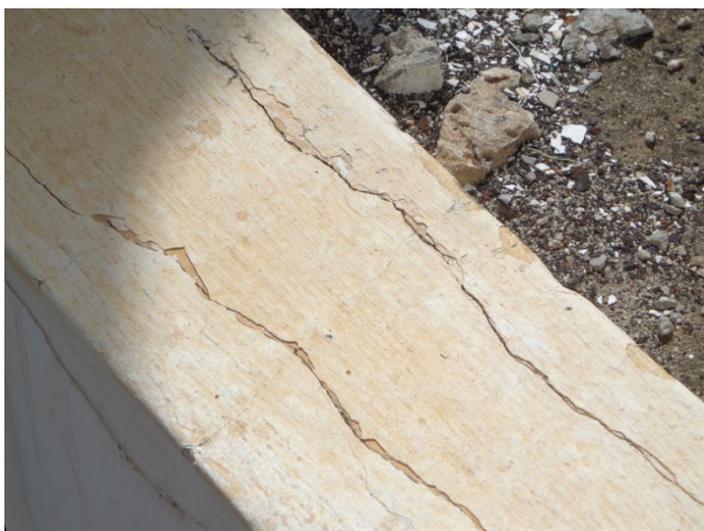
**Figura 5-78 - Fissuração no vértice do pilar devido ao aumento de volume devido à oxidação**

Realizou-se a medição da abertura de fissuras e constatou-se que a abertura delas variam de 0,2 mm a 3,5 mm. As aberturas de maiores diâmetros foram encontradas no encontro entre os pilares de concreto e a alvenaria do depósito. A Figura 5-79 mostra a medição da abertura de fissuras realizada em um dos pilares.



**Figura 5-79 - Medição da abertura de fissuras**

As vigas apresentam fissuras e deslocamento do concreto. A característica da fissuração – acompanhando a direção das armaduras – são originárias do processo de aumento do volume das barras devido à corrosão. A Figura 5-80 mostra a ocorrência de fissuras devido à oxidação da armadura.



**Figura 5-80 - Fissuras no concreto devido ao aumento de volume da armadura**

Conforme mostrado nas Figura 5-81 e Figura 5-82, há a presença de manchas escuras na parede do reservatório e na face inferior da laje em balanço, características do escoamento de águas pluviais associadas à poluição urbana.



**Figura 5-81 - Manchas escuras na parede do reservatório**



**Figura 5-82 - Manchas escuras na laje em balanço - nível 02**

Na face externa da laje de fundo há a presença de corrosão das armaduras em locais pontuais. Houve o deslocamento da camada de cobertura e do revestimento e a exposição das armaduras às intempéries, conforme pode ser visto na Figura 5-83.

Na laje de fundo também há a presença de manchas amarelas ocasionadas devido à deficiências no sistema de impermeabilização. As manchas são mais visíveis

no local em que foram instaladas as tubulações do reservatório, conforme pode ser visto na Figura 5-84.



**Figura 5-83 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura na laje de fundo do reservatório**



**Figura 5-84 - Mancha amarelada na laje de fundo devido à deficiências no sistema de impermeabilização**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despассивando-a; enquanto que a segunda solução indicou contaminação por cloretos, conforme pode ser visto na Figura 5-85.



Figura 5-85 - Aspersão de solução de nitrato de prata e sedimentação dos sais de prata, indicando a presença de cloretos

A Tabela 5-32 mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o R-13.

Tabela 5-32 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-13

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	125,57	<b>226,21</b>	<b>5,00</b>	<b>1131,03</b>	<b>116,96</b>
Pilar P2	125,57				
Pilar P3	125,57				
Pilar P4	125,57				
Pilar P5	125,57				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	80,39	<b>120,59</b>	<b>5,00</b>	<b>602,93</b>	
Viga - Nível 02	80,39				
Viga - Nível 03	80,39				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	20,53	<b>20,53</b>	<b>4,00</b>	<b>82,12</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	27,62	<b>27,62</b>	<b>2,00</b>	<b>55,24</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 13 estão mostradas na Tabela 5-33.

Tabela 5-33 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-13

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-13	Carbonatação
	Contaminação por cloretos
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável

### 5.1.11 Reservatório R- 14 Apoiado

Localizado na Avenida Bacharel Tomaz Landim, Parque dos Coqueiros, do tipo apoiado. Toda sua estrutura (paredes, lajes de fundo e cobertura, vigas e pilares) foi executada em concreto armado. Sua laje de cobertura é sustentada por quarenta e oito pilares, apoiados em sapatas, e dezoito vigas (em direções ortogonais).

A Figura 5-86 ilustra uma vista panorâmica externa do reservatório.



Figura 5-86 - Vista da fachada do reservatório

A parte externa do reservatório apresenta alguns pontos com a presença de manchas - características de infiltração. Devido à ocorrência dessas infiltrações, há a presença de eflorescências, conforme pode ser visto nas Figura 5-87 e Figura 5-88.



**Figura 5-87 - Manchas decorrentes de infiltração**



**Figura 5-88 - Detalhe da ocorrência de infiltrações**

Em determinados pontos, a ocorrência das infiltrações coincide com a presença de fissuras externas. Essas fissuras aparecem em mais de um local, sempre nas paredes laterais, e com orientação vertical.

O reservatório apresenta duas juntas de dilatação, sendo uma transversal e a outra longitudinal, estendendo-se pelas paredes e pela laje de fundo. O material elástico da junta encontra-se deteriorado, possibilitando a ocorrência de infiltrações



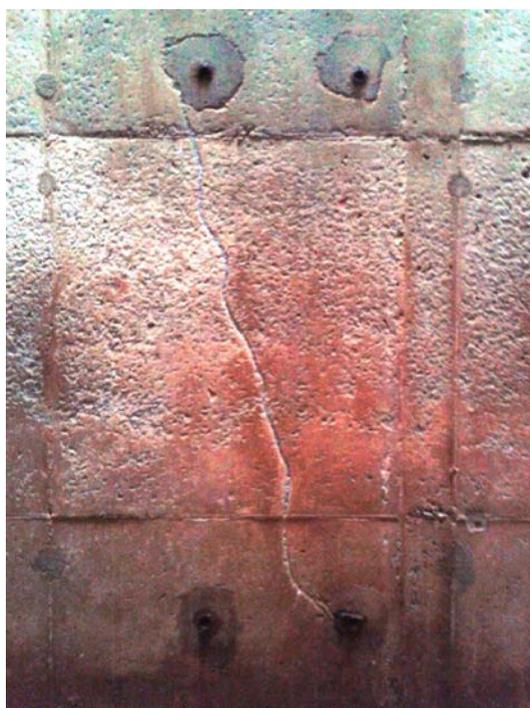
**Figura 5-89 - Junta de dilatação sem com o material comprometido**

Internamente as paredes encontram-se em bom estado, apesar de não haver a aplicação de material impermeabilizante, seja por meio de argamassas ou de mantas.

A Figura 5-90 ilustra a situação da face interna das paredes do reservatório e na Figura 5-91 está retratado o desgaste superficial devido à oscilação do nível de água no reservatório.



**Figura 5-90 - Face interna da parede do reservatório**



**Figura 5-91 - Desgaste superficial na face interna da parede do reservatório**

A face inferior da laje de cobertura, de modo geral, encontra-se em bom estado. Há a presença de apenas uma fissura com as características semelhantes às fissuras devido à oxidação das armaduras.



**Figura 5-92 - Estado da face interna da laje de cobertura**

As vigas superiores situadas no interior do reservatório, de maneira geral, encontram-se em bom estado de conservação. Pontualmente, elas apresentam manchas, devido principalmente à ocorrência de eflorescências. Algumas vigas apresentam deslocamento do concreto devido à corrosão, e exposição de pequenas parcelas das armaduras, conforme retrata a Figura 5-93.



**Figura 5-93 - Estado das vigas de cobertura do reservatório**

Externamente as vigas apresentam-se mais deterioradas. Nelas há o deslocamento do concreto e exposição da armadura devido à corrosão. Os locais em que houveram degradações mais acentuadas foram nos trechos iniciais e finais da viga, locais em que são realizadas a drenagem das águas pluviais que escoam sobre a cobertura.

A Figura 5-94 mostra as manifestações patológicas descritas no parágrafo anterior.



**Figura 5-94 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura na viga**



**Figura 5-95 - Presença de manchas na superfície do reservatório**

A face externa das vigas, exposta às intempéries, apresenta manchas escuras em praticamente toda a superfície, decorrente do escoamento, pela superfície, de

águas pluviais juntamente com o acúmulo de poluição. A Figura 5-95 retrata a distribuição das manchas na superfície.

O reservatório apresenta quarenta e oito pilares – sendo vinte situados no interior e vinte e oito no exterior. Possuem seção transversal quadrada de dimensões aproximadas de 30 cm x 30 cm. Apesar de os pilares externos apresentarem seção transversal trapezoidal, sua seção é igual à dos pilares internos. A seção trapezoidal foi obtida por meio do complemento com alvenaria de tijolos. Em todos os pilares há uma fissura vertical no encontro entre o pilar de concreto e a alvenaria de tijolos cerâmicos.

A Figura 5-96 mostra a fissura existente na interface concreto - alvenaria.



**Figura 5-96 - Fissura vertical no encontro concreto alvenaria**

Eles apresentam uma camada de revestimento executada com argamassa de cimento e areia. Os pilares não apresentam quaisquer tipos de manifestações patológicas, nem mesmo na região submetida à oscilação do nível da água.

Os pilares internos apresentam desgaste superficial devido à variação do nível da água, assim como nas paredes. A Figura 5-97 ilustra tal situação.



**Figura 5-97 - Desgaste superficial no pilar interno**

Foi realizada, também, a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata. Houve reação da solução de fenolftaleína, indicando que a frente de carbonatação ainda não atingiu a armadura. E a solução de nitrato de prata não apresentou qualquer tipo de reação indicando que não há contaminação por cloretos.

A Tabela 5-34 mostra o cálculo do Grau de Deterioração para o reservatório R-14 – Apoiado.

Tabela 5-34 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Apoiado (Continua)

CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA					
PILARES	Gde	Gdf	Fr	Gdf x Fr	Gd
Pilar P1	25,04				
Pilar P2	25,04				
Pilar P3	25,04				
Pilar P4	25,04				
Pilar P5	25,04				
Pilar P6	25,04				
Pilar P7	25,04				
Pilar P8	25,04				
Pilar P9	25,04				
Pilar P10	25,04				
Pilar P11	25,04				
Pilar P12	25,04				
Pilar P13	25,04				
Pilar P14	25,04				
Pilar P15	25,04				
Pilar P16	25,04				
Pilar P17	25,04				
Pilar P18	25,04				
Pilar P19	25,04				
Pilar P20	25,04	51,36	5,00	256,08	81,61
Pilar P21	21,96				
Pilar P22	21,96				
Pilar P23	25,04				
Pilar P24	25,04				
Pilar P25	21,96				
Pilar P26	25,04				
Pilar P27	25,04				
Pilar P28	25,04				
Pilar P29	25,04				
Pilar P30	21,96				
Pilar P31	25,04				
Pilar P32	25,04				
Pilar P33	21,96				
Pilar P34	25,04				
Pilar P35	21,96				
Pilar P36	25,04				
Pilar P37	21,96				
Pilar P38	25,04				
Pilar P39	21,96				

Tabela 5-35 - Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Apoiado

Pilar P40	25,04				81,61
Pilar P41	25,04				
Pilar P42	21,96				
Pilar P43	25,04				
Pilar P44	21,96	<b>51,36</b>	<b>5,00</b>	<b>256,08</b>	
Pilar P45	25,04				
Pilar P46	25,04				
Pilar P47	25,04				
Pilar P48	25,04				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	61,48				
Viga - Nível 02	26,75				
Viga - Nível 03	26,75				
Viga - Nível 04	26,75				
Viga - Nível 05	26,75				
Viga - Nível 06	26,75				
Viga - Nível 07	26,75				
Viga - Nível 08	26,75				
Viga - Nível 09	61,48	<b>116,87</b>	<b>5,00</b>	<b>584,35</b>	
Viga - Nível 10	61,48				
Viga - Nível 11	26,75				
Viga - Nível 12	26,75				
Viga - Nível 13	26,75				
Viga - Nível 14	26,75				
Viga - Nível 15	26,75				
Viga - Nível 16	26,75				
Viga - Nível 17	26,75				
Viga - Nível 18	61,48				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	20,53	<b>20,53</b>	<b>4,00</b>	<b>82,12</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	27,62	<b>27,62</b>	<b>2,00</b>	<b>55,24</b>	
<b>JUNTAS DE DILATAÇÃO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Longitudinal	82,27	<b>130,91</b>	<b>3,00</b>	<b>392,73</b>	
Transversal	82,27				

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 14 Apoiado estão mostradas na Tabela 5-36.

Tabela 5-36 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-14 Apoiado

RESERVATÓRIO	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS
R-14 Apoiado	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Desagregação
	Fissuração Inaceitável
	Infiltração
	Manchas

### 5.1.12 Reservatório R- 14 Elevado

Localizado na Avenida Bacharel Tomaz Landim, Parque dos Coqueiros – no mesmo lote em que está inserido o R-14 Apoiado. Este reservatório é do tipo elevado, sendo sua estrutura executada em concreto armado.

Sua estrutura é composta por doze pilares, sendo oito responsáveis pela sustentação do seu corpo do reservatório e quatro que suportam a estrutura de acesso. Ele apresenta dois níveis de vigamento, sendo o primeiro a aproximadamente 4,0 m acima do nível do terreno e o último o responsável pelo apoio de todo o corpo do reservatório (lajes de cobertura e de fundo e paredes laterais).

A Figura 5-98 mostra uma visão geral do reservatório.



**Figura 5-98 - Vista geral do reservatório**

O corpo do reservatório apresenta manchas escuras em toda a sua extensão, conforme pode ser visto na Figura 5-99.



**Figura 5-99 - Manchas escuras em toda a superfície do reservatório**

Este reservatório apresenta corrosão localizada nos pilares e na laje de cobertura. A Figura 5-100 a seguir mostra o deslocamento do cobrimento do concreto e conseqüente exposição da armadura.



**Figura 5-100 - Deslocamento do concreto e exposição da armadura na base do pilar**



**Figura 5-101 - Fissura no vértice do pilar devido aos esforços causados devido ao aumento de volume da armadura oxidada**

É possível ver que já foram realizadas pequenas intervenções nos pilares, devido à diferença na tonalidade no concreto aplicado e no existente.



**Figura 5-102 - Indicativos da realização de pequenas intervenções no pilar**

A laje de fundo do reservatório apresenta indícios pontuais de corrosão. Há a presença de manchas amareladas em toda a sua extensão, sendo um indicativo de deficiências no sistema de impermeabilização, conforme pode ser visto na Figura 5-103.



**Figura 5-103 - Existência de corrosão pontual no reservatório. É possível perceber a existência de manchas escuras e de eflorescências no corpo do reservatório**

Após a aspersão das soluções de fenolftaleína e de nitrato de prata constatou-se que a primeira permaneceu incolor, indicando que a frente de carbonatação atingiu a armadura despassivando-a; enquanto que a segunda solução não indicou contaminação por cloretos.

**Tabela 5-37- Cálculo do Grau de Deterioração para o R-14 Elevado**

<b>CÁLCULO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA</b>					
<b>PILARES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	<b>Gd</b>
Pilar P1	25,04	<b>47,99</b>	<b>5,00</b>	<b>239,97</b>	<b>96,11</b>
Pilar P2	25,04				
Pilar P3	25,04				
Pilar P4	25,04				
Pilar P5	25,04				
Pilar P6	25,04				
Pilar P7	25,04				
Pilar P8	25,04				
Pilar P9	25,04				
Pilar P10	25,04				
Pilar P11	25,04				
Pilar P12	25,04				
<b>VIGAS</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Viga - Nível 01	103,26	<b>154,89</b>	<b>5,00</b>	<b>774,45</b>	
Viga - Nível 02	103,26				
<b>LAJES</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Laje de Fundo	117,11	<b>117,11</b>	<b>4,00</b>	<b>468,44</b>	
Laje de Cobertura	0,00				
<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>Gde</b>	<b>Gdf</b>	<b>Fr</b>	<b>Gdf x Fr</b>	
Corpo do Reservatório	27,49	<b>27,49</b>	<b>2,00</b>	<b>54,98</b>	

As principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R – 14 Elevado estão mostradas na Tabela 5-38.

**Tabela 5-38 - Principais manifestações patológicas encontradas no reservatório R-14 Elevado**

<b>RESERVATÓRIO</b>	<b>MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS</b>
R-14 Elevado	Carbonatação
	Corrosão das armaduras
	Eflorescências
	Fissuração Inaceitável
	Manchas

## 5.2 Discussão dos Resultados

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar e quantificar as manifestações patológicas existentes nos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal.

Para a quantificação do grau de deterioração utilizou-se a metodologia GDE/UnB, em sua reformulação mais recente proposta por Fonseca (2007). Foram realizadas visitas *in loco* para avaliar as manifestações patológicas existentes nos reservatórios, sendo, na etapa seguinte, atribuídos diversos fatores de ponderação para as manifestações patológicas encontradas, em função da deterioração causada por elas.

Constatou-se que todos os reservatórios analisados apresentam uma sintomatologia, características executivas e de projeto bastante semelhantes. No âmbito das características de projeto, todos foram concebidos sob as recomendações das prescrições normativas vigentes à época. Nos concretos dos reservatórios avaliados o  $f_{ck}$  variou entre 13,5 MPa e 18 MPa; e o cobrimento com espessuras variando de 1,0 cm a 1,5 cm. Tais valores encontram-se muito abaixo daqueles recomendados na NBR 6118/2007. Em todos os reservatórios avaliados foi possível constatar a presença de uma camada de argamassa sendo adotada como medida protetora – algumas visivelmente com presença de argila.

Todos os reservatórios avaliados apresentaram manchas escuras devido à ação das chuvas. Nos reservatórios em que houve a presença de manchas com essas características constatou-se a ausência de pingadeiras, objetivando possibilitar o escoamento da água da chuva por todo o corpo do reservatório.

O aparecimento de manchas amareladas, principalmente na laje de fundo dos reservatórios elevados também foram recorrentes. A dimensão dessas manchas foi bastante variável, tendo ocorrido desde generalizadas até pontuais, tendo sido o local mais crítico onde há a passagem de tubulações. Essas manchas originam-se da deterioração da impermeabilização existente e são decorrentes do processo de lixiviação dos produtos da hidratação do cimento, resultando em eflorescências, com presença de produtos de corrosão.

No interior dos reservatórios podem-se caracterizar três zonas: a primeira zona corresponde à fração do concreto que se encontra totalmente submerso; a segunda fração corresponde àquela em que o concreto está submetido à variação do nível da água, e a terceira zona corresponde à parcela do concreto submetida diretamente à ação do vapor de água. A primeira e a segunda situação apresentam semelhanças devido ao processo de enchimento e esvaziamento do reservatório. Este processo ocorre de maneira bastante lenta, caracterizando uma condição quase estática.

A laje de fundo e os trechos das paredes mantidos submersos tendem a sofrer um processo de degradação mais lento que o sofrido pela laje de cobertura. Por estar totalmente submersa, a laje de fundo não possui contato com o vapor de água, e devido à saturação permanente dos poros do concreto, o processo de corrosão das armaduras tem sua velocidade de ocorrência bastante reduzida.

Assim como a laje de fundo, as paredes do reservatório apresentam a maior parcela de suas áreas submersas, por isso, o processo de deterioração das armaduras devido à corrosão também ocorre com velocidade bastante reduzida. Por outro lado, o desgaste superficial tende a ser mais acentuado devido à variação do nível da água.

A laje de cobertura, por estar sob a ação direta do vapor de água, apresenta um processo de deterioração mais acelerado. Neste elemento, o processo de difusão dos gases é o principal fator que possibilita a penetração da umidade até atingir a armadura, situada no interior da massa de concreto, e o consequente desenvolvimento do processo de corrosão.

As manifestações patológicas decorrentes da corrosão, iniciando-se com a fissuração e posteriores deslocamento do concreto, têm ocorrido principalmente na face inferior da laje de cobertura dos reservatórios, independentemente de serem apoiados ou elevados. Em praticamente todos os reservatórios em que foi possível visualizar a laje de cobertura, tais elementos encontram-se deteriorados, principalmente nos reservatórios em que o sistema de ventilação impossibilita a troca do vapor úmido com o meio de maneira eficiente.

Além de haver o processo de fissuração nas lajes de cobertura, a fissuração dos pilares e vigas apresentou-se bastante recorrente. Nestes elementos a corrosão

ocorre principalmente nos cantos, acompanhando a armadura principal. Tal situação decorre devido ao aumento de volume sofrido pelas armaduras, que ocasionam esforços de tração, e expulsam a camada de cobrimento do concreto.

Em todos os reservatórios avaliados realizou-se a aspersão de solução de nitrato de prata a 1% objetivando-se avaliar se na massa de concreto há a presença de íons cloreto. Foi possível constatar que alguns reservatórios apresentam tal contaminação em sua parte externa.

A presença dos íons cloretos na parte externa dos reservatórios nos possibilita concluir que a contaminação deu-se devido à utilização de materiais contaminados – como o uso de areias que apresentam tal íon em sua estrutura mineralógica – ou devido à utilização de aditivos aceleradores de pega que contenham  $\text{CaCl}_2$ .

Outra forma de contaminação das estruturas de concreto por meio de cloretos dá-se por meio da névoa salina. Entretanto, os reservatórios em que constatou-se evidências de contaminação por cloretos localizam-se em áreas distantes da zona costeira.

Constatou-se que a maioria dos reservatórios apresenta corrosão devido à ação da frente de carbonatação. Todos os reservatórios encontram-se na zona urbana do município de Natal, sujeito à ação dos poluentes atmosféricos, principalmente o  $\text{CO}_2$ , e este agente é o maior responsável pelo avanço da frente de carbonatação e consequente corrosão das armaduras.

As características do concreto utilizado na execução dos reservatórios, quando somadas às características de projeto da época, constituem fatores que possibilitam o rápido avanço da frente de carbonatação. Com relação às especificações de projeto tem-se a adoção de concretos com a baixa resistência à compressão, baixo consumo de cimento, elevado fator água/cimento, elevada porosidade e pequena espessura da camada de cobrimento.

Analisando-se os dados apresentado na Tabela 5-39 vê-se que a manifestação patológica que apresenta maior recorrência diz respeito à impermeabilização deficiente, sendo possível sua identificação em aproximadamente 17% dos reservatórios analisados; 13% dos reservatórios apresentam corrosão das armaduras;

em 11% tem-se a presença de manchas e fissuração inaceitável; e com 10% de recorrência tem-se a desagregação do concreto. As demais manifestações apresentaram-se com menos de 10% de recorrência.

Tabela 5-39 - Manifestações patológicas nos reservatórios analisados

RESERVATÓRIOS	MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA													
	C	CD	CC	CA	D	E	EF	FI	FE	ID	IN	M	OJD	V
R-4.1														
R-4.2														
R-5.2														
R-6 Apoiado														
R-6 Elevado														
R-9														
R-10.1														
R-10.2														
R-11														
R-13														
R-14 Apoiado														
R-14 Elevado														

C - Carbonatação

CD – Cobrimento Deficiente

CC – Contaminação por Cloretos

CA – Corrosão de Armaduras

D – Desagregação

E – Eflorescências

EF - Esfoliação

FI – Fissuração Inaceitável

FE – Flechas Excessivas

ID – Impermeabilização Deficiente

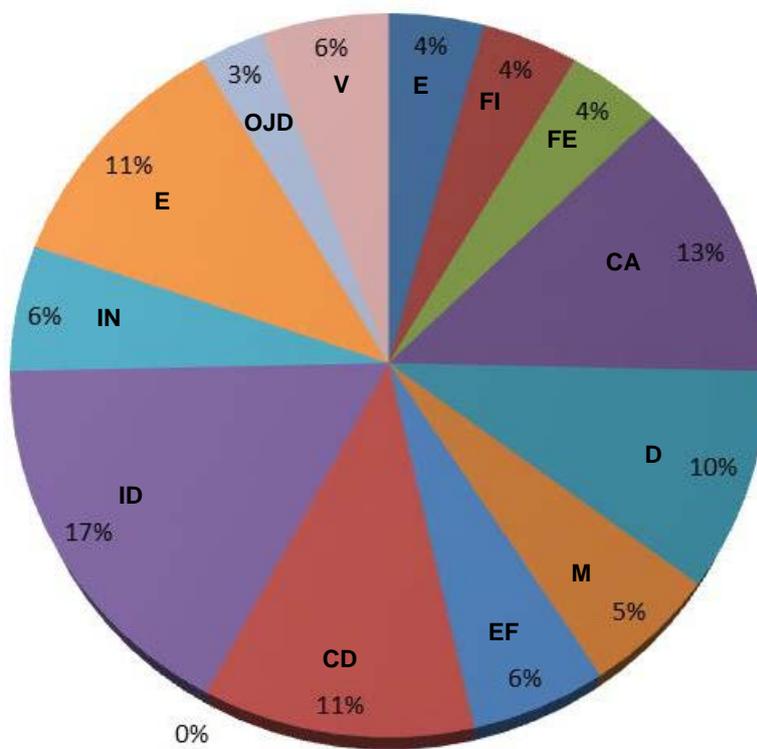
IN - Infiltração

M - Manchas

OJD – Obstrução das Juntas de Dilatação

V - Vazamentos

A Figura 5-104 mostra, em formato de gráfico as principais manifestações patológicas recorrentes nos reservatórios analisados.



**Figura 5-104 - Gráfico representativo das principais manifestações patológicas encontradas nos reservatórios do Sistema de Abastecimento de Água de Natal, que foram objeto desta pesquisa.**

Após a realização das visitas *in loco* e posterior quantificação das manifestações patológicas com o cálculo dos respectivos graus de deterioração, foi possível obter os valores apresentados na Tabela 5-40.

Tabela 5-40 - Grau de Deterioração dos Reservatórios

RESERVATÓRIO	GRAU DE DETERIORAÇÃO (Gd)
R-4.1	163,93
R-4.2	157,33
R-5.2	166,65
R-6 Apoiado	82,87
R-6 Elevado	266,46
R-9	193,38
R-10.1	150,87
R-10.2	120,90
R-11	82,13
R-13	116,96
R-14 Apoiado	110,76
R-14 Elevado	96,11

A Figura 5-105, apresentada a seguir, representa de maneira ilustrativa os dados presentes na Tabela 5-40 - Grau de Deterioração dos Reservatórios.

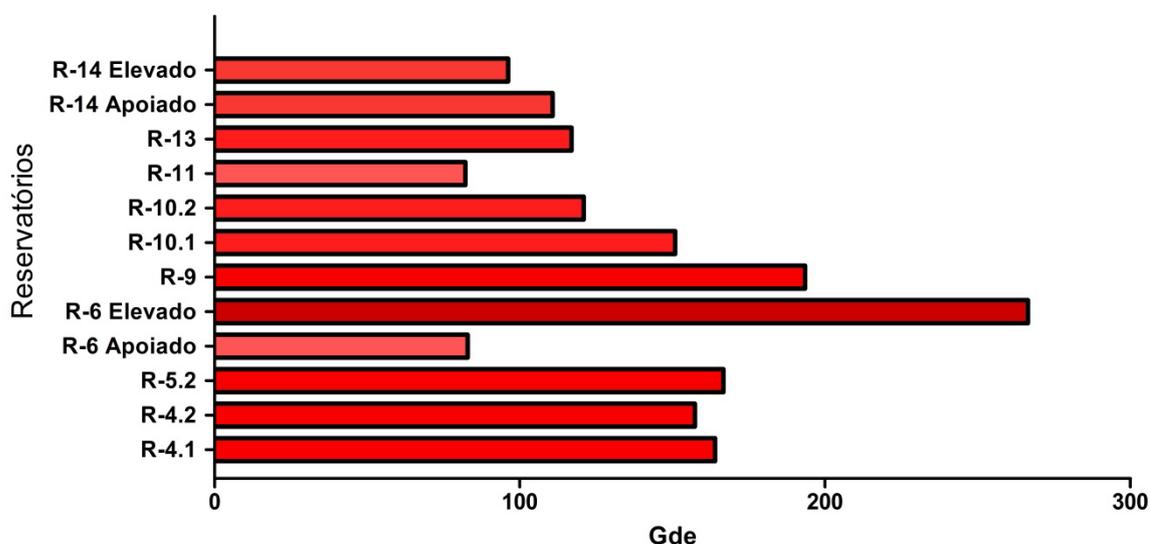


Figura 5-105 - Grau de Deterioração calculado para os reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal

Após a aplicação da reformulação proposta para a metodologia GDE/UnB conclui-se que todos os reservatórios analisados apresentam seu nível de deterioração classificado como crítico, conforme escala estabelecida na Tabela 3-4.

Esta situação mostra que o prazo para intervenção deve ser planejado para ocorrer em no máximo um ano. Entretanto, a realização de intervenções simultâneas

em todos os reservatórios é inviável porque impossibilitaria o abastecimento de água na cidade de Natal.

Assim, como forma de programar as intervenções a serem realizadas, causando os menores transtornos possíveis à população, apresenta-se a proposta de realiza-las inicialmente nos reservatórios que apresentam maiores valores para o  $G_d$ , devendo esse dado ser submetido à análise crítica obtida mediante a realização das inspeções de campo.

Alguns reservatórios apresentam problemas maiores devido às deficiências no sistema de impermeabilização, fato este que contribui para a aceleração do processo de deterioração da estrutura. Entretanto, havendo a reparação do sistema de impermeabilização poder-se-á prolongar o tempo necessário para a reparação da estrutura, sendo preciso, apenas a realização de pequenas intervenções, como o reparo pontual do concreto, como é o caso do R-6 Apoiado, R-14 Apoiado, e R-14 Elevado.

Para os demais reservatórios não há outra forma de priorizar a ordem de intervenção, a não ser pela utilização do grau de deterioração, visto que os estados de deterioração encontram-se bastante avançados, impossibilitando a realização de intervenções pontuais e sim a recuperação de toda a estrutura.

Portanto, após todas as análises realizadas neste trabalho recomenda-se que o plano de recuperação dos reservatórios seja realizado seguindo a prioridade estabelecida na Tabela 5-41.

Tabela 5-41 - Ordem de realização de intervenções nos reservatórios do SAA de Natal

PRIORIDADE	RESERVATÓRIO	GRAU DE DETERIORAÇÃO
1	R-6 Elevado	266,46
2	R-9	193,38
3	R-5.2	166,65
4	R-4.1	163,93
5	R-4.2	157,33
6	R-10.1	150,87
7	R-10.2	120,90
8	R-13	116,96
9	R-14 Apoiado	110,76
10	R-14 Elevado	96,11
11	R-6 Apoiado	82,87
12	R-11	82,13

Ressalta-se a importância de se realizar a recuperação estrutural com a maior brevidade possível, considerando que as patologias presentes encontram-se na sua maioria em estados avançados de deterioração, comprometendo assim, a vida útil dos reservatórios e condições de segurança.

Acrescenta-se a importância de se realizar os serviços de recuperação estrutural com empresas que detenham o conhecimento técnico quanto a correta identificação das manifestações patológicas e detenham equipamentos e técnicas executivas adequadas, de forma a assegurar o incremento de vida útil aos reservatórios avaliados.

## CAPÍTULO 6

# 6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas após a identificação dos danos e a aplicação da metodologia para a quantificação do grau de deterioração dos reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água de Natal.

### 6.1 Conclusões

Após a realização desta pesquisa e concatenação dos resultados, conclui-se que os reservatórios constituem estruturas completamente susceptíveis ao processo acelerado de aparecimento de manifestações patológicas e consequente degradação.

Por haver a formação de um microclima específico – em que há a predominância de valores elevados de umidade relativa do ar, aliada com a presença de saturação – a parte interna dos reservatórios são bastante susceptíveis à deterioração.

Devido a essa característica peculiar os reservatórios devem ser periodicamente, objeto de vistorias preliminares, procurando sempre identificar e intervir quando da ocorrência de manifestações de pequena interferência na integridade e segurança estrutural, como é o caso da realização de manutenções no sistema de impermeabilização.

Além de garantir o objetivo fim do reservatório, que é a estanqueidade, a manutenção da impermeabilização dentro das condições técnicas aceitáveis evita o aparecimento prematuro de diversas manifestações patológicas, como a ocorrência de eflorescências e oxidação das armaduras.

O acesso às câmaras superiores dos reservatórios constituiu um empecilho à inspeção devido à falta de segurança. Além de apresentarem degraus soltos, elas

estavam em desconformidade com as normas de segurança vigentes, que exigem guarda-corpo e patamares para descanso.

Com relação às características de projeto e executivas, conclui-se que as recomendações de projeto devem, acima de tudo, continuar presando pelo projeto e execução de estruturas que apresentem durabilidade compatível com as condições de projeto a que estarão sujeitas ao longo de sua vida útil.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros de avaliação, identificação e quantificação do grau de deterioração das estruturas, propõe-se a continuação desta pesquisa por meio dos seguintes tópicos:

- Aplicação da metodologia apresentada nesta pesquisa em outros tipos de obras;
- Adaptação da metodologia apresentada para obras de arte especiais (OEA);
- Estudo dos procedimentos de recuperação que mais se adéquam ao tipo de obra apresentada na pesquisa;
- Estudo de materiais que melhor se adequam aos procedimentos de recuperação de reservatórios de água elevados, enterrados ou semienterrados.

## Referências Bibliográficas

ABNT NBR 6118. (31 de Março de 2007). *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*.

ABOSRRA, L., ASHOUR, A., & YOUSEFFI, M. (23 de May de 2011). Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. *Construction and Building Materials*, pp. 3915 - 3925.

ACHAL, V., MUKERJEE, A., & REDDY, M. S. (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 1 - 5.

ACI - American Concrete Institute. (2007). ACI 224.1R-07: Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. *Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures*.

ACI. (2002). ACI 201. *Guide for Durable Concrete*.

ACI 350R-01. (December de 2001). *Code Requirements for Enviromental Engineering Concrete Structures*.

AHMAD, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review. *Cement & Concrete Composites*, pp. 459 - 471.

AMORIM, A. A. (s.d.). Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado Aparente. *Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado Aparente*. Belo Horizonte, MG.

ANDRADE, J. d. (2001). *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacado pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos*. UFRGS. Porto Alegre: UFRGS.

ANDRADE, J. O. (2008). Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: G. C. ISAÍÁ, & G. C. ISAÍÁ (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. 1, p. 1579). São Paulo: IBRACON.

ANDRADE, T. (2006). Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In: T. ANDRADE, & G. C. ISAÍÁ (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. 1, p. 1579). São Paulo: IBRACON.

ANGST, U. M., HOOTON, R. D., MARCHAND, J., PAGE, C. L., FLATT, R. J., ELSENER, B., et al. (2012). Present and Future Durability Challenges for Reinforced Concrete Structures. *Materials and Corrosion*, 1047-1051.

ARYA, C., & WOOD, L. (2003). The Relevance of Cracking in Concrete to Corrosion of Reinforcement. In: *Concrete Repair Manual* (pp. 553-584). Farmington Hills, Michigan: ACI International.

AVELDAÑO, R. R., & ORTEGA, N. F. (28 de July de 2010). Characterization of concrete cracking due to corrosion of reinforcements in different environments. *Construction and Building Materials*, pp. 630-637.

BERTOLINI, L. (2010). *Materiais de Construção: Patologia, Reabilitação e Prevenção*. (L. BECK, Trad.) São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos.

BOLDO, P. (Janeiro de 2002). *Avaliação quantitativa das estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro*. Brasília, DF, Brasil: Dissertação de Mestrado.

BURIN, E., DANIEL, E., FIGUEIREDO, F. F., MOURÃO, I. C., & SANTOS, M. S. (2009). *Vistorias na Construção Civil: Conceitos e Métodos*. São Paulo, SP, Brasil: PINI.

CÁNOVAS, M. F. (1998). *Patologia e Terapia do Concreto Armado*. São Paulo, São Paulo, Brasil: PINI.

CASCUDO, O. (2005). Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura. In: O. CASCUDO, & G. C. ISAIA (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. 2, p. 1579). São Paulo: IBRACON.

CASTRO, E. K. (Dezembro de 1994). *Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado*. Brasília, DF, Brasil.

CORREA, M. I. (06 de 2013). Implantação de programas de manutenção preventiva e corretiva em estruturas de concreto armado. *Anais do IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas - CINPAR*.

COSTA, A., & APPLETON, J. (2002). Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. *Cemente & Concrete Composites*, pp. 169-179.

DONG, S.-G., LIN, C.-J., HU, R.-G., LI, L.-Q., & DU, R.-G. (30 de Agosto de 2010). Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor. *Electrochimica Acta*.

FERREIRA, R. M. (13 de Dezembro de 2006). *Optimização da Vida Útil das Estruturas de Betão Armado*. p. 16.

FIGUEIREDO, E. P. (2005). Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: G. C. ISAIA, & G. C. ISAIA (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. Volume 2, pp. 829 - 855). São Paulo, SP, Brasil: IBRACON.

FONSECA, R. P. (Junho de 2007). A Estrutura do Instituto Central de Ciências: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção. *A Estrutura do Instituto Central de Ciências: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção*. Brasília, DF, Brasil.

GEIKER, M. R. (2012). On the importance of execution for obtaining the designed durability of reinforced concrete structures. *Materials and Corrosion*, 1114 - 1118.

GJORV, O. E. (15 de 01 de 2011). Durability of concrete structures. *Civil Engineering*, pp. 151 - 172.

HELENE, P. R. (Dezembro de 1997). Introdução da Durabilidade no Projeto de Estruturas de Concreto. *Ambiente Construído*, 45 - 57.

HELENE, P. R., MEDEIROS, M. F., & ANDRADE, J. d. (2006). Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: P. R. HELENE, M. H. MEDEIROS, J. J. ANDRADE, & G. C. ISAIA (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. 2, p. 1579). São Paulo: IBRACON.

HUANG, P., BAO, Y., & YAO, Y. (11 de June de 2004). Influence of HCL corrosion on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, pp. 584 - 589.

IBRAHIM, M., SHAMEEM, M., & MASLEHUDDIN, M. (2013). Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions. *Cement & Concrete Composites*, 60 - 69.

INSTITUTE, A. C. (2002). Guide to Durable Concrete. *Guide to Durable Concrete*, 41.

LEWANDOWSKI, Z., & CUNNINGHAM, A. B. (1998). *Bioremediation: principles and practice - fundamental and applications* (Vol. 1). Pennsylvania, USA: Technomic Publishing.

LIMA, M. G. (2006). Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: M. G. LIMA, & G. C. Isaia (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e REalizações* (p. 1500). São Paulo: IBRACON.

LIU, J. P.; LI, L.; MIAO, C. W.; TIAN, Q.; RAN, Q. P.; WANG, Y. J.;. (2011). Reduction of water evaporation and cracks on plastic concrete surface by monolayers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engeneering Aspects*, 496 - 500.

LOPES, B. (Setembro de 1998). Sistemas de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: estudo para a inclusão do componente estrutura de concreto. Brasília, DF, Brasil.

MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. M. (2008). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, São Paulo, Brasil: IBRACON.

NEVILLE, A. P. (2004). *Properties of Concrete*. London: Pearson Prentice Hall.

ODRIOZOLA, M. B., & GUTIÉRREZ, P. A. (14 de June de 2007). Comparative study of different test methods for reinforced concrete durability assessment in marine environment. *Materials and Structures*, pp. 527-541.

PAULETTI, C. (2004). *Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: UFRGS.

SAFEHIAN, M., & RAMEZANIANPOUR, A. K. (4 de Julho de 2013). Assesment of service life models for determinatation of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environment condition. *Construction and Building Materials*, pp. 287-294.

SAHADE, R. F. (2005). *Avaliação de Sistemas de Recuperação de Fissuras em Alvenaria de Vedação*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

SILVA, M. R., & PINHEIRO, S. d. (2006). Biodeterioração do Concreto. In: M. R. SILVA, S. M. PINHEIRO, & G. ISAIA (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (p. 1579). São Paulo: IBRACON.

SONG, Y.-P., SONG, L.-Y., & ZHAO, G.-F. (23 de Julho de 2003). Factor affecting corrosion and approaches for improving durability of ocean reinforced concrete structures. *Ocean Engineering*.

SOUZA, V. M., & RIPPER, T. (2009). *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo: PINI.

SOUZA, V. M., & RIPPER, T. (2009). *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo, São Paulo: PINI.

SUPRENANT, B. A. (1992). Efflorescence - Minimizing unsightly staining.

THOMAZ, É. (2001). *Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação*. São Paulo: PINI.

TUTIKIAN, B., & PACHECO, M. (Março de 2013). Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil. *Inspección, diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil*. Mérida, México: ALCONPAT.

VERA, R., VILLARROEL, M., CARVAJAL, A. M., VERA, E., & ORTIZ, C. (2008). Corrosion Products of Reinforcement in Concrete in Marine and Industrial Environments. *Materials Chemistry and Physics*, 467-474.

VIECILI, F. A. (Fevereiro de 2004). Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto. *Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: Editora UFRGS.