

Monografia

"EFEITOS DO TRANSPORTE DE ESGOTO SANITÁRIO E ÁGUAS PLUVIAIS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO"

Autor: Evelize Oliveira Maia

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Janeiro/2012

Evelize Oliveira Maia

**"EFEITOS DO TRANSPORTE DE ESGOTO SANITÁRIO E
ÁGUAS PLUVIAIS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em

Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Construção Civil

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

M217e Maia, Evelize Oliveira.
Efeitos do transporte de esgoto sanitário e águas pluviais em tubulações de concreto [manuscrito] / Evelise Oliveira Maia. – 2012. 107 f., enc.: il.

Orientadora: Adriano de Paula e Silva.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.

Bibliografia: f. 102-107.

1. Construção civil. 2. Concreto. 3. Patologia. 4. Esgotos. 5. Águas pluviais. I. Silva, Adriano Paula e. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade do grande aprendizado que o curso me propiciou;

Ao professor Adriano pela orientação e condução neste trabalho;

Aos demais professores do curso, meu agradecimento pela sabedoria compartilhada durante o ano que passou;

Aos colegas de curso, obrigada pelo auxílio e amizade;

Aos meus amigos, agradeço pela enorme paciência que tiveram comigo durante a confecção deste trabalho;

Á Lorene, pelo ombro amigo, compreensão e materiais emprestados;

À minha família pelo incentivo, mesmo distante;

Ao Cocó pelo amor, companheirismo, e por todos os outros motivos acima;

E principalmente a Deus, pela condição de concluir mais esta etapa de vida.

RESUMO

Pelo grande uso do concreto em todo o mundo, fica evidente a necessidade de um cuidado maior com a durabilidade deste material. Torná-lo mais durável significa confeccioná-lo menos susceptível ao desgaste, conferindo assim, melhor desempenho às estruturas, por um período de tempo maior.

Hoje já podemos constatar que estruturas que possuem acompanhamento e manutenção constantes, são mais duráveis e menos dispendiosas que aquelas que não os tem. Fica claro então, que substituindo os gastos com reparos e reconstruções, por gastos com manutenção, é possível obter considerável economia.

As tubulações de transporte de esgoto doméstico e água pluvial, assim como qualquer outra estrutura, necessitam de manutenção preventiva, a fim de evitar o aparecimento de patologias tão comuns a esse meio.

Os efeitos da deterioração do concreto nas citadas tubulações são basicamente causados por ataques químicos, físicos e biológicos, como a corrosão biogênica, o desgaste superficial e o ataque causado por sulfatos. Em todos os casos discutidos neste trabalho, existem formas de minimização de riscos do desgastes, mas quase sempre, as intervenções feitas são apenas de caráter emergencial.

O prejuízo econômico é grande em questões como essa, e a consciência da importância de uma metodologia de manutenção preventiva precisa ser adquirida.

Palavras-chave: *Concreto, durabilidade, deterioração, patologias, esgoto, água pluvial.*

ABSTRACT

The great use of concrete in the world, it is evident the need for greater care with the durability of this material. Make it more durable means prepares it less susceptible to wear, thus providing better performance for structures for a period of time.

Today we can see that structures that have constant monitoring and maintenance, are more durable and less expensive than those that do not have them. It is clear then that replacing spending on repairs and reconstructions, for maintenance expenses, you can achieve considerable savings.

The pipes carrying domestic sewage and rainwater, as well as any other structure, need preventive maintenance in order to avoid the appearance of diseases so common to this medium.

The effects of concrete deterioration in the said pipes are basically caused by chemical, physical and biological agents, such as biogenic corrosion, wear and surface attack caused by sulfates. In all cases discussed in this paper, there are ways to minimize the risks of wear, but often, interventions are only for emergency.

The economic damage is great in such matters, and awareness of the importance of a methodology of preventive maintenance must be purchased.

Keywords: *Concrete, durability, deterioration, disease, sewage, rainwater.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Caracterização do Esgoto Sanitário	13
3.2 Caracterização das Águas Pluviais	17
3.3 Concreto	19
3.3.1 Durabilidade do concreto.....	19
3.3.1.1 Fatores que afetam a durabilidade do concreto	21
3.3.2 Deterioração do concreto	25
3.3.2.1 Causas de deterioração relativa à falhas humanas.....	26
3.3.2.2 Causas de deterioração relativa à estrutura porosa do concreto.....	32
3.3.2.3 Causas físicas de deterioração das estruturas de concreto	34
3.3.2.4 Causas químicas de deterioração das estruturas de concreto	44
3.3.2.5 Causas biológicas de deterioração das estruturas de concreto.....	68
4. EFEITOS DO TRANSPORTE DE ESGOTO SANITÁRIO E ÁGUAS PLUVIAIS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	71
4.1 Deterioração por Abrasão	72
4.2 Deterioração por Cavitação	74
4.3 Deterioração por Ataque Químico.....	82
4.3.1 Deterioração causada por sulfatos	83
4.3.2 Corrosão biogênica	86
4.4 Demais Patologias Recorrentes.....	98
4.4.1 Infiltrações.....	98
4.4.2 Trincas	98
4.4.3 Brocas.....	99

4.4.4 Recalques	100
5. CONCLUSÃO	101
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Excesso de altura do lançamento de concreto provocou a segregação do mesmo.	27
Figura 3.2: Falta de estanqueidade nas fôrmas causando fuga da argamassa	28
Figura 3.3: Congestionamento da armadura provocando deterioração precoce da estrutura.....	29
Figura 3.4 a): Espaçamento irregular em armadura de laje	30
Figura 3.4 b): Armadura negativa da laje fora de posição.....	30
Figura 3.5 a): Armadura curta em disposição incorreta	31
Figura 3.5 b): Armadura prolongada em disposição correta.	31
Figura 3.6: Influência do fator água/cimento no coeficiente de permeabilidade dos concretos.	33
Figura 3.7: Variações térmicas provocando fissuras e trincas na cúpula da igreja.	38
Figura 3.8: Influência da temperatura sobre a resistência do concreto.....	41
Figura 3.9: Formação de estalactites.	45
Figura 3.10: Deterioração do concreto por ataque de sulfatos.	50
Figura 3.11: Estruturas de concreto severamente deterioradas, localizadas na linha da maré.....	51
Figura 3.12: Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto.....	53
Figura 3.13: Mapeamento de fissuras em blocos de fundação devido a reação álcali-agregado.....	53
Figura 3.14: Borda formada a partir da reação, circundando o agregado.....	54
Figura 3.15: Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado.....	54
Figura 3.16: Célula de corrosão em concreto armado	58
Figura 3.17: Fissuras em viga, causadas pela expansão dos óxidos gerados na corrosão.....	59
Figura 3.18: Ataque de cloretos em estruturas de concreto, afetando o aço.	60

Figura 3.19: Pilar deteriorado devido aos efeitos da interação da carbonatação com íons de cloreto.....	61
Figura 3.20: Corrosão das armaduras do pilar, em local de menor cobrimento, devido à carbonatação.	63
Figura 3.21: Processo de carbonatação.	64
Figura 3.22: Processo de carbonatação.	65
Figura 3.23: Crescimento de raízes de plantas em fendas do concreto.....	69
Figura 3.24: Cracas na linha d'água protegendo as estruturas marinhas, inibindo assim o processo de corrosão das armaduras.	70
Figura 4.1: Deterioração causada por abrasão em galeria.	73
Figura 4.2: Armaduras expostas (lado esquerdo inferior) por causa da erosão.	74
Figura 4.3: Tipos de irregularidades e prováveis zonas deterioradas pela cavitação...	75
Figura 4.4: Erosão nas paredes e cavitação na região do degrau, em galeria de água pluvial.....	76
Figura 4.5: Efeito da cavitação em estrutura hidráulica de concreto.....	77
Figura 4.6: Galeria construída com degraus, a fim de reduzir a velocidade do fluxo da água.	78
Figura 4.7: Cratera com profundidade superior a um metro, logo após degrau.....	79
Figura 4.8: Representação diagramática da expansão de argamassa ou concreto pela formação de etringita tardia.....	84
Figura 4.9: Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia.....	85
Figura 4.10 a): Efeitos do tipo e consumo de cimento sobre o ataque por sulfato ao concreto.	86
Figura 4.10 b): Efeitos da adição de cinzas volantes sobre o ataque por sulfato ao concreto.	86
Figura 4.11: Galeria de águas pluviais contaminada por esgotos, apresentando teto manchado devido ao ataque biológico.	87

Figura 4.12: Redução de sulfato em condutos de esgoto com oxigênio suficiente para prevenir o transporte de sulfeto para o líquido.....	91
Figura 4.13: Redução de sulfato e transporte do sulfeto produzido, para a corrente líquida.	91
Figura 4.14: Representação do processo de corrosão em tubo de esgoto, causado por sulfeto de hidrogênio	92
Figura 4.15: Degradação do concreto por ácido sulfúrico.....	93
Figura 4.16: Severa degradação do concreto corroeu a base da parede da galeria.	94
Figura 4.17: Degradação da laje da galeria, provocando exposição da armadura.....	95
Figura 4.18: Representação esquemática de desenvolvimento típico de corrosão em tubos de concreto armado.....	96
Figura 4.19: Infiltrações pelas paredes de uma galeria.	98
Figura 4.20: Trinca em laje superior de uma galeria.....	99
Figura 4.21: Ninhos de pedra em parede de galeria.....	100
Figura 4.22: Recalque da laje de fundo de uma galeria.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características físico-químicas dos esgotos sanitários	17
Tabela 3.2: Parâmetros encontrados na análise da água de chuva de diversas localidades do Brasil	18
Tabela 3.3: Classe de agressividade ambiental	23
Tabela 3.4: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	23
Tabela 3.5: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal para $\Delta c = 10$ mm	24
Tabela 3.6: Requisitos de concretagem em temperaturas adversas	36
Tabela 3.7: Métodos complementares de proteção das armaduras	67
Tabela 4.1: Efeitos produzidos pela exposição humana ao ar contaminado com várias concentrações de sulfeto de hidrogênio	89

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado mundialmente e para tanto é necessário que haja grande preocupação do ponto de vista da sua vida útil, devido à grande possibilidade de surgimento de diversas patologias, comuns a esse material.

É de grande importância que se conheça os conceitos de durabilidade e os mecanismos de deterioração do concreto, a fim de conferir melhor desempenho às estruturas, tornando constante as atividades de manutenção, e mínimos os gastos com elas, uma vez que os custos associados a falhas prematuras e repentinas podem ser muito altos.

Para o caso das tubulações de concreto em sistemas de esgoto sanitário, isso não é diferente. Além das patologias comuns, tão características do concreto, soma-se o fato de que o sistema de coleta e transporte de esgoto sanitário apresenta elevado potencial de formação de produtos passíveis de gerar odores ofensivos e corrosão dos condutos de concreto, agravando assim o aparecimento das anomalias. Estes produtos quando em concentrações elevadas são, também, tóxicos ao homem e representam perigo de vida aos operadores desses sistemas de esgoto.

Além do sistema de esgotamento sanitário podemos também, incluir nessa situação, o transporte de águas pluviais no sistema de macrodrenagem urbana. As estruturas de concreto desse sistema sofrem desgaste gradual pelo escoamento das águas, que normalmente possuem sedimentos sólidos, esgotos transportados clandestinamente e contaminações químicas oriundas de efluentes industriais.

Em vista ao exposto, este trabalho tem a finalidade de discutir os processos de deterioração do concreto em sistemas de esgoto sanitário e de macrodrenagem urbana, bem como as patologias comuns a esse meio.

Espera-se que este trabalho contribua para que se desenvolva a consciência da importância dos processos de manutenção preventiva nas estruturas de concreto discutidas, a fim de torná-las mais duráveis e minimizar os custos com reconstruções.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho está em discutir o efeito que os esgotos e águas pluviais causam às estruturas de concreto responsáveis pelo seu transporte, bem como a principais patologias encontradas no ambiente descrito, considerando também a importância dos conceitos de durabilidade e deterioração do concreto.

No decorrer do trabalho, são também propostas algumas soluções para que o desgaste do concreto seja evitado em determinadas situações.

A Revisão Bibliográfica contemplará os principais mecanismos de deterioração do material concreto, enquanto o Capítulo 4 tratará apenas dos mecanismos mais comuns sob o aspecto dos ataques físicos e químicos, atuantes nas tubulações de transporte de esgoto e águas pluviais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do Esgoto Sanitário

Conforme Jordão & Pessôa (2005), os esgotos costumam ser classificados em dois grupos principais: os esgotos sanitários e os industriais. Os primeiros são constituídos essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais, águas de infiltração, e eventualmente uma parcela não significativa de despejos industriais, tendo características bem definidas.

Os esgotos domésticos compõem-se essencialmente da água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes, águas de lavagem. Os esgotos industriais, provêm de qualquer utilização da água para fins industriais, e adquirem características próprias em função do processo industrial empregado (JORDÃO & PESSÔA, 2005).

As principais características físicas dos esgotos sanitários são (FUNASA, 2006):

- **Temperatura:** Em geral, é pouco superior à das águas de abastecimento. A velocidade de decomposição do esgoto é proporcional ao aumento da temperatura;
- **Odores:** São causados pelos gases formados no processo de decomposição, assim o odor de mofo, típico de esgoto fresco é razoavelmente suportável e o odor de ovo podre, insuportável, é típico do esgoto velho ou séptico, em virtude da presença de gás sulfídrico;
- **Cor e Turbidez:** Indicam de imediato o estado de decomposição do esgoto. A tonalidade acinzentada acompanhada de alguma turbidez é típica do esgoto fresco e a cor preta é típica do esgoto velho;
- **Variação de vazão:** Depende dos costumes dos habitantes. A vazão doméstica do esgoto é calculada em função do consumo médio diário de água de um indivíduo.

Estima-se que para cada 100 litros de água consumida, são lançados aproximadamente 80 litros de esgoto na rede coletora, ou seja, 80%;

- **Matéria Sólida:** Jordão & Pessôa (2005), consideram que essa seja a característica de maior importância, em termos de dimensionamento e controle de operações das unidades de tratamento, ainda que represente apenas cerca de 0,08% dos esgotos. Ela é classificada da seguinte maneira:

a) Em função das dimensões das partículas:

- Sólidos em suspensão;
- Sólidos coloidais;
- Sólidos dissolvidos.

b) Em função da sedimentabilidade:

- Sólidos sedimentáveis;
- Sólidos flutuantes ou flotáveis;
- Sólidos não sedimentáveis.

c) Em função da secagem, a alta temperatura (550° a 600° C):

- Sólidos fixos;
- Sólidos voláteis.

d) Em função da secagem em temperatura média (103° a 105° C)

- Sólidos totais;
- Sólidos em suspensão totais;
- Sólidos dissolvidos totais.

As principais características químicas dos esgotos, de acordo com Jordão & Pessôa (2005) são:

- **Matéria orgânica:** Cerca de 70% dos sólidos no esgoto são de origem orgânica, e geralmente esses compostos orgânicos são uma combinação de carbono, hidrogênio e oxigênio, e algumas vezes com nitrogênio. Os grupos de substâncias orgânicas nos esgotos são constituídos principalmente por:

a) **Compostos de proteínas (40 a 60%):** As proteínas são produtoras de nitrogênio e contêm carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, algumas vezes fósforo, enxofre e ferro. Elas são o principal constituinte de organismo animal, mas ocorrem também em plantas. O gás sulfídrico presente nos esgotos é proveniente do enxofre fornecido pelas proteínas.

b) **Carboidratos (25 a 50%):** Contém carbono, hidrogênio, e oxigênio. São as principais substâncias a serem destruídas pelas bactérias, com produção de ácidos orgânicos (por esta razão os esgotos velhos apresentam maior acidez). Entre os principais exemplos de carboidratos pode-se citar os açúcares, o amido, a celulose e a fibra da madeira.

c) **Gorduras e óleos (10%):** A gordura está sempre presente no esgoto doméstico, sendo proveniente do uso de manteiga e óleos vegetais em cozinhas, da carne, etc. Pode estar presente também sob forma de óleos minerais derivados do petróleo (querosene, óleo lubrificante), e neste caso sua presença é altamente indesejável, pois geralmente são contribuições não permitidas (de garagens, postos de gasolina, indústrias) que chegam às canalizações em grande volume ou grande concentração, aderem às paredes das canalizações e provocam seu entupimento. As gorduras em geral, e particularmente os óleos minerais, não são desejáveis nas unidades de transporte e de tratamento dos esgotos: aderem às paredes, produzindo odores desagradáveis, além de diminuir as seções úteis; formam espuma, uma camada de matéria flutuante, nos decantadores, que poderá vir a entupir os filtros; interferem e inibem a vida biológica; trazem problemas de manutenção. Em vista disso, costuma-se limitar o teor de gordura nos efluentes.

d) **Uréia, surfatantes, fenóis, pesticidas (típicos de despejos industriais, em quantidade), etc.:** Os surfatantes são constituídos por moléculas orgânicas com a propriedade de formar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento em que

o esgoto é lançado. Tendem a se agregar à interface ar-água, e nas unidades de aeração aderem à superfície das bolhas de ar, formando uma espuma muito estável e difícil de ser quebrada. Os fenóis são compostos orgânicos, originados em despejos industriais, principalmente, e que têm a propriedade de causar, ainda que em baixa concentração, gosto característico à água (em especial à água clorada). Os pesticidas e demais compostos químicos são utilizados, principalmente, na agricultura, e, como tal, não costumam chegar às galerias urbanas de esgoto, mas aos rios e corpos receptores, sendo, no entanto, uma fonte de poluição e de toxicidade à vida aquática.

- **Matéria inorgânica:** É formada principalmente pela presença de areia e de substâncias minerais dissolvidas. A areia é proveniente de águas de lavagem das ruas e de águas do subsolo, que chegam às galerias de modo indevido ou que se infiltram através das juntas das canalizações.

As características quantitativas físico-químicas típicas de esgotos sanitários predominantemente domésticos, usualmente utilizadas em estudos e projetos, encontram-se apresentadas de forma sintetizada na Tabela 3.1, segundo Von Sperling (2005).

Tabela 3.1: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.

Parâmetro	Concentração		
	Unidade	Faixa	Típico
<i>Sólidos totais</i>	mg/L	700 - 1350	1100
• <i>Em suspensão</i>	mg/L	200 - 450	350
• <i>Dissolvidos</i>	mg/L	500 - 900	700
• <i>Sedimentáveis</i>	mL/L	10 - 20	15
<i>Matéria orgânica</i>			
• <i>DBO₅</i>	mg/L	250 - 400	300
• <i>DQO</i>	mg/L	450 - 800	600
• <i>DBO última</i>	mg/L	350 - 600	450
<i>Nitrogênio total</i>	mgN/L	35 - 60	45
• <i>Nitrogênio orgânico</i>	mgN/L	15 - 25	20
• <i>Amônia</i>	mgNH ₃ - N/L	20 - 35	25
• <i>Nitrito</i>	mgNO ₂ ⁻ - N/L	? 0	? 0
• <i>Nitrato</i>	mgNO ₃ ⁻ - N/L	0 - 1	? 0
<i>Fósforo</i>	mgP/L	4 - 15	7
• <i>Fósforo orgânico</i>	mgP/L	1 - 6	2
• <i>Fósforo inorgânico</i>	mgP/L	3 - 9	5
<i>pH</i>	-	6,7 - 8,0	7,0
<i>Alcalinidade</i>	mgCaCO ₃ /L	100 - 250	200
<i>Metais pesados</i>	mg/L	traços	traços
<i>Compostos orgânicos tóxicos</i>	mg/L	traços	traços
<i>Cloreto *</i>	mg/L		50
<i>Sulfato *</i>	mg/L		30
<i>Óleo e Graxa *</i>	mg/L		90

Fonte: (VON SPERLING, 2005); *(METCALF & EDDY, 2003)

3.2 Caracterização das Águas Pluviais

Segundo Jaques (2005), as águas de chuva são encaradas pela legislação brasileira hoje como esgoto, pois ela usualmente vai dos telhados, e dos pisos para as bocas de lobo, carreando todo tipo de impurezas, dissolvidas, suspensas, ou simplesmente arrastadas mecanicamente, para um córrego que vai acabar dando num rio que por sua vez vai acabar suprimindo uma captação para tratamento de água potável. Essa água sofreu um processo natural de diluição e autodepuração, ao longo de seu percurso hídrico, mas nem sempre suficiente para realmente depurá-la.

A literatura mostra diferentes resultados de avaliação da qualidade da água de chuva. Enquanto alguns autores concluíram que a água da chuva que cai na superfície dos telhados é poluída, outros encontraram um baixo potencial de poluição associado à mesma, confirmando assim que as características da água de chuva variam de acordo com a região.

No Brasil, essas características foram estudadas em diversos estados. Conforme Jaques (2005), as principais espécies químicas encontradas na chuva, em suas formas iônicas, são: sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), sendo que os seis primeiros têm como principal origem à água do mar.

A Tabela 3.2 apresenta os locais de estudo nos diversos estados do Brasil, os parâmetros analisados e as citações bibliográficas de cada estudo.

Tabela 3.2: Parâmetros encontrados na análise da água de chuva de diversas localidades do Brasil.

Local/Parâmetros	pH	Cl^- mg/L	SO_4^{2-} mg/L	NO_3^- mg/L	NH_4^+ mg/L	K^+ mg/L	Ca^{2+} mg/L	Na^+ mg/L	Mg^{2+} mg/L	H^+ mg/L	Referências
Pedras Altas - RS	4,98	1,35	0,99	0,89	0,45	0,51	0,723	0,722	0,13	0,01	Migliavacca <i>et al.</i> (2004)
Parque Nacional Itatiaia - RJ	4,94	0,184	0,74	0,732	0,423	0,051	0,086	0,09	0,027	0,012	Mello e Almeida (2004)
Rio Corumbataí - SP	5,5	2,2	2,2	4,5		0,26	8,85	0,97	0,79		Conceição e Bonotto (2004)
Região Metropolitana - SP	6,2	1,03	1,63	1,36	0,5	0,23	0,92	0,28			Rocha <i>et al.</i> (2003)
Região Metropolitana - SP	4,77	0,03	0,83	0,97	0,5	0,14	0,22	0,08	0,04	0,02	Fornaro e Gutz (2003)
Região Metropolitana - RJ	4,77	2,36	1,98	0,98	0,34	0,434	0,6	0,144	0,24	0,02	Mello (2001)
Figueira - PR	4,7		3,31		0,54		0,7				Flues <i>et al.</i> (2002)
Piracicaba - SP	4,5	0,25	0,9	1,03	0,31	0,113	0,11	0,62	0,28	0,33	Lara <i>et al.</i> (2001)
Manaus - AM	4,7	0,16	0,96	0,26	0,054	0,031	0,048	0,055	0,011	0,017	Williams <i>et al.</i> (1997)
Região Metropolitana - RS	5,5	4,2		0,45		0,66	0,95		0,81		De Luca <i>et al.</i> (1991)
Cubatão - SP	3,6	7,71	7,67		1,25	0,58	4,32	3,62	1		Abbas (1989)
João Pessoa - PB	5,24	17,2	ND	0							Costa <i>et al.</i> (2007)

Fonte: (COSTA *et al.* 2007)

3.3 Concreto

3.3.1 Durabilidade do concreto

É possível observar que concretos executados há mais tempo, em geral, têm durabilidade superior aos executados recentemente. Durante os anos 60, para se produzir um concreto com resistência à compressão de 30 MPa era necessário um consumo de cimento muito alto, entre 400 a 500 kg/m³. Com o crescimento da atividade da construção a partir da década de 70 e o surgimento da indústria do concreto pré-misturado, verificou-se uma otimização nos traços dos concretos, procurando-se atingir concretos mais resistentes com um teor de cimento cada vez menor (FERREIRA, 2000).

A execução das obras não acompanhou o avanço tecnológico. Para facilitar o lançamento do concreto em peças cada vez mais estreitas e mais armadas, utilizou-se concretos mais fluidos e compostos com materiais mais finos, resultando em um produto final de qualidade inferior (VASCONCELOS, 2005 *apud* LAPA, 2008).

Segundo Ferreira (2000), até o final da década de 80, a resistência à compressão ainda era, praticamente, o único parâmetro adotado para avaliar a qualidade do concreto. Em função disto, está ocorrendo uma degradação mais acelerada nas estruturas de concreto armado, obrigando a comunidade que trabalha com este material a definir novos parâmetros, de forma a garantir a sua performance.

Para isto deve-se atuar em todas as fases: projeto (arquitetônico e estrutural), execução da obra, inspeção e manutenção. Além dos cuidados com a composição do traço do concreto, é necessário adotar procedimentos adequados para o lançamento, adensamento e cura do concreto. Mas o cuidado com a manutenção das obras acabadas é também muito importante. Surge então um conceito até então pouco conhecido e praticamente não utilizado: a durabilidade do concreto. Este novo parâmetro é a capacidade do concreto de resistir às intempéries e aos demais processos de degradação (LAPA, 2008).

De acordo com Souza & Ripper (1998), é inevitável a associação dos conceitos de vida útil e durabilidade. Deve-se entender que a concepção de uma construção durável implica a adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção.

Segundo Andrade (2005) *apud* Ribeiro (2010), concreto durável é aquele que, quando submetido ao trabalho, durante vida útil, possui capacidade de resistir às intempéries, aos agentes agressores, aos processos de deterioração, mantendo sua qualidade, forma, utilidade, segurança e estabilidade. Cuidados e procedimentos específicos relativos à durabilidade devem ser tomados em todas as etapas de vida da estrutura, desde a etapa de levantamento de dados para elaboração do projeto, visando assegurar o bom desempenho da estrutura e prevenir as patologias. A durabilidade de uma estrutura está relacionada, principalmente, com:

- Critérios de desempenho e de vida útil estabelecidos;
- Projetos arquitetônico, estrutural e associados (detalhes construtivos, cobertura da armadura, deformabilidade da estrutura, resistência à compressão, a impermeabilidade, etc.);
- A execução da obra (qualidade dos materiais, processos de execução, etc.);
- O meio ambiente circundante (micro-clima, entorno, grau de agressividade ambiental, etc.);
- O uso, os procedimentos de manutenção e o tempo.

Souza & Ripper (1998) define vida útil e desempenho como:

“Por vida útil de um material entende-se o período durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados (...) Já por desempenho entende-se o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil (...)”

Ainda segundo Souza & Ripper (1998), no entanto, as estruturas e seus materiais deterioram-se mesmo quando existe um programa de manutenção bem definido, sendo esta deterioração, no limite, irreversível. O ponto em que cada estrutura, em função da deterioração, atinge níveis de desempenho insatisfatórios varia de acordo com o tipo de estrutura. Algumas delas, por falhas de projeto ou de execução, já iniciam as suas vidas de forma insatisfatória, enquanto outras chegam ao final de suas vidas úteis projetadas ainda mostrando um bom desempenho.

Por outro lado, o fato de uma estrutura em determinado momento apresentar-se com desempenho insatisfatório não significa que ela esteja necessariamente condenada. A avaliação desta situação é, talvez, o objetivo maior da Patologia das Estruturas, posto que esta é a ocasião que requer imediata intervenção técnica, de forma que ainda seja possível reabilitar a estrutura (SOUZA & RIPPER, 1998).

3.3.1.1 Fatores que afetam a durabilidade do concreto

Segundo Helene (2001), a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores, identificados como a regra dos 4C:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento ou espessura do concreto de cobertura das armaduras.

Um adensamento mal executado pode resultar em alto índice de vazios, produzindo, assim, um concreto altamente poroso. Uma cura insuficiente, por sua vez, produz baixo grau de hidratação do cimento, especialmente nas regiões superficiais, resultando em alta permeabilidade do concreto de superfície e baixa durabilidade das peças (ROQUE & MORENO JUNIOR, 2005).

A elevação da resistência dos cimentos, que se verificou nos últimos anos, permite que se doseem concretos (para as resistências usuais de projeto) com consumos mais baixos. Do ponto de vista de resistência mecânica e de custos, não haveria impacto negativo. Quanto ao aspecto de durabilidade da estrutura, entretanto, seria preocupante o uso de concreto com consumos de cimento muito baixos, pois estes concretos apresentariam maior porosidade e, conseqüentemente, menor resistência a ataques químicos. Além disso, baixos consumos de cimento dão menor coesão e consistência mais seca, dentro de limites de relação água/cimento usuais. Tais características dificultam as operações de lançamento, adensamento e acabamento, aumentando o risco de segregação e as falhas de aplicação do concreto (REZENDE, 1996 *apud* ROQUE & MORENO JUNIOR, 2005).

Tradicionalmente, a durabilidade de uma estrutura de concreto tem sido considerada através de regras implícitas, de modo determinístico, por intermédio de fatores como cobrimento mínimo, relação água/aglomerante máxima, limitação de abertura de fissuras, tipo de cimento, tipo de aditivo, etc. Estes valores são tomados a partir de pesquisas de laboratório ou de campo e lições oriundas da experiência prática. Os resultados que se tem obtido com este procedimento leva, em geral, a um grau satisfatório de durabilidade, mas com variações significativas (positivas ou negativas) devido à grande influência das condições reais do meio ambiente envolvente e do concreto real colocado nas peças estruturais (ISAIA, 2001).

Desta forma, a NBR 6118:2003 propõe a classificação da agressividade ambiental nos projetos das estruturas correntes, através da Tabela 3.3, a fim de promover sua correspondência com os fatores influenciadores da durabilidade do concreto, tais como relação água/cimento, classe do concreto (i. e. resistência do concreto) (Tabela 3.4) e cobrimento nominal (Tabela 3.5).

Tabela 3.3: Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	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, armazém de fertilizantes, indústrias químicas.			

Fonte: (NBR 6118:2003)

Tabela 3.4: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe do concreto	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
¹⁾ O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.					
²⁾ CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
³⁾ CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: (NBR 6118:2003)

Tabela 3.5: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: (NBR 6118:2003)

Do ponto de vista da exposição do material ao meio ambiente, Helene (2001) indica certos tipos de cimento Portland, adições e aditivos mais adequados a resistir à agressividade ambiental, em função da natureza dessa agressividade. Do ponto de vista da maior resistência à lixiviação são preferíveis os cimentos com adições tipo CP II e CP IV; para minimizar o risco de reações álcali-agregado são preferíveis os cimentos pozolânicos tipo CP IV; para reduzir a profundidade de carbonatação são preferíveis os cimentos tipo CP I e CP V e para reduzir a penetração de cloretos são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III e CP IV, assim como adição extra de microsilica e cinza de casca de arroz.

John (2001), afirma que a durabilidade em ambientes marítimos, por exemplo, pode ser aumentada substituindo-se parte do clínquer do cimento Portland por resíduos de escória granulada de alto forno ou cinza volante. Dessa forma, indica que a durabilidade não é uma qualidade intrínseca de apenas um material, mas determinadas combinações de materiais diversos que podem proporcionar maior proteção ao componente contra fatores de degradação.

Segundo Isaia (2001), deve-se considerar que a durabilidade de dado concreto testado em condições específicas pode não corresponder à durabilidade deste mesmo concreto na estrutura, "in situ", sujeito às condições ambientais específicas.

Segundo Souza & Ripper (1998), a essência do conceito de durabilidade estará, pois, na execução de uma obra que apresente desempenho satisfatório, por um período

suficientemente longo e com custos de manutenção razoáveis. No entanto, e na eventualidade de que algum infortúnio possa ter ocorrido, e de que o desempenho da estrutura venha a se tornar insatisfatório, os responsáveis deverão estar habilitados a tomar a melhor decisão sobre como então proceder, adotando a opção mais conveniente, que respeite pontos de vista técnicos, econômicos e socioambientais.

3.3.2 Deterioração do concreto

Conforme Roque (2003), os requisitos e critérios de desempenho visam limitar o nível de degradação dos materiais, quando submetidos a ensaios que aceleram a ação dos agentes agressivos atuantes sobre o componente ou estrutura. Buscam impedir a utilização conjunta de materiais incompatíveis físico-quimicamente e de detalhes construtivos que possam contribuir para a diminuição da vida útil da estrutura e de seus elementos.

O conhecimento das origens da deterioração é indispensável, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para se garantir que, após reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (SOUZA & RIPPER, 1998).

Segundo VILASBOAS (2004), as causas físicas da deterioração do concreto podem ser agrupadas em duas categorias:

- Desgaste superficial, ou perda de massa devida à abrasão, à erosão e à cavitação;
- Fissuração, devido à gradientes normais de temperatura e umidade, à pressões de cristalização de sais nos poros, à carregamento estrutural e à exposição a extremos de temperaturas, tais como congelamento ou fogo.

As causas químicas da deterioração do concreto podem ser agrupadas em três categorias:

- Hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura;

- Trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento;
- Reações causadoras de produtos expansíveis, tais como expansão por sulfatos, reação álcali- agregado e corrosão da armadura no concreto.

Geralmente, os desgastes físicos e químicos acabam complementando-se. Ocorridos os desgastes físicos, há um aumento da exposição da superfície de concreto aos agentes agressivos, e, conseqüentemente, aos ataques pelos compostos químicos presentes nestes. Ocorridos os desgastes químicos, o concreto torna-se mais poroso, facilitando o processo de erosão, e assim sucessivamente. Estes fatos fazem com que ambos os processos de deterioração, físicos ou químicos, resultem em um ciclo de difícil dissociação ou estabilização. (AGUIAR & BAPTISTA, 2009)

Temos ainda causas biológicas de deterioração do concreto, segundo Lapa (2008), causas de deterioração do concreto baseado em falhas humanas, e causas de deterioração devido à estrutura porosa do concreto, segundo Souza & Ripper (1998).

As causas mais relevantes às estruturas de concreto utilizadas em sistemas de macrodrenagem e transporte de esgoto, serão abordadas no Capítulo 4 – Efeitos do transporte de esgoto sanitário e águas pluviais em estruturas de concreto. Aqui neste capítulo, veremos apenas as causas, observadas de forma mais recorrente nas demais estruturas de concreto.

3.3.2.1 Causas de deterioração relativa à falhas humanas

A) Durante a construção da estrutura

Os defeitos construtivos são falhas bastante freqüentes, tendo origem, na grande maioria dos casos, na deficiência de qualificação profissional da equipe técnica, o que pode levar a estrutura a manifestar problemas patológicos significativos.

A.1) Deficiência de concretagem

Ao método de concretagem estão relacionadas, entre outras, as falhas no transporte, no lançamento e no adensamento do concreto, que podem provocar, por exemplo, a segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, além da formação de ninhos de concretagem e de cavidades no concreto.

A Figura 3.1 mostra que quando ocorre um lançamento inadequado, por excesso de altura, as partículas mais pesadas se deslocam para o fundo da fôrma, enquanto as partículas finas da argamassa sobem. A linha escura é uma evidência da maior concentração de cimento na argamassa, caracterizando a segregação do concreto.



Figura 3.1: Excesso de altura do lançamento de concreto provocou a segregação do mesmo.
Fonte: (AGUIAR, 2006)

A.2) Inadequação de fôrmas e escoramentos

Os exemplos de falhas construtivas mais comuns relacionadas diretamente às fôrmas e aos escoramentos convencionais são:

- Falta de limpeza e de aplicação de desmoldantes nas fôrmas antes da concretagem, o que acaba por ocasionar distorções e “embarrigamento” nos elementos estruturais, o que por sua vez, leva à necessidade de enchimento de argamassa maiores dos que os usuais e, conseqüentemente, à sobrecarga da estrutura;
- Insuficiência de estanqueidade das fôrmas, o que torna o concreto mais poroso, por causa da fuga de nata de cimento através das juntas e fendas próprias da madeira, com a conseqüente exposição desordenada dos agregados. A Figura 3.2 retrata esta situação;



Figura 3.2: Falta de estanqueidade nas fôrmas causando fuga da argamassa. Fonte: (AGUIAR, 2006)

- Retirada prematura das fôrmas e escoramentos, o que resulta em deformações indesejáveis na estrutura e, em muitos casos, em acentuada fissuração;

- Remoção incorreta dos escoramentos (especialmente em balanços, casos em que as escoras devem ser sempre retiradas da ponta do balanço para o engaste), o que provoca o surgimento de trincas nas peças.

A.3) Deficiências nas armaduras

As deficiências que podem ser apontadas como as mais freqüentes são:

- Má interpretação dos elementos de projeto, o que, em geral, implica na inversão do posicionamento de algumas armaduras ou na troca das armaduras de uma peça com as de outra;
- Insuficiência de armaduras, como conseqüência de irresponsabilidade, dolo ou incompetência, com implicação direta na diminuição da capacidade resistente da peça estrutural;
- Congestionamento das barras de aço devido ao precário detalhamento das armaduras, o que pode dificultar o lançamento e adensamento do concreto (Figura 3.3)



Figura 3.3: Congestionamento da armadura provocando deterioração precoce da estrutura.
Fonte: (AGUIAR, 2006).

- Mau posicionamento das armaduras, que se pode traduzir na não observância do correto espaçamento das barras (em lajes isto é muito comum, como se vê na Figura 3.4 a), ou no deslocamento das barras de suas posições originais, muitas vezes motivado pelo trânsito de operários e carrinhos de mão, por cima da malha de aço, durante as operações de concretagem - o que é particularmente comum nas armaduras negativas das lajes (ver Figura 3.4 b) e poderá ser crítico nos casos de balanço. O recurso a dispositivos adequados (espaçadores, pastilhas, caranguejos) é fundamental para garantir o correto posicionamento das barras da armadura;

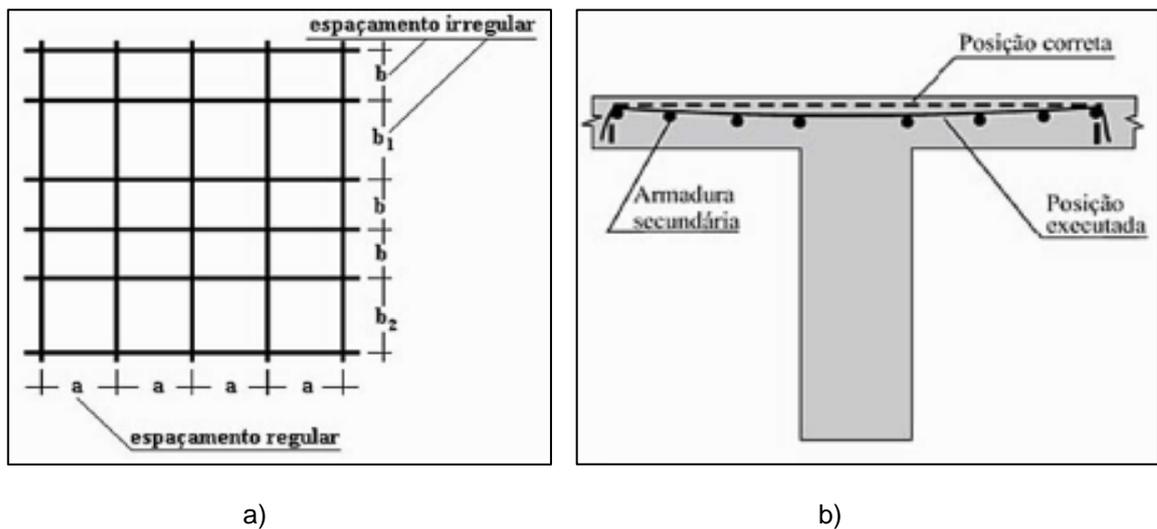


Figura 3.4: a) Espaçamento irregular em armadura de laje; b) Armadura negativa da laje fora de posição. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 1998).

- Cobrimento de concreto insuficiente, ou de má qualidade, o que facilita a implantação de processos de deterioração tal como a corrosão das armaduras, ao propiciar acesso mais direto dos agentes agressivos externos. Também neste caso torna-se indispensável o recurso aos espaçadores.
- Dobramento das barras sem atendimento aos dispositivos regulamentares, fazendo com que o aço venha a "morder" o concreto, provocando seu fendilhamento por excesso de tensões trativas no plano ortogonal ao de dobramento;

- Deficiências nos sistemas de ancoragem, com utilização indevida de ganchos (na compressão, por exemplo), que, muitas vezes, só vêm a introduzir estados de sobretensão (como já se referiu, para o caso do dobramento). Outra situação falha é a registrada com a não observância do correto comprimento de ancoragem, necessário para redução, ao mínimo, dos esforços transferidos ao concreto. Em ambos os casos, o resultado será o surgimento de um quadro fissuratório que, algumas vezes, poderá trazer conseqüências bastante graves (Figuras 3.5 a e b);

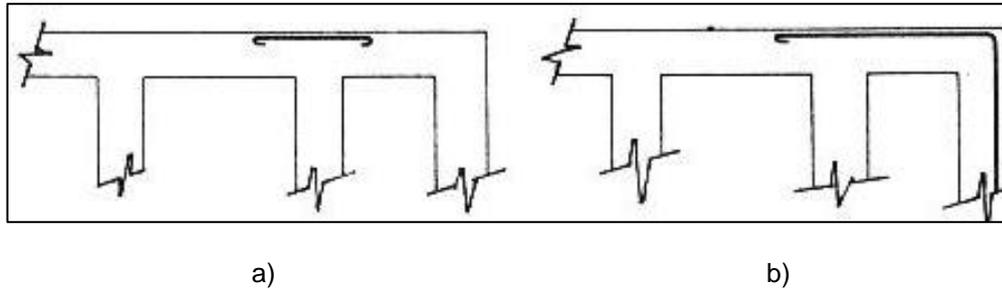


Figura 3.5: a) Armadura curta em disposição incorreta; b) Armadura prolongada em disposição correta. Fonte: (<<http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/causas.htm>> Acessado em 14/01/2012, às 11:45:24).

- Deficiências nos sistemas de emenda, que, para além daquelas já referidas para as ancoragens, podem surgir também como resultado da excessiva concentração de barras emendadas em uma mesma seção, e por utilização incorreta de métodos de emenda, especialmente quando do uso de soldas;
- Má utilização de anticorrosivos nas barras da armadura, que são pinturas efetuadas nas barras para diminuir a possibilidade do ataque da corrosão, mas reduzem a aderência das barras ao concreto.

A.4) Utilização incorreta de materiais de construção

Alguns casos mais comuns de utilização incorreta de materiais de construção:

- Utilização de concreto com f_{ck} inferior ao especificado, quer no caso de encomenda errada ou de erro no fornecimento de concreto pronto, quer por erro em concreto virado na própria obra;
- Utilização de aço com características diferentes das especificadas, quer em termos de categorias, quer de bitolas;
- Assentamento das fundações em camadas de solo com capacidade resistente - ou características, de uma maneira geral - inferior à requerida;
- Utilização de agregados reativos, instaurando, desde o início, a possibilidade de geração de reações expansivas no concreto, e potencializando os quadros de desagregação e fissuração do mesmo;
- Utilização inadequada de aditivos, alterando as características do concreto, em particular as relacionadas com resistência e durabilidade;
- Dosagem inadequada do concreto, seja por erro no cálculo da mesma, seja pela utilização incorreta de agregados, do tipo de cimento ou de água.

B) Na fase de utilização

Neste tópico está incluída a ausência da manutenção programada, ou seja, o conjunto de medidas que vise manter materiais e peças estruturais atendendo às condições para as quais foram projetadas e construídas.

3.3.2.2 Causas de deterioração relativa à estrutura porosa do concreto

A interação entre os agentes agressivos e a estrutura porosa do concreto é variável, em função do meio de transporte, como se identifica a seguir:

- Pelo ar, o mecanismo de transporte de gases, de água e de agentes agressivos diluídos (carbonetos, cloretos e sulfato) é por difusão. Entenda-se que a maior ou

menor intensidade no transporte de gases ou de água dependerá da umidade relativa do ar: quanto maior esta for, menos permeável aos gases será o concreto;

- Pela água da chuva ou das marés, em transporte por capilaridade (os canais porosos de diâmetros mais reduzidos chegam a ficar completamente saturados pela água aderida à parede da superfície lateral dos mesmos, pelo fenômeno da adsorção);
- Em condições de imersão, e, portanto sob pressão, dá-se o transporte por penetração direta.

Desta forma, percebe-se que a deterioração do concreto pela atuação dos agentes agressivos será tão menor quanto menores forem seus índices de permeabilidade e porosidade. Para tanto, duas condições principais devem ser satisfeitas:

- Reduzido fator água/cimento (Figura 3.6);

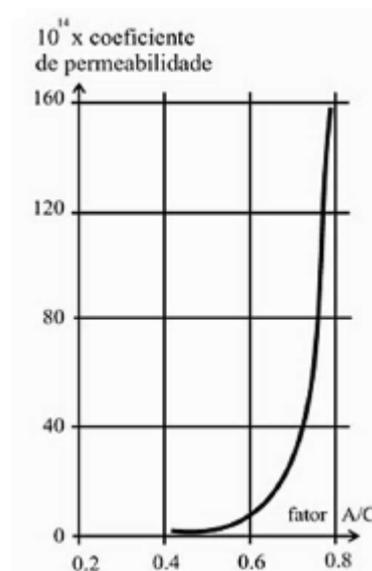


Figura 3.6: Influência do fator água/cimento no coeficiente de permeabilidade dos concretos.

Fonte: (SOUZA & RIPPER, 1998)

- Maior tempo possível de impedimento de evaporação da água de hidratação da pasta (cura).

3.3.2.3 Causas físicas de deterioração das estruturas de concreto

As causas físicas ao processo de deterioração da estrutura são as resultantes da ação da variação da temperatura externa, da insolação, do vento e da água, esta última sob a forma de chuva, gelo e umidade, podendo-se ainda incluir as eventuais solicitações mecânicas ou acidentes ocorridos durante a fase de execução de uma estrutura. A ação desses agentes é perceptível durante os períodos de endurecimento do concreto, afetando sua cura.

Pode-se incluir neste item:

- As variações de temperatura, não só as ambientais, ou seja, as que solicitam igualmente as várias peças de uma estrutura, mas também, e principalmente, as que geram gradientes térmicos, ao solicitarem peças que são protegidas apenas em uma das faces, como reservatórios e lajes de cobertura, por exemplo. Em qualquer caso, se a correspondente armadura resistente não tiver sido convenientemente dimensionada e detalhada, é certa a instalação de um quadro fissuratório;
- Os movimentos que ocorrem na interface entre materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, mas submetidos à mesma variação de temperatura, com a conseqüente geração de diferentes deformações, como é caso do assentamento de paredes de alvenaria em peças de concreto;
- A ação da água, nas suas diversas formas, desde a umidade, à chuva e ao gelo.

A) Deterioração por desgaste superficial

Os desgastes superficiais das galerias de águas pluviais são definidos como a perda, normalmente lenta, de seção do material a partir das superfícies expostas aos fenômenos de deterioração, podendo afetar a espessura total do elemento estrutural.

Segundo Vilasboas (2004), a perda progressiva de massa de uma superfície do concreto pode ocorrer devida à abrasão, erosão e cavitação. A abrasão ocorre quando há o atrito seco, como no caso do desgaste de pavimentos e pisos industriais pelo tráfego de veículo. A erosão é caracterizada quando ocorre o desgaste por ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão, como se observa em revestimentos de canais, vertedouros e tubulações para o transporte de água ou esgoto. Outra possibilidade de dano em estruturas hidráulicas é por cavitação, que se relaciona à perda de massa pela formação de bolhas de vapor e sua subsequente ruptura devido a mudanças repentinas de direção em águas que fluem com alta velocidade, particularmente em regiões onde existem degraus.

De acordo com Aguiar & Baptista (2011), o desgaste superficial é um processo muito comum em galerias de águas pluviais, principalmente através do desgaste por abrasão e por cavitação.

No Capítulo 4, encontra-se a descrição dos tipos de deterioração dada por desgaste da superfície do concreto.

B) Deterioração por Fissuração

A deterioração física por fissuração pode ocorrer por mudanças de volume (gradientes de temperatura e umidade, e pressões de cristalização de sais nos poros), carregamento estrutural (sobrecarga e impacto, e carga cíclica) e exposição a extremos de temperatura (ação do gelo-degelo e fogo).

O comportamento do concreto face às ações climáticas pode ser analisado segundo duas fases bem diferenciadas: uma correspondente ao seu período de pega e princípio de endurecimento e a que compreende o resto do endurecimento, cuja duração pode-se considerar indefinida.

As condições climáticas fundamentais que podem criar problemas no concreto são frio, o calor e a baixa umidade, todas aumentadas pela ação do vento.

A NBR 14931:2003, discrimina as prescrições relativas aos serviços de concretagem em temperaturas muito frias e muito quentes, cujas recomendações básicas foram representadas na Tabela 3.6 seguinte.

Tabela 3.6: Requisitos de concretagem em temperaturas adversas

Características e Condições	Concretagem em temperatura muito fria	Concretagem em temperatura muito quente
Temperatura da massa do concreto no momento do lançamento.	Ser $\geq 5^{\circ} \text{C}$	
Temperatura ambiente $\geq 35^{\circ} \text{C}$, umidade relativa do ar $\leq 50\%$ e velocidade do vento $\geq 30\text{m/s}$.		Adotar medidas necessárias para evitar a perda de abatimento do concreto, bem como para reduzir a temperatura de sua massa.
Imediatamente após as operações de lançamento e adensamento.		Tomar providências para reduzir a perda de água do concreto.
Quando estiver prevista queda na temperatura ambiente para abaixo de 0°C nas 48 h seguintes.	Suspender a concretagem, caso não existam disposições estabelecidas no projeto ou definidas pelo responsável técnico pela obra.	
Para condições ambientais adversas, com temperatura ambiente superior a 40°C ou velocidade do vento acima de 60m/s .		Suspender a concretagem, caso não existam disposições estabelecidas no projeto ou definidas pelo responsável técnico da obra.
Emprego de aditivo	Requer prévia comprovação de desempenho do material. Proíbe-se o uso de produtos que possam atacar quimicamente as armaduras, em especial aditivos à base de cloreto de cálcio.	

Fonte: (VILASBOAS, 2004)

B.1) Fissuração pela cristalização de sais nos poros

Uma ação puramente física (sem envolver ataque químico ao cimento) da cristalização de sulfatos, cloretos, nitratos e similares nos poros do concreto pode ser responsável por danos significativos. Essa ação pode ser verificada, por exemplo, quando um lado

de um muro de arrimo ou laje de um concreto permeável está em contato com uma solução salina e o outro lado está sujeito à evaporação. Neste caso, o material pode deteriorar-se por tensões resultantes da pressão de sais que se cristalizam nos poros. Em muitos materiais porosos, a cristalização de sais de soluções supersaturadas produz pressões que são suficientemente grandes para produzir fissuração.

B.2) Elevação da temperatura interna do concreto

As reações dos componentes do cimento com a água são exotérmicas. A quantidade de calor liberada poderá vir a causar problemas quando da concretagem de peças de grandes dimensões, já que, no início do processo de hidratação, não há troca positiva de calor com o exterior, o que provoca o aquecimento e a expansão da massa, sendo que, posteriormente, com a continuidade do processo, dá-se o natural esfriamento, implicando na geração de um gradiente térmico, situação que pode ocasionar a fissuração interna do concreto.

A variação de temperatura provoca uma mudança volumétrica nas estruturas de concreto. Se as contrações e expansões são restringidas, e as tensões de tração resultantes forem maiores que a resistência do concreto, poderão ocorrer fissuras. Em elementos de concreto com grandes dimensões, como por exemplo, barragens ou blocos de fundação, poderão surgir fissuras devido aos efeitos do gradiente térmico causado pelo calor de hidratação do cimento, que pode originar tensões de tração (FERREIRA, 2000).

A igreja da Pampulha em Belo Horizonte, é um exemplo de surgimento de fissuras devido aos efeitos do gradiente térmico. Sua concepção se deu, sem a previsão de juntas de dilatação. Com o passar do tempo, observou-se o aparecimento de fissuras em sua cúpula.

Segundo Aguiar *et. al.* (2006), o interior da igreja apresentava-se estanque, sem a presença de infiltrações. As fissuras existentes na casca eram superficiais, restringindo-se somente aos materiais utilizados no revestimento, que por terem módulos de elasticidade diferentes, e submetidos a gradientes térmicos de até 50°C,

fissuraram-se em função das movimentações termodinâmicas diferenciadas e por não apresentarem ligação forte entre as camadas (Figura 3.7).



Figura 3.7: Variações térmicas provocando fissuras e trincas na cúpula da igreja. (Fonte: AGUIAR, *et. al.* 2006).

B.3) Carregamento estrutural (sobrecarga, impacto e carga cíclica)

A atuação de sobrecargas pode produzir a fissuração de componentes estruturais, tais como pilares, vigas e paredes. Essas sobrecargas atuantes podem ter consideradas no projeto, caso em que a falha decorre da execução da peça ou do próprio cálculo estrutural, como pode ter sido originada de uma sobrecarga superior à prevista. Vale salientar que é freqüente presenciar a atuação de sobrecargas em componentes sem função estrutural, geralmente pela deformação da estrutura resistente do edifício ou pela sua má utilização (THOMAZ, 1989).

B.4) Ação do gelo-degelo

Em climas frios, danos em peças estruturais atribuídos à ação do congelamento (ciclos de gelo-degelo) constituem um dos maiores problemas de durabilidade, requerendo elevados gastos para saná-los. Felizmente, esse problema não existe na zona tropical.

Ferreira (2000), afirma que os efeitos destes fenômenos sobre o desempenho do concreto dependerão do seu estágio de endurecimento. Se ocorrer o congelamento antes do endurecimento, o processo de hidratação do cimento será suspenso, sendo retomado após o descongelamento, sem perda significativa da resistência, apesar da expansão interna da água. Se o congelamento ocorrer após o endurecimento do concreto, mas sem que ele tenha atingido sua resistência final, a expansão devido ao congelamento da água resultará em perdas significativas de resistência. Quando o concreto endurecido é exposto a baixas temperaturas, a água retida nos poros capilares congela e expande. Ao descongelar, verifica-se um acréscimo expansivo nos poros, que aumenta com a sucessão de ciclos, causando uma pressão de dilatação que provoca fissuração no concreto, e conseqüentemente sua deterioração.

O dano por congelamento no concreto pode ter várias formas. As mais comuns são fissuração e o destacamento do concreto, causadas pela expansão progressiva da matriz da pasta de cimento por repetidos ciclos gelo-degelo. A capacidade do concreto resistir aos danos devidos à ação de congelamento depende das características da pasta de cimento e do agregado.

A degradação do concreto pode ocorrer também pela aplicação de sal para acelerar o degelo. As ações de cloros neste processo podem ser danosas ao concreto, contribuindo para a sua degradação em função dos mecanismos de corrosão das armaduras (CODY, 1996).

A aplicação do sal produz também uma redução da temperatura na superfície do concreto causando um choque térmico, além de tensões internas que podem provocar fissuras devido a diferença de temperatura entre a superfície e o interior do concreto (SILVA, 1998).

B.5) Deterioração por fogo

O concreto apresenta, geralmente, um bom comportamento quando submetido ao fogo, uma vez que, ao contrário da madeira e plásticos, é incombustível e não emite gases tóxicos quando exposto a altas temperaturas.

Segundo Neville (1982), o concreto também possui boas características com respeito à resistência ao fogo; isso significa que o período de tempo em que fica exposto ao fogo, com desempenho satisfatório, é relativamente, grande.

Os critérios fundamentais de desempenho são a capacidade de suportar cargas, a resistência à penetração de chamas e resistência à transferência de calor quando o concreto é usado como material de proteção do aço. Na prática, o que se exige de uma peça de concreto armado é que seja preservado o seu comportamento estrutural durante um período de tempo estabelecido, denominado período de resistência ao fogo.

As altas temperaturas podem afetar a resistência da estrutura de forma notável. A partir dos 100°C a água livre ou capilar do concreto começa a evaporar. Entre 200°C e 300°C, a perda de água capilar é completa, sem que se observem alterações na estrutura do cimento hidratado e sem redução considerável na resistência. De 300°C a 400°C produz-se a perda de água de gel do cimento, ocorrendo uma sensível diminuição das resistências e aparecendo as primeiras fissuras superficiais no concreto. Aos 400°C, uma parte do hidróxido de cálcio procedente da hidratação dos silicatos se transforma em cal viva. Até os 600°C, os agregados que não têm todos os mesmos coeficientes de dilatação térmica, se expandem com diferentes intensidades, provocando tensões internas que começam a desagregar o concreto (CÁNOVAS, 1988).

O concreto no processo de elevação de temperatura vai perdendo resistência e mudando sua coloração. Como este fato depende da presença de certos compostos de ferro, há uma certa diferença no comportamento dos diversos concretos. A mudança de cor é permanente, de modo que se pode fazer, a posteriori, uma estimativa da temperatura máxima atingida durante a exposição do concreto ao fogo e, como consequência, da sua resistência residual.

A 200°C o concreto é cinza e não há perda de resistência apreciável; a 300°C a perda de resistência varia em torno de 10%, decrescendo progressivamente a partir desta temperatura; de 300°C a 600°C a cor muda para rosa a vermelha, a resistência à compressão cai para 50% do valor original, aproximadamente, o módulo de

deformação reduz em até 20% e a resistência à tração chega a ter um valor praticamente desprezível (SOUZA, 2003 *apud* LAPA, 2008); entre 600°C e 950°C a cor passa para um cinza com pontos vermelhos, com resistência à compressão muito pequena; de 950°C a 1000°C a cor muda para amarela alaranjada e o concreto começa a sinterizar-se; a partir de 1000°C o concreto sofre a sinterização, virando um material calcinado, mole e sem resistência, conforme Figura 3.8 (AGUIAR, 2006).

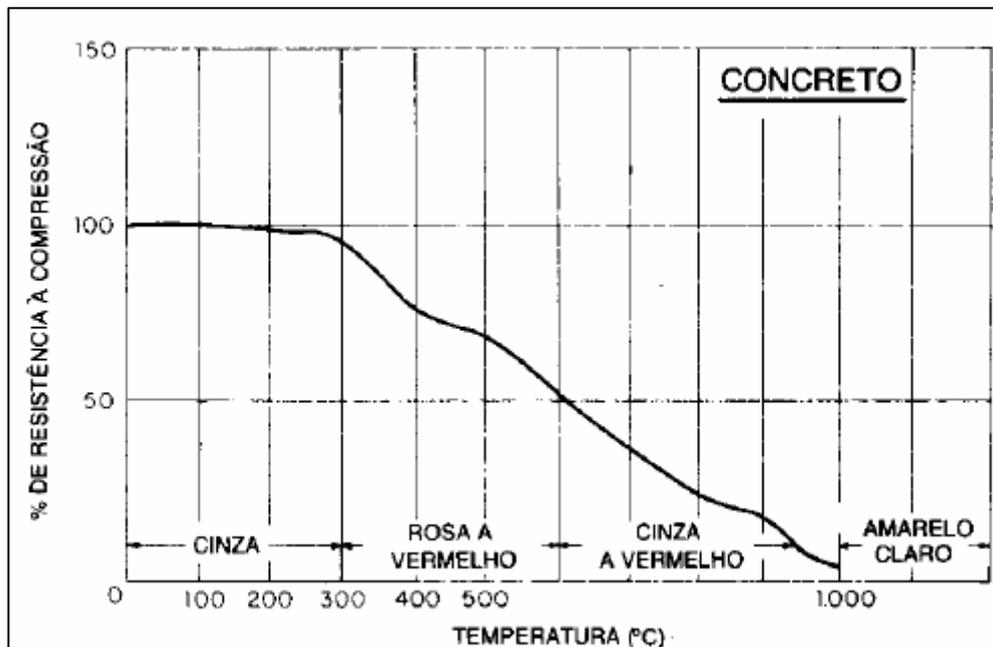


Figura 3.8: Influência da temperatura sobre a resistência do concreto. Fonte: (CÂNOVAS, 1988).

Muitos fatores controlam a performance do concreto ao fogo, cuja composição é importante porque tanto a pasta de cimento como o agregado possuem componentes que se decompõem ao serem aquecidos. A permeabilidade do concreto, o tamanho da peça e a taxa de aumento da temperatura são significantes porque governam o desenvolvimento de pressões internas dos produtos gasosos de decomposição.

No concreto armado, o efeito da variação de temperatura não costuma ocasionar o surgimento de tensões quando as temperaturas são normais, pois o coeficiente de

dilatação dos dois materiais é semelhante: No entanto, quando as temperaturas se elevam, os coeficientes têm comportamentos diferentes, sendo que o do aço pode chegar a 30 vezes superior ao do concreto, produzindo tensões que podem provocar o destacamento da camada de revestimento das armaduras (VELASCO, 2003).

O aço exposto à alta temperatura se dilata, diminui seu limite elástico e sua tensão de ruptura, chegando ao colapso perto dos 500°C (COSTA, 2004 *apud* LAPA, 2008). É importante considerar que aços doces e laminados recuperam praticamente suas propriedades originais quando esfriam (LAPA, 2008).

Os revestimentos exercem papel importante como isolantes e protetores das armaduras frente à ação de altas temperaturas, particularmente o fogo, para conseguir que estas permaneçam abaixo das temperaturas críticas.

Por causa da baixa condutividade térmica do concreto, os revestimentos formam uma camada protetora eficaz para as armaduras, desde que tenham espessuras adequadas. Um revestimento de 2 cm de espessura, por exemplo, assegura uma proteção aproximada de meia hora. Portanto, quanto maior o revestimento, maior será a proteção, mas para esta ser superior a 3 horas é necessário recorrer a barreiras especiais, mais leves, como vermiculita, fibras cerâmicas ou outros isolantes térmicos (CÁNOVAS, 1988).

Efeito da alta temperatura na pasta de cimento

O efeito da temperatura na pasta de cimento depende do grau de hidratação e da umidade. Uma pasta bem hidratada consiste principalmente de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio hidratado. Uma pasta saturada contém uma grande quantidade de água livre e água capilar, além da água adsorvida.

Do ponto de vista de proteção ao fogo, verifica-se que, devido ao considerável calor de vaporização necessário para conversão de água em vapor, a temperatura do concreto não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido removida. Contudo, a presença de grandes quantidades de água evaporável pode causar um problema.

Caso a taxa de aquecimento seja alta e a permeabilidade do concreto baixa, podem ocorrer danos ao concreto sob a forma de pipocamento (destacamento superficial). Este fenômeno ocorre quando a pressão de vapor dentro do material aumenta a uma taxa maior do que o alívio de pressão causado pela liberação de vapor para a atmosfera.

A ação do fogo sobre o cimento Portland tem vários efeitos físicos e químicos. Se, por um lado, a pasta de cimento expande pelo aumento de temperatura, por outro, ela se retrai por perda de água de constituição. Esta retração logo supera a expansão e diz-se que o material retrai (PETRUCCI, 1972 *apud* VILASBOAS, 2004).

Efeito da alta temperatura no agregado

A porosidade e mineralogia do agregado exercem uma influência importante no comportamento do concreto exposto ao fogo. Agregados porosos, dependendo da taxa de aquecimento, tamanho do agregado, permeabilidade e umidade, podem ser suscetíveis de expansões destrutivas, acarretando a degradação do concreto por fissuração e destacamento. A mineralogia do agregado determina a dilatação térmica diferencial entre o agregado e a pasta de cimento e a resistência última da zona de transição.

Em geral, observa-se que o comportamento do concreto frente ao fogo será tanto melhor quanto mais concorram as seguintes características:

- emprego de agregado de menor coeficiente de dilatação térmica;
- utilização de granulometria contínua e com alta proporção agregado/cimento;
- utilização de agregados leves ou calcários;
- boa compactação do concreto;
- baixa condutividade térmica;
- alta resistência à tração;

- umidade não muito alta no concreto;
- emprego de cimentos com escórias ou pozolanas, especialmente estes, pela facilidade de fixar a cal liberada;
- emprego de cobrimento adequado, a fim de que as armaduras não alcancem a temperatura crítica do aço. (CÁNOVAS, 1988)

C) Desgaste pela presença de poluição

A poluição atmosférica nos grandes centros urbanos ocasiona o apodrecimento e a descoloração do concreto. As substâncias poluidoras transportadas pelo ar são, em sua grande maioria, provenientes de gases e fuligens liberados pelos escapamentos dos veículos automotores, e dos gases ácidos provenientes das chaminés de algumas indústrias. O dióxido de enxofre, SO_2 , e o trióxido de enxofre, SO_3 , em forma de fuligem, são provenientes da queima de óleos combustíveis, gases residuais e hidrocarbonetos. Quando chove, a água precipitada forma, junto com a fuligem existente no ar, a chamada chuva ácida (H_2SO_3 e H_2SO_4), fortemente agressiva para o concreto e que, após certo tempo, ataca também o aço.

3.3.2.4 Causas químicas de deterioração das estruturas de concreto

A) Deterioração por hidrólise dos componentes da pasta de cimento

Todas as águas são, em maior ou menor grau, agressivas ao concreto, mas a agressividade aumenta quando a água está em movimento, há variação freqüente do nível da água, a temperatura da água é superior a 45°C , a água está poluída com produtos químicos ou por esgotos residenciais e as peças de concreto são delgadas.

As águas quimicamente puras, tais como a água da chuva (exceto a chuva ácida) e a água de poços em regiões silicosas, não contêm sais dissolvidos e, por isto, tendem a

agredir o concreto, tornando-o mais poroso e diminuindo, conseqüentemente, a sua resistência.

A agressividade das águas puras é função direta da sua velocidade, da quantidade de água que atua sobre o concreto e do seu tempo de permanência (águas empoçadas). A evidência mais comum desta ação é a dissolução do hidróxido de cálcio, seguida de precipitação de géis, com a conseqüente formação de estalactites e estalagmites (Figura 3.9).



Figura 3.9: Formação de estalactites.

Fonte: (<<http://www.demc.ufmg.br/aguiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>>

Acessado em 30/01/2012, às 17:48:24)

A água subterrânea, de lagos e de rios possui contaminações como cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio. Denominada de água dura, geralmente não ataca os constituintes da pasta de cimento Portland. As águas puras (ex: condensação de neblina, ou vapor), e água mole (ex: originadas da chuva ou da fusão de neve e gelo), podem conter pouco ou nenhum íon de cálcio. Quando estas águas entram em contato com a pasta de cimento, elas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio. À medida que a solução de contato atinge o equilíbrio químico, a hidrólise adicional da pasta de cimento irá parar. Entretanto, no caso da água corrente

ou infiltração sob pressão, ocorrerá diluição da solução de contato, proporcionando, portanto, a condição para continuação da hidrólise.

Em pasta hidratada de cimento Portland, o hidróxido de cálcio é o constituinte que, devido à sua solubilidade em água pura, é mais suscetível à hidrólise. Teoricamente, a hidrólise da pasta de cimento continua até que a maior parte do hidróxido de cálcio tenha sido retirada por lixiviação; isto expõe os outros constituintes do cimento à decomposição química. Dessa forma, o processo prejudica os géis de sílica e alumina, deixando-os com pouca ou nenhuma resistência.

Além da perda de resistência, a lixiviação do hidróxido de cálcio do concreto pode ser considerada indesejável por razões estéticas. Frequentemente, o produto lixiviado interage com o CO_2 presente no ar e resulta na precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície. Este fenômeno, conhecido como eflorescência, é mais freqüente nos concretos com porosidade nas proximidades da superfície e é influenciado pelo tipo de material, formas, o grau de adensamento e pela relação água/cimento. A ocorrência do fenômeno é maior quando após um período de clima fresco e chuvoso, há um período seco e quente. A eflorescência também pode ser causada pelo uso de agregado originado de praia, não lavado, bem como pelo gesso do cimento e os álcalis do agregado (NEVILLE, 1982).

B) Deterioração através de reações por troca de cátions

Baseado na troca de cátions, os três tipos de reações deletérias que podem ocorrer entre soluções químicas e os componentes da pasta de cimento são decorrentes de formação de sais de cálcio solúveis; formação de sais de cálcio insolúveis e não expansivos e ataque químico por soluções contendo sais de magnésio.

B.1) Formação de sais de cálcio solúveis

As soluções ácidas contendo ânions que formam sais solúveis de cálcio são encontradas, freqüentemente, na prática industrial, como por exemplo, ácido hidrocloreto, sulfúrico ou nítrico, presentes em efluentes. Em produtos alimentícios, podem ser encontrados os ácidos acético, fórmico ou láctico. Em águas naturais são

obtidas altas concentrações de CO₂; já o ácido carbônico, H₂CO₃, pode ser encontrado em refrigerantes. A reação por troca de cátions entre as soluções ácidas e os constituintes da pasta de cimento Portland gera sais solúveis de cálcio, acetato de cálcio e bicarbonato de cálcio, que são removidos por lixiviação. Através da reação por troca de cátions, as soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia, que são comumente encontradas na indústria agrícola e de fertilizantes, são capazes de transformar os componentes da pasta de cimento em produtos altamente solúveis. como na Equação 3.1 abaixo:



Como ambos os produtos da reação são solúveis, os efeitos do ataque são mais severos que, por exemplo, uma solução de MgCl₂, que formaria CaCl₂ e Mg(OH)₂. Já que o último não é solúvel, a sua formação não aumenta a porosidade e a permeabilidade do sistema.

Convém assinalar que a acidez da água, na natureza, geralmente se deve ao CO₂ dissolvido, que é encontrado em concentrações significativas em águas minerais, água do mar e água subterrânea pela ação de restos de animais ou vegetais em decomposição.

B.2) Formação de sais de cálcio insolúveis

Alguns ânions, quando presentes em água, podem reagir com a pasta de cimento para formar sais insolúveis de cálcio. A sua formação pode não causar danos ao concreto, a não ser que o produto da reação seja expansivo, ou removido por erosão, devido ao fluxo de soluções, infiltração ou tráfego de veículos.

Caso um íon chegue ao contato com a superfície do concreto ou penetre nos poros da pasta de cimento hidratado, ao reagir com hidróxido de cálcio e der origem a um sal insolúvel, este se precipitará naqueles poros, podendo, eventualmente, proteger o cimento de outros ataques. Efetivamente, se a precipitação der origem a uma nova

fase sólida, contínua, sem fendas, não pulverulenta, com ligações sólidas entre si e à base sobre a qual precipitou, em suma, impermeável, obter-se-á uma superfície que protege o concreto, não só da saída de novas quantidades de hidróxido de cálcio, mas também da entrada de novos íons. É o que se passa com a precipitação do carbonato de cálcio, através do ciclo do anidrido carbônico em dissolução na água, que forma a camada protetora à superfície do concreto.

B.3) Ataque químico por soluções contendo sais de magnésio

Cloreto, sulfato ou bicarbonato de magnésio são encontrados freqüentemente em águas subterrâneas, água do mar e alguns efluentes industriais. As soluções de magnésio reagem prontamente com o hidróxido de cálcio presente na pasta do cimento para formar sais de cálcio. A solução $MgSO_4$ é bastante agressiva porque o íon sulfato pode ser deletério aos hidratos que contêm alumina e estão presentes na pasta do cimento. Um aspecto característico do ataque por um íon magnésio na pasta de cimento é que o ataque, no final, estende-se ao hidrato de silicato de cálcio, que é o principal constituinte cimentício. Aparentemente, no contato prolongado com íons de magnésio, o silicato de cálcio hidratado gradualmente perde íons de cálcio que são substituídos por íons de magnésio. O produto final da reação de substituição é um hidrato de silicato de magnésio, cuja formação é associada com perda de características cimentícias.

Os silicatos e aluminatos de magnésio não têm propriedades ligantes, razão pela qual a ação do íon Mg^{2+} contribui também, por este fato, para desagregação do ligante.

C) Deterioração através de reações que envolvem a formação de produtos expansivos

As reações químicas que envolvem a formação de produtos expansivos no concreto endurecido podem levar a certos efeitos deletérios. No início, a expansão pode acontecer sem qualquer dano ao concreto, mas o surgimento crescente de tensões internas, ao final, manifesta-se pela oclusão de juntas de expansão, deformação e deslocamentos em diferentes partes da estrutura, fissuração, destacamento e pipocamento. Os quatro fenômenos associados com reações químicas expansivas são

ataque por sulfato, ataque álcali-agregado, hidratação retardada de CaO e MgO livres e corrosão da armadura no concreto.

C.1) Ataque por sulfato

Os sulfatos podem ter origem nos materiais que compõe o concreto ou no contato do concreto com os solos ou águas ricas neste agente (SILVA, 1998). Ele está presente em muitos tipos de solo na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em pequenas quantidades, sendo inofensivo ao concreto. A concentração de sulfatos em águas subterrâneas aumenta devido à presença de sulfato de magnésio, sódio e potássio. Em águas agrícolas, é freqüente a ocorrência de sulfato de amônia. Acido sulfúrico pode estar presente em efluentes de fornos (combustível com alto teor de enxofre) e de indústria química. Através da decomposição de matéria orgânica em pântanos, poços de mineração e tubulação de esgoto, o gás H_2S é formado e, reagindo com bactérias, forma o ácido sulfúrico. (POGGIALI, 2009).

Todos os sulfatos são potencialmente danosos ao concreto, reagindo com a pasta de cimento hidratado. No ataque, os íons sulfatos reagem principalmente com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e com o aluminato tri-cálcico C_3A , originando o gesso e a etringita, também chamada de sal de Candlot.(LAPA, 2008).

Segundo Mehta & Monteiro (1994), os produtos expansivos formados nesta reação química, podem aparecer inicialmente sem causar danos ao concreto, mas a medida que surgem crescentes tensões internas, passam a se manifestam através da obstrução de juntas de expansão, fissuração, lascamento e pipocamento.

Através das fissuras, os agentes deletérios entram no material com uma maior facilidade, acelerando o processo de deterioração (POGGIALI, 2009). Já a redução da resistência do concreto ocorre devido à perda de coesão da pasta de cimento e aderência da pasta aos agregados (NEVILLE, 1982).

Como um resumo, a Figura 3.10 representa a deterioração do concreto dada pelo ataque de sulfatos.

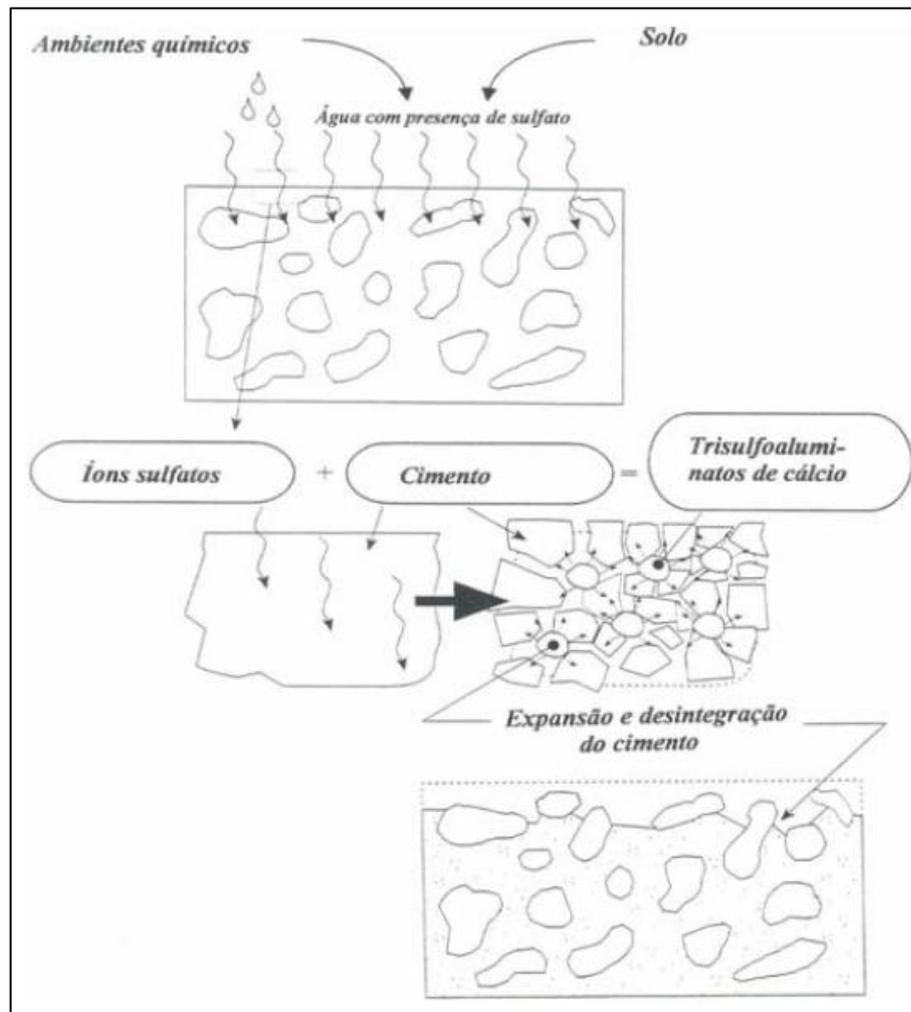


Figura 3.10: Deterioração do concreto por ataque de sulfatos. Fonte: (EMMONS, 1993 In: AGUIAR, 2006).

De acordo com Lapa (2008), a água do mar é um exemplo de água agressiva que contém sulfatos, que por sua vez atacam o concreto, e sua ação sobre ele é acompanhada das ações destrutivas de impactos e abrasão das ondas. Além da ação química, a cristalização dos sais nos poros do concreto pode provocar a degradação devido à pressão exercida pelos cristais salinos, nos locais onde há evaporação, acima da linha d'água. O ataque só ocorre quando a água pode penetrar no concreto, portanto, o nível de impermeabilização é muito importante neste processo.

Os concretos localizados entre os limites da maré, sujeitos à molhagem e secagem alternadas, são severamente atacados, conforme Figura 3.11, enquanto os concretos submersos permanentemente são menos atacados.



Figura 3.11: Estruturas de concreto severamente deterioradas, localizadas na linha da maré.

(Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aguiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>>

Acessado em 30/01/2012, às 17:24:02)

A ação dos sulfatos na água do mar não provoca a expansão do concreto, diferentemente das águas subterrâneas. A ausência de expansão é devida à presença de cloretos na água do mar, que inibem a expansão, porque o gesso e o sulfato-aluminato de cálcio são mais solúveis em soluções de cloretos do que em água e são, portanto, lixiviados pela água do mar (LAPA, 2008).

No concreto armado, a absorção de sal cria regiões anódicas e catódicas, resultando em uma ação eletrolítica que leva à corrosão das armaduras, de modo que, os efeitos da água do mar são mais sérios no concreto armado do que no concreto simples. É preciso dotar as armaduras de cobertura suficiente e utilizar concretos densos e impermeáveis (NEVILLE, 1982).

C.2) Reação álcali-agregado

Expansão e fissuração, levando à perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto, também podem resultar de reações químicas envolvendo íons alcalinos do cimento Portland (ou de outras fontes), íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes nos agregados. Pipocamento e exsudação de um fluido viscoso álcali-silicoso são outras manifestações do fenômeno. Prosseguindo, são discutidas as características dos cimentos e agregados que contribuem para a reação, mecanismos associados a expansão e métodos de controle do fenômeno.

Conforme o que se demonstra, a presença de ambos, íons hidroxilas e íons metálicos-alcalinos, parece ser necessária para o fenômeno da expansão. Devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio em cimentos Portland hidratados, a concentração de íons hidroxila no fluido dos poros permanece alta, mesmo em cimentos de baixa alcalinidade; neste caso, o fenômeno expansivo estará, pois, limitado pela disponibilidade limitada de íons metálicos alcalinos, a menos que estes íons sejam fornecidos por alguma outra fonte, tais como aditivos contendo álcalis, agregados contaminados com sais, e a penetração de água do mar ou soluções degelantes, contendo cloreto de sódio no concreto.

Quanto aos agregados reativos a álcalis, dependendo do tempo, temperatura e tamanho da partícula, todos os silicatos ou minerais de sílica, bem como sílica hidratada ou amorfa, podem reagir com soluções alcalinas, embora um grande número de minerais reaja apenas em um grau insignificante.

Mecanismos de expansão

Segundo Souza & Ripper (1998), esta reação resulta da interação entre a sílica reativa de alguns tipos de minerais utilizados como agregados e os íons álcalis (Na^+ e K^+) presentes nos cimentos (quando em percentagem superior a 0,6%), libertados durante a hidratação dos mesmos, ou ainda pela penetração de cloretos, contendo estes mesmos íons, no meio concreto. Esta reação é expansivas, pela formação adicional de sólidos em meio confinado, provocando, de início, a fissuração da superfície do concreto, conferindo à mesma o aspecto de um mosaico, para posteriormente vir a

desagregar a estrutura, criando crateras profundas, pelas quais escorre, às vezes, um gel de sílica (ver Figura 3.12 a 3.15).

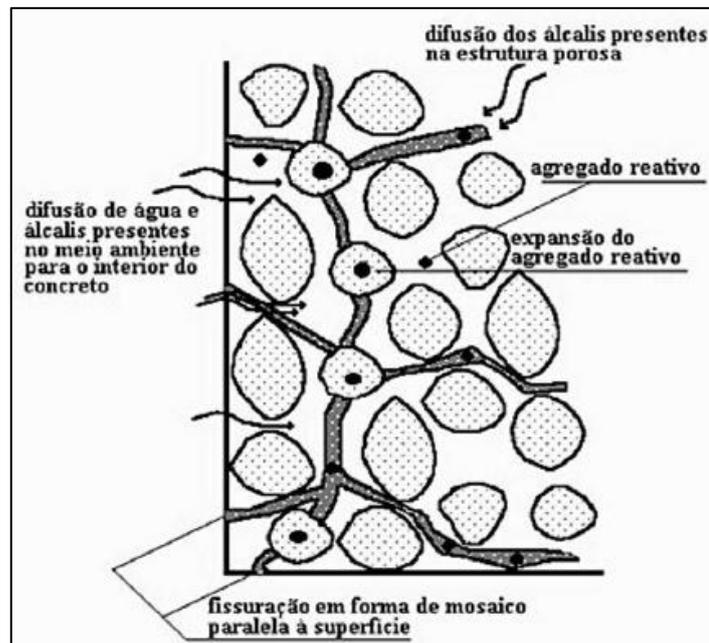


Figura 3.12: Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto. Fonte: (SOUZA & RIPPER, 1998)

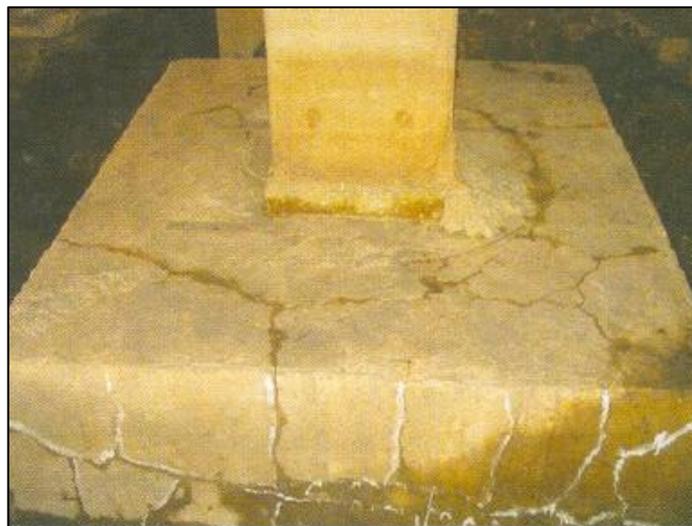


Figura 3.13: Mapeamento de fissuras em blocos de fundação devido a reação álcali-agregado. (Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aquiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>> Acessado em 30/01/2012, às 14:35:29)



Figura 3.14: Borda formada a partir da reação, circundando o agregado. Fonte: (<<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/imprime59011.asp>> Acessado em 26/01/2012, às 20:41:45)

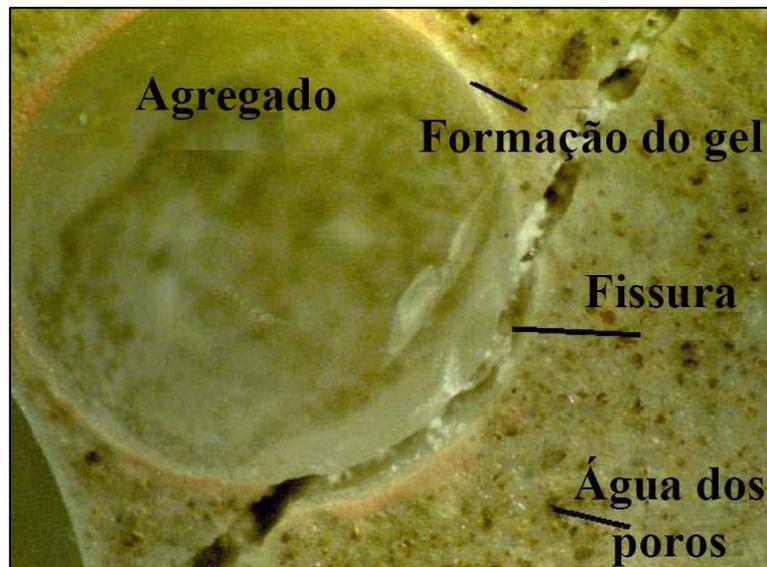


Figura 3.15: Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado. (Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aguiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>> Acessado em 30/01/2012, às 17:39:54)

Pelo exposto, conclui-se que os fatores mais importantes para ocorrência do fenômeno são:

- o conteúdo de álcalis do cimento e o consumo de cimento do concreto;
- a contribuição de íons alcalinos de outras fontes, que não o cimento Portland, tais como aditivos ou agregados contaminados com sais e penetração de água do mar por solução salina degelante no concreto;
- a quantidade, tamanho e reatividade do constituinte reativo aos álcalis presentes no agregado;
- disponibilidade de umidade junto à estrutura de concreto e
- temperatura ambiental.

Os meios empregados para combater esta reação são:

- uso de cimento Portland de baixa alcalinidade (menor que 0,6% de Na_2O equivalente);
- caso não esteja disponível cimento Portland de baixa alcalinidade, o conteúdo total de álcali no concreto pode ser reduzido pela substituição de parte do cimento de alta alcalinidade por adições cimentícias ou pozolânicas, tais como escória granulada de alto forno, cinza volante ou microssílica;
- uso de agregados que não tenham sílica reativa;
- controle do acesso de água ao concreto pelo imediato reparo de quaisquer juntas com vazamento, a fim de impedir expansões excessivas no concreto.

C.3) Hidratação do MgO e CaO cristalinos

A estabilidade do cimento é uma característica ligada à ocorrência eventual de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do concreto e resulta da hidratação de cal e magnésia livre, nele presente. Quando o cimento contém apreciáveis proporções (acima de 1,0%) de cal livre (CaO), esse óxido, ao se hidratar posteriormente ao endurecimento, aumenta de volume, criando tensões internas que conduzem à microfissuração, e pode terminar na desagregação mais ou menos completa do material. Isso pode ocorrer quando prevalecem temperaturas superiores a 1900°C no processo de fabricação do clínquer e resulta na supercalcinação da cal. Este óxido, como se sabe, hidrata-se de maneira extremamente lenta, conduzindo a indesejável expansão em época posterior ao endurecimento do material. Tal fenômeno ocorre com maior frequência com o óxido de magnésio, motivo pelo qual as especificações limitam o teor desse constituinte no cimento.

Nenhum caso de dano estrutural devido à presença de MgO (periclásio) no cimento é reportado em nosso país, onde limitações na matéria-prima obrigam alguns produtores de cimento a fabricar o aglomerante contendo menos de 6,5% de MgO (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Recentemente, vários casos de expansão e fissuração de estruturas de concreto foram relatados em Oakland, Califórnia, onde se descobriu que o agregado usado na confecção do concreto havia sido contaminado com tijolos triturados de dolomita, que continham grandes quantidades de MgO e CaO calcinados a temperaturas muito inferiores a 1400°C.

C.4) Corrosão da armadura no concreto armado

Segundo Aguiar (2006), a corrosão metálica, quando tem lugar em meio aquoso, é um fenômeno eletroquímico, isto é, supõe-se a existência de uma reação de oxidação e uma de redução, e a circulação de íons através do eletrólito. Assim, sobre a superfície do metal são geradas duas zonas, atuando como ânodo aquela em que se produz a oxidação do metal, liberando elétrons, que migram através do metal em direção a

outro lugar, onde reagem para produzir uma redução de alguma substância existente no eletrólito.

O processo de corrosão pressupõe, portanto, a constituição de uma pilha eletroquímica. A corrosão através do metal e do eletrólito, entre o ânodo e o cátodo, pressupõe o funcionamento de um circuito fechado. Se o circuito se interrompe em algum de seus pontos, a pilha não pode funcionar e a corrosão se detém (ANDRADE, 1992).

Ressalta-se que é necessário não só considerar se um dado metal está em corrosão ou não, como também considerar a velocidade deste processo, já que a corrosão pode evoluir tão lentamente que seu efeito seja desprezível. No processo corrosivo influem além da natureza do eletrólito, o conteúdo de oxigênio e a resistividade do meio.

Espera-se que, quando a armadura estiver protegida do ar por uma camada adequadamente espessa de concreto de baixa permeabilidade, a corrosão do aço e outros problemas associados a ela não surjam. Esta expectativa não é plenamente satisfeita na prática em função da frequência com que as estruturas de concreto armado e protendido, adequadamente construídas, continuam a sofrer danos devidos à corrosão do aço. A magnitude dos danos é especialmente grande em estruturas expostas a ambientes marinhos e elementos químicos degelantes.

O dano ao concreto resultante da corrosão da armadura manifesta-se sob forma de expansão, fissuração e, finalmente, destacamento do revestimento. Não só a perda do revestimento, como também uma peça de concreto armado pode sofrer dano estrutural devido à perda de aderência entre o aço e o concreto e diminuição da área da seção transversal da armadura, às vezes a tal grau que o colapso da estrutura torna-se inevitável.

De acordo com Ferreira (2000), o concreto confere ao aço uma barreira física que o separa e o protege do meio ambiente, mas também confere a este, uma elevada alcalinidade, que permite formar uma película fina de óxido de ferro na superfície do aço, chamada de camada de passivação, mantendo-o inalterado por um tempo indeterminado, desde que o concreto seja de boa qualidade, e que suas propriedades

físico-químicas não se alterem devido às ações externas. A camada de passivação é criada pouco depois do início da hidratação do cimento, sendo constituída de Fe_2O_3 , e adere fortemente ao aço.

A corrosão eletroquímica da armadura do concreto pode ocorrer devido à falta de uniformidade do aço (diferentes aços, soldas), do contato com metais com menor potencial eletroquímico, assim como da heterogeneidade do meio físico e químico que rodeia o aço (FERREIRA, 2000).

A célula de corrosão da armadura está ilustrada na Figura 3.16 abaixo.

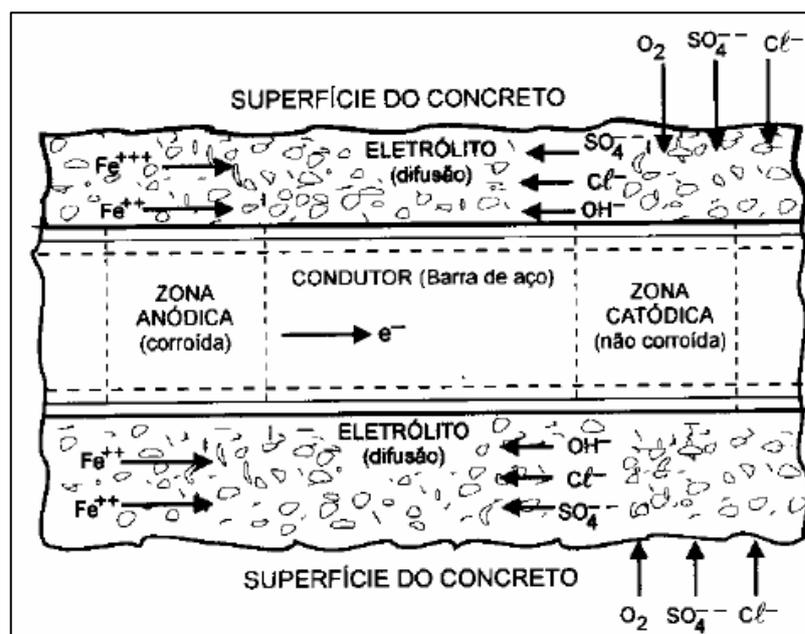


Figura 3.16: Célula de corrosão em concreto armado. Fonte: (SILVA, 1995 In: AGUIAR, 2006)

Quando as condições de serviço se modificam, e o concreto se altera através da penetração de substâncias agressivas, ocorre o rompimento da película passivante, e inicia-se a corrosão das armaduras. Os óxidos expansivos, gerados na corrosão, ocupam um volume várias vezes maior que o volume do aço original, causando fissuras e destacamento da camada de cobertura, facilitando o ingresso de mais

agentes agressivos (Figura 3.17). O aço em corrosão diminui de seção ou converte-se totalmente em óxido, há redução da aderência aço/concreto e conseqüentemente, ocorre uma perda da capacidade estrutural do elemento de concreto (LAPA, 2008).



Figura 3.17: Fissuras em viga, causadas pela expansão dos óxidos gerados na corrosão.
Fonte: (AGUIAR, 2006)

Essencialmente são duas as causas que podem dar lugar a destruição da capa passivante: A presença de uma quantidade suficiente de cloretos, adicionada durante o amassamento do concreto ou penetrada do exterior, ou outros íons despassivantes em contato com a armadura, e a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio (ANDRADE, 1992).

A ação dos cloretos se dá como na Figura 3.18.

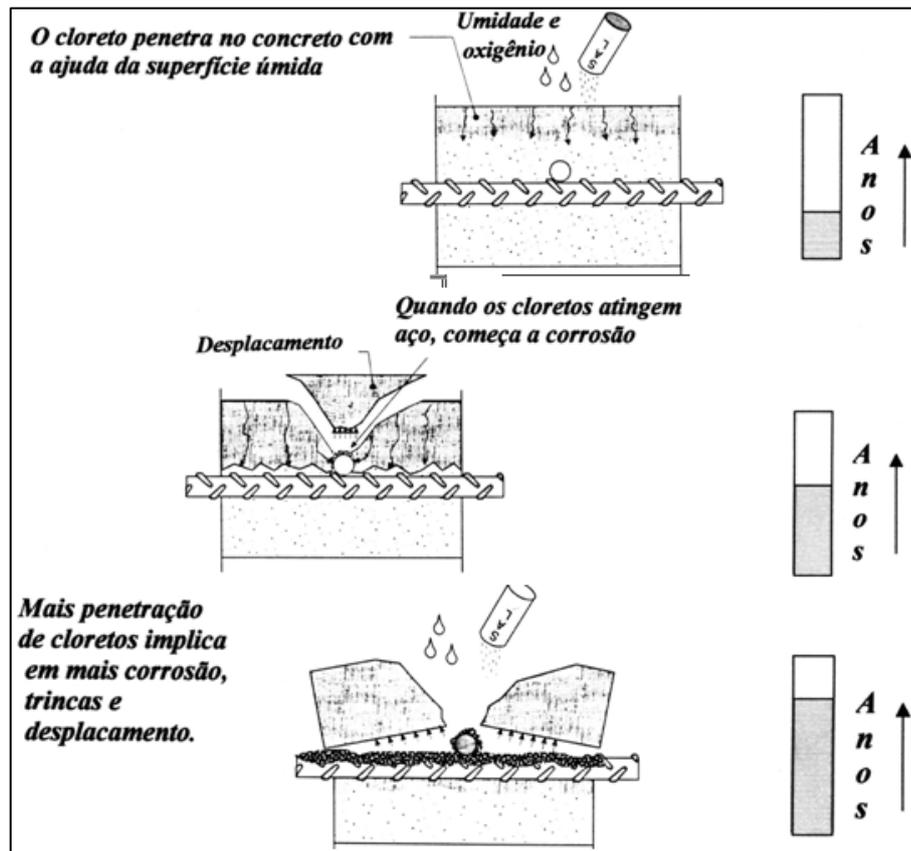


Figura 3.18: Ataque de cloretos em estruturas de concreto, afetando o aço.

(Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aguiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%20E7%E3o.pdf>>
Acessado em 28/01/2012, às 15:06:25)

A concentração de cloretos necessária para promover a corrosão é fortemente afetada pelo pH do concreto. Foi demonstrado que é necessário um nível de 8.000 ppm de íons cloretos para iniciar o processo quando o pH é de 13,2, mas quando o pH cai para um patamar de 11,6, a corrosão se inicia com somente 71 ppm de íons cloretos (EMMONS, 1993).

Para que ocorra o processo corrosivo é necessária a presença simultânea de oxigênio e umidade. A presença destes dois componentes acelera fortemente o processo, e a ausência deles detém o processo completamente (LAPA, 2008).

A corrosão está intimamente ligada à despassivação do aço pelo processo de carbonatação e pela penetração de cloretos. A introdução de determinados materiais cimentícios reduzem significativamente a penetrabilidade no concreto, aumentando a sua resistência e, conseqüentemente, reduzindo a velocidade de corrosão (LAPA, 2008).

Os efeitos da interação da carbonatação com os íons cloretos levam a uma aceleração da velocidade de corrosão quando comparada com a ocorrência dos ataques de forma independente, conforme mostrado na Figura 3.19.



Figura 3.19: Pilar deteriorado devido aos efeitos da interação da carbonatação com íons de cloreto. Fonte: (AGUIAR, 2006)

Carbonatação

O anidrido carbônico (CO_2) presente na atmosfera tende a se combinar com as bases do cimento hidratado, resultando em compostos com pH mais baixos. Sua ação

manifesta-se através do transporte deste para dentro dos poros do concreto, e com a sua subsequente reação com o hidróxido de cálcio – liberado pela hidratação do cimento - formando o carbonato de cálcio (Equação 3.2).



Citando Lapa (2008):

“O concreto possui pH da ordem de 12,5, principalmente por causa do Ca(OH)₂. O desaparecimento do hidróxido de cálcio do interior dos poros da pasta de cimento hidratado e sua transformação em carbonato de cálcio faz baixar o pH da solução em equilíbrio de 12,5 para 9,4, fator importante para o início da corrosão das armaduras.”

O CO₂ penetra da superfície para o interior, pelo que a carbonatação inicia-se na superfície do concreto e penetra lentamente para seu interior. Em concreto de mediana qualidade observa-se que a velocidade da carbonatação varia entre 1 e 3 mm por ano (SILVA, 1995). A intensidade da corrosão devido à carbonatação é influenciada pela espessura do cobrimento, sendo que a corrosão inicia-se nas armaduras onde as espessuras da camada de cobrimento são menores, como observado na Figura 3.20 (LAPA, 2008).

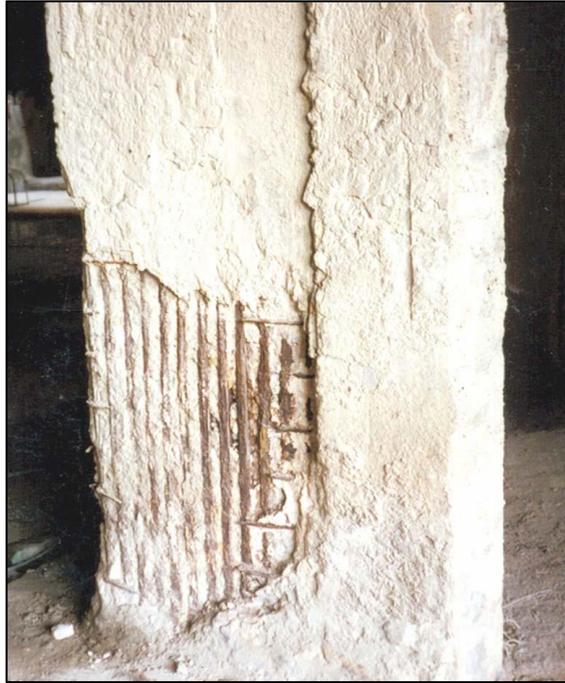


Figura 3.20: Corrosão das armaduras do pilar, em local de menor cobrimento, devido à carbonatação. Fonte: (AGUIAR, 2006)

A velocidade do processo é função da difusão de CO_2 no concreto, umidade relativa, tempo, relação água/cimento, tipo de cimento, permeabilidade do concreto e cura.

À medida que se aumenta a relação água/cimento, a permeabilidade e a profundidade de carbonatação também aumentam, devido à maior capacidade de difusão do CO_2 no concreto, cimentos mais finos contribuem para diminuir a profundidade de carbonatação e a deficiência de cura pode ocasionar fissuras no concreto, facilitando a entrada do CO_2 (LAPA, 2008).

Se o concreto tem todos os seus poros cheios de água, o gás carbônico não pode penetrar e difundir-se. Por outro lado, se todos os poros estão secos, o gás carbônico não pode ionizar-se, e se o fizer, a carbonatação será realizada muito lentamente (SILVA, 1995).

Os esquemas apresentados na Figura 3.21 e 3.22 ilustram o processo da carbonatação.

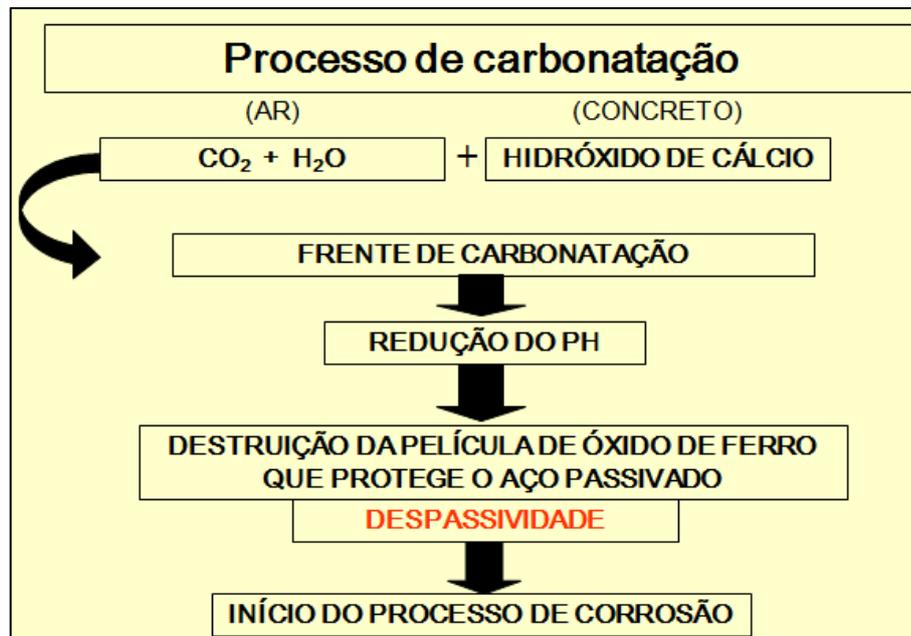


Figura 3.21: Processo de carbonatação.

(Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aquiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>>

Acessado em 28/01/2012, às 14:25:17)

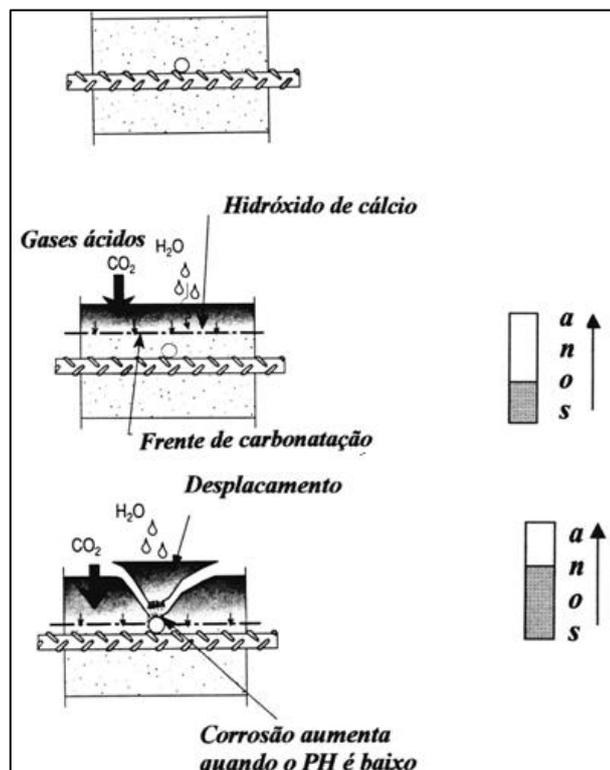


Figura 3.22: Processo de carbonatação.

(Fonte: <<http://www.demc.ufmg.br/aquiar/Mecanismos%20de%20Deteriora%E7%E3o.pdf>>

Acessado em 28/01/2012, às 14:28:12)

De acordo com Lapa (2008), as superfícies do concreto podem ser protegidas para prevenir a carbonatação. A aplicação de barreiras espessas como rebocos, revestimentos com pedras ou cerâmicos, além de pinturas, evitam a entrada do CO_2 , ressaltando-se que as pinturas possuem uma vida útil reduzida, necessitando de novas intervenções para garantir o bloqueio da carbonatação.

Considerando que a água, oxigênio e íons cloreto desempenham papéis importantes na corrosão da armadura e fissuração do concreto, é óbvio que a permeabilidade do concreto é a chave para controlar os vários processos envolvidos no fenômeno. Por isso, deve-se utilizar parâmetros de dosagem de concreto que assegurem baixa permeabilidade (ex: baixa relação água/cimento, controle do agregado, uso de adições minerais, etc), bem como, adensamento e cura adequados. O projeto da dosagem de

concreto deve também levar em consideração a possibilidade de um aumento da permeabilidade quando em serviço, devido a várias causas físico-químicas, tais como a ação do congelamento, ataque por sulfatos e expansão álcalis-agregado (LAPA, 2008).

A proporção de cimento é de vital importância para assegurar uma adequada compacidade e impermeabilidade do concreto. Concretos com altas quantidades de cimento, contanto que não dêem lugar a retrações, que provocariam uma fissuração indesejável, são muito mais duráveis que os concretos pobres em cimento, ainda que ambos alcancem a mesma resistência mecânica. Esta afirmativa só será verdadeira se na mesma proporção que cresce o consumo de cimento, houver uma redução da relação água-cimento (ANDRADE, 1992).

Ainda segundo Andrade (1992), no caso de estruturas situadas nas zonas de marés ou as submetidas à ação dos sais de degelo, é necessário utilizar métodos complementares de proteção das armaduras. Os principais métodos utilizados até agora se resumem na Tabela 3.7, onde são expostos também seu campo de aplicação e suas vantagens e desvantagens (ANDRADE, 1992).

Tabela 3.7: Métodos complementares de proteção das armaduras

Proteção de armaduras					
Características	Métodos que atuam sobre o aço			Métodos que atuam sobre o concreto	
Tipo de método	Proteção catódica	Cobrimentos metálicos (galvanização)	Pinturas epóxis	Aditivos inibidores de corrosão	Pinturas epóxis, cera, etc
Campo de aplicação	Qualquer	Ataques por água do mar, carbonatação	Qualquer	Ataques por cloretos adicionados durante o amassamento, carbonatação.	Qualquer
Vantagens	Único método eficaz em corrosão já iniciada.	- Facilidade de operação - Custo relativo - Sem manutenção	- Sem manutenção - Eficaz contra corrosão por pite	- Sem manutenção - Fácil aplicação - Custo relativo	Protegem ao mesmo tempo o concreto
Inconvenientes	- Pessoal qualificado - Controle contínuo	- Deteriorações locais por manipulação e transporte. - Ineficiente na proteção contra a corrosão por pite causada por cloretos.	- Custo elevado - Colocação na obra - Baixa aderência entre o produto e a barra de aço.	- Uso de quantidade ótima - Regiões com diferentes suscetibilidades à corrosão	- Custo relativo - Necessidade de manutenção - Retenção de água nos poros, favorece a corrosão.

Fonte: (ANDRADE, 1992)

A qualidade do concreto e a espessura da camada de revestimento são fatores fundamentais na proteção das armaduras. Quanto melhor for a qualidade do concreto e maior o revestimento, maior será o intervalo de tempo necessário para que a frente de carbonatação e os íons cloretos atinjam a superfície das armaduras (LAPA, 2008).

Citando Aguiar (2006):

“É preciso estudar melhor a interação entre a camada superficial do concreto e o meio ambiente, além dos mecanismos de transporte dos agentes despassivadores das armaduras, que são os responsáveis pelo início dos processos de deterioração.”

3.3.2.5 Causas biológicas de deterioração das estruturas de concreto

Lapa (2008) descreve o item referente às causas biológicas da forma como se segue:

A biodeterioração provoca mudanças indesejáveis nas propriedades do material, devido à ação de microorganismos. Esses microorganismos podem atuar sobre o concreto em ações deletérias contra a pasta de cimento e os agregados, interferindo em sua estética, reduzindo sua durabilidade comprometendo sua integridade.

O concreto é considerado um material bioreceptivo ao ataque microbiológico, devido às condições de rugosidade, porosidade, umidade e composição química, que combinadas com as condições ambientais, como umidade, temperatura e luminosidade, podem promover a biodeterioração do concreto.

Os principais microorganismos envolvidos nos mecanismos são as algas, fungos, bactérias, líquens e protozoários (SILVA & PINHEIRO, 2005). A deterioração provocada pelos microorganismos está relacionada com seu crescimento e sua reprodução, sua fixação e seu processo metabólico.

Os mecanismos de biodegradação, que promovem o envelhecimento, comprometem a durabilidade e integridade do concreto, podem se manifestar através de formação de biofilme, ataque ácido e tensões provocadas pela cristalização de sais (SILVA & PINHEIRO, 2005).

Os biofilmes são ecossistemas microbianos, de consistência gelatinosa, que se apresentam em forma de película, na presença de água ou umidade. Depois de estabelecido, o biofilme pode proporcionar a fixação de outros microorganismos e adesão de outras partículas, bem como se destacar da superfície, criando microambientes com concentrações de pH e oxigênio diferenciados, levando à formação de manchas e pátinas biológicas características da biodeterioração estética.

O biofilme também pode funcionar como camada impermeabilizante que, se por um lado impede a penetração de água no seu interior, por outro, impede o fluxo inverso, fazendo com que os sais, cristalizados no seu interior, acelerem a deterioração do material por expansão.

Os produtos metabólicos ácidos reagem com os elementos minerais do concreto, promovendo sua dissolução, alterando sua microestrutura e reduzindo sua durabilidade. Os ácidos excretados durante o metabolismo dos microorganismos, em contato com a pasta de cimento, podem ser convertidos em sais capazes de causar tensões e esfoliações no material.

Na prática o mais significativo ataque biológico ao concreto é o que ocorre em esgotos. No interior dos esgotos, em condições anaeróbicas, as bactérias produzem ácido sulfídrico, que é um composto de pouca agressividade ao concreto. Ao escapar de dentro do esgoto para o ar, o ácido sulfídrico vai colocar-se ao alcance de bactérias aeróbicas, que habitam na superfície livre do esgoto. Estas bactérias transformam o ácido sulfídrico em ácido sulfúrico, que é bastante agressivo ao concreto, dando-se um ataque de ácidos de sulfatos, que provoca uma rápida degradação da superfície livre interna da estrutura de concreto em contato com o esgoto (AGUIAR & BAPTISTA, 2011). Este tópico será mais bem discutido no Capítulo 4.

Outra forma comum de ataque biológico é o crescimento de raízes de plantas, algas e líquens em fendas ou zonas porosas do concreto, originando forças expansivas de degradam mecanicamente o concreto, facilitando o transporte de outros agentes agressivos para seu interior, conforme Figura 3.23 (AGUIAR, 2006).



Figura 3.23: Crescimento de raízes de plantas em fendas do concreto. Fonte: (AGUIAR, 2006)

Em estruturas marinhas subaquáticas, as plantas e cracas que se desenvolvem nas superfícies do concreto têm efeito benéfico, pelo fato de consumirem o oxigênio antes que ele possa penetrar no concreto, inibindo o processo de corrosão das armaduras. Observa-se na Figura 3.24 que as cracas estão protegendo a estrutura contra a deterioração.



Figura 3.24: Cracas na linha d'água protegendo as estruturas marinhas, inibindo assim o processo de corrosão das armaduras. Fonte: (AGUIAR, 2006)

4. EFEITOS DO TRANSPORTE DE ESGOTO SANITÁRIO E ÁGUAS PLUVIAIS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Este trabalho tratará exclusivamente dos efeitos mais recorrentes da deterioração, em tubulações de concreto através do transporte de águas pluviais e do esgoto sanitário, predominantemente doméstico.

No que concerne às galerias de águas pluviais, e também às tubulações de esgoto, com o passar dos anos, as estruturas de concreto utilizadas sofrem um desgaste gradual pelo escoamento (das águas e esgotos), que, normalmente, possuem sedimentos sólidos, esgotos clandestinos (no caso das galerias de águas pluviais) e contaminações químicas oriundas de efluentes industriais. Os desgastes refletem em prejuízos econômicos relevantes, pois, por um lado, representam a degradação do significativo capital nelas investido e, por outro lado, implicam em intervenções de manutenção, na maior parte das vezes, em caráter emergencial (AGUIAR & BAPTISTA, 2011).

Ainda segundo os autores, os estudos envolvendo as patologias em galerias de águas pluviais e tubulações de esgoto, particularmente as erosões, são escassos na literatura nacional e internacional. O maior problema refere-se ao elevado grau de dificuldade para se obter essas informações, uma vez que exige incursões no interior das galerias, trabalho em ambiente confinado, que requer diversos procedimentos de segurança em função dos altos riscos envolvidos devido à presença de gases tóxicos, pontas de ferros salientes, grandes cavidades, obstruções, etc.

A deterioração dada através de desgaste superficial (abrasão e cavitação) e por ataque de sulfatos são mais visíveis em galerias de águas pluviais, enquanto que a corrosão biogênica pode ser observada com mais facilidade em sistemas de transporte de esgoto (não deixando de ocorrer no sistema de macrodrenagem).

4.1 Deterioração por Abrasão

A erosão do concreto por abrasão geralmente ocorre devido ao carreamento pela água de partículas sólidas (materiais abrasivos) como argila, areia, cascalhos etc. Os materiais abrasivos são aqueles que, por serem mais duros, são capazes de arrancar por fricção as partículas de outros corpos, segundo Leonardo (2002).

Os detritos transportados pelos fluxos d'água variam desde seus tipos até suas durezas, podendo ser areias, pedras, escombros, cascalhos, restos vegetais, etc.

A aparência das superfícies das estruturas hidráulicas que sofrem erosão por abrasão é normalmente lisa e polida. Segundo Kormann (2002), esta aparência é facilmente diferenciada da superfície de concreto que sofreu cavitação, pois esta apresenta buracos ou cavidades.

Conforme MacInnis (1997) *apud* Aguiar & Baptista (2011), a erosão causada ao concreto pela ação abrasiva de materiais no escoamento pode ser tão severa quanto a erosão por cavitação, que tende a aumentar com a perda da camada superficial, que, normalmente, é mais resistente que as camadas inferiores, mas, geralmente, não causa danos tão catastróficos.

A taxa de desgaste ou profundidade de ataque é dependente de alguns fatores, tais como tamanho, forma, dureza, quantidade de partículas sendo transportada no leito do fluxo, velocidade da água e qualidade do concreto, segundo Mehta e Monteiro (1994).

A resistência à abrasão é uma característica importante nas superfícies sujeitas a movimentação de cargas. A destruição da estrutura do material se processa pelo rompimento dos agregados ou pelo seu arrancamento. A utilização de agregados mais duros e de maior tamanho melhora a qualidade da pasta de cimento e contribuem na redução do desgaste (LEONARDO, 2002).

Quanto mais turbulentos forem os fluxos, juntamente com as forças de impacto ocasionadas pelos detritos, mais abrangente será a abrasão, conforme mostrado na Figura 4.1.



Figura 4.1: Deterioração causada por abrasão em galeria. (Fonte: AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

Geralmente, a resistência à abrasão do concreto cresce proporcionalmente com a resistência à compressão, e, por causa disto, ela depende muito do tipo, da granulometria dos materiais e da coesão do concreto. Em superfícies de concreto sujeitas à abrasão, o consumo mínimo de cimento deve ser de 350 kg/m^3 , segundo Leonardo (2002).

De maneira geral, a pasta de cimento endurecida não possui alta resistência ao atrito. A vida útil do concreto pode ser seriamente diminuída sob condições de ciclos repetidos de atrito, principalmente quando a pasta possui alta porosidade ou baixa resistência e é inadequadamente protegida por um agregado que não possui resistência ao desgaste (VILASBOAS, 2004).

A erosão por abrasão atinge principalmente a laje de piso e a parte inferior das paredes das galerias, por causa do carregamento constante de partículas sólidas em suspensão. Observou-se que existe uma forte correlação entre o nível do desgaste do concreto do piso e das bases das paredes com a qualidade do material empregado na construção, o tipo de sedimentos transportados e o tempo de exposição (AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

As erosões por abrasão contribuem lentamente e de forma decisiva na degradação das estruturas de concreto, pois causam a redução de espessura dos pisos e das paredes das estruturas de concreto. Segundo Aguiar & Baptista (2011), a perda da camada superior de concreto do piso, além de comprometer a parte estrutural das galerias, interfere também no seu comportamento hidráulico, uma vez que as armaduras da laje ficam expostas e salientes acima da linha de água, causando a retenção de lixos e escombros, reduzindo a velocidade dos fluxos de água conforme visto na Figura 4.2.



Figura 4.2: Armaduras expostas (lado esquerdo inferior) por causa da erosão. (Fonte: AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

4.2 Deterioração por Cavitação

O dano devido à cavitação sempre ocorre a jusante da fonte que o provocou. Dentre as fontes estão as irregularidades superficiais e as mudanças bruscas na direção do escoamento, particularmente os degraus nas galerias de águas pluviais

As irregularidades podem ser de alguns tipos, sendo que os mais frequentes são ressaltos, rugosidades, mudanças na inclinação e curvaturas, bem como saliências em

juntas. A Figura 4.3 ilustra os tipos de irregularidades, juntamente com as prováveis regiões a serem afetadas pela cavitação.

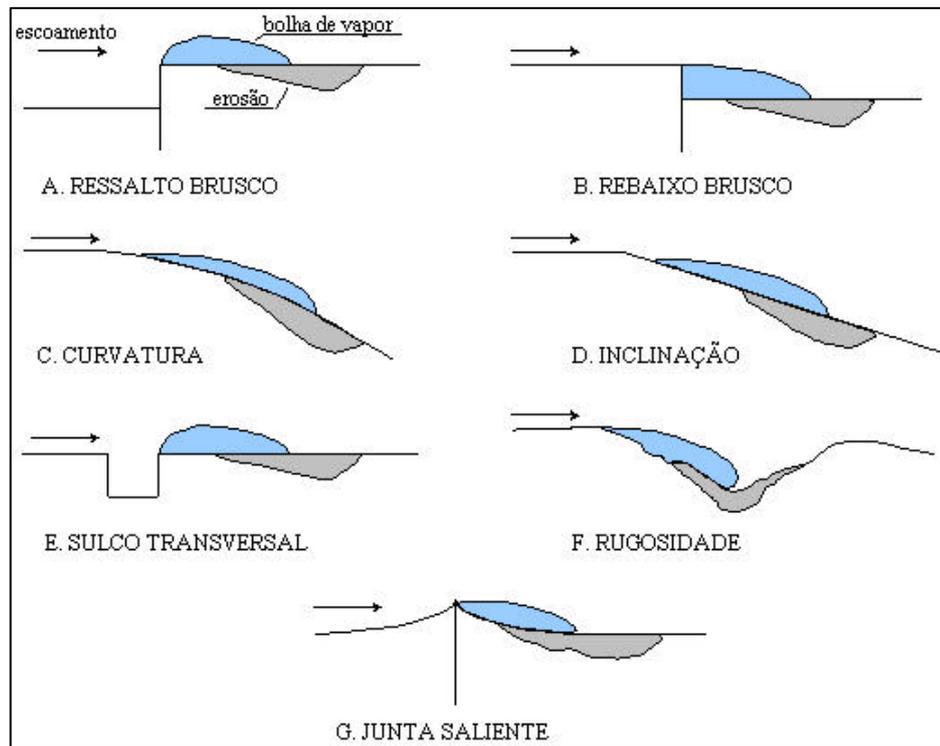


Figura 4.3: Tipos de irregularidades e prováveis zonas deterioradas pela cavitação.

Fonte: (QUINTELA & RAMOS, 1980 In: KORMANN, 2002)

A elevação da velocidade local é ocasionada por sobressaltos existentes na superfície de escoamento, havendo queda de pressão a valores próximos aos da pressão de vapor, formando-se as bolhas, segundo Kormann (2002).

Segundo Neville (1982), a principal característica do fenômeno é a instabilidade das bolhas, visto que, quando são transportadas pelo fluxo para regiões de pressões mais elevadas, elas colapsam ou implodem repentinamente. A água preenche velozmente os pequenos vazios e pressões altíssimas são atingidas em áreas infinitesimais e em intervalos de tempo extremamente pequenos. Com a repetição deste fenômeno nas mesmas partes do concreto, resultam as escarificações.

A Figura 4.4 mostra uma galeria de água pluvial sofrendo desgaste da erosão nas paredes, onde percebe-se o concreto mais deteriorado e a armadura aparente; e a cavitação na região do degrau, que se encontra deformado no local onde houve a implosão das bolhas de vapor d'água, devido a alteração brusca da velocidade ou da direção do escoamento.



Figura 4.4: Erosão nas paredes e cavitação na região do degrau, em galeria de água pluvial.
Fonte: (AGUIAR, 2006)

Os danos podem se desenvolver muito rapidamente depois de iniciado o processo. Em muitos casos, a simples substituição do concreto erodido não garante o bom desempenho em longo prazo, necessitando de técnicas de reparo mais aprimoradas, que envolvem a utilização de concretos mais resistentes e tratamentos superficiais mais adequados (AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

A cavitação pode ocorrer tanto em dutos fechados como em canais abertos; neste último caso, mesmo em velocidades baixas, em torno de 7,0 m/s, segundo Mehta e Monteiro (1994).

Como a cavitação não ocorre uniformemente, a aparência da superfície que sofreu cavitação é irregular, riscada e perfurada, conforme Figura 4.5, aspecto oposto das superfícies que sofreram abrasão, conforme comenta Neville (1982).



Figura 4.5: Efeito da cavitação em estrutura hidráulica de concreto. Fonte: (MACINNIS *et al.*, 1997 In: AGUIAR, 2006)

Segundo Kormann (2002), as microfissuras na superfície do concreto, bem como entre a argamassa e os agregados, contribuem para que os danos provocados pela cavitação sejam maiores ainda. Na região microfissurada do concreto, ondas compressivas de água podem causar tensões de tração que propagam as microfissuras já existentes. A repetição do esforço causado pelas ondas pode fazer com que o material se deteriore e pedaços do mesmo se descolem, criando ressaltos na superfície.

Borsari (1986) *apud* Aguiar & Baptista (2011), explica que a erosão por cavitação tende a desgastar a argamassa, promovendo o descolamento dos agregados. E ocorrido o desgaste pela cavitação, ele só tende a aumentar a intensidade do fenômeno, pois com a deterioração da argamassa, os agregados ficam expostos, formando novas irregularidades, favorecendo o fenômeno cavitante.

Em vistorias feitas nas diversas galerias de Belo Horizonte observou-se que existe uma forte correlação entre as erosões por cavitação e as declividades da laje de piso, particularmente as mais acentuadas, acima de 5%, por que nestes casos, geralmente, existem degraus, com espelho variando entre 0,5 a 1,0 m de altura, criados para conformar o perfil do canal e reduzir a velocidade do escoamento, conforme mostrado na Figura 4.6 (AGUIAR & BAPTISTA, 2011).



Figura 4.6: Galeria construída com degraus, a fim de reduzir a velocidade do fluxo da água. (Fonte: AGUIAR, 2006)

Ainda segundo os autores, as cavidades provenientes da cavitação variam de tamanho e profundidade, podendo ser encontradas enormes crateras, conforme mostrado na Figura 4.7, com grande risco de colapso da estrutura, requerendo intervenções urgentes para restabelecer a estabilidade do local, uma vez que, ao colapsar, a galeria pode levar consigo edificações, veículos e pessoas que estão ao seu redor.



Figura 4.7: Cratera com profundidade superior a um metro, logo após degrau. (Fonte: AGUIAR, 2006)

Vale ressaltar que este mecanismo de desgaste é recorrente após os degraus na maioria das galerias, mas não ocorre necessariamente em todos os ressaltos, pois depende do perfil do canal, da qualidade do material empregado e do tempo de construção da obra. Uma vez instaurado o processo de desgaste, observa-se que ele é progressivo, tanto a jusante, como a montante do ponto inicial de cavitação (AGUIAR & BAPTISTA, 2011).

Frente ao avanço que houve nos estudos da cavitação nas últimas décadas, tanto ao seu entendimento quanto ao estudo da resistência dos materiais, pode-se assegurar que as estruturas hidráulicas de concreto podem ser projetadas para serem, relativamente, resistentes aos efeitos da cavitação. Para tal, é necessário que o projeto hidráulico seja ausente de curvaturas abruptas e o acabamento da superfície do concreto seja liso, alinhado, sem defeitos como saliências e depressões (NEVILLE, 1982).

Segundo Kormann (2002), quanto menos irregularidades existirem na superfície acabada de concreto, menor será a probabilidade da cavitação provocar danos. São

diversas as especificações de acabamento das superfícies, porém, algumas têm sido mais utilizadas. Autores sugerem que as irregularidades sejam atenuadas para inclinações de 1:20, 1:50 e 1:100, à medida em que as pressões locais forem baixas, e as velocidades estiverem no intervalo de 12 a 27 m/s, 27 a 36 m/s e maiores que 36 m/s, respectivamente. É recomendado que as alturas das irregularidades sejam limitadas a 3,2 mm e 6,4 mm, dependendo da forma executiva da superfície e da irregularidade longitudinal ou transversal ao escoamento.

O acabamento perfeitamente liso de uma superfície de concreto é praticamente impossível. Pode ser realizado esmerilhamento superficial, porém este serviço é oneroso e para grandes áreas, é impraticável. A obtenção da especificação de declividade máxima de 1:100, para velocidades acima de 36 m/s, é outro quesito de difícil concepção. Entre outras ressalvas, não se pode afirmar que a superfície não venha sofrer qualquer outro tipo de erosão, por exemplo, a abrasão, criando-se assim, irregularidades que facilitariam a cavitação. A utilização destas técnicas reduz-se a pequenas áreas, que possam ser reparadas continuamente (BORSARI, 1986).

A seguir, de acordo com Vilasboas (2004), encontram-se algumas recomendações que devem ser adotadas para eliminar ou minimizar a degradação por desgaste superficial do concreto:

- A velocidade de erosão depende da quantidade, forma, tamanho, massa específica e dureza das partículas transportadas pela água, bem como da sua velocidade, da presença de turbilhões e também da qualidade do concreto. Como no caso da abrasão em geral, a qualidade do concreto, aparentemente, pode ser avaliada pela resistência à compressão, mas também é importante a composição da mistura. Em particular, os concretos com agregados de maior tamanho sofrem menos erosão do que argamassas de mesma resistência e os agregados com maior dureza aumentam a resistência à abrasão. Segundo Neville (1982), no entanto, em certas circunstâncias, os agregados de tamanho menor levam a uma abrasão mais uniforme da superfície.

Para condições severas de erosão ou abrasão, recomenda-se que, além do uso de agregados com alta dureza, o concreto deva ser dosado para atender, aos 28 dias de idade, uma resistência característica à compressão de 40 MPa e curado adequadamente antes da exposição ao ambiente agressivo (METHA & MONTEIRO, 1994).

- Deve-se observar que o processo de atrito físico do concreto ocorre na superfície; portanto, atenção especial deve ser dada para assegurar que, ao menos, o concreto na superfície seja de alta qualidade. Para reduzir a formação de uma superfície fraca, recomenda-se postergar o seu acabamento até que o concreto tenha perdido a água de exsudação superficial.

Em função do baixo valor da relação água/cimento, camadas superficiais de concreto, contendo aditivos de látex ou superplastificantes, estão-se tornando cada vez mais utilizadas para resistência à abrasão ou erosão. Do mesmo modo, o uso de adições minerais, tais como a microssílica, apresenta possibilidades interessantes, porque além de causar uma redução substancial na porosidade do concreto depois da cura úmida, minimiza a sua exsudação.

A resistência à deterioração por infiltração de fluidos e redução do desgaste devido ao atrito também podem ser atingidas pela aplicação de soluções endurecedoras de superfícies. As soluções mais comumente utilizadas são de fluossilicato de zinco ou magnésio e de silicato de sódio ou potássio, que reagem com o hidróxido de cálcio, presente na pasta de cimento Portland, para formar compostos insolúveis, selando os poros capilares próximos ou na superfície e aumentando um pouco a resistência do concreto aos ácidos.

O grau de proteção dos diferentes tipos de tratamento é variável, mas, em qualquer caso, é essencial que o revestimento resultante do procedimento seja bem aderente ao concreto e não seja danificado por ações mecânicas, de modo que se faz necessário, geralmente, um acesso para inspeção e renovação do revestimento.

- Para solucionar os problemas originados pela cavitação, é necessário remover as causas do fenômeno, tais como: desalinhamentos da superfície ou mudanças bruscas

na declividade, ou seja, executar superfícies lisas e bem acabadas, isentas de irregularidades como depressões, saliências e juntas, e com geometria que impeça o descolamento do fluxo do líquido sobre si. A degradação por cavitação não evolui de forma uniforme; normalmente, depois de um período inicial em que os danos são pequenos, ocorre uma deterioração rápida, seguida de um período de deterioração mais lenta.

4.3 Deterioração por Ataque Químico

Erosão por ataques químicos é outra causa importante de deterioração das galerias de águas pluviais. As estruturas podem ter alterações na composição de sua massa, pois os produtos resultantes da hidratação do cimento são susceptíveis às reações que podem ser provocadas pela presença da água e por elementos contidos nesta, como comenta Neville (1982). A água pode agir como solvente dos diversos compostos do cimento Portland endurecido e de agentes agressivos do meio. Se a água contiver ácidos e sais reagentes dissolvidos em seu meio, os efeitos erosivos podem ser ainda piores.

Segundo Aguiar e Baptista (2011), os fatores determinantes para que ocorram ataques químicos no concreto das estruturas hidráulicas são os elementos resultantes da hidratação do cimento, vulneráveis à presença de água e compostos agressivos dissolvidos, temperatura, umidade e condições do meio no qual as estruturas estiverem inseridas.

Os compostos resultantes da hidratação do cimento mais vulneráveis às reações são o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Se o concreto contiver agregados calcários, estes também poderão sofrer alterações químicas deletérias, segundo Neville (1982).

O pH da água também é responsável pela agressividade às estruturas de concreto. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que qualquer meio com pH abaixo de 12,5 pode ser agressivo à pasta de cimento endurecida. Assim, toda água seria nociva ao concreto,

porém, o grau de agressividade está diretamente relacionado com a sua permeabilidade. Águas com pH maior que 6 podem ser consideradas inofensivas se o concreto possuir pouca permeabilidade, de acordo com Kormann (2002).

Quanto a este aspecto, Neville (1982) explica que, se o pH da água estiver entre 5,5 e 6,5 o ataque aos compostos resultantes da hidratação será brando, abaixo de 5,5 será severo, e se estiver abaixo de 4,5 será muito danoso às estruturas de concreto. Águas correntes com pH abaixo de 6,5 lixiviam o CaO (óxido de cálcio) do concreto, diminuindo a resistência e aumentando a quantidade de poros da massa, aumentando sua permeabilidade.

Conforme comenta Canovas (1988), a água, quando não contém substâncias nocivas, é um bom aliado do concreto, especialmente durante a sua fase de cura. Entretanto, quando é pura ou traz dissolvidas substâncias químicas procedentes do ar, da terra ou de produtos químicos de despejo, converte-se em grande inimigo.

Devido ao elevado pH do concreto, raramente microorganismos conseguem desenvolver-se nas estruturas. Porém, em regiões tropicais, alguns tipos de algas, fungos e bactérias fixam-se nas superfícies de concreto e utilizam o nitrogênio do ar como fonte de energia. Assim sendo, com o metabolismo destes, há formação de ácido nítrico, que é agressivo ao concreto, de acordo com Neville (1982).

Apesar de existirem diversas situações em que ocorre deterioração por ataques químicos, as mais relevantes que geram erosão nas superfícies do concreto das galerias de águas pluviais são os sulfatos e corrosão biogênica.

4.3.1 Deterioração causada por sulfatos

O ataque por sulfatos foi previamente abordado como forma de deterioração dos demais tipos de estruturas de concreto. No caso das galerias de água pluviais ele é também de grande importância.

Um importante composto formado pela reação com sulfato é a etringita, que é o produto resultante da reação do sulfato de cálcio com o aluminato de cálcio hidratado presente na pasta de cimento. Além de ser um composto extremamente frágil, a formação da etringita causa expansão, podendo fissurar o concreto. Mas os problemas de ataque por sulfatos não consistem apenas nas reações expansivas e na fissuração, mas também há redução da resistência do concreto devido à perda de coesão da pasta de cimento e aderência da pasta aos agregados, segundo Neville (1982).

Segundo Poggiali (2009), quando o concreto for confeccionado com alto teor de sulfato ou quando o agregado estiver contaminado com gipsita, ou seja, quando a fonte de íons de sulfato é interna ao concreto, ocorre o fenômeno da formação de etringita tardia.

A expansão na pasta causada pela formação de etringita tardia origina fissuras na pasta e na interface pasta-agregado. Subseqüentemente, a etringita se recristaliza nas fissuras a partir de cristais submicroscópicos dispersos ao longo de toda a pasta de cimento, como na Figura 4.8. (MEHTA & MONTEIRO, 2008 *apud* POGGIALI, 2009).

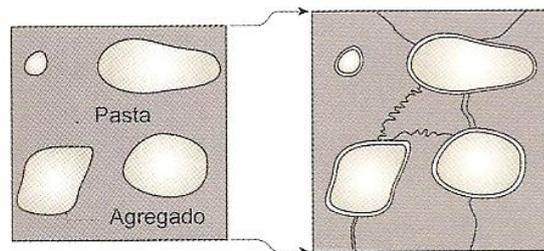


Figura 4.8: Representação diagramática da expansão de argamassa ou concreto pela formação de etringita tardia. Fonte: (MEHTA & MONTEIRO, 2008 *apud* POGGIALI, 2009).

A Figura 4.9 ilustra a formação de etringita tardia, em consequência de alta permeabilidade do concreto, por onde o sulfato tardio é liberado e transportado pelo concreto por meio da água.



Figura 4.9: Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia. Fonte: (POGGIALI, 2009).

Considerando a imagem acima, é fácil concluir que os fatores que influenciam o ataque por sulfatos são: a quantidade e natureza do sulfato (sua concentração); o nível da água e sua variação sazonal; porosidade do solo e o fluxo da água subterrânea; a forma de construção e a qualidade do concreto (tipo de cimento empregado). Como é impossível impedir que a água com sulfato tenha contato com o concreto, a única forma de controlar o ataque de sulfatos é atuando na qualidade do concreto, ou seja, permeabilidade do material.

A deterioração do concreto devido a ataque por sulfato pode ser controlada pelo consumo de cimento (relação água/cimento), tipo de cimento e aditivos minerais. Os resultados de um estudo de longo prazo revelaram que a baixa permeabilidade do concreto (alto consumo de cimento) era mais importante na redução da taxa de deterioração do que o teor de C_3A no cimento (Figura 4.10 a). A figura à direita (Figura 4.10 b) mostra que, no caso de um cimento Portland com alto teor de C_3A , a adição de aditivos minerais (cinzas volantes) oferece uma alternativa pra controlar o ataque por sulfato, reduzindo o teor efetivo de C_3A no material cimentício total (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

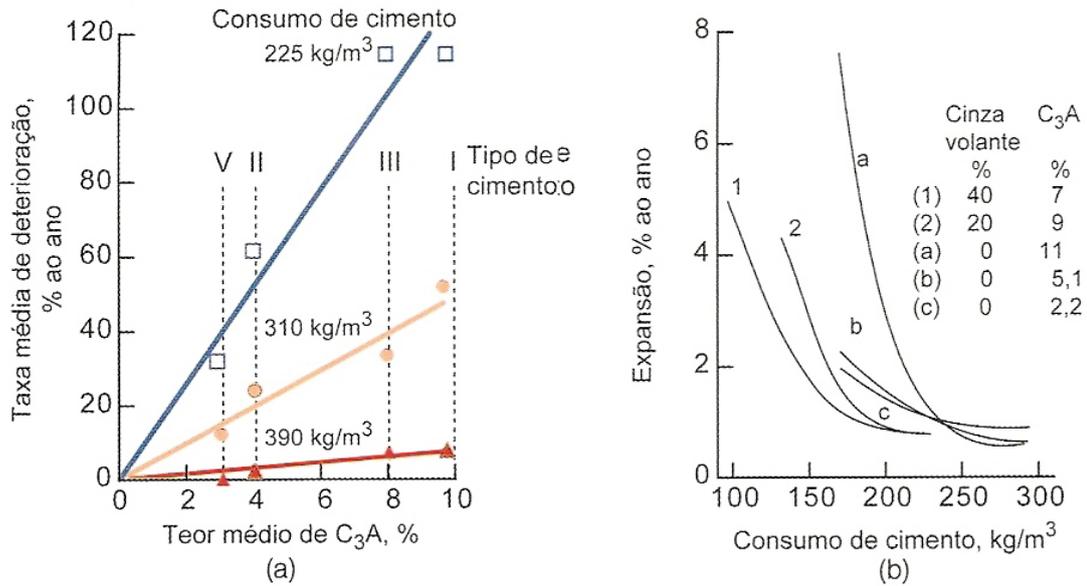


Figura 4.10: a) Efeitos do tipo e consumo de cimento sobre o ataque por sulfato ao concreto; b) Efeitos da adição de cinzas volantes sobre o ataque por sulfato ao concreto. Fonte: (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Para conferir baixa permeabilidade ao concreto, devemos garantir uma espessura adequada para a peça de concreto, fazer uso de um alto consumo de cimento e de uma baixa relação água/cimento, adensar e curar o concreto de acordo com especificações técnicas. A utilização de cimento resistente à ação de sulfato ou compostos pode amenizar os efeitos advindos de fissurações devido à retração, congelamento, corrosão da armadura ou outro fenômeno de deterioração do concreto (POGGIALI, 2009).

4.3.2 Corrosão biogênica

A corrosão biogênica é uma das formas mais comuns de deterioração (biodeterioração) do concreto em tubulações de esgotos, mas podem também ocorrer

em galerias de águas pluviais, quando estas recebem clandestinamente em seu fluxo, lançamento de esgotos residenciais e industriais (Figura 4.11).



Figura 4.11: Galeria de águas pluviais contaminada por esgotos, apresentando teto manchado devido ao ataque biológico. (Fonte: AGUIAR, 2006)

Segundo Tsutiya & Alem Sobrinho (2000), sistemas de coleta e transporte de esgoto sanitário, particularmente aqueles de maior porte e localizados em áreas de temperaturas mais altas, apresentam elevado potencial de formação de produtos passíveis de gerar odores ofensivos e corrosão dos condutos de esgoto quando estes são de cimento ou metálicos (aço ou ferro fundido).

As substâncias responsáveis pela geração de odores ofensivos encontradas nos esgotos são, de modo geral, resultantes de decomposição anaeróbia de matéria orgânica contendo enxofre e nitrogênio, e principalmente, pela redução de sulfatos e sulfetos, também em anaerobiose (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).

Ainda segundo os autores, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) é o mais importante gás observado em sistemas de coleta e transporte de esgoto sanitário, associado à

produção de odores desagradáveis, corrosão e toxidez. Ele tem um odor característico de ovo podre, é extremamente tóxico, e é corrosivo a metais como ferro, zinco, cobre, chumbo e cádmio, bem como é precursor para a formação de ácido sulfúrico, o qual corroe concreto, pintura à base de chumbo, metais e outros materiais.

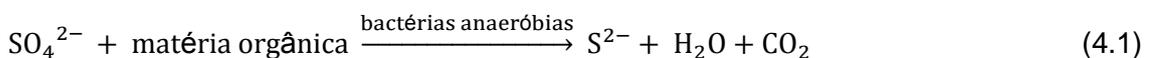
Nos sistemas de coleta e transporte de esgoto sanitário, os problemas relacionados à presença de sulfetos são observados principalmente em coletores tronco, interceptores e emissários, implantados normalmente em concreto, em poços de sucção de elevatórias e também em tubulações metálicas de linhas de recalque de maior porte (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000). Ateremos-nos apenas, aos efeitos no material concreto.

Tsutiya & Alem Sobrinho (2000) descrevem o processo da seguinte forma:

*“Os sulfetos em esgoto sanitário podem ser provenientes de despejos industriais, de águas de infiltração, da decomposição anaeróbia de matéria orgânica contendo enxofre, pela redução de tiosulfato ($S_2O_3^-$), sulfito (SO_3^{2-}), enxofre livre e outros compostos inorgânicos de enxofre eventualmente presentes no esgoto, porém sua principal origem é a redução bacteriana anaeróbia do íon sulfato (SO_4^{2-}), presente no esgoto. A ação de bactérias que reduzem o sulfato para obter energia para sua manutenção e crescimento, e sob condições anaeróbias, dois gêneros de bactérias anaeróbia estrita da espécie **Desulfovibrio**, comumente chamadas de bactérias redutoras de sulfato, podem converter sulfato a sulfeto. (**Dv. Desulfuricans**, **Dv. vulgaris** e **Dv. Salzigens** – principais membros da espécie **Desulfovibrio** associada à transformação.)”*

Com relação às reações, os autores citam que:

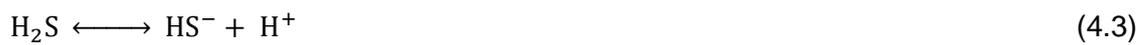
“A reação de redução é normalmente casada com a oxidação de matéria orgânica e, em casos especiais, hidrogênio. Quando se tem oxidação da matéria orgânica, a produção de sulfetos pode ser representada pelas equações 4.1 e 4.2.”





“Considerando que o esgoto doméstico contém bactérias capazes de completar essas reações, bem como matéria orgânica e quantidades variáveis de íon sulfato, o potencial para a produção de sulfetos de hidrogênio sempre existe.

O sulfeto de hidrogênio molecular formado pela redução de sulfato dissolve em água e se dissocia de acordo com a reação de ionização reversível, expressa como nas equações 4.3 e 4.4.”



De acordo com Metcalf & Eddy (1981), uma das conseqüências da presença de gases mal cheirosos do esgoto em sistemas de coleta e transporte, é o perigoso potencial para os trabalhadores. Alguns dos efeitos que a exposição humana ao sulfeto de hidrogênio pode causar são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Efeitos produzidos pela exposição humana ao ar contaminado com várias concentrações de sulfeto de hidrogênio.

Tempo e condições de exposição	Concentração de H ₂ S na atmosfera do sistema de esgoto PPM (em volume)	Efeitos
Exposição prolongada, trabalho leve	5 - 10 (algumas pessoas menos)	Pouco ou nenhum
1 a 2 horas, trabalho leve	10 - 50 (algumas pessoas menos)	Irritações leves nos olhos e nas vias respiratórias, dores de cabeça
6 horas de trabalho manual pesado	cerca de 50	Cegueira temporária
1 hora de trabalho manual pesado	cerca de 100	Limite máximo sem conseqüências sérias

Fonte: (METCALF & EDDY, 1981)

Conforme Tsutiya & Alem Sobrinho (2000), as bactérias redutoras de sulfato a sulfeto podem ocorrer apenas em ambiente anaeróbio, e normalmente se desenvolvem na camada de limo submersa que se forma nas paredes dos condutos de esgoto. A espessura da camada de limo varia normalmente de 1,0 a 1,5 mm, dependendo da velocidade de escoamento dos esgotos. Quando a velocidade é muito baixa, as camadas de limo podem atingir e mesmo ultrapassar 3 mm. A presença de muita areia ou materiais abrasivos e velocidades mais altas podem evitar a formação dessa camada.

A presença de areia no esgoto, fluindo com baixas velocidades (e baixa tensão de arraste) mesmo nas horas de pico, permitirá a deposição de areia nos condutos, formando depósitos que reterão também matéria orgânica, se tornarão anaeróbios, com desenvolvimento de bactérias anaeróbias, resultando em condições adequadas para a geração de sulfetos (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).

Ainda de acordo com os autores, a camada de limo normalmente contém uma população heterogênea de microorganismos. A espessura da camada anaeróbia inerte aumenta gradualmente e, periodicamente, uma porção se desprende da parede do conduto. Sulfato, matéria orgânica e nutrientes são transferidos por difusão para dentro da camada anaeróbia e o sulfeto produzido dentro desta camada se transfere para fora dela, também por difusão. Se existir uma camada aeróbia de limo, em vista da presença de O.D. (oxigênio dissolvido) no líquido (Figura 4.12), o sulfeto deixando a camada anaeróbia será oxidado e não chegará ao líquido. Por outro lado, quando se tem $O.D.=0$ (Figura 4.13), o sulfeto que deixa a camada anaeróbia é incorporado ao fluxo de esgoto.

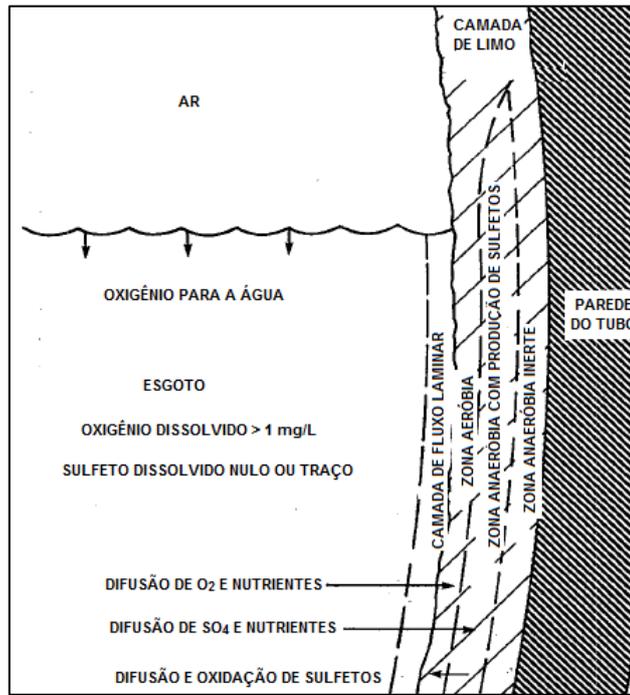


Figura 4.12: Redução de sulfato em condutos de esgoto com oxigênio suficiente para prevenir o transporte de sulfeto para o líquido. Fonte: (BOWKER, 1985)

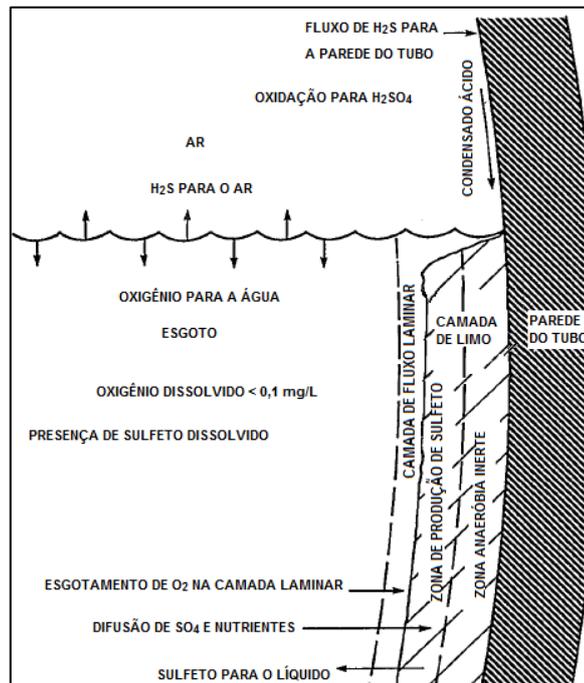


Figura 4.13: Redução de sulfato e transporte do sulfeto produzido, para a corrente líquida. Fonte: (BOWKER, 1985)

O sulfeto de hidrogênio presente na fase líquida escapa para a atmosfera local, em quantidade que depende da sua concentração no líquido. O H_2S é então transferido da atmosfera local para as paredes do conduto, acima da superfície líquida, que são normalmente úmidas devido ao líquido aí condensado. O sulfeto de hidrogênio retido nessa umidade é então convertido a ácido sulfúrico por bactérias aeróbias de gênero *Thiobacillus*, conforme segue na equação 4.5 (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).



A Figura 4.14 ilustra o processo de formação de H_2SO_4 .

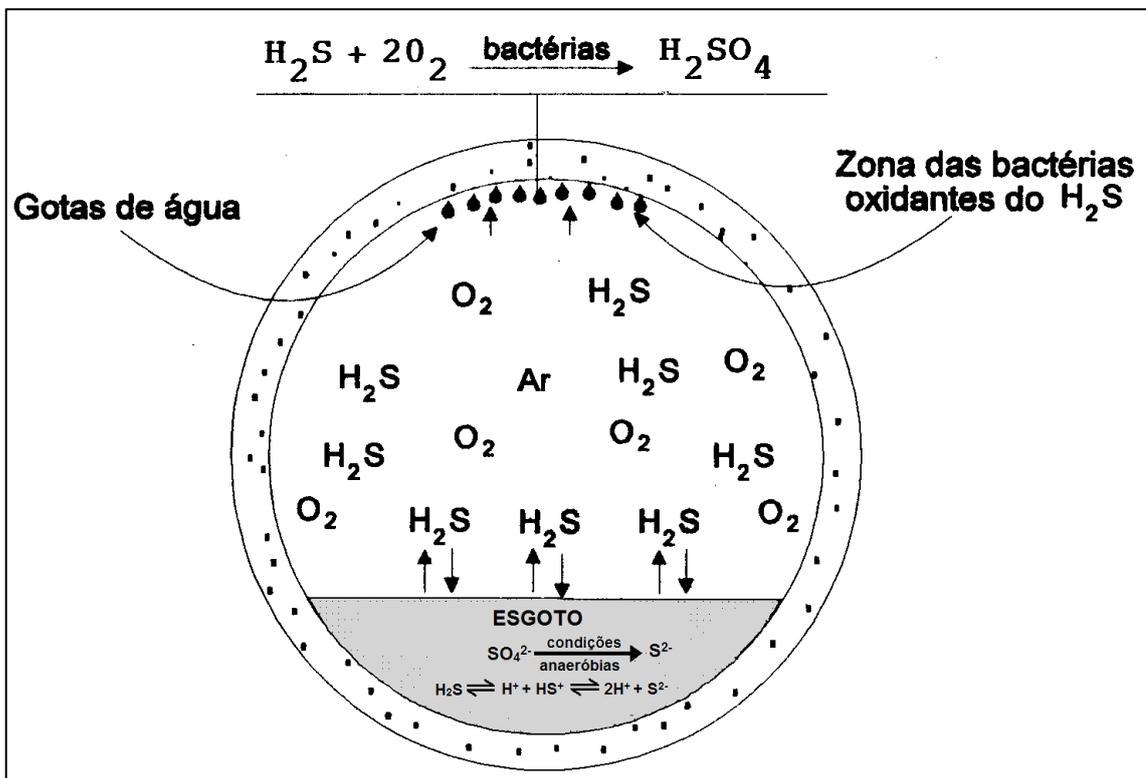


Figura 4.14: Representação do processo de corrosão em tubo de esgoto, causado por sulfeto de hidrogênio. (Fonte: TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000)

O ácido sulfúrico reage com o cimento dos condutos, formando uma pasta que fica fracamente ligada aos agregados inertes do concreto, que se espalha por toda a superfície do conduto acima do nível do líquido. Esta pasta se desprende das paredes do conduto, por seu próprio peso, ou é arrastada pelo líquido quando seu nível sobe (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).

Segundo Aguiar & Baptista (2011), o ácido sulfúrico, que é bastante agressivo ao concreto, vai provocar uma rápida degradação da superfície livre interna da estrutura em contato com o esgoto, com velocidades de ataque na ordem de 5 a 10 mm por ano. Este ataque trata-se do maior potencial de deterioração existente em estruturas com fluxos contaminados de esgotos, conforme mostrado na Figura 4.15.



Figura 4.15: Degradação do concreto por ácido sulfúrico. (Fonte: AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

Os autores afirmam que a corrosão do tubo não se configura de forma uniforme, devido às correntes de ar que controlam a taxa de transferência de H_2S para a sua parede. O fluxo de ar na direção do escoamento do esgoto, aliado às diferenças de temperatura, provoca o aparecimento de correntes transversais. Como a temperatura da parede do tubo é menor que a do esgoto, ocorre o resfriamento do ar que tende a

descer. O ar aquecido pelo esgoto sobe na parte central, resultando, em conjunto com o escoamento axial, um movimento helicoidal duplo. O deslocamento do ar provoca a taxa de transferência máxima de H_2S no topo do conduto.

Outro fator que contribui para a distribuição desigual da corrosão é a migração do ácido sulfúrico para o esgoto, que remove o sulfato de cálcio e as demais impurezas, deixando a parede suscetível a novos ataques, quando o nível do esgoto na tubulação diminui (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).

De acordo com Aguiar & Baptista (2011), em inspeções feitas nas galerias pluviais em Belo Horizonte, os efeitos da corrosão biogênica foram observados principalmente acima da linha de água mais constante, provocando perda de seção de concreto ao longo das paredes, podendo ser tão severa que pode levar, em alguns casos, a erosão completa da parte inferior da parede, conforme Figura 4.16.



Figura 4.16: Severa degradação do concreto corroeu a base da parede da galeria. (Fonte: AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

Os efeitos da corrosão biogênica são observados também nas lajes de teto das galerias, quando o gás sulfídrico presente na atmosfera confinada causa a deterioração superficial do concreto, deixando as armaduras expostas no teto da estrutura. Nas barras de aço desprotegidas instaura-se o processo de corrosão, que vai pouco a pouco consumindo os metais, conforme Figura 4.17, até seu rompimento. A exposição e a conseqüente corrosão das barras de aço são mais relevantes nas obras onde houve deficiência de espessura da camada de cobrimento das armaduras (AGUIAR & BAPTISTA, 2011).



Figura 4.17: Degradação da laje da galeria, provocando exposição da armadura. (Fonte: AGUIAR & BAPTISTA, 2011)

De modo geral, as maiores taxas de corrosão ocorrem na parte superior e nas proximidades da superfície líquida dos condutos, conforme ilustrado na Figura 4.18.

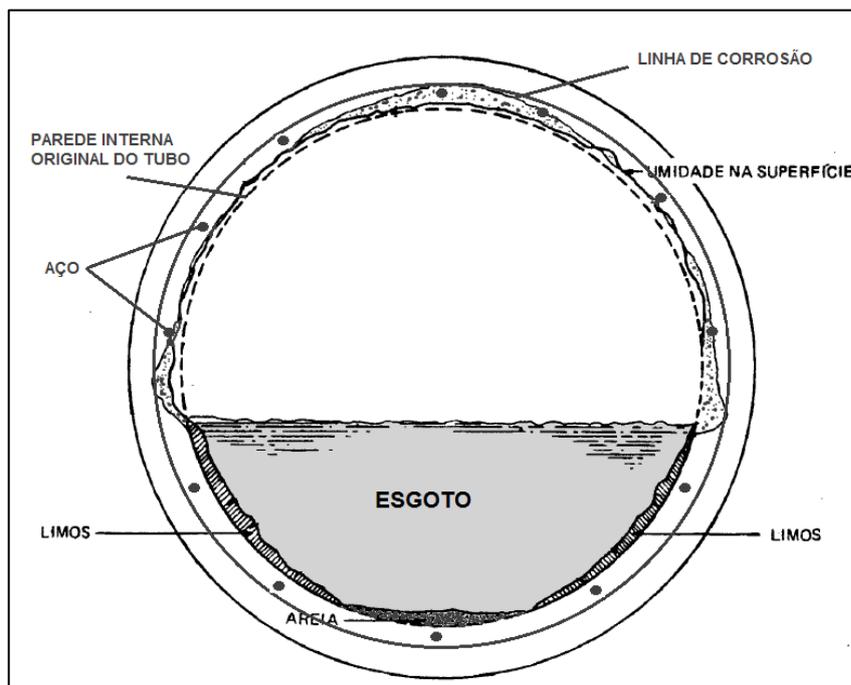


Figura 4.18: Representação esquemática de desenvolvimento típico de corrosão em tubos de concreto armado. Fonte: (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000)

As NBR 9649:1986 – Projeto de Redes Coletoras de Esgoto Sanitário e NBR 12207:1992 – Projeto de Interceptores de Esgoto Sanitário, ao imporem os valores mínimos da tensão de arraste de 1,0 Pa e 1,5 Pa respectivamente, visam evitar a formação de depósitos de material sólidos nas tubulações e minimizar a formação do limo biológico nas paredes das tubulações, evitando, ou minimizando a geração de sulfetos no sistema de coleta e transporte de esgoto. O valor maior de tensão tratativa mínima (1,5 Pa) para interceptores representa maior segurança e se justifica, por serem as suas tubulações de concreto, que são sujeitas à corrosão por H_2S .

Segundo Tsutiya & Alem Sobrinho (2000), quando existem condições para a formação de H_2S nos condutos de esgoto, as alternativas mais recomendadas são aquelas capazes de inibir a formação de sulfetos, seja pela aeração ou aplicação de oxigênio puro, de modo a evitar a anaerobiose, seja pela aplicação de produtos químicos oxidantes como cloro ou peróxido de hidrogênio, ou ainda pelo fornecimento de uma

fonte alternativa de oxigênio combinado, para as bactérias, como a adição de nitrato de sódio ou nitrato de amônio.

A limpeza periódica de trechos críticos também é uma medida que pode contribuir para a minimização da produção de H₂S no esgoto sanitário.

Tendo em vista que nos sistemas de coleta e transporte de esgoto os cuidados tomados na fase de projeto e mesmo as medidas complementares para controle da produção de H₂S não garantem a sua total eliminação, a escolha adequada de materiais para a construção dos condutos de esgoto sanitário é de grande importância (TSUTIYA & ALEM SOBRINHO, 2000).

A adoção da camada de sacrifício para condutores de concreto, inclusive utilizando agregado calcário para o aumento da alcalinidade, baseia-se no fato de a corrosão se dar de forma uniforme entre o cimento e o agregado. O agregado, serviria também para neutralizar o ácido sulfúrico formado, não deixando só por conta do ataque ao cimento. Isso retardaria o avanço da corrosão (TAKAHASHI, 1988).

Outra maneira de prolongar a vida útil dos condutos é a adoção de cimento que seja mais resistente ao ataque do H₂SO₄ e de medidas que diminuam a porosidade do concreto. A utilização de cimento Portland de escória de alto forno ou cimento pozolânico aumenta a resistência ao ácido sulfúrico. A diminuição de porosidade pode ser conseguida aumentando convenientemente o consumo de cimento e limitando o fator água/cimento (TAKAHASHI, 1988).

4.4 Demais Patologias Recorrentes

4.4.1 Infiltrações

As infiltrações são caracterizadas pelo aparecimento de água ou outros líquidos, através da estrutura de concreto, oriundas do exterior, principalmente quando o nível de água subterrâneo é elevado, conforme mostrado na Figura 4.19. As causas mais prováveis são trincas na estrutura, porosidade do concreto, defeitos de concretagem e falhas nas juntas de construção (AGUIAR & BAPTISTA, 2009).



Figura 4.19: Infiltrações pelas paredes de uma galeria. Fonte: (AGUIAR & BAPTISTA, 2009)

4.4.2 Trincas

Ainda citando Aguiar & Baptista (2009), as trincas são caracterizadas pelo aparecimento de fissuras de grande abertura no concreto que indicam uma deficiência do comportamento estrutural, podendo levar a degradação do concreto ou perda da

estabilidade da estrutura. A Figura 4.20 mostra grandes trincas na laje superior de uma galeria, com sérios comprometimentos de sua estabilidade. As causas mais prováveis são atuação de sobrecargas ou concentração de tensões acima do previsto, deformação excessiva da estrutura, recalques diferenciados e corrosão das armaduras.



Figura 4.20: Trinca em laje superior de uma galeria. Fonte: (AGUIAR & BAPTISTA, 2009)

4.4.3 Brocas

Segundo Aguiar & Baptista (2009), esta patologia é caracterizada pela formação de imperfeições e cavidades no concreto em forma de ninhos de pedra, conforme Figura 4.21. As causas mais prováveis pelo surgimento desta patologia são fuga de nata através das fôrmas de madeira durante o processo de concretagem, segregação devido ao lançamento incorreto do concreto. Estas falhas na superfície do concreto reduzem a vida da estrutura, pois permitem a entrada dos agentes agressivos que irão instaurar a corrosão nas armaduras.



Figura 4.21: Ninhos de pedra em parede de uma galeria. Fonte: (AGUIAR & BAPTISTA, 2009)

4.4.4 Recalques

O recalque é caracterizado pelo aparecimento de desníveis na estrutura resultante de uma acomodação diferenciada da galeria, tendo como causa mais provável um recalque diferencial do terreno de fundação, conforme Figura 4.22 (AGUIAR & BAPTISTA, 2009).



Figura 4.22: Recalque da laje de fundo de uma galeria. Fonte: (AGUIAR & BAPTISTA, 2009)

5. CONCLUSÃO

Citando Pinto & Takagi (2007), o concreto armado é atualmente o material de construção mais utilizado em obras de saneamento. Porém, apesar da grande evolução de sua tecnologia, o transporte de água pluvial e esgoto são cada vez mais agressivos e podem colocar em risco a operação e durabilidade das estruturas de saneamento. Dessa forma, fica destacada a importância da manutenção preventiva em estruturas novas, a fim de aumentar sua durabilidade, e da execução de reparo e recuperação das estruturas já existentes, pois a tecnologia de concreto empregada no passado, não mais atende aos atuais requerimentos.

As manifestações patológicas, principalmente as erosões por abrasão, cavitação e ataques químicos, encontradas nas estruturas de concreto aqui abordadas, são progressivas, e paulatinamente degradam as estruturas, podendo levá-las ao colapso em pouco tempo de construção. Este procedimento deve servir de parâmetro para outras cidades, que, normalmente, não realizam inspeções nas redes de esgoto e água pluvial (AGUIAR & BAPTISTA, 2011).

Como as administrações públicas no Brasil não dispõem de metodologias para elaboração de um plano de manutenção preventiva para conservar as estruturas, verifica-se, lamentavelmente, que as intervenções de manutenção só ocorrem de forma corretiva, quando a degradação atinge nível tão elevado que a estabilidade das estruturas já está seriamente comprometida, com eminente risco de acidentes para os pedestres e o tráfego do local, exigindo recursos muito maiores se ações preventivas tivessem sido tomadas.

Sem haver uma mudança de foco, prevê-se, em um futuro próximo, que mais da metade do dinheiro envolvido no orçamento das obras públicas será gasto na reabilitação, recuperação e reparação das estruturas de concreto deterioradas (AGUIAR, 2006).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

AGUIAR, J. E., BAPTISTA, M. B. Estudos das patologias nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais de Belo Horizonte. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** Campo Grande, 2009.

_____. Erosões nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais urbanas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais.** 4 v., 1 n., 70-90 p., Mar./2011.

AGUIAR, J. E., MORAES, A. C. L., GOMES, A. M., CARVALHO JÚNIOR, A. N. Recuperação e restauro da igrejinha da Pampulha. **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto.** Rio de Janeiro: IBRACON, Set/2006.

ANDRADE, W. P. Abrasão do concreto de superfícies hidráulicas. In: **Congresso Brasileiro do Concreto.** REIBRAC, 34, 1992, Curitiba - PR. Anais. São Paulo: IBRACON, 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2003. 170 p.

_____. **NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 1986. 7 p.

_____. **NBR 12207: Projeto de interceptores de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

_____. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004. 59 p.

- BORSARI, R. D. **A cavitação por irregularidade de superfície e a areação como forma de prevenção.** São Paulo, 1986. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 1986.
- BOWKER, R. P. G., SMITH, J. M., WEBSTER, N. A. **Design Manual - Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewage Systems and Treatment Plants.** New York: U.S EPA, 1985. 144 p.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.
- CODY, R. D., CODY, M. A., SPRY, P. G., GAN, G. L. Experimental deterioration of highway concrete by chloride deicing salts. **Environment & Engineering Geoscience.** V. 2, n. 4, p. 575- 588, Nov./1996.
- COSTA, I. Y. L. G., SANTOS, C. A. G., NÓBREGA, R. L. B. Análise físico-química da água de chuva na cidade de João Pessoa para uso não potável. **6º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva.** Belo Horizonte, 2007.
- EMMONS, P. H. **Concrete Repair and Maintenance.** Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p.
- FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.** 2000. 246p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.
- FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de saneamento.** 3ª Ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006. 408p.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados.** 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 2008. 179p.
- HELENE, P. Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001. **Workshop sobre durabilidade das construções.** São José dos Campos, Nov./2001.

- HELENE, P., ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: Geraldo C. Isaia (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Iphis Gráfica e Editora, 2007. 2 v, p. 905-944.
- ISAIA, G. C. Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema. **Workshop sobre durabilidade das construções**. São José dos Campos, Nov./2001.
- JQUES, R. C. **Qualidade da água de chuva no município de Florianópolis e sua potencialidade para aproveitamento em edificações**. 2005. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - UFSC, Florianópolis, 2005.
- JOHN, V. M. *et al.* Durabilidade e sustentabilidade: desafios para a construção civil brasileira. **Workshop sobre durabilidade das construções**. São José dos Campos, Nov./2001.
- JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2005. 932p.
- KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. 2002. 196p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, 2002.
- LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56p. (Monografia) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- LEONARDO, C.R.T. **Estudo de concreto de alto desempenho visando a aplicação em reparos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, 2002.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 580p.

- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1981. 432p.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.
- PEREIRA, J. A. R., SOARES, J. M. **Rede coletora de esgoto sanitário: Projeto, construção e operação**. Belém: NUMA/UFPA, EDUFPA, GPHS, 2006. 296 p.
- PINTO, J. TAKAGI, E. M. Sistema de impermeabilização e proteção para obras de saneamento. **Concreto & Construções**. São Paulo, v. XXXIV, n. 47, p. 73-79, Jul./Ago./Set. 2007.
- POGGIALI, F. S. J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. 2009. 81 p. Monografia – Curso de especialização em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191p. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- RIBEIRO, R. M. **Concreto aparente: Uma contribuição para a construção sustentável**. 2010. 112 p. Monografia – Curso de especialização em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- ROQUE, J. A. **Sistema construtivo em aço patinável e bloco de concreto celular autoclavado: Análise de protótipo de Moradia de Interesse Social**. 2003. 197p. Dissertação (Mestrado). PPGSS-ECM, Universidade São Francisco, Itatiba, 2003.
- ROQUE, J. A., MORENO JUNIOR, A. L. Considerações sobre vida útil do concreto. **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré-moldado**. São Carlos, 2005.

- SILVA, M. R., PINHEIRO, S. M. M. Biodeterioração do concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 28, p. 857- 878.
- SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. 152 p.
- SILVA, P. R. **Estudo laboratorial da estabilidade de filmes de sulfeto de ferro visando ao monitoramento da corrosão em unidades de craqueamento catalítico fluido**. 2007. 137 p. Tese (Doutorado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 1998. 290 p. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Escola técnica superior de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.
- SOUZA, V. C. M., RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 1998. 257p.
- TAKAHASHI, A. Durabilidade de interceptores de esgoto. **Anais do 9º Encontro Nacional da Construção**. Instituto de engenharia – São Paulo, 1988.
- THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação**. São Paulo: PINI, 1989. 194 p.
- TSUTIYA, M. T., ALEM SOBRINHO, P. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário**. 2 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. 548p.
- VELASCO, R. V., TOLEDO FILHO, R. D., LIMA, P. R. L., FAIRBAIRN, E. M. R. Comportamento tensão-deformação do concreto de alto desempenho submetido a altas temperaturas. In: **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, São Paulo, 2003.

VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: Uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003.** 2004. 231 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

VON SPERLING, M. **Princípio do Tratamento Biológicos de Águas Residuárias. Vol. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005. 452p.