



**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Universidade Federal de Minas Gerais**



**ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**MONOGRAFIA**

**Patologias em canais de drenagem em concreto**  
**Estudo de caso de BH**

**RODRIGO TAVARES GUABIROBA**

**Belo Horizonte**

**Outubro 2012**

**RODRIGO TAVARES GUABIROBA**

**Patologias em canais de drenagem em concreto  
Estudo de caso de BH**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado a  
Universidade Federal de Minas Gerais como  
requisito parcial para obtenção do título de  
especialista em Construção Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes**

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

2012

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Abdias Magalhães Gomes, que tornou possível a realização deste trabalho, e cujo apoio e orientação tem me ajudado desde os tempos da graduação.

À engenheira Silvana Trigueiro, pela disponibilização do material sem o qual esse trabalho não seria possível, e principalmente pelo apoio, pelo incentivo e pela amizade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	5
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO .....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Patologias em estruturas de concreto.....	13
3.2 Causas degradação do concreto .....	13
3.2.1 Causas físicas e mecânicas .....	14
3.2.1.1 Tensões térmicas .....	14
3.2.1.2 Deformações por retração e fluência .....	14
3.2.1.3 Desgaste por abrasão, erosão e cavitação.....	17
3.2.1.4 Efeito de altas temperaturas sobre o concreto.....	18
3.2.2 Causas químicas .....	20
3.2.2.1 Eflorescências .....	20
3.2.2.2 Ataque de sulfatos .....	21
3.2.2.3 Reação álcali-agregado .....	22
3.2.2.4 Ataque de água pura.....	23
3.2.2.5 Ataque por ácidos .....	23
3.2.2.6 Carbonatação.....	24
3.2.2.7 Ataque por Cloretos .....	25

3.2.3 Biodeterioração do concreto .....	27
3.2.4 Causas eletroquímicas de degradação .....	29
3.2.4.1 Fundamentos da corrosão .....	29
3.2.4.2 Corrosão de armaduras .....	30
3.2.4.3 Tipos de corrosão .....	33
4 ESTUDO DE CASO .....	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
6 CONCLUSÃO .....	55
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Exemplo de ficha de levantamento cadastral das patologias .....	35
Figura 4.2: Exemplo de ficha de levantamento cadastral das patologias .....	35
Figura 4.3: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	35
Figura 4.4: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	35
Figura 4.5: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	36
Figura 4.6: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	36
Figura 4.7: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	36
Figura 4.8: Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.....	36
Figura 4.9: Desgaste em canais abertos causada pelo fluxo d'água, em área próxima a degrau .....	37
Figura 4.10: Desgaste em canais abertos causada pelo fluxo d'água, em área próxima a degrau .....	37
Figura 4.11: Desgaste por erosão e cavitação em área de degrau .....	37
Figura 4.12: Desgaste por erosão e cavitação em área de degrau .....	37
Figura 4.13: Desgaste por erosão e cavitação em degrau .....	38
Figura 4.14: Desgaste por erosão e cavitação em degrau .....	38
Figura 4.15: Desgaste por erosão e cavitação em degrau .....	38
Figura 4.16: Desgaste por erosão e cavitação em degrau .....	38
Figura 4.17: Desgaste por erosão no fundo de redes tubulares de concreto .....	39
Figura 4.18: Desgaste por erosão no fundo de redes tubulares de concreto .....	39
Figura 4.19: Desgaste na junção da laje de fundo com as paredes dos canais .....	39
Figura 4.20: Desgaste na junção da laje de fundo com as paredes dos canais .....	39
Figura 4.21: Desgaste por erosão no fundo de galerias.....	40
Figura 4.22: Desgaste por erosão no fundo de galerias.....	40
Figura 4.23: Desgaste acentuado de laje de fundo de galeria com exposição das armaduras e sua subsequente corrosão .....	40

Figura 4.24: Desgaste acentuado de laje de fundo de galeria com exposição das armaduras e sua subsequente corrosão .....	40
Figura 4.25: Corrosão das armaduras nas lajes de teto da galeria, junto a poços de visita .....	41
Figura 4.26: Corrosão das armaduras nas lajes de teto da galeria, junto a poços de visita .....	41
Figura 6.27: Corrosão generalizada das armaduras nas paredes de canal Aberto e no fundo de passeio conjugado ao canal.....	41
Figura 4.28: Corrosão generalizada das armaduras nas paredes de canal Aberto e no fundo de passeio conjugado ao canal.....	41
Figura 4.29: Detalhe de ligação de redes tubulares nas paredes e tetos dos canais .....	42
Figura 4.30: Detalhe de ligação de redes tubulares nas paredes e tetos dos canais .....	42
Figura 4.31: Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria ....	42
Figura 4.32: Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria ....	42
Figura 4.33: Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria, propiciando o acúmulo de lixo preso nas ferragens .....	43
Figura 4.34: Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria, propiciando o acúmulo de lixo preso nas ferragens .....	43
Figura 4.35: Estalactites formadas pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto .....	43
Figura 4.36: Estalactites formadas pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto.....	43
Figura 4.37: Manchas indicando presença de eflorescências .....	44
Figura 4.38: Manchas indicando presença de eflorescências .....	44
Figura 4.39: Manchas e eflorescências indicando processos de patologia química do concreto .....	44
Figura 4.40: Manchas e eflorescências indicando processos de patologia química do concreto .....	44
Figura 4.41: Manchas e eflorescências indicando processos de patologia química do concreto.....	45
Figura 4.42: Manchas e eflorescências indicando processos de patologia química do concreto.....	45

Figura 4.43: Manchas e estalactites formadas pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto.....	45
Figura 4.44: Manchas e estalactites formadas pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto .....	45
Figura 4.45: Presença de raízes dentro das galerias .....	46
Figura 4.46: Presença de raízes dentro das galerias .....	46
Figura 4.47: Presença de plantas e matéria orgânica (lodo) em canais abertos .....	46
Figura 4.48: Presença de plantas e matéria orgânica (lodo) em canais abertos .....	46
Figura 4.49: Canal em aduelas pré fabricada sofreu recalques e deslocamentos .....	47
Figura 4.50: Canal em aduelas pré fabricada sofreu recalques e deslocamentos .....	47
Figura 4.51: Canal em aduelas pré fabricada sofreu recalques e deslocamentos .....	47
Figura 4.52: Canal em aduelas pré fabricada sofreu recalques e deslocamentos .....	47
Figura 4.53: Presença de trincas nas estruturas de galerias.....	48
Figura 4.54: Presença de trincas nas estruturas de galerias.....	48
Figura 4.55: Presença de trincas nas estruturas de galerias.....	48
Figura 4.56: Presença de trincas nas estruturas de galerias.....	48
Figura 4.57: Colapso de manilhas de concreto pré fabricadas em rede de drenagem .....	49
Figura 4.58: Colapso de manilhas de concreto pré fabricadas em rede de drenagem .....	49
Figura 4.59: Presença de concreto dentro das galerias .....	49
Figura 4.60: Presença de concreto dentro das galerias .....	49
Figura 4.61: Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais.....	50
Figura 4.62: Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais.....	50
Figura 4.63: Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais.....	50
Figura 4.64: Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais.....	50
Figura 4.65: Presença de estacas de fundações de edifícios dentro das galerias..	51
Figura 4.66: Presença de estacas de fundações de edifícios dentro das galerias..	51



Figura 4.67: Detalhe de estaca cravada dentro da galeria danificando a laje de teto .....	51
Figura 4.68: Colapso de uma estrutura de concreto de canal aberto, executada sobre uma estrutura de gabião existente. ....	51

## **Resumo**

Este trabalho apresenta as principais patologias encontradas no sistema de macro drenagem da cidade de Belo Horizonte e procura associar as causas mais comuns dessas ocorrências, através do estudo dos fundamentos teóricos sobre a manifestação de problemas patológicos nas estruturas concreto armado

Os dados de campo apresentados neste trabalho foram retirados do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte (PDDBH), elaborado entre os anos de 2000 a 2004 pela SUDECAP, que é o órgão municipal responsável pela implantação e manutenção das obras de infra-estrutura da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

**Palavras Chave: Patologia, drenagem pluvial, concreto armado**

## 1 - Introdução

Embora o uso do concreto seja datado de milênios, sendo utilizados, por exemplo, por Egípcios e Romanos, foi somente no final do século XIX é que surgiu o concreto armado como hoje os conhecemos.

Suas características como a resistência mecânica, estabilidade e a durabilidade resistência à água, disponibilidade, custo e facilidade de execução em diversas formas e tamanhos fazem dele, conforme HELENE (1992), ANDRADE e DAL MOLIN (1997) e MEHTA e MONTEIRO (1994), o material mais utilizado na construção civil.

Assim, as estruturas de concreto são comumente encontradas em variados usos e propósitos. Algumas das maiores e principais estruturas de concreto armado presentes nos centros urbanos modernos são os sistemas de drenagem de águas pluviais e canalizações de cursos d'água. A função destes dispositivos é a de captar e conduzir rapidamente as águas provenientes tanto da superfície quanto de minas d'água existentes.

Devido à agressividade meio onde estão inseridas, com presença de água, solo, assim como a própria finalidade destes dispositivos, as estruturas de concreto das galerias e canalizações sofrem deterioração devido à ação física e química das águas a que estão destinadas a conduzir, que carregam partículas sólidas – e frequentemente grandes objetos - e são contaminadas por esgoto e outros efluentes lançados indevidamente na drenagem pluvial, além de danos estruturais de diversas causas, desde fundações de edificações que são executadas sobre as galerias como defeitos congênitos das estruturas e a falta crônica de manutenção.

No caso específico de Belo Horizonte, existem conforme dados oficiais, 673 Km de cursos d'água dos quais 26% encontram-se revestidos (6% canais abertos e 20% canais fechados), o que corresponde a 173 km de canais em concreto armado. Além disso são aproximadamente mais 617 km de redes tubulares de concreto utilizadas em microdrenagem que alimentam os canais existentes.

## **2 - Objetivo**

Este trabalho apresenta as principais patologias encontradas no sistema de macro drenagem da cidade de Belo Horizonte e procura associar as causas mais comuns dessas ocorrências. Os dados de campo apresentados neste trabalho foram retirados do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte (PDDBH), elaborado entre os anos de 2000 a 2004 pela SUDECAP, que é o órgão municipal responsável pela implantação e manutenção das obras de infra-estrutura da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

Serão objeto deste trabalho apenas as patologias encontradas no sistema de drenagem urbano de Belo Horizonte. Existem outras patologias que não são pertinentes ao trabalho, como por exemplo ataque de águas salinas (água do mar) ou ciclos de gelo e degelo, que não são encontradas nas estruturas em questão

Tendo em vista sua natureza, não foi objeto desse trabalho um estudo pormenorizado das causa de cada patologia mostrada, apenas destacada sua presença na rede de drenagem da cidade. Também não foi feito nenhum tipo de tratamento estatístico, que demonstrasse qual o percentual de ocorrência de cada tipo de patologia.

### **3 - Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 - Patologia em estruturas de concreto:**

Embora o concreto seja o material de construção mais utilizado no planeta, as estruturas em concreto armado tem apresentado diversos tipos de patologias. É interessante notar que as estruturas subterrâneas, em geral, são bastante susceptíveis à ocorrência de patologias em virtude do próprio meio onde se inserem. Além disso, por estarem enterradas, seu estado de conservação não é facilmente visível, a manutenção é dificultada e muitas vezes desleixada pois o estado de conservação das estruturas não é visível, ficando assim as patologias sem serem detectadas até a estruturas atingirem um grau avançado de deteriorização ou ocorrer o colapso em seu funcionamento.

#### **3.2 - Causas da degradação do concreto:**

Devido às excelentes características do concreto armado, este material foi utilizado em diversos tipos de ambientes agressivos como áreas marinhas, industriais e também nas estruturas enterradas em solos (CASCUDO, 1997).

Em obras subterrâneas, a água do solo, lençol freático e/ou rios podem-se infiltrar no concreto devido à sua alta porosidade, acarretando problemas de degradação por ataque de sulfatos, corrosão de armaduras e ataques por microorganismos.

Devido à localização das estruturas subterrâneas, dificilmente as manifestações patológicas são detectadas no início de sua ação, podendo ser encontradas em avançado estado de degradação quando não inspecionadas por um longo período de tempo.

O concreto sofre degradação basicamente por fatores intrínsecos e extrínsecos, que tem como causas físicas, mecânicas, químicas, biológicas e eletromagnéticas. A deterioração do concreto geralmente se dá pela combinação de diferentes fatores, que muitas vezes se combinam ou se complementam e que levam a estrutura a perder a capacidade de desempenhar suas funções conforme esperado. Conforme SOUZA e RIPPER (1998), as causas dos problemas patológicos podem ser geradas na etapa de concepção estrutural, execução das estruturas e na fase de utilização.

Nem todas as patologias apresentam sintomas visíveis, mas dentre estes podemos destacar as trincas e fissuras, o destacamento ou deslocamento, a segregação, as manchas e as eflorescências.

### **3.2.1 - Causas físicas e mecânicas:**

#### **3.2.1.1 - Tensões térmicas**

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, blocos de fundação, etc, poderão surgir fissuras devido os efeitos do gradiente térmico causado pela calor de hidratação do cimento, que pode originar tensões de tração (FERREIRA, 2000).

Variações bruscas de temperatura provocam danos sobre as estruturas, onde se verifica que a temperatura da superfície se ajusta rapidamente, enquanto a do interior se ajusta lentamente. Os efeitos são destacamentos do concreto causados pelos choques térmicos.

#### **3.2.1.2 - Deformação por retração e fluência**

O concreto pode estar sujeito tanto a condições de secagem ambiental como a carregamentos constantes. Estas condições podem refletir em variações de volume do concreto e estão ligadas à remoção de água da pasta de cimento. Se a umidade ambiental estiver abaixo do nível de saturação, o concreto estará sujeito à uma deformação denominada retração por secagem. Se o carregamento for mantido ao longo do tempo, ocorre a perda de água fisicamente adsorvida, ocorrendo uma deformação denominada fluência.

O fenômeno da retração está ligada a deformações em pastas de cimento, argamassas e concretos, independente do carregamento, sendo a principal causa à perda de água da pasta de cimento. A retração pode ocorrer no concreto em seu estado plástico ou endurecido.

No estado plástico podem ocorrer o assentamento plástico e a retração plástica. O assentamento plástico está ligado a dois fenômenos: a acomodação das partículas sólidas devido à ação da gravidade causando a sedimentação e, em sentido contrário, a exsudação, que representa a movimentação do ar aprisionado e da água. A sedimentação pode provocar fissuras nos primeiros momentos após o lançamento, causadas pela presença de obstáculos como armaduras ou agregados maiores que impedem a movimentação homogênea das partículas sólidas.

A retração plástica é devida a perda de água do concreto ainda não endurecido por causa da exposição de sua superfície às intempéries como vento, baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas, e podem também levar à fissuração, denominada dessecação superficial.

A ocorrência deste fenômeno será mais intensa quanto maior for o consumo de cimento, a relação a/c e as proporções de finos no concreto, estando ligada ao fenômeno da exsudação; se a evaporação da água da superfície for mais rápida que a exsudação, podem ocorrer fissuras por retração plástica (HASPARYK et al, 2005).

As fissuras no concreto endurecido devido à movimentação da água podem ser resumidas basicamente em retração autógena e retração por secagem, existindo também retração por carbonatação e por origem térmica.

A retração autógena é definida como a remoção da água dos poros pela hidratação do cimento ainda não combinado, com a redução volumétrica macroscópica dos materiais cimentícios após o início de pega, sem que ocorra mudança de volume devido a perda ou ingresso de substância. Tornou-se importante com o advento do concreto de alto desempenho (CAD), por representar uma das suas principais causas de fissuração.

O mecanismo de retração autógena pode ser explicado por meio da retração química e autodessecação. A primeira ocorre com a hidratação do cimento Portland, quando o volume total de sólidos e líquidos diminui devido às reações químicas, enquanto a dessecação ocorre pela diminuição da umidade relativa no interior do concreto endurecido, sem qualquer perda de massa, devido ao consumo de água pela reação de hidratação. Desta maneira, formam-se meniscos cujos esforços resultantes da tensão superficial levam à retração autógena. A retração autógena em um concreto comum desenvolvida nas primeiras 24 horas é desprezível quando comparada com a retração por secagem. Já no CAD, a retração autógena é intensa e mais importante que a retração de secagem nas primeiras idades.

A retração por secagem, ou retração hidráulica, é definida como a diminuição do volume da peça de concreto devido à remoção da água da pasta endurecida de cimento, quando o concreto “seca” em contato com o ar. O fenômeno é natural e ocorre como consequência da hidratação dos compostos anidros dos cimentos Portland. Para a explicação do fenômeno é importante saber que existem diversos tipos de água e com graus diferentes de dificuldade para serem removidos, como água livre, água capilar, água interlamelar (água de gel), água adsorvida e água de cristalização.

A água livre é toda a água que está na pasta de cimento ou no concreto, sem sujeição a qualquer força, ficando livre para evaporar durante o endurecimento da pasta e do concreto.

A água capilar pode ser livre ou retida por tensão capilar. A primeira se localiza em grandes vazios, de diâmetro maior que 50nm, e sua remoção não causa retração no sistema, enquanto a segunda se localiza em diâmetros menores (5 a 50nm) e sua remoção pode causar retração.

A água adsorvida está próxima à superfície dos sólidos da pasta, com suas moléculas fisicamente adsorvidas na superfície desta. Pode ser perdida por secagem da pasta a 30% de umidade relativa, e sua perda é a principal responsável pela retração da pasta por secagem.

A água de cristalização, ou quimicamente combinada, é a parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados de cimento. Esta água não é perdida por secagem, apenas por aquecimento a partir da decomposição dos hidratos.

A retração por carbonatação, fenômeno que será detalhado posteriormente, é provocada pela reação do  $\text{CO}_2$  com os produtos hidratados, que além de neutralizar a natureza cristalina da pasta de cimento hidratado causa a retração. Quando o  $\text{CO}_2$  é fixado pela pasta de cimento, a massa deste aumenta. Conseqüentemente, também aumenta a massa de concreto. A retração deve-se, provavelmente, à dissolução dos cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  enquanto sujeito a tensões de compressão e à deposição de  $\text{CaCO}_3$  nos locais livres de tensão. Por este motivo, a compressibilidade da pasta de cimento é aumentada temporariamente.

A retração por origem térmica é devida ao calor gerado durante a hidratação do cimento Portland, que causa tensões térmicas que tracionam o concreto na fase de resfriamento. Estes problemas ocorrem principalmente em estruturas massivas, onde o esfriamento à temperatura ambiente pode levar à fissuração (HASPARYK et al, 2005).

O concreto sob carga pode estar sujeito a três tipos de deformação: elástica, plástica e viscosa. Podem ocorrer também combinações entre elas.

A deformação elástica, ou imediata, é reversível e pode ser totalmente recuperada quando do descarregamento do concreto. Já a deformação lenta, ou por fluência, refere-se a uma deformação parcialmente reversível, plástica.

A fluência ou deformação lenta pode ser definida como a deformação que o concreto sofre devido a um carregamento contínuo, podendo ocorrer sob compressão, tração ou cisalhamento. Como ela é parcialmente reversível, trata-se de uma propriedade viscoelástica.



Podem existir dois tipos de fluência, a básica e por secagem quando ocorre troca de umidade para o ambiente externo, sendo a fluência total a soma das duas. Portanto, a umidade relativa do meio envolvente é um dos fatores externos mais importantes neste processo, sendo a fluência tanto maior, quanto menor for a umidade relativa (HASPARYK et al, 2005).

A fadiga provoca o aumento da deformação, obtida através da aplicação repetida de uma carga ao longo de um tempo. Tensões cíclicas e carregamentos repetitivos inferiores à tensão máxima resistente podem provocar ruptura por fadiga em estruturas de pontes, ou aquelas sujeitas à ações do vento e do mar (FERREIRA, 2000).

### **3.2.1.3 - Desgaste por abrasão, erosão e cavitação**

A abrasão pode ser definida como o desgaste por atrito entre um sólido e o concreto. Isto ocorre, por exemplo, em pavimentos de concreto onde o tráfego provoca o desgaste da superfície por atrito seco, ou seja, sem presença de líquidos.

A resistência superficial e dureza do concreto influenciam o desgaste por abrasão. A utilização de agregados graúdos mais resistentes e o aumento da resistência à compressão elevam a resistência à abrasão (ALMEIDA, 2000).

A erosão é similar à abrasão, mas a erosão é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas sólidas finas suspensas. Este mecanismo é importante para as estruturas sujeitas ao desgaste pelo escoamento das águas, ocorrendo geralmente em vertedores de barragens ou canalizações, sendo necessário separar o desgaste provocado pelo carreamento de partículas finas pela água e os estragos causados pela cavitação. KORMANN (2002) comenta o aumento do efeito erosivo em concretos quando a água contém ácidos e sais reagentes com elementos do cimento dissolvido.

A cavitação é a degradação da superfície do concreto causada pela ruptura ou implosão de bolhas de vapor de água quando a velocidade ou direção do escoamento sofre uma mudança brusca (ANDRADE,1992).

O escoamento laminar de água, normalmente não danifica o concreto, mas a erosão provocada por partículas grossas, como areia ou brita, pode ser tão severa como a cavitação, que tende a aumentar com a perda da camada superficial do concreto, que normalmente é mais resistente que as camadas inferiores (LIU, 1981).

Podemos ver os efeitos dos desgastes nas figuras 4.3 até 4.24.

#### **3.2.1.4 - Efeito de altas temperaturas sobre o concreto**

Os efeitos da temperatura no concreto podem ter origem tanto externa como interna. Do ponto de vista externo, as condições climáticas, como o frio e calor, juntos com a umidade do ar e ventos, podem provocar problemas no concreto (ABRAMS, 1971). Do ponto de vista interno, o calor gerado pela hidratação do cimento é um dos mais importantes causadores de manifestações patológicas. Neste item será tratado particularmente a influência de altas temperaturas no concreto, entre elas a ação de fogo.

A transferência de calor em uma estrutura ocorre em função da transmissão de energia de uma região para outra, seguindo três mecanismos básicos: condução, convecção e radiação. Na condução, o calor se propaga dentro de um corpo sólido, das regiões mais quentes para as mais frias, desde que estejam em contato direto. A convecção ocorre quando um fluido fica em contato com uma superfície sólida a uma temperatura distinta, resultando em um processo de troca de energia térmica entre estes materiais. A radiação é a transmissão de temperatura de um corpo com maior temperatura para outro de temperatura mais baixa através do espaço, mesmo sem contato (GRAÇA et al, 2005).

Os efeitos do calor no concreto podem ser muito prejudiciais. Quando as estruturas de concreto armado e seus elementos absorvem calor de tal maneira que se produzem transformações das mais diversas, em geral, são indesejáveis. As altas temperaturas podem afetar a resistência da estrutura de uma maneira notável (COSTA, 2002).

Quando um elemento de concreto é submetido a altas temperaturas sofrem modificações importantes. A água livre ou capilar do concreto começa a evaporar a partir dos 100°C. 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. Assim, a 200°C o concreto é cinza e não há perda de resistência apreciável; a 300°C a

perda de resistência é 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); entre 600°C a 950°C a cor passa para um cinza com pontos vermelhos, com a 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.

A porosidade e mineralogia dos agregados influenciam o comportamento do concreto exposto às altas temperaturas, assim como concretos com boa granulometria comportam-se melhor frente ao calor (LIMA, 2003).

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 muito similar:  $1,2 \times 10^{-5}$  m/m°C para o aço e  $1,0 \times 10^{-5}$  m/m°C para o concreto. No entanto, quando as temperaturas se elevam, os coeficientes se separam, sendo que o coeficiente do aço pode chegar a 30 vezes superior ao do concreto, produzindo tensões relevantes, que estouram os cobrimentos. (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). É importante considerar que aços doces e laminados recuperam praticamente suas propriedades originais quando esfriam.

Os cobrimentos 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.

Estruturas sujeitas à ação de altas temperaturas necessitam ser protegidas. Por causa da baixa condutividade térmica do concreto, os cobrimentos formam uma camada protetora das armaduras bastante eficaz, desde que tenham espessuras adequadas. Um cobrimento de 2 cm de espessura, por exemplo, assegura uma proteção aproximada de meia hora. Portanto, quanto maior o cobrimento, 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).

### 3.2.2 - Causas químicas

O contato do concreto com ácidos em altas concentrações não é habitual. Já a ação de chuvas ácidas nos grandes centros e nas áreas industriais é mais freqüente.

Os ácidos sobre o concreto atuam destruindo seu sistema poroso e produzindo uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. O resultado destas ações é a perda de massa e uma redução da seção do concreto. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta, sendo a velocidade da degradação proporcional à quantidade e concentração do ácido em contato com o concreto (ANDRADE, 2003), conforme Figura 2.10.

Os fluidos agressivos podem penetrar nos poros do concreto de três formas: Por difusão, resultado da diferença de concentrações iônicas entre os fluidos externos e internos; por pressão hidrostática, resultado da diferença de pressão dos fluidos; por forças capilares, resultado de mecanismos capilares (FERREIRA, 2000).

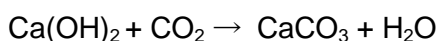
A penetração pode ser resultado também de uma combinação de forças, e podem ser influenciadas por temperaturas, correntes elétricas, etc (FERREIRA, 2000).

As reações químicas se manifestam através de efeitos físicos nocivos, tais como o aumento da porosidade e permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e destacamento. Atenção especial deve ser dada ao ataque de sulfatos, ataque por álcali-agregado e corrosão das armaduras, uma vez que estes fenômenos são responsáveis pela deterioração de um grande número de estruturas de concreto (MEHTA et al, 1994).

#### 3.2.2.1 – Eflorescências

O contato da água corrente de baixa dureza com a pasta de cimento tende a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio, como o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , atingindo o equilíbrio químico e lixiviando tais compostos presentes no concreto. Este tipo de água provém de chuvas, infiltrações e umidade (GENTIL, 1996).

Esta forma de decomposição química diminui a resistência do concreto deixando os constituintes cimentícios como géis de sílica e alumina. Além do  $\text{CO}_2$ , que interage com o material lixiviado formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conforme a equação:



Esta equação é conhecida como eflorescência, onde a lixiviação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , retira o carbonato de cálcio solúvel, processo que é caracterizado por depósitos de crostas brancas na superfície do concreto, conforme pode ser visto nas figuras 4.37 até 4.44.

Tais manchas, comuns em estruturas de túneis de concreto, caixas de água e valas, onde ocorre a livre percolação de água, diminuem a proteção química e o pH do concreto, e em alguns casos, formam estalactites decorrentes de lixiviação acentuada.

### **3.2.2.2- Ataque de sulfatos**

O concreto, quando inserido em locais com elevada concentração de sulfatos, está sujeito a alterações químicas na matriz da pasta. Reações envolvendo a formação de produtos expansivos são provenientes de contato de  $\text{SO}_4$  em soluções aquosas. Estas reações acarretam perda de massa, coesão e resistência dos concretos utilizados em estruturas subterrâneas e em regiões industriais (AL-AMOUNDI, 2002).

A porosidade do concreto e a elevada quantidade de sulfatos encontrados em solos são responsáveis pelo ataque dos sulfatos. Tais ataques ocorrem, em sua maioria, quando o concreto está em contato com a água do mar e lençóis freáticos contaminados.

GENTIL (1996) cita as reações do sulfato com componentes do concreto, como o aluminato tricálcico hidratado ( $\text{C}_3\text{A}$ ) que forma sulfo-aluminato de cálcio hidratado ou etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$ ) e o hidróxido de cálcio livre [ $\text{Ca(OH)}_2$ ] que forma sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$ ).

As presenças de sulfato de sódio, cálcio e magnésio ocasionam a redução da resistência do concreto devido ao aumento do volume da água, que ao se expandir, provoca fissuração do concreto, desestabilizando os cristais de CSH.

A maior ou menor facilidade da ocorrência de reações com sulfatos é influenciada pela água e, principalmente, pela qualidade do concreto. A qualidade está relacionada com a relação a/c, tipo de cimento e, conseqüentemente, com o transporte de água pelos poros do concreto (GENTIL, 1996).

### **3.2.2.3 - Reação álcali-agregado**

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) além das reações expansivas de sulfatos, existem diversas outras reações envolvendo íons alcalinos, hidroxilas e constituintes silicosos.

A variação da temperatura, a ação da água, do grau de hidratação e de alguns constituintes do concreto, podem provocar o surgimento de reações álcali-agregado, resultando na deterioração de

estruturas através da fissuração e expansão do concreto, o que tem sido observado em obras de grande porte. Estas são evidenciadas pela localização das fissuras em forma de mapa, eflorescência, exsudação de gel e descoloração do concreto (SABBAG, 2003).

Existem três tipos de reações álcali-agregado denominadas:

- reação álcali-sílica;
- reação álcali-silicato;
- reação álcali-carbonato.

A reação álcali-sílica ocorre quando a partícula de sílica reativa é circundada por componentes da pasta do cimento como íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  em solução básica. Na reação álcali-silicato é formada de uma fina camada de gel álcali-sílica. Na reação álcali-carbonato, os íons de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  penetram na camada de gel para reagir com a sílica. Quando a concentração de cálcio é insuficiente, os álcalis reagem formando um gel de álcali-sílica que na presença de água se expandirá provocando fissuras. Este tipo de reação ocorre com maior frequência no Brasil (PAULON, (1981) apud SABBAG, 2003).

A reação álcali-silicato é similar à reação álcali sílica, porém mais lenta. Os álcalis do cimento juntam-se aos silicatos de rochas como o quartzo. Diferente das outras reações, a reação alcali-carbonato ocorre com a presença de calcários dolomíticos.

HASPARYK (1999) cita as propriedades dos materiais, cimento e agregado, e outros fatores como temperatura, umidade, tempo e tensões internas, como principais responsáveis pela reação álcali-agregado. VALDUGA (2002) demonstra que a permeabilidade do concreto, em conjunto com o teor de álcalis e agregados, influencia na degradação acelerada dos concretos.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) comentam que os silicatos e minerais de sílica, bem como a sílica hidratada (opala) ou amorfa (obsidiana, vidro de sílica), podem reagir com soluções alcalinas. Cimentos com teor de óxido de sódio superior a 0,6% são considerados altamente alcalinos e quando utilizados em elevado consumo com agregados reativos contendo teor de álcalis agravam o processo de reação álcali-agregado.

#### **3.2.2.4 - Ataque de água pura**

Água subterrânea, de lagos e rios contém contaminações como cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio. Denominada de água dura, geralmente não ataca os constituintes da pasta de cimento Portland. A água pura da condensação de neblina ou vapor, e água mole da chuva, podem conter pouco ou nenhum íon de cálcio. Quando estas águas entram em contato com a

pasta de cimento Portland, elas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio. O hidróxido de cálcio é o constituinte que, devido à sua solubilidade alta em água pura, é mais sensível à eletrólise, ocorrendo a lixiviação. Além da perda de resistência, a lixiviação do hidróxido de cálcio pode ser indesejável por razões estéticas. Frequentemente, o produto da lixiviação interage com o  $\text{CO}_2$ , presente no ar, e resulta na precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície, fenômeno conhecido como eflorescência (MEHTA et al, 1994).

### 3.2.2.5 - Ataque por ácidos

Em ambientes úmidos o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{SO}_2$  e outros gases ácidos presentes na atmosfera atacam o concreto, dissolvendo e removendo parte da pasta de cimento Portland endurecido, que não é resistente aos ácidos.

O ataque ocorre em valores de pH inferiores, em torno de 6,5. Entre 3 a 6 a velocidade do ataque é proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo determinante a difusão através dos produtos pouco solúveis que permanecem, depois que o  $\text{Ca(OH)}_2$  foi dissolvido. A velocidade de ataque depende não só do pH, mas também da capacidade dos íons serem transportados.

Os concretos também são atacados por águas contendo  $\text{CO}_2$  livre em terrenos pantanosos, com pH em torno de 4,4, e pelas águas puras com pouco  $\text{CO}_2$ .

As tubulações com esgotos sofrem deteriorações acentuadas quando os compostos de enxofre são transformados em  $\text{H}_2\text{S}$  por bactérias anaeróbicas. Este agente, mesmo não sendo agressivo, sofre oxidação pelas bactérias aeróbicas, dando como produto final o ácido sulfúrico, sendo que o ataque se processa acima do nível do líquido. O cimento se dissolve gradativamente e degrada o concreto.

Vários ensaios físicos e químicos de resistência aos ácidos foram desenvolvidos, mas não existem procedimentos padronizados. O pH isoladamente não é um indicador adequado do potencial do ataque; a presença de  $\text{CO}_2$  decorrente da dureza da água também tem influência sobre a situação; temperatura e pressão aumentam a intensidade do ataque.

O uso de cimento de alto-forno e pozolanas ajuda o desempenho do concreto, mas ele depende mais das suas próprias qualidades do que do tipo de cimento usado.

A resistência ao ataque químico aumenta quando a superfície está seca antes de ser exposta. A película de carbonato de cálcio, formada pela ação do  $\text{CO}_2$  sobre cal, obstrui os poros e aumenta a

permeabilidade da camada superficial. Portanto os concretos pré-fabricados tendem a ser mais resistentes que os moldados *in situ*.

As superfícies de concreto sujeitas aos ataques químicos devem ser protegidas com pinturas de borracha, resinas epóxicas e outras barreiras. O nível de proteção é bastante variável, mas é essencial que a barreira anti-ácida seja bem aderente ao concreto e resistente às ações mecânicas (NEPOMUCENO, 1982).

### 3.2.2.6 - Carbonatação

A deterioração do concreto está diretamente relacionada ao movimento das águas nos poros, podendo ser na forma líquida ou vapor, que em conjunto com a alta permeabilidade, permite o transporte de CO<sub>2</sub> proveniente de veículos ou outros gases, reagindo com os componentes da pasta hidratada (BENAZZOUK, 2004).

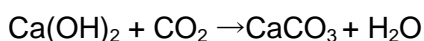
KULAKOWSKI (2002) ressalta que fatores como o aumento da porosidade devido ao uso de concretos com elevada relação (a/c), bem como a otimização de peças desrespeitando valores mínimos de cobrimento estipulado em normas e códigos, interferem na vida útil do concreto.

A alta alcalinidade do concreto deve-se à presença de Ca(OH)<sub>2</sub> na pasta de cimento. A redução da alcalinidade pode ocorrer por lixiviação dos compostos básicos como KOH, NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub> e pela ação do CO<sub>2</sub> do ar, bem como pela ação de gases ácidos provenientes do SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S (CASCUDO, 1997).

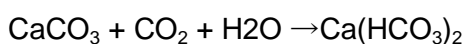
Segundo ANDRADE (1992), o processo de redução de alcalinidade por efeitos do CO<sub>2</sub> denomina-se carbonatação, onde o pH do concreto diminui para valores inferiores a 8,0 na presença de umidade relativa entre 50 e 80%. Quando a umidade for superior a 80% a água tende a saturar os poros do concreto dificultando a entrada do CO<sub>2</sub>. Quando a umidade relativa for baixa, os poros se encontram secos e acabam não reagindo por falta da água.

No estudo do processo da carbonatação CEUKELAIRE e VAN NIEUWENBURG (1992), verificaram a importância da umidade, onde a maior velocidade de carbonatação se deu com 50% de umidade relativa.

A reação básica da carbonatação é mostrada pela equação:



Outra reação pode ser encontrada quando houver CO<sub>2</sub> em excesso, formando o solúvel bicarbonato de cálcio, como mostra a equação:





A ação da carbonatação no cobrimento do concreto pode ser visualizada pela equação abaixo que ocorre a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo devido à ação do  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio) que satura os poros superficiais dificultando o ingresso de  $\text{CO}_2$  no concreto.

$$e = k \cdot (t)^{1/2}, \text{ onde:}$$

e: espessura carbonatada

k: constante (depende do tipo e quantidade de cimento, relação a/c e resistência do concreto)

t: tempo para alcançar a profundidade de carbonatação

O avanço da carbonatação, que separa duas zonas, uma com pH menor que 9,0 e outra com pH maior que 12,0, é denominada frente de carbonatação.

Quando a frente de carbonatação encontra a armadura acaba provocando a despassivação da mesma e iniciando o processo de corrosão.

ANDRADE (1992) alerta sobre a carbonatação em concretos com adição de cloretos, pois aumenta o potencial de corrosão e os efeitos do  $\text{CO}_2$  em cloroaluminatos do cimento que desagregam, deixando livres os cloretos que se encontravam combinados.

### **3.2.2.7 - Ataque por Cloretos**

CASCUDO (1997) refere-se ao contaminante cloreto como o maior causador de corrosão dos metais no concreto devido à destruição da camada passivadora da armadura em conjunto com a presença de água e oxigênio.

A presença de grandes quantidades de cloretos, utilizados na água de amassamento como acelerador de pega, presentes nos agregados contaminados, ou posteriormente infiltrados em concreto armados, ocasionam a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio. Ou seja, os íons cloreto podem estar presentes desde o princípio na mistura dos componentes, ou serem introduzidos por agentes agressivos durante a vida útil do material.

ANDRADE (1992) indica a entrada de cloretos na forma de aditivos, na água, como componentes do cimento e algumas vezes, em agregados. O teor de cloretos máximo de um concreto fresco deve ser em torno de 0,4%, em relação à massa do cimento ou 0,1% em relação à massa do concreto. A NBR 6118 (2003) não se reporta ao teor de cloretos, chamando somente a atenção quanto ao uso de aditivos contendo cloretos. As Normas Européias CEB (1991), ENV 206 (1991) e a BS 8110:1 (1985) recomendam um limite de 0,40% em relação à massa de cimento, enquanto

a ACI 318-21 (2003) limitam em 0,15% em ambientes com cloretos, 0,3% em ambientes normais, 1% em ambientes secos e 0,06% em concreto protendidos (FIGUEIREDO, 2005).

A infiltração de cloretos no concreto pode ocorrer por absorção capilar, permeabilidade sob pressão, migração iônica e o mecanismo de difusão de íons cloretos. Pode ser relativamente lenta quando não transportados por forças capilares, como em ambientes marinhos. Outros fatores responsáveis pela infiltração de cloreto são: fissuras, concentração de cloretos no ambiente externo, temperatura, umidade e qualidade do concreto no que se refere principalmente à distribuição e tamanho dos poros, pasta hidratada e a interconexão entre eles. O tipo de cimento utilizado influencia a concentração de cloros, tendo aqueles com teores mais elevados de  $C_3A$  desempenho superior aos cimentos com baixos teores de  $C_3A$ .

CASCUDO (1997) apresenta o cloreto em três tipos de forma no concreto: ligado quimicamente ao  $C_3A$  formando  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$  (cloro-aluminato de cálcio), adsorvido na superfície, ou sob a forma de íons livres.

A profundidade da iniciação de ataque por cloretos é obtida pela equação, mostrada a seguir.

$$d = k\sqrt{t} \quad \text{onde:}$$

$d$  é a profundidade de penetração do  $CO_2$  em mm

$k$  é uma constante que depende das características do concreto

$t$  é o tempo em anos

Relação a/c, adensamento e cura são fatores significativos que influenciam a qualidade do concreto e têm relação direta com a penetração de cloretos.

As fissuras no concreto favorecem a penetração dos cloretos, sendo que velocidade depende da abertura das fissuras e da qualidade do concreto.

A concentração de cloretos necessária para promover a corrosão é fortemente afeta 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).

BAI et al. (2002) comentam a importância da relação entre absorvidade e resistência, pois minimizando a absorvidade consegue-se a redução da penetração de sulfatos e cloretos que causam danos a estruturas de concreto.

### **3.2.3 - Biodeterioração do concreto**

A biodeterioração é considerada a mudança indesejável nas propriedades do material, devido à ação de microorganismos.

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 microorganismos podem atuar sobre o concreto em ações deletérias sobre a pasta de cimento e os agregados, interferindo em sua estética, reduzindo sua durabilidade e podendo comprometer sua integridade.

A biodeterioração pode ser classificada em quatro categorias: física ou mecânica, estética, química assimilatória e química não assimilatória. Os mecanismos podem ocorrer separados ou simultaneamente.

A biodeterioração física ou mecânica é o rompimento do material devido à pressão exercida na superfície pelo microorganismo, durante seu crescimento ou locomoção.

A biodeterioração estética é causada pela presença de microorganismos que interferem na estética do concreto, mudando sua cor, manchando-o, muitas vezes de forma inaceitável.

A biodeterioração química assimilatória ocorre quando o material, constituído de nutrientes para os microorganismos, tem sua microestrutura alterada, apresentando déficit de compostos essenciais para sua integridade.

A biodeterioração química não assimilatória é o resultado da ação dos produtos metabólicos, sobre os constituintes do material, formando compostos prejudiciais à sua integridade. Produtos metabólicos são substâncias produzidas pelos microorganismos durante o metabolismo.

Os principais microorganismos envolvidos nos mecanismos acima citados são as algas, fungos, bactérias, líquens e protozoários (SILVA et al, 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, tensões provocadas pela cristalização de sais e complexação. (SILVA et al, 2005)

Os biofilmes são ecossistemas microbianos, de consistência gelatinosa, apresentando-se em forma de película, na presença de água. 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, conforme mostrado nas Figuras 4.37 a 4.48. Podem 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. É considerado o ataque mais agressivo devido à sua natureza alcalina.

Os ácidos excretados durante o metabolismo dos microorganismos, em contato com a pasta de cimento, podem ser convertidos em sais que podem causar tensões e esfoliações no material.

Os ácidos orgânicos, excretados pelos microorganismos, podem promover a complexação de certos metais. Este é o mecanismo pelo qual, certas substâncias químicas, podem remover moléculas de metais de vários substratos, tornando disponíveis elementos como ferro, potássio, manganês e cálcio, que são minerais solúveis, facilmente lixiviados pela água.

Para identificar e avaliar a sanidade da microestrutura são utilizadas técnicas diretas como microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e a microscopia acústica de varredura, ou indiretas, como difração de Raio-X, resistividade elétrica, termografia, porosimetria e análises químicas (SILVA et al, 2005).

Na prática o mais significativo ataque biológico ao concreto é o que ocorre em esgotos. No interior dos esgotos, em condições anaeróbicas (sem oxigênio), as bactérias produzem ácido sulfídrico, 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 vai provocar uma rápida degradação da superfície livre interna da estrutura de concreto em contato com o esgoto, com velocidades de ataque na ordem de 5 a 10 mm por ano.

Outra forma comum de ataque biológico é o crescimento de raízes de plantas, algas e líquens em fendas ou zonas porosas do concreto, que origina forças expansivas de degradam mecanicamente o concreto, facilitando o transporte de outros agentes agressivos para seu interior.

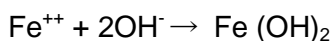
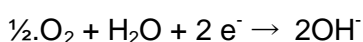
### **3.2.4 - Causas eletroquímicas de degradação**

#### **3.2.4.1 - Fundamentos da corrosão**

Os metais encontram-se, em geral, na natureza formando compostos tais como óxidos, sulfetos, etc, com outros elementos. Para usá-los na forma elementar é preciso extrair o metal mediante um processo de redução, o que requer aplicar uma certa quantidade de energia. O processo inverso pelo qual volta ao seu estado natural vai acompanhado de uma redução de sua energia, isto é, tem lugar através de uma reação espontânea. Este processo, que corresponde a uma oxidação, é conhecido por corrosão, e representa a lenta destruição do metal (ANDRADE, 1992).

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 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.

Segundo AHMAD (2003), a corrosão do aço inserida dentro do concreto é definida como um processo eletroquímico, onde a superfície do aço corroído funciona como um eletrodo composto por ânodo e cátodo conectados eletricamente pelo corpo do aço gerado pela diferença de potencial entre dois pontos com reações, tais como:



A primeira equação mostra a reação do ânodo como processo de oxidação que resulta em dissolução ou perda de material. A segunda equação mostra a reação catódica como redução de íons do eletrólito resultando em redução de oxigênio dissolvido. A terceira equação mostra a formação de íons hidroxila como um condutor metálico que permite o fluxo eletrônico no sentido ânodo-cátodo e o eletrólito.

Conforme GENTIL (1996) os principais produtos de corrosão são o óxido de ferro, que aparece na natureza na forma de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a ferrugem, que aparece como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado. O produto da corrosão se assemelha ao inverso do processo metalúrgico onde, a partir de minérios, obtém-se o metal.

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.

#### **3.2.4.2 - Corrosão de armaduras**

Há várias décadas existem informações sobre corrosão das armaduras no concreto armado que podem ocorrer principalmente em estruturas de concreto aparente. 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, que o mantém 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e adere fortemente ao aço. (FERREIRA, 2000)

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).

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.

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.

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, a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio e carbonatação.

Estudos realizados por AL-BAHAR et al. (1998), em estruturas com mais de 25 anos de utilização, serviram para determinar as causas e extensão de danos causados pela ação da corrosão induzida, carbonatação e principalmente ataque por cloretos. Observou-se também a incidência de corrosão em regiões com elevada temperatura, umidade excessiva, solos agressivos com presença de sulfatos e cloretos, e materiais com teor de cloretos utilizados para confecção do concreto.

A qualidade do concreto, a alta relação a/c (aumento da permeabilidade), tipo do cimento, impurezas nos materiais, fissuras em superfícies, densidade e espessura do cobrimento, relacionados ao ambiente externo suscetível à umidade, oxigênio, temperatura, ataque de bactérias e correntes elétricas perdidas, iniciam ou alimentam a corrosão (GENTIL, 1996).

A correta camada de cobrimento proporciona uma maior proteção para o aço. Esta barreira, formada por película de caráter passivo, denominada proteção química, e em virtude do pH do concreto se situar por volta de 13,5 (meio alcalino), faz com que o aço mantenha-se passivo e, portanto, a estrutura apresenta durabilidade e desempenho adequados. Barreiras físicas podem ser formadas em volta da superfície metálica pela precipitação de plaquetas hexagonais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Neste caso, o concreto resulta num sólido poroso, permitindo a permeabilidade tanto por capilares como por poros.

O processo de corrosão pressupõe 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). Os metais reagem naturalmente com líquidos e gases encontrados no meio ambiente e se propagam pelo concreto.

A água contida nos poros serve como meio aquoso carregado ionicamente como um eletrólito complexo, formando assim uma célula de corrosão. Esta fase líquida é essencial para o processo

eletroquímico de corrosão, permitindo ocorrer as reações anódicas e catódicas bem como a ocorrência do fluxo iônico.

Os fatores internos que afetam a corrosão são:

- presença de umidade e oxigênio;
- umidade relativa e temperatura.

A respeito da presença de umidade e oxigênio, enquanto a umidade cumpre a exigência eletrolítica da célula de corrosão, a umidade e oxigênio juntos ajudam na formação de mais  $\text{OH}^-$  (3), produzindo o componente mais ferruginoso,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . O oxigênio também afeta o progresso de reações catódicas. Na ausência de oxigênio, até mesmo em uma situação de despassivação, a corrosão não progredirá devido à polarização catódica. A umidade relativa afeta principalmente a carbonatação do concreto.

A umidade ótima para ocorrer o processo encontra-se entre 70 a 80%, sendo que, acima deste nível, a difusão de oxigênio é reduzida consideravelmente (ARANHA,1994). Valores entre 80% e 100% de umidade relativa podem não permitir o processo da carbonatação. Valores entre 30% e 50% de umidade relativa podem não causar carbonatação de concreto, especialmente quando o  $\text{CO}_2$  se encontra em concentração normal ou até mesmo depois de um longo período de exposição. O aumento da temperatura geralmente aumenta também as taxas de reação química, influenciando significativamente na profundidade de carbonatação. Ou seja, elevada temperatura e umidade levam à indução da corrosão.

Uma vez iniciado o processo de corrosão, este se propaga a uma taxa fixa devido à expansão do volume do aço corroído, ao destacamento do revestimento e à fissuração, diminuindo a vida útil do concreto. Esse processo pode ser visualizado através da perda de seção de armaduras e massa do concreto. A resistividade elétrica do concreto restringe a taxa de corrosão reduzindo o fluxo de corrente elétrica de anódica para catódica.

Como 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. 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.



Ambientes agressivos como os de indústrias, onde existem gases, líquidos ou sólidos agressivos, ou mesmo solos agressivos, proporcionam condições para a corrosão de armadura no concreto armado. Vemos os efeitos da corrosão nas figuras 4.19 até 4.34

### **3.2.4.3 - Tipos de corrosão**

#### **a) Corrosão generalizada**

A corrosão uniforme ou generalizada ocorre devido a uma perda generalizada da película de passivação, resultante da frente de carbonatação no concreto e/ou presença excessiva de cloretos. Também pode ocorrer por efeito de lixiviação do concreto produzido pela percolação e/ou lavagem por águas puras ou ligeiramente ácidas.

#### **b) Corrosão localizada**

A corrosão localizada forma-se por dissolução localizada da película de passivação, tipicamente causada pela penetração de íons cloretos no meio, vindos do exterior ou pertencente a algum constituinte do concreto. Forma-se uma célula de corrosão onde existe uma área passivada intacta, atuando como um cátodo, e uma pequena área atuando como ânodo, que perdeu a película passiva e onde se reduz o oxigênio dissolvendo o aço. As pequenas áreas despassivadas, conhecidas pelo nome de pite, podem gerar condições suficientes para a sua continuidade e crescimento, e decrescem o pH localmente.

#### **c) Corrosão sob tensão**

A corrosão sob tensão se caracteriza por ocorrer em aços submetidos a elevadas tensões, em cuja superfície é gerada uma microfissura que vai progredindo muito rapidamente, provocando uma ruptura brusca e frágil do metal, ainda que a superfície não mostre evidências de ataques. Este tipo de corrosão acontece, preferencialmente, em concretos protendidos, sendo um fenômeno muito específico e normalmente associado à má qualidade do concreto (bainhas mal preenchidas, lixiviação do concreto) ou a presença de determinados íons.

#### **d) Corrosão galvânica**

Este tipo de corrosão ocorre quando existem diferentes tipos de metal no mesmo meio eletrolítico. O metal com menor atividade eletroquímica é corroído. Uma das situações mais comuns encontradas é o uso de alumínio dentro do concreto armado (EMMONS, 1993).

#### **4 – Estudo de Caso:**

Os exemplos mostrados a seguir foram retirados do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte (PDDBH), elaborado entre os anos de 2000 a 2004 pela SUDECAP, que é o órgão municipal responsável pela implantação e manutenção das obras de infra-estrutura da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Todas as fotos são de autoria da SUDECAP.

Serão objeto deste trabalho apenas as patologias encontradas nas estruturas de concreto do sistema de drenagem urbano de Belo Horizonte.

Alguns dos canais cujas patologias foram mostradas já foram recuperados, em que pode-se citar o canal da Rua Francisco Deslandes, o canal da Rua Piauí, o canal da Av. Uruguai e o canal da Av. Professor Moraes. Outros estão em recuperação, como por exemplo o canal do córrego da Serra, o canal do Arrudas e o canal do Ressaca. Outros ainda serão objeto de intervenções, como o canal da Av. Consul Antonio Cadar, o canal da Rua Levindo Lopez, o canal do Córrego dos Pintos e o canal do Córrego Zoológico.

FOLHA: 57 / 62	LEVANTAMENTO CADASTRAL - MACRODRENAGEM		REGIONAL(S): Nordeste
GEOMETRIA DO CANAL REVESTIDO FECHADO			
LOCALIZAÇÃO próximo à Rua Alto Guandu	CÓDIGO(S) DO(S) LOGRADOURO(S): 2630		
BARRIO: São Paulo	BACIA: Ribeirão da Onça	CÓDIGO DA BACIA: 4131300	
CURSO D'ÁGUA: Córrego Cachoeirinha	EXTENSÃO: 426,50 m		
CÓDIGO DE CAMPO: D.P.8	DATA DE CADASTRO: 01/03/2000	MAPAS: 5456	
<b>MEDIDAS (m)</b> <b>COORDENADAS DOS ACESSOS EXTERNOS</b>  A = 8,00 B = 4,30 C = ____ D = ____ H = ____  H = altura do assoreamento		<b>TIPO DE SEÇÃO: 1</b> 	

DPR01E - Córrego Vilarinho	686	G40 + 49,50m	Janela mal tamponada		
	690	G42 + 15,50m	Obstrução Parcial		
	621	C + 41,00m	Interferência		
	608	G22 + 66,70m	Retenção de lixo com ferragens expostas		
	606	A + 2,00m	Retenção de lixo em Seção bicelular		
	599	G19 + 85,00m	Retenção de lixo em Seção bicelular		
	530	G5 + 29,50m	Janela mal tamponada		
	508	G1 + 93,00m	Interferência		
	493	Ala + 31,00 m	Janela mal tamponada		
	490	Ala + 18,00 m	Junta aberta		
	491	Ala + 26,00 m	Retenção de lixo com ferragens expostas		
	513	G2 + 35,00 m	Janela mal tamponada		
	510	G2 + 2,50	Janela mal tamponada		
	516	G2 + 102,00 m	Janela mal tamponada		
	597	G19 + 55,00 m	Ligação de contribuição mal executada		
540	G6 + 63,00 m	Janela mal tamponada			

Figuras 4.1 e 4.2– Exemplo de ficha de levantamento cadastral das patologias, utilizados durante os trabalhos de levantamento de dados pela PBH.



Figuras 4.3 e 4.4 – Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água. O finos foram carreados pelo fluxo de água, ficando exposto o agregado graúdo.



Figuras 4.5 e 4.6 – Desgaste por erosão e cavitação no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água.



Figuras 4.7 e 4.8 – Desgaste por erosão no fundo de galeria causada pelo fluxo d'água. O fundo da galeria foi completamente erodido e não mais existe. Nota-se pelo bastão na mão do vistoriador que a grande profundidade da erosão abaixo do leito do canal.





Figuras 4.9 e 4.10 – Desgaste em degraus de canais abertos causada pelo fluxo d'água, em área próxima a degrau, que é um ponto susceptível a este tipo de ocorrência, pois cria diferenças de pressão que favorecem o aparecimento de bolhas no fluxo que são as causadoras dos danos por cavitação.



Figuras 4.11 e 4.12 – Desgaste por erosão e cavitação em área de degraus. O desgaste se soma a corrosão de armaduras e acúmulo de lixo e sedimentos na segunda figura.



Figuras 4.13 e 4.14 – Desgaste por erosão e cavitação em degrau. A cavitação é a degradação da superfície do concreto causada pela ruptura ou implosão de bolhas de vapor de água quando a velocidade ou direção do escoamento sofre uma mudança brusca (ANDRADE,1992).



Figuras 4.15 e 4.16 – Desgaste por erosão e cavitação em degraus. Nota-se pelo bastão na mão do vistoriador que a grande profundidade da erosão abaixo do leito do canal.





Figuras 4.17 e 4.18 – Desgaste por erosão no fundo de redes tubulares de concreto. A erosão é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas sólidas finas suspensas. Há o aumento do efeito erosivo em concretos quando a água contém ácidos e sais reagentes com elementos do cimento dissolvido. A presença de ligações clandestinas de esgoto e lançamentos indevidos nas redes propiciam tal situação.



Figuras 4.19 e 4.20 – Desgaste na junção da laje de fundo com as paredes dos canais, ponto vulnerável. Nota-se que já se iniciou o processo de corrosão das armaduras. Na maioria dos casos, como este, nota-se que a deterioração da estrutura devido a determinada patologia é a porta de entrada para o desenvolvimento de outras patologias. O processo acaba se retroalimentando levando a estrutura a deterioração acentuada ou até mesmo à ruína.



Figuras 4.21 e 4.22 – Desgaste por erosão no fundo de galerias. O fundo da galeria foi completamente erodido e não mais existe. Tal condição pode inclusive levar a estrutura à ruína, uma vez que há o solapamento da estrutura do canal devido ao fluxo d'água que passa a ocorrer em leito natural, já que não mais existe laje de fundo.



Figuras 4.23 e 4.24 – Desgaste acentuado de laje de fundo de galeria com exposição das armaduras e sua subsequente corrosão. Nota-se na segunda figura que a exposição das armaduras faz com que o lixo carreado pelo fluxo fique preso nesta.





Figuras 4.25 e 4.26 – Corrosão das armaduras nas lajes de teto de galeria, junto a poços de visita. Nota-se que houve o deslocamento do recobrimento de concreto destas armaduras, em virtude da expansão a armadura corroída.



Figuras 4.27 e 4.28 – Corrosão generalizada das armaduras na parede de canal aberto, no caso o Arrudas e no fundo de passeio conjugado ao canal. 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. 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.



Figuras 4.29 e 4.30 – Detalhe de ligação de redes tubulares nas paredes e tetos dos canais. Realizada de maneira imprópria, deixa exposta as armaduras, o que propicia o início de processo patológico. O arremate e acabamento corretos das ligações das redes coletoras aos canis é fundamental para o não aparecimento das manifestações patológicas.



Figuras 4.31 e 4.32 – Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria, acompanhada de manchas indicando processos de patologia química do concreto. Nota-se que as ferragens estão se desprendendo e o fluxo faz com que fiquem retorcidas como nota-se na primeira figura.





Figuras 4.33 e 4.34 – Corrosão generalizada das armaduras em lajes de teto de galeria, propiciando o acúmulo de lixo preso nas ferragens. Ambientes agressivos como os canais fechados, onde existem gases, líquidos ou sólidos agressivos, ou mesmo solos agressivos, proporcionam condições para a corrosão de armadura no concreto armado



Figuras 4.35 e 4.36 - Estalactites formadas pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto. Pode-se notar pela cor a presença de material das armaduras, além da presença de carbonatação e efluorecências.

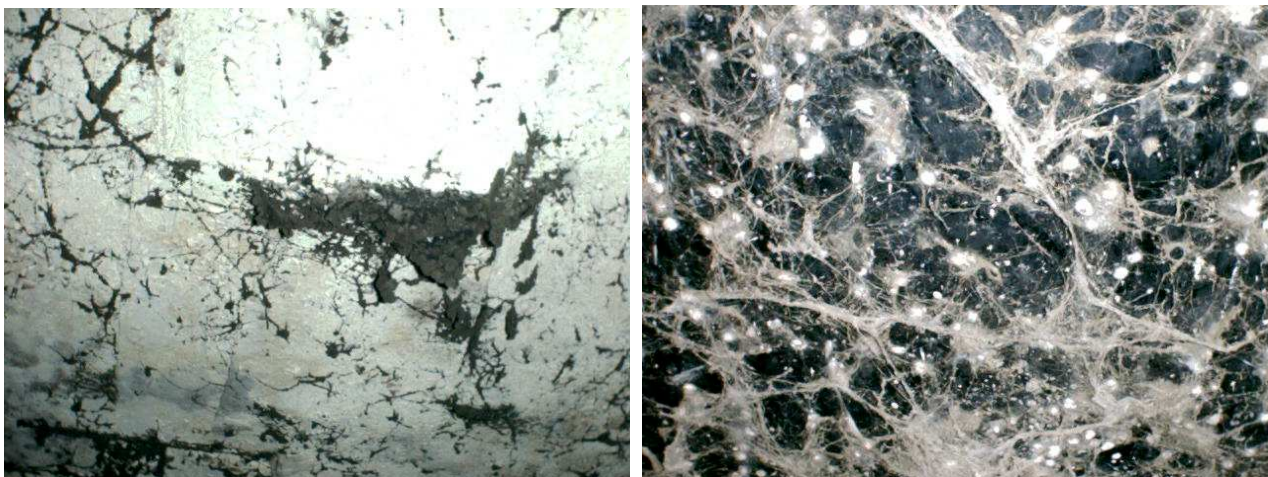


Figuras 4.37 e 4.38 – Manchas brancas indicando a presença de eflorescências. Nota-se também a presença de estalactites, o que mostra que houve carreamento de material de dentro da estrutura. As reações químicas no concreto se manifestam através de efeitos físicos nocivos, tais como o aumento da porosidade e permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e destacamento. Atenção especial deve ser dada ao ataque de sulfatos, ataque por álcali-agregado e corrosão das armaduras, uma vez que estes fenômenos são responsáveis pela deterioração de um grande número de estruturas de concreto.



Figuras 4.39 e 4.40 – A primeira figura mostra a presença de grande quantidade de concreto lançado dentro do canal, provavelmente proveniente da execução de fundações de edificações acima deste. A seção do canal é case totalmente estrangulada pelo material. A Figura 4.40 mostra a presença de redes de utilidades dentro dos canais. Além de danificar as paredes e tetos a estrutura, propicia o acúmulo de lixo, além de interferir no funcionamento dos canais.





Figuras 4.41 e 4.42 – Manchas e eflorescências indicando processos de patologia química do concreto. Grande presença de matéria orgânica no concreto. As eflorescências ocorrem onde a lixiviação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  retira o carbonato de cálcio solúvel, processo que é caracterizado por depósitos de crostas brancas na superfície do concreto.



Figuras 4.43 e 4.44 – Manchas e estalactites decorrentes de lixiviação acentuada, causada pelo carreamento de material causado pelo fluxo d'água dentro das estruturas de concreto. Tais manchas, comuns em estruturas de túneis de concreto, caixas de água e valas, onde ocorre a livre percolação de água, diminuem a proteção química e o pH do concreto, e em alguns casos, formam estalactites decorrentes de lixiviação acentuada.



Figuras 4.45 e 4.46 – Presença de raízes dentro das galerias. As raízes criam tensões nas estruturas que originam trincas e deslocamentos. Além disso, criam caminhos por onde a água percola pela estrutura, facilitando o transporte de outros agentes agressivos para seu interior. e podem gerar outras patologias como por exemplo a carbonatação.



Figuras 4.47 e 4.48 – Presença de plantas e matéria orgânica (lodo) em canais abertos. Sua presença causa deterioração do concreto, além de criar caminhos por onde a água pode percolar. 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, tensões provocadas pela cristalização de sais e complexação.





Figuras 4.49 e 4.50 – Canal em aduelas pré-fabricadas sofreu recalques e deslocamentos. A causa apontada para a origem da patologia foi a falta do berço de concreto para assentamento das aduelas.



Figuras 7.51 e 4.52 – O canal localizado na rua Tocantins possui curva acentuada. Tal característica dificulta a execução de estruturas pré moldadas, o que muitas vezes torna preferível construir tais trechos em concreto usinado in loco.



Figuras 4.53 e 4.54 - Presença de trincas nas estruturas de galerias O concreto sob carga pode estar sujeito a três tipos de deformação: elástica, plástica e viscosa. Podem ocorrer também combinações entre elas. A deformação elástica, ou imediata, é reversível e pode ser totalmente recuperada quando do descarregamento do concreto. Já a deformação lenta, ou por fluência, refere-se a uma deformação parcialmente reversível, plástica.



Figuras 4.55 e 4.56 – Presença de trincas nas estruturas de galerias A fadiga provoca o aumento da deformação, obtida através da aplicação repetida de uma carga ao longo de um tempo. Tensões cíclicas e carregamentos repetitivos inferiores à tensão máxima resistente podem provocar ruptura por fadiga nas estruturas.





Figuras 4.57 e 4.58 – Colapso de manilhas de concreto pré fabricadas em rede de drenagem, causada pelo solapamento do solo abaixo das manilhas. Uma vez que as manilhas se deslocam ou entram em ruína, o fluxo d'água diretamente no solo abaixo causado pela falta da rede retroalimenta o processo de carreamento de material e cada vez mais manilhas são atingidas.



Figuras 4.59 e 4.60 – Presença de concreto dentro das galerias. A presença tanto pode ser originada de descarte irregular de material nas redes quanto de defeitos nas formas durante a execução das estruturas.



Figuras 4.61 e 4.62 – Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais. Patologia decorrente da execução incorreta das estruturas, tendo o concreto sido vibrado incorretamente. Nota-se na primeira figura que a armadura ficou exposta por falta de material de recobrimento, o que abre espaço para a corrosão da armadura.



Figuras 4.63 e 4.64 – Presença de ninhos de concretagem nas paredes dos canais. Patologia decorrente da execução incorreta das estruturas, tendo o concreto sido vibrado incorretamente.





Figuras 4.65 e 4.66 – Presença de estacas de fundações de edifícios dentro das galerias. A cravação das estacas atravessou a laje de topo e de fundo das galerias, danificando severamente sua estrutura, mostrando situação extrema de mau uso da estrutura.



Figura 4.67 e 4.68 – Detalhe de estaca cravada dentro da galeria apresentada na figura 4.66, mostrando os extensos danos causados à laje do teto da galeria. A Segunda figura mostra o colapso de uma estrutura de concreto de canal aberto, que foi executada sobre uma estrutura de gabião existente. A base de baião é muito flexível e propensa a grandes deformações, o que foi incompatível com a estrutura rígida de concreto feita por cima desta.

## 5 – Considerações Gerais

Embora a compilação de dados e o tratamento estatístico das patologias encontradas não tenha sido objeto deste trabalho, é interessante notar que existem alguns tipos de patologias muito recorrentes nas estruturas de concreto dos canais de galerias de Belo Horizonte.

Uma delas, talvez a mais comum, é o desgaste das superfícies de fundo dos canais, sendo notada desde o menor grau até casos extremos onde o fundo da galeria simplesmente não mais existe. O que é um resultado até mesmo de certa forma esperado, pois o fluxo constante de água, já que grande parte das galerias não só servem para drenar a água pluvial como também canalizaram cursos d'água existentes, geralmente carreando grande quantidade de sólidos dos mais variados tamanhos, como a alta incidência da presença de lixo e entulho nos canais mostra, geram condições onde a erosão e cavitação provocam desgastes acentuados nas estruturas dos canais. O próprio relevo de Belo Horizonte é um fator complicador, pois altas declividades geram maiores velocidades de escoamento que propiciam maior incidência de erosão e cavitação. Para reduzir a velocidade, e até mesmo por questões de geometria dos canais, é comum a adoção de degraus para a dissipação da energia. Porém esses degraus são pontos mais propícios ao desgaste nas lajes de fundo por causa da cavitação.

Conforme observado no estudo de caso, as estruturas subterrâneas de concreto sofrem grande incidência de manifestações patológicas relacionadas à erosão, cavitação e desgaste do concreto, acompanhados de armaduras expostas de elementos estruturais com corrosão. A corrosão nas lajes de fundo tem grande correlação com os fenômenos de erosão e cavitação anteriormente descritos, enquanto que a corrosão das lajes de topo geralmente tem como causa a elevada umidade e o ataque sofrido pelo concreto. O fato das galerias trabalharem bem abaixo o nível máximo a maior parte do tempo, faz com que a umidade se condense, e juntamente com a presença de  $O_2$  e  $CO_2$ , promovem a corrosão acelerada de armaduras.

Uma ocorrência muito comum nas estruturas subterrâneas são os danos causados nas estruturas causados pela presença de estruturas e redes de outros serviços urbanos, como por exemplo, esgoto e outros e até mesmo fundações que são implantadas sobre as galerias. Além do próprio dano causado diretamente por essas estruturas, sua implantação cria pontos onde o concreto e sua armadura fica vulnerável a ataques do meio agressivo onde se encontram.

A localização destas estruturas em meio urbano, sob ação da emissão de poluentes por veículos, lançamentos irregulares de esgotos e outros tipos de efluentes, faz com que sofram com o elevado teor de substâncias ácidas, como o  $CO_2$ , pois estas promovem a despassivação da

armadura por carbonatação. A carbonatação, indicada pela redução da alcalinidade do concreto, e outras manifestações patológicas encontradas são decorrentes de fatores que, em conjunto, agredem as estruturas de concreto armado.

Além da carbonatação, as eflorescências foram facilmente percebidas em vários dos casos mostrados.

Já no caso dos canais abertos, uma patologia comum é a presença de mato, plantas e até mesmo pequenas árvores, que acabam comprometendo as estruturas. Tais manifestações não são encontradas em cais fechados, pois a ausência de luz solar impossibilita tais ocorrências.

Para melhor avaliação das patologias nas estruturas subterrâneas é necessário realizar ensaios referentes às diversas manifestações patológicas apresentadas. Qualificando e quantificando as manifestações patológicas, pode-se estudar e avaliar tais estruturas, prevendo reparos para estagnar ou desacelerar o processo de deterioração de estruturas de concreto inseridas em ambientes agressivos, bem como aprimorar as estruturas que se encontram em situação similar às que apresentam as manifestações patológicas. Ensaio como o de corrosão, de desgaste e outros, além de ensaios mais sofisticados e modernos, como o ensaio por ultrassonografia e o ensaio de Caminhamento Elétrico e de GPR, são fundamentais para a caracterização das patologias existentes, o que leva a um entendimento dos mecanismos de funcionamento dessas patologias e em consequência às suas causas.

Para que se possam criar estruturas que resistam melhor às condições agressivas às quais as estruturas dos canais e galerias são submetidas, a qualidade do concreto deve ser repensada, pois as estruturas, na maioria moldadas em loco, deveriam possuir maior controle de qualidade em sua produção. Fatores como relação a/c, espessura de cobrimento, tipo de cimento, entre outros, ou não são especificados nos projetos, ou especificados erroneamente, além de não serem respeitados na execução de obras subterrâneas.

Como as administrações públicas não dispõem de metodologias para elaboração de um plano de manutenção preventiva para conservar as estruturas, verifica-se, que as intervenções de manutenção em galerias de águas pluviais 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 anteriormente.

Seria então fundamental que a SUDECAP, como órgão responsável pela implantação, operação e manutenção destas estruturas na cidade de Belo Horizonte, criasse normas e padrões específicos

para estruturas de concreto para canais e galerias, a serem incluídos no seu caderno de encargos, de tal forma a especificar materiais e métodos construtivos que minimizassem as condições que dão origem às patologias geralmente encontradas nessas estruturas e proovessem maior durabilidade às estruturas de concreto das canalizações.

## 6 - CONCLUSÃO

Tendo em vista o exposto neste trabalho, concluímos que os principais problemas encontrados nas estruturas de concretos dos canais em Belo Horizonte são as patologias decorrentes de defeitos construtivos das estruturas; problemas decorrentes das próprias condições de trabalho das canalizações, onde o fluxo constante de água gera acentuado desgaste por erosão e o meio ambiente é muito agressivo aos concreto. E por último a falta de um plano de manutenção preventiva e corretiva das estruturas existentes;

Assim sendo, tem-se como sugestão para minimizar estes problemas, algumas ações como:

A criação de normas e padrões específicos para estruturas de canalizações, tendo em vista as condições a que estas estruturas são submetidas, visando maior durabilidade, visando por exemplo maior resistência à erosão e desgaste, ou menor porosidade, ao invés de somente especificar o concreto por seu fck, o que pode não ser suficiente para que se tenha uma estrutura com bom desempenho.

O maior controle tecnológico durante a execução das estruturas, evitando problemas como ninhos de concretagem, a execução inadequada de janelas de inspeção e de ligação das redes tubulares com as estruturas de canais, que são pontos vulneráveis mais susceptíveis às patologias.

O uso, sempre que possível, de canais abertos em detrimento de canais fechados. Além das vantagem ambientais, canais abertos facilitam a manutenção e a detecção das patologias, e geralmente são mais simples de se fazer intervenções, pois não são ambientes confinados como os canais fechados. Além disso, são menos susceptíveis ou até mesmo imunes a algumas das patologias encontradas, como por exemplo o ataque biogênico devido à contaminação de esgotos às lajes de teto e danos causados por estruturas como estacas, redes de água e esgoto e de utilidade pública construídos sem critério e cuidado.

E finalmente, a inclusão de plano de inspeção e manutenção efetivo, evitando a degradação acentuada das estruturas.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M. S. *Compressive Strength of concrete at temperature to 16000 F . American Concrete Institute SP 25 Temperature and Concrete*. Detroit, Michigan, 1971
- ABREU, A. G. *Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais*. Dissertação de mestrado. Porto Alegre 1998.
- AGUIAR, J. E. *Patologias que comprometem a durabilidade do concreto em galerias de águas pluviais*. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, Fortaleza. Anais em CD-ROM do 42º IBRACON. Fortaleza: IBRACON, III-A-012.
- AGUIAR, J. E. ; BAPTISTA, M. B *Estudo Das Patologias Nas Estruturas De Concreto Das Galerias De Águas Pluviais De Belo Horizonte*. In XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande – MS.
- AHMAD, S. *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction — a review*. Cement & Concrete Composites, 25. 2003.
- AÏTCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: Pini. 2000. 667p. AL-AMOUNDI, O. S. B. *Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments*. Cement and Concrete Composites, n. 24, 2002.
- AL-BAHAR, S.; ATTIOGBE, E. K.; KAMAL, H. *Investigation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete Structure in Kuwait*. ACI Materials Journal. May-June 1998.
- ALMEIDA, I. R. *Influência da resistência à abrasão do agregado na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho*. In: Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC, 42, 2000, Fortaleza. Anais. São Paulo: IBRACON, 2000 (CD Rom)
- ANDRADE, J., DAL MOLIN D. *Influência da Agressividade Ambiental nas Patologias em Estruturas de Concreto Armado nas Cidades de Porto Alegre (RS) e Recife (PE)*. Durabilidade das Construções. São Leopoldo – RS. Anais ANTAC, 1997.
- ANDRADE, J.J.O. et al. *Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química*. In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 45, 2003, Vitória - ES. Anais. São Paulo: IBRACON, 2003 (CD Rom)



ANDRADE, Jairo José de Oliveira. *Vida Útil das Estruturas de Concreto*. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. 2. v, cap. 31, p. 923-951. ISBN 85-98576-05-0

ANDRADE, Maria del Carmem. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução e adaptação de Antônio Carmona e Paulo Helene. 1. ed. São Paulo: Pini, 1992. 104 p. ISBN 85-7266-011-9

ANDRADE, T. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, cap. 25, p. 752-792. ISBN 85-98576-04-2

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

ANDRIOLO, R. R., SGARBOZA, B. C. *Inspeção e controle de qualidade do concreto*. 1. ed. São Paulo: Newswork. 1993.

ARANHA, P. M. F. *Contribuição ao estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado da região da Amazônia*. Porto Alegre: UFRGS, 1994. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994, 144p.

ASHTON, H. E.; SEREDA, P. J. *Environment, Microenvironment and Durability of Building Materials*. Durability of Building Materials, V1. 1982.

BARBOSA, W.; WOZNIAK, R.S; MEDEIROS, B.L.; PEDROZO, P.H; FERNANDES, M.; CARMO, J.B.M. *Análise do concreto de estrutura das câmaras transformadoras subterrâneas sob a ação de ambiente agressivo*. Congresso Betão estrutural 2004. Cidade do Porto – Portugal.

BAUER, F. L.A. *Materiais de Construção*. 1 ed. LTC. São Paulo: 1994.

BAUER, R. J. F. et al *Influência dos endurecedores de superfícies sobre a resistência ao desgaste por abrasão* In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 44, 2002, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002 (CD Rom)

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; QUÉNEUDEC, M. *Transport of fluids in cement–rubber composites*. Cement & Concrete Composites, 2004.

CABRAL, A. E. B. *Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos*. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, 2000.

CÁNOVAS, M. *Patologia e Terapia do Concreto armado*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1988.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. *Patologia e terapia do concreto armado*. Tradução de Maria Celeste Marcondes, Carlos W. F. dos Santos, Beatriz Cannabrava. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CARVALHO, R.C.; JURLAN JÚNIOR, S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de; MAREGA, W. T.; COSTA, M. H. *Recuperação de dois reservatórios enterrados*. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 42º, 2000, Fortaleza. Anais em CD-ROM do 42º IBRACON. Fortaleza: IBRACON, III-E-005.

CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas*. 1. ed. São Paulo: Pini. 1997.

CEUKELAIRE, L, VAN NIEUWENBURG, D. *Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concret*. 1992.

CINCOTTO, M.A. *Ação do Meio Sobre o Concreto. Durabilidade das Construções*. São Leopoldo – RS. Anais ANTAC, 1997.

COSTA, C. N. et al *O fenômeno do lascamento (spalling) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica*. In: *Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC*, 44, 2002, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002 (CD Rom)

COSTA, C. C. & SILVA, V. P. *Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situações de incêndio* In: NUTAU 2004 – Seminário Internacional – Demandas Sociais, Inovações tecnológicas e a Cidade. Anais. NUTAU/FAU/USP. São Paulo, 2004 (Cd Rom).

DAL MOLIN, D. C. C. *Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de mestrado. Porto Alegre. 1988.

EMMONS, Peter H. *Concrete Repair and Maintenance*. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p. ISBN 0-87629-286-4

FERREIRA, Rui Miguel. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão*. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 27, p. 828-855. ISBN 85-98576-04-2

GENTIL, V. *Corrosão*. 3 ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: 1996.

GRAÇA, Newton G.; BITTENCOURT, Rubens M.; SANTOS, Sérgio B. dos. Efeitos da Temperatura sobre o Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, cap. 23, p. 687-711. ISBN 85-98576-04-2

HAMMOND, E. & ROBSON, T.D. *Comparison of electrical properties of various cements and concretes*, The Engineer, 199, pp. 78-90, Jan. 21, 1955

HASPARYK, N. P. *Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa*. Dissertação de mestrado. 1999.

HASPARYK, Nicole Pagan; LOPES, Anne N. M.; ANDRADE, Moacir A. S.; SANTOS, Sérgio B. dos. Deformações por Retração e Fluência. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1 cap. 22, p. 655-685. ISBN 85-98576-04-2

HELENE, P. *Manual para Reparos, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

HELENE, Paulo R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 1993. 231 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

JUNG, W.; YOON, Y.; SOHN, Y. *Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion*. 2002.

KELHAM, S. A water absorption test for concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 40, n. 143, p. 106-110, June 1988.

KLEIN, D. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA, L.C. *Patologias das edificações*. Curso UFRGS. 1999.

- KORMANN, A. C. M. *Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens*. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2002.
- KULAKOWSKI, M. *Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos*. Dissertação de mestrado. Porto Alegre. 1994.
- KULAKOWSKI, M. *Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*. Tese de Doutorado. Porto Alegre, 2002.
- LIMA, Maryangela Geimba. *Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto*. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, cap. 24, p. 713-751. ISBN 85-98576-04-2
- LIMA, R. C. A. et al *O concreto de alto desempenho em temperaturas elevadas* In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5, 2003, São Paulo -SP. Anais. São Paulo, 2003 (CD Rom)
- LIU, T. C. & MCDONALD, J. E. *Abrasion-erosion resistance of fiber-reinforced concrete*. *Cement, Concrete and Aggregates*. v. 3, n. 2, p. 93-100. 1981
- MACIEL, A. da S. *Análise experimental de vigas armadas de concreto de alto desempenho com diferentes tipos de fibras*. Rio de Janeiro, 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- MAILVAGANAM, N.P. *Repair and Protection of Concrete Structures*. *Institute for Research in Construction*. National Research Council of Canada. Ottawa, Ontario, 1992.
- MARTYS, S. N. e FERRARIS E. C. *Capillary transport in mortars and concrete*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 5, 1997.
- MATHER, B. *Concrete durability*. *Cement & Concrete Composites*, 2004
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. Tradução de Paulo Helene *et al.* 1. ed. São Paulo, PINI, 1994. 580p. ISBN 85-7266-040-2
- METHA, P. K. *Point of view durability – critical issues for the future*. *Concrete International*. American Concrete Institute. Detroit. v.19, n.7, p. 27-33, 1997

- NEPOMUCENO, Antônio Alberto. Mecanismos de Transporte de Fluidos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. 2. v, cap. 26, p. 793-827. ISBN 85-98576-05-0
- NEPOMUCENO, Adam Matthew. *Propriedades do concreto*. Tradução Salvador E. Giammusso. 1. ed. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.
- NEVILLE, A. *Propriedades do Concreto*. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.
- ODIGURE, J. O. *Deterioration of long-serving cement-based sandcrete structures in Nigeria*. Cement and Concrete Research, 32. 2002.
- PADILHA, F. A., AMBROZIO, F. F. *Técnicas de análise microestrutural*. 1. ed. São Paulo: Hemus. 1985.
- SABBAG, F. A. *Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da uhe de mascarenhas*. Dissertação de mestrado. 2003.
- SARJA, A. & VERSIKARI, E. *Durability design of concrete structures*. Report of RILEM Technical Committee 130 – CLS, RILEM Report !4. London ; E & FN SPON., 1994.
- SHAHIN, U. M.; HOLSEN, T; ODABASI, M. *Dry deposition measured with a water surface sampler: a comparison to modeled results*. Atmospheric Environment, 36. 2002.
- SILVA, Moema Ribas; PINHEIRO, Sayonara Maria de Moraes. Biodeterioração do concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 28, p. 857-878. ISBN 85-98576-04-2
- SILVA, Paulo Fernando A. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. 152 p. ISBN 85-7266-043-7
- SILVA, Turíbio José da. *Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro*. 1998. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.
- SITTER, W. R. *Cost for service optimization the "Law of Fives"*. Comitè Euro International du Beton – CEB. Copenhagen, Denmark, n. 152, p.131 -134, 1983

SOUZA, V.; RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

SOUZA, A. A. A & MORENO Jr., A. L. *Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto* In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5, 2003, São Paulo -SP. Anais. São Paulo, 2003 (CD Rom)

SUJJAVANICH, S. et al. *Development of Strength and Fracture Properties of Styrene-Butadiene Copolymer Latex-Modified Concrete*. ACI Materials Journal, v. 95, n. 2, 1998.

THOMAZ, E. *Trincas em Edifícios – causas, prevenção e recuperação*. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo*. Dissertação de mestrado. Campinas, 2002.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de; CARRIERI JÚNIOR, Renato. *A escola brasileira do concreto armado*. 1. ed. São Paulo: Axis Mundi, 2005. 207 p. ISBN 85-85554-34-7

VELASCO, R. V. et al *Comportamento tensão- deformação do concreto de alto desempenho submetido a altas temperaturas* In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5, 2003, São Paulo -SP. Anais. São Paulo, 2003 (CD Rom)

ZIVICA, V.; BAJZA, A. *Acidic Attack of Cement-Based Materials – A Review*. Part 1: Principles of Acidic Attack. Construction and Building Materials. n. 15, 2001.