

Monografia

"MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO"

Autor: Bruno dos Santos Rocha

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Belo Horizonte

Janeiro/2015

Bruno dos Santos Rocha

**"MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização
em Construção Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais.
Ênfase: Gestão e Tecnologia na Construção Civil

Orientador: Prof. Adriano de Paula e Silva

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2015

À minha família e amigos por todo o apoio.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Departamento de Materiais de Construção pelos ensinamentos compartilhados durante o curso.

A Luciana por todo o companheirismo e incentivo, sem o qual este trabalho não teria chegado à sua conclusão.

A meus pais pelas oportunidades e possibilidades que me foram oferecidas.

Ao professor Adriano de Paula e Silva, pela orientação, paciência e apoio dados na elaboração deste trabalho.

A todo o Departamento de Manutenção da UFMG, e principalmente ao Diretor Edmilson Januário Santos, por todo o incentivo durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

A Patologia das Construções é uma área da engenharia de grande importância e tem como principal objetivo garantir a qualidade e o desempenho das estruturas de concreto armado durante sua vida útil esperada. A grande maioria das estruturas de concreto armado apresenta problemas oriundos de projetos falhos, de seleção incorreta de materiais, de execução e manutenção. Este trabalho tem como objetivo apresentar um resumo conciso sobre as origens, formas de manifestação, mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado e auxiliar a todos os profissionais envolvidos nas diversas etapas de construção de estruturas de concreto armado. A correta avaliação das estruturas e determinação das causas é fundamental para o sucesso das medidas de recuperação/proteção de estruturas.

Palavras-Chave: Concreto armado, patologias, ensaios não destrutivos, ensaios destrutivos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa / Relevância.....	3
2 OBJETIVOS	4
2.1 Geral	4
2.2 Específicos.....	4
2.3 Desenvolvimento do trabalho	4
3 PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	6
3.1 Corrosão das armaduras no interior do concreto.....	9
3.1.1 Carbonatação do concreto	12
3.1.2 Presença de cloretos.....	15
3.1.3 Corrosão das armaduras.....	18
3.2 Mecanismos de desintegração do concreto.....	21
3.2.1 Ataque de substâncias ácidas.....	21
3.2.2 Ataque de sulfatos.....	22
3.2.3 Reação álcalis-agregados	24
3.2.4 Desintegração por ciclo de gelo-degelo	25
3.2.5 Desgaste do concreto	27
3.3 Efeitos térmicos	29
3.4 Efeitos do carregamento.....	33
3.5 Falhas de projeto e execução	38
4 AVALIAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	40
4.1 Normas e procedimentos para avaliação de estruturas.....	41
4.2 Condições de serviço e de exposição.....	45
4.3 Investigação visual.....	46
4.4 Métodos e ensaios para avaliação do concreto.....	49
4.4.1 Resistência à compressão	49
4.4.2 Resistência de ligação.....	51

4.4.3	Potencial eletroquímico	52
4.4.4	Profundidade de carbonatação	54
4.4.5	Reação álcali-agregado.....	55
4.4.6	Presença de cloretos.....	56
4.4.7	Determinação da localização de armaduras no interior do concreto.	58
5	CONCLUSÃO	61
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).	2
Figura 3-1 – Modelo simplificado do processo de corrosão das armaduras no concreto. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).	10
Figura 3-2 – Relação entre a taxa de corrosão das armaduras e o pH do concreto. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	11
Figura 3-3 – Processo de carbonatação no concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	13
Figura 3-4 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo para diferentes fatores água/cimento de acordo com o Modelo de Vesikari. (Fonte: próprio autor).	14
Figura 3-5 – Processo de penetração de íons cloreto no interior do concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	16
Figura 3-6 – Processo de deterioração em pilar sobre o mar. (Fonte: Aguiar, 2014).	18
Figura 3-7 – Fissura em viga causada pela expansão dos óxidos gerados na corrosão. (Fonte: Aguiar, 2014).	19
Figura 3-8 – Perda de seção transversal nas armaduras devido à corrosão. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	20
Figura 3-9 – Efeitos do ataque de ácidos. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).	22
Figura 3-10 – Efeitos do ataque de sulfatos. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).	23
Figura 3-11 – Fissuras causadas pelo ataque de sulfatos. (Fonte: CEB, 1989)...	24
Figura 3-12 – Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado. (Fonte: Aguiar, 2014).	25
Figura 3-13 – Mecanismo de degradação das estruturas por ciclos de gelo-degelo. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado)... ..	26
Figura 3-14 – Efeitos da cavitação em estruturas de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014)... ..	27
Figura 3-15 – Desgaste superficial em pavimento de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014)... ..	28

Figura 3-16 – Efeitos da expansão térmica em estruturas de concreto com movimentação restrita. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	29
Figura 3-17 – Formação das trincas de retração devido à alta temperatura de hidratação do cimento. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	30
Figura 3-18 – Gráfico de temperatura de uma parede de concreto em função do tempo. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	31
Figura 3-19 – Danos a um pilar devido ao fogo utilizado por moradores de rua. (Fonte: Aguiar, 2014).	32
Figura 3-20 – Viga de concreto armado simplesmente apoiada. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	34
Figura 3-21 – Fissuras em vigas de vãos contínuos. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	35
Figura 3-22 – Fissuras causadas por esforços de cisalhamento entre pilares e vigas/lajes. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	36
Figura 3-23 – Situação de recalque de fundação em estruturas de concreto armado. (Fonte: Souza; Ripper, 1998).	37
Figura 3-24 – Categorias de possíveis falhas que podem surgir no processo de construção. (Fonte: Emmons, 1994 - adaptado).	38
Figura 4-1 – Métodos de ensaio para avaliação de estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994).	42
Figura 4-2 – Condições a serem consideradas durante a análise de estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	45
Figura 4-3 – Plataformas de inspeção em pontes. (Fonte: Aguiar, 2014).	46
Figura 4-4 – Caminhão tipo Munck com braço articulado. (Fonte: Aguiar, 2014).	47
Figura 4-5 – Inspeção por profissionais em altura. (Fonte: Aguiar, 2014).	47
Figura 4-6 – Inspeções subaquáticas. (Fonte: Aguiar, 2014).	48
Figura 4-7 – Aparelhos ópticos. (Fonte: Aguiar, 2014).	48
Figura 4-8 – Extração de corpos de prova de estruturas. (Fonte: Aguiar, 2014).	49
Figura 4-9 – Ensaio de compressão axial. (Fonte: Aguiar, 2014).	50
Figura 4-10 – Desenho esquemático de um ensaio de arrancamento. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	52
Figura 4-11 – Desenho esquemático de um ensaio de potencial eletroquímico. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).	54

Figura 4-12 – Ensaio de profundidade de carbonatação. (Fonte: Aguiar, 2014).	.55
Figura 4-13 – Desenho esquemático de um ensaio de teor de cloretos. (Fonte: Emmons, 1994).....	57
Figura 4-14 – Obtenção do perfil de cloretos em diferentes profundidades em uma peça de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014).....	57
Figura 4-15 – Ensaio de teor de cloretos sendo realizado em laboratório. (Fonte: Aguiar, 2014).	58
Figura 4-16 – Desenho esquemático de ensaio magnético de localização de armaduras e cobrimento. (Fonte: Emmons, 1994).	59
Figura 4-17 – Localização de armaduras e determinação de cobrimento através de aparelhos magnéticos. (Fonte: Aguiar, 2014).	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Distribuição percentual em função das causas que produziram os defeitos nas construções de concreto. (Fonte: Valente, 2008).....	7
Tabela 3-2 – Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto. (Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 23)	7
Tabela 3-2 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto. (Fonte: NBR 12655:2006)	17
Tabela 3-3 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação da temperatura ambiente. (Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 74).....	31
Tabela 4-1 – Normas utilizadas na avaliação das estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado)	43

LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CEB – *Comité Euro-International du Béton*

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – fator água/cimento do concreto

C₃A – aluminato tricálcico

CaCO₃ – carbonato de cálcio

CaCl₂ – cloreto de cálcio

CO₂ – dióxido de carbono

CP – Cimento Portland

Fe₂O₃ – óxido de ferro

Fe(OH)₂ – hidróxido ferroso

MPa – Megapascal

pH – potencial hidrogeniônico

1 INTRODUÇÃO

Durante anos as normas e regulamentos que tratam do processo de projeto e execução de estruturas de concreto armado mantiveram seu foco somente nos critérios de estabilidade e desempenho em serviço destas estruturas. O objetivo principal destas normas era garantir que as estruturas fossem projetadas e construídas de forma a possuírem resistência mecânica suficiente para suportar os carregamentos atuantes durante sua vida útil além de proporcionar conforto e segurança aos usuários da edificação.

Durante sua vida útil as edificações estão sujeitas à ação de diversos agentes que contribuem para a diminuição de sua resistência. Dessa forma, quando a estrutura de uma edificação apresentava uma queda em seu desempenho, era comum a execução de um reparo que devolvia, ou buscava devolver, esta estrutura à sua condição e resistência original. Esta recuperação era realizada sem o estudo dos motivos que levaram a esta diminuição no desempenho da estrutura e, portanto a solução não tinha como objetivo a correção definitiva do problema.

Com o aumento do número de construções em concreto armado foi possível observar que edificações semelhantes localizadas em uma mesma região, ou mesmo estruturas semelhantes em diferentes regiões, apresentavam necessidades de intervenções estruturais de forma diferenciada ao longo do tempo e que os problemas apresentados eram bastante diversos, tornando-se necessária a aplicação de diferentes técnicas para sua resolução.

No fim dos anos 70, a preocupação em relação à durabilidade inadequada das estruturas de concreto levou a um aumento dos estudos acerca das causas e natureza dos processos de degradação, e ao desenvolvimento de estratégias gerais para lidar com estas situações. Neste contexto o *Comité Euro-International du Béton* (CEB) formou seus primeiros grupos de estudo que deram origem ao manual *Durable Concrete Structures – Design Guide*.

Durante estes estudos o CEB buscou relacionar conceitos de durabilidade (projeto de estruturas, materiais, execução e cura do concreto) com conceitos de desempenho (resistência, rigidez e condições da superfície), conforme apresentado na Figura 1-1.

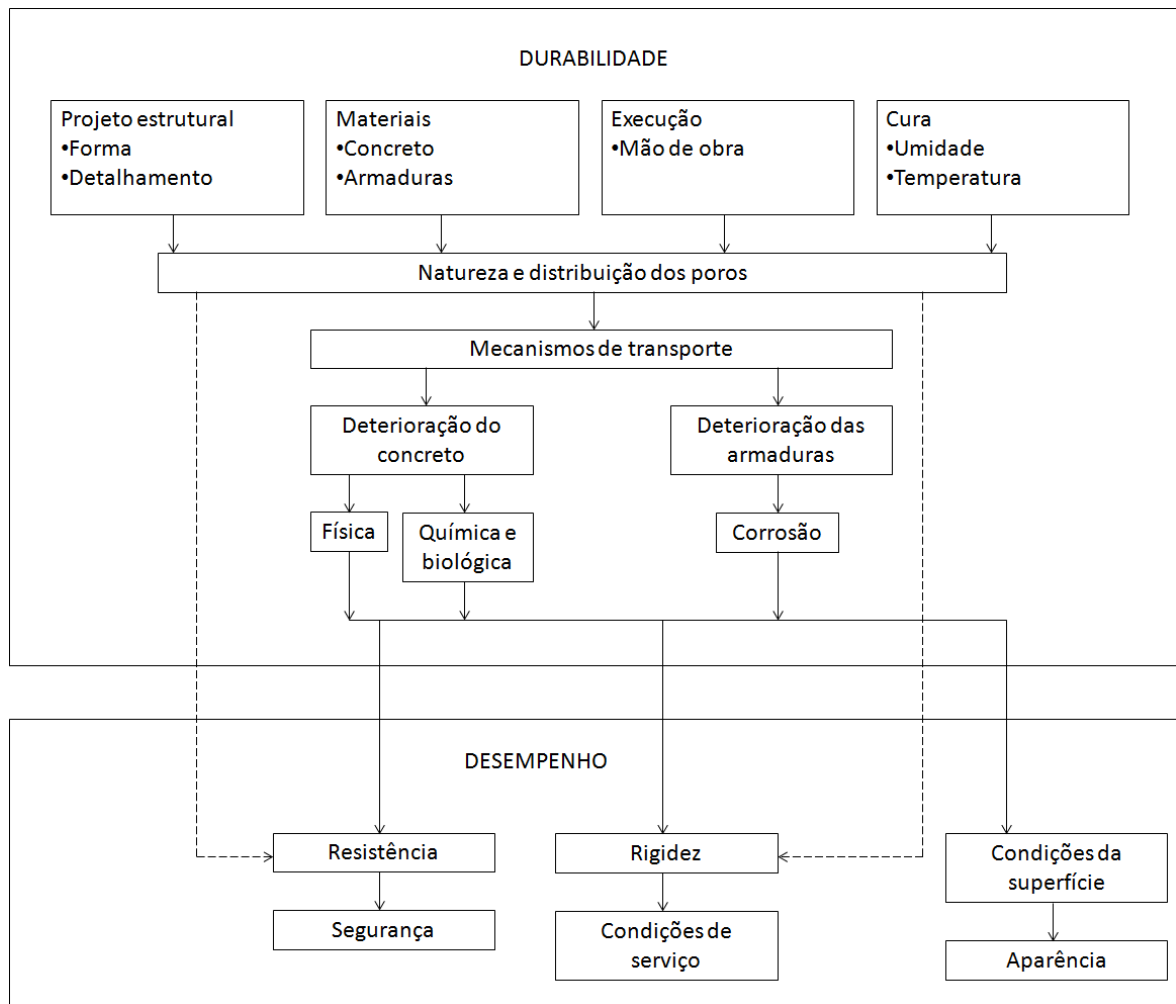


Figura 1-1 – Relação entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho.
(Fonte: CEB, 1989 – adaptado).

Surgem então os primeiros conceitos do ramo da engenharia conhecida como Patologia das Construções. “Esse novo campo da Engenharia das Construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas”. (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 14)

O estudo da Patologia das Construções teve grande inspiração na medicina. O engenheiro passou então buscar a origem das manifestações patológicas (diagnosticar os problemas das estruturas), estudar os mecanismos e consequências destas manifestações e com isso prever como o problema evoluiria e qual seria o comportamento da estrutura (elaborar prognósticos), passou a tratar a causa desta manifestação de forma a sanar definitivamente o problema (indicar terapias) e até mesmo a desenvolver sistemas de proteção que impedissem a ocorrência da manifestação (profilaxia das edificações).

O avanço no estudo da Patologia das Construções está possibilitando aos diversos setores envolvidos na construção de edificações a correta atuação na correção dos problemas apresentados pelas estruturas antigas visando estender a vida útil e a servicibilidade destas edificações. Além de demonstrar que a durabilidade das estruturas deve ser tratada por todos estes setores, seja no desenvolvimento dos projetos arquitetônicos e estruturais, na melhoria e escolha dos materiais, processos de execução, fiscalização, procedimentos de manutenção e inspeção das estruturas.

1.1 Justificativa / Relevância

Atualmente o que se observa na grande maioria das estruturas de concreto armado são projetos de baixa qualidade, executados com o mínimo de zelo, controle e sem nenhum critério ou plano de manutenção/conservação. Desta forma, a manutenção destas estruturas representa um problema, seja por questões de segurança ou gastos financeiros excessivos em sua manutenção.

O conhecimento das origens, formas de manifestação e mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado pode possibilitar a todos os envolvidos em seu processo de criação e utilização a tomada de decisões que afetem consideravelmente a vida útil e a qualidade destas estruturas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo apresentar as origens, formas de manifestação e os mecanismos de deterioração, as principais normas e procedimentos de avaliação do grau de comprometimento, previsão de vida útil e desempenho de estruturas de concreto armado.

2.2 Específicos

- Identificar os principais mecanismos de deterioração de estruturas de concreto armado.
- Apresentar os principais procedimentos e normas de avaliação das estruturas.

2.3 Desenvolvimento do trabalho

Dentro do contexto previamente descrito este trabalho será estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 1 – Introdução: apresenta-se a contextualização do estudo das patologias nas estruturas de concreto armado e sua justificativa / relevância.

No Capítulo 2 – Objetivos: apresentam-se os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

No Capítulo 3 – Patologia das Estruturas de Concreto Armado: são apresentadas as diversas manifestações patológicas que se apresentam nas estruturas. O estudo tem como foco principal as origens e mecanismos de desenvolvimento dos diferentes tipos de patologia e seus impactos sobre as estruturas de concreto armado.

No Capítulo 4 – Avaliação das Estruturas de Concreto: são apresentadas as diversas normas, ensaios e procedimentos técnicos utilizados para a avaliação das estruturas, quais os dados relevantes são retirados destas análises.

No Capítulo 5 – Conclusão: é feita uma análise geral acerca do que foi apresentado neste trabalho.

No Capítulo 6 – Referências Bibliográficas: são apresentados os materiais que serviram de fonte de consulta para a elaboração deste trabalho.

3 PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

As estruturas de concreto armado podem apresentar manifestações patológicas causadas por diversos motivos e estas manifestações podem apresentar sintomas muito semelhantes mesmo com sua causa sendo de origens diversas. Esta grande variedade de possibilidades de falhas nas estruturas de concreto armado é o que torna o estudo da Patologia das Construções um campo tão complexo da engenharia.

A construção de estruturas de concreto armado, ainda hoje, trata-se de um processo praticamente artesanal, onde as matérias-primas são trazidas ao canteiro de obras e processadas por diversas equipes e profissionais de forma a se obter uma estrutura final de acordo com os projetos. Aliado a isto se verifica ainda a grande quantidade de etapas e profissionais envolvidos no processo de concepção de estruturas de concreto e o grande aumento na complexidade das obras. Todos estes fatores em conjunto são responsáveis pela grande quantidade de problemas encontrados nas obras.

Em sua dissertação VALENTE (2008) apresenta a Tabela 3-1 retirada de um estudo realizado por JEAN BLEVOT (1974) sobre os fatores causadores das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. Estes resultados foram obtidos com base em uma análise dos documentos de 2.979 sinistros existentes nos arquivos do *Bureau Securitas* e *Socotex*.

O estudo de Blevot demonstra que as origens das manifestações patológicas que surgem nas estruturas de concreto armado durante sua vida útil são as mais variadas possíveis. Outros estudos mostram ainda que certos tipos de problemas são mais comuns em alguns países que em outros e que certas localidades conseguem evoluir satisfatoriamente algumas áreas do conhecimento sobre as estruturas de concreto armado.

Tabela 3-1 – Distribuição percentual em função das causas que produziram os defeitos nas construções de concreto. (Fonte: Valente, 2008)

Tipo de problema	(%)
Erros de concepção	3,5
Erros nas hipóteses de cálculo, erros materiais e ausências de estudos	8,5
Disposições defeituosas em certos elementos ou na transmissão de esforços	2,5
Falhas resultantes de deformações excessivas	19,7
Falhas resultantes dos efeitos de variações dimensionais (térmica)	43,7
Defeitos de execução	16,5
Fenômenos químicos	4,0
Causas diversas	1,6

A Tabela 3-2 apresenta um estudo de SOUZA e RIPPER (1998) contendo a distribuição das patologias nas estruturas de concreto em diversos estudos realizado pelo mundo. É possível observar que a causa dos problemas patológicos varia em função da localidade analisada.

Tabela 3-2 – Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto. (Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 23)

FONTE DE PÉSQUISA	CAUSAS DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO			
	Concepção e projeto	Materiais	Execução	Utilização e outras
Edward Grunau Paulo Helene (1992)	44	18	28	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	49		
C.S.T.C (Belgica) Verçpza (1991)	46	15	22	17
CEB Boletim 157 (1982)	50	40		10
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado Verçoza (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S (Reino Unido) (1972)	58	12	35	11
Bereau Securitas (1972)		88		12
E.N.R (USA) (1968 – 1978)	9	6	75	10
S.I.A (Suiça) (1979)	46		44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51	40		16
Jean Blévot (França) (1974)	35		65	
LEMIT (Venezuela) (1965 – 1975)	19	5	57	19

O estudo das manifestações patológicas é de fundamental importância para a correta avaliação das estruturas e adoção das soluções de recuperação/proteção que satisfaçam técnica e economicamente.

3.1 Corrosão das armaduras no interior do concreto

A corrosão das armaduras no interior do concreto é um processo eletroquímico onde ocorre simultaneamente uma reação de oxidação, uma de redução e a circulação de íons através do eletrólito.

No anodo ocorre a dissolução do ferro uma vez que é gerada uma corrente elétrica dirigida para o catodo através da água. Da combinação do cátion Fe^{++} com os ânions $(OH)^{-}$ resulta o hidróxido ferroso, de cor amarelada (SOUZA e RIPPER, 1998:67)

No catodo, os elétrons em excesso na armadura irão se combinar com a água e o oxigênio presentes no concreto, formando o óxido de ferro hidratado ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), de cor avermelhada.

Dessa forma, pode-se concluir que somente oxigênio é consumido para que ocorra a formação de ferrugem nas armaduras. Este oxigênio normalmente é encontrado nos poros do concreto, encaminhando-se da superfície do concreto até as armaduras. A presença de água somente é necessária para permitir que o processo eletrolítico ocorra. A Figura 3-1 exemplifica o processo de oxidação nas armaduras.

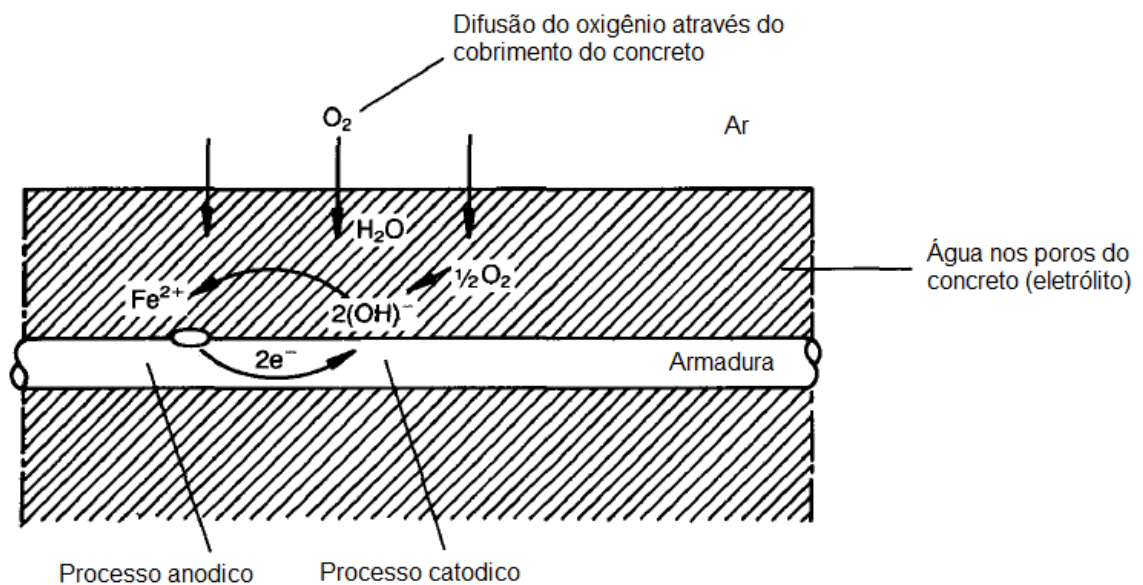


Figura 3-1 – Modelo simplificado do processo de corrosão das armaduras no concreto. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).

Por se tratar de um material de alta alcalinidade (pH entre 12,6 e 14,0) o concreto garante a proteção das armaduras devido à formação de uma fina camada passivadora em toda a superfície das armaduras que impede a dissolução do ferro. De acordo com CEB (1989) com a existência desta camada passivadora a corrosão das armaduras é impossível, mesmo com a presença de umidade e oxigênio, principais condições para a ocorrência da corrosão. Para SOUZA e RIPPER (1998) sempre que o pH for superior a 9 estará garantida a criação desta película.

No concreto em bom estado a corrosão ocorre de forma muito lenta. A Figura 3-2 apresenta a taxa de corrosão das armaduras em função do pH do concreto.

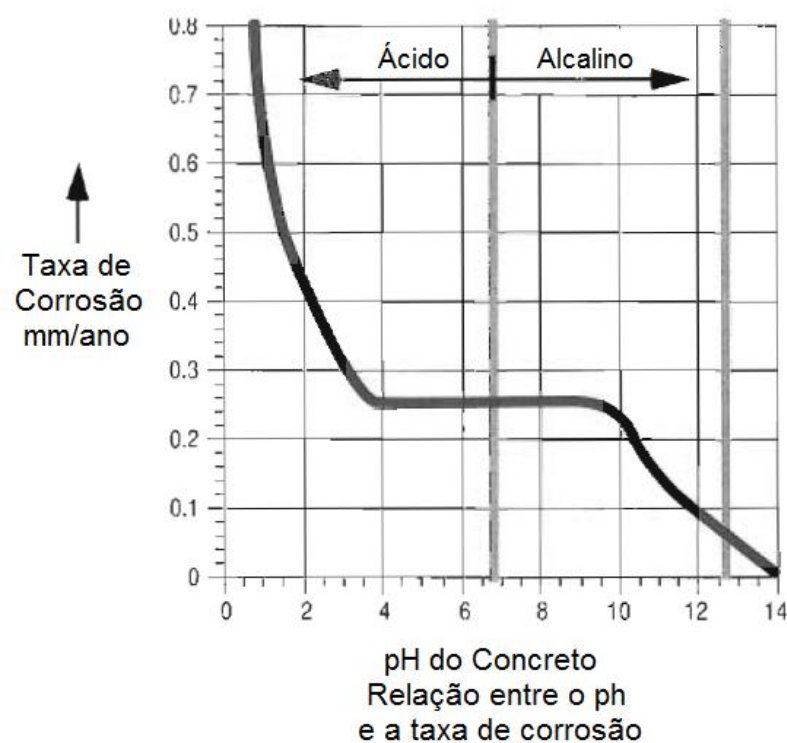


Figura 3-2 – Relação entre a taxa de corrosão das armaduras e o pH do concreto.
(Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Com a carbonatação do concreto ou a ação de cloretos esta camada passivante pode ser destruída e, com a presença de umidade e oxigênio em quantidades suficientes pode-se dar início ao processo de corrosão das armaduras. Em ambientes externos assume-se que estas condições serão atendidas.

De acordo com o CEB (1989) todos os processos envolvidos na corrosão das armaduras no concreto armado são controlados pelos mecanismos de transporte de gases e líquidos para o interior das estruturas de concreto.

- Carbonatação: difusão do CO_2 nos poros preenchidos com ar.
- Penetração de cloretos: difusão de cloretos em poros preenchidos com água e preenchimento de água contendo cloretos por capilaridade nos poros preenchidos com ar.
- Corrosão: difusão do oxigênio nos poros preenchidos com ar.

3.1.1 Carbonatação do concreto

A carbonatação do concreto é uma reação entre o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera e os produtos gerados durante a hidratação do cimento. O dióxido de carbono penetra nos poros do concreto através de difusão e reage com o hidróxido de cálcio no interior do concreto. O resultado desta reação é a formação de carbonato de cálcio e a redução do pH do concreto a valores inferiores a 9 e à consequente perda da película passivante que protege as armaduras. Com a perda dessa proteção as armaduras estarão sujeitas à ocorrência de oxidação caso haja a presença de oxigênio e água.

O processo de carbonatação não ocorre em concretos totalmente saturados, uma vez que a difusão do CO_2 somente ocorre através dos poros do concreto.

A Figura 3-3 apresenta esquematicamente o mecanismo de formação da carbonatação do concreto armado.

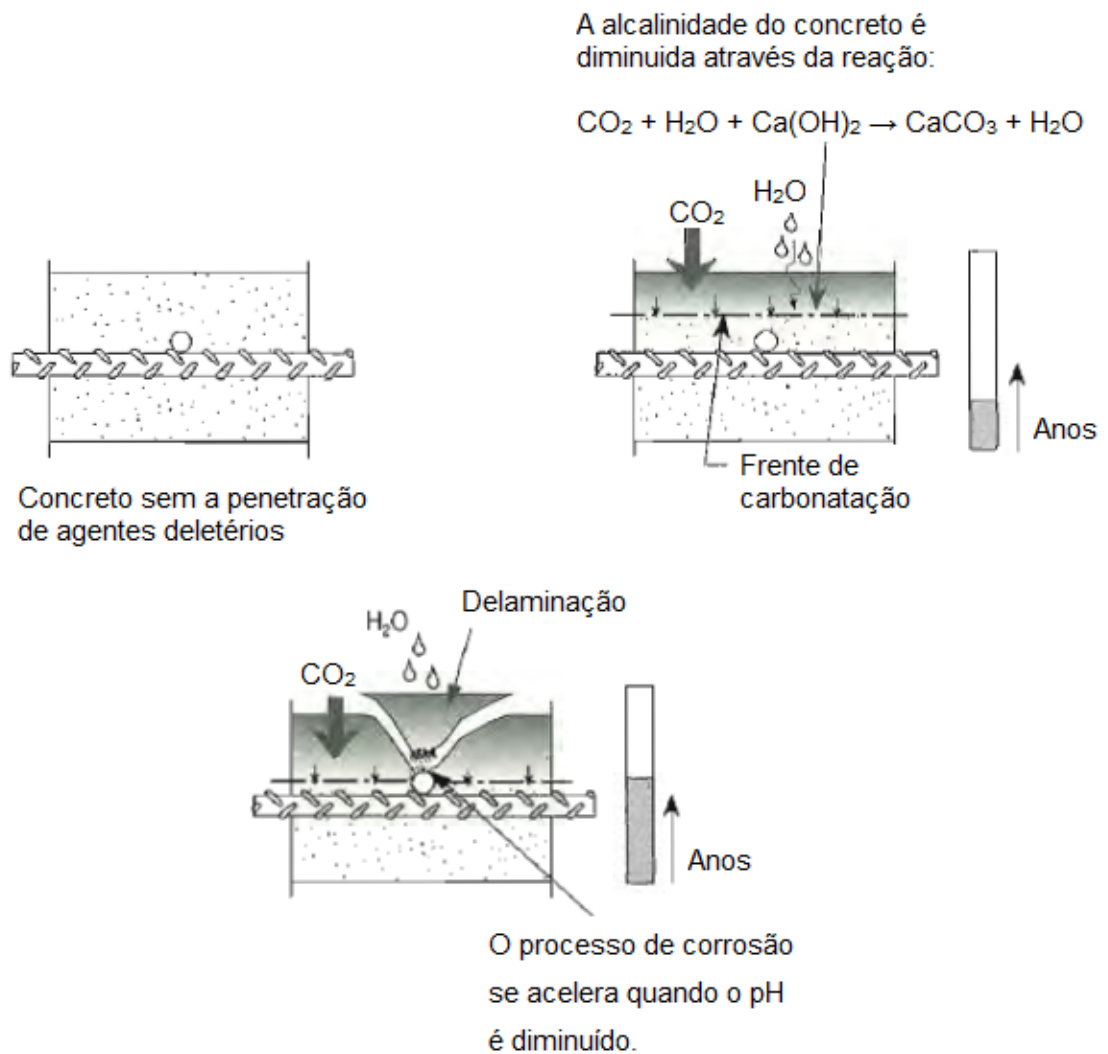


Figura 3-3 – Processo de carbonatação no concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

De acordo com SOUZA e RIPPER (1998) a carbonatação seria benéfica para o concreto caso se restringisse a uma espessura menor que o cobrimento das armaduras uma vez que aumentaria sua resistência química e mecânica.

A velocidade de avanço da frente de carbonatação depende de inúmeros fatores entre os quais se podem citar a concentração de CO_2 na atmosfera, porosidade e nível de fissuração do concreto, temperatura e umidade do ambiente. Existem diversos modelos de previsão da vida útil de estruturas de concreto que buscam encontrar uma correlação entre estes fatores e o processo de carbonatação do concreto.

Um dos modelos aceitos pela comunidade científica é o modelo proposto por Vesikari que se baseia no fator água/cimento (a/c) do concreto e possui a seguinte equação:

$$x = B \cdot \sqrt{t}$$

sendo:

$$B = 26 \cdot [(a/c) - 0,3]^2 + 1,6$$

onde:

a/c é o fator água/cimento do concreto.

A Figura 3-4 apresenta, utilizando o Modelo de Vesikari, uma previsão de profundidade da frente de carbonatação em função do tempo para três diferentes fatores água/cimento.

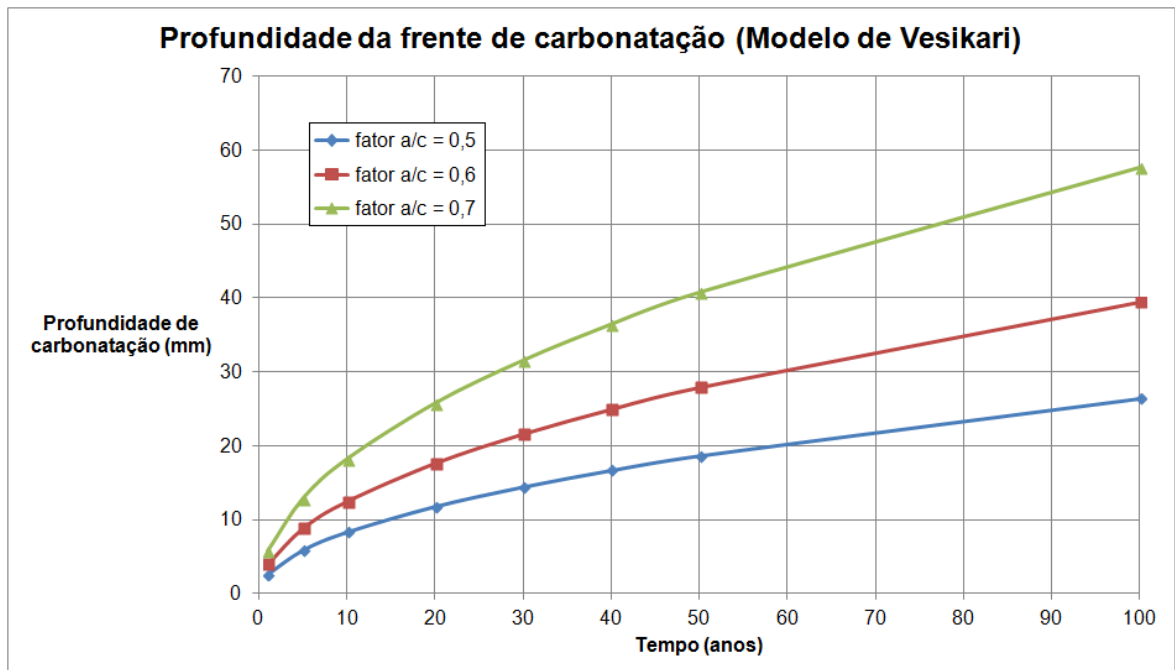


Figura 3-4 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo para diferentes fatores água/cimento de acordo com o Modelo de Vesikari. (Fonte: próprio autor).

De acordo com o gráfico, um elemento estrutural executado com concreto com fator água/cimento igual a 0,7 e um cobrimento de 3,0 cm (comum na construção

brasileira) teria a frente de carbonatação atingindo suas armaduras em aproximadamente 30 anos e a partir deste momento estaria sujeito à despassivação da camada protetora das armaduras tornando-se possível o início da corrosão de suas armaduras.

3.1.2 *Presença de cloretos*

De acordo com AGUIAR (2014) a presença de cloretos é apontada como um dos principais causadores do processo de corrosão nas armaduras do concreto.

O concreto situado em ambientes que possuam água do mar, maresia e sais de degelo estão sujeitos à ação dos íons cloreto. A penetração de cloretos ocorre da superfície do concreto para seu interior e sua velocidade depende basicamente de três fatores:

- Quantidade de íons cloreto no ambiente em contato com o concreto.
- A permeabilidade do concreto.
- A quantidade de umidade presente no ambiente.

Ao atingir as armaduras os cloretos poderão romper a camada passivante que protege o concreto e causar sua corrosão caso haja a presença de oxigênio e umidade. Com a formação das camadas de ferrugem surgem forças de tensão no interior do concreto que ocasionam trincas e deslocamento do concreto. Estas trincas facilitam ainda mais o acesso dos cloretos ao interior do concreto acelerando o processo de corrosão.

A Figura 3-5 apresenta o processo de penetração e efeitos da presença de cloretos no concreto armado.

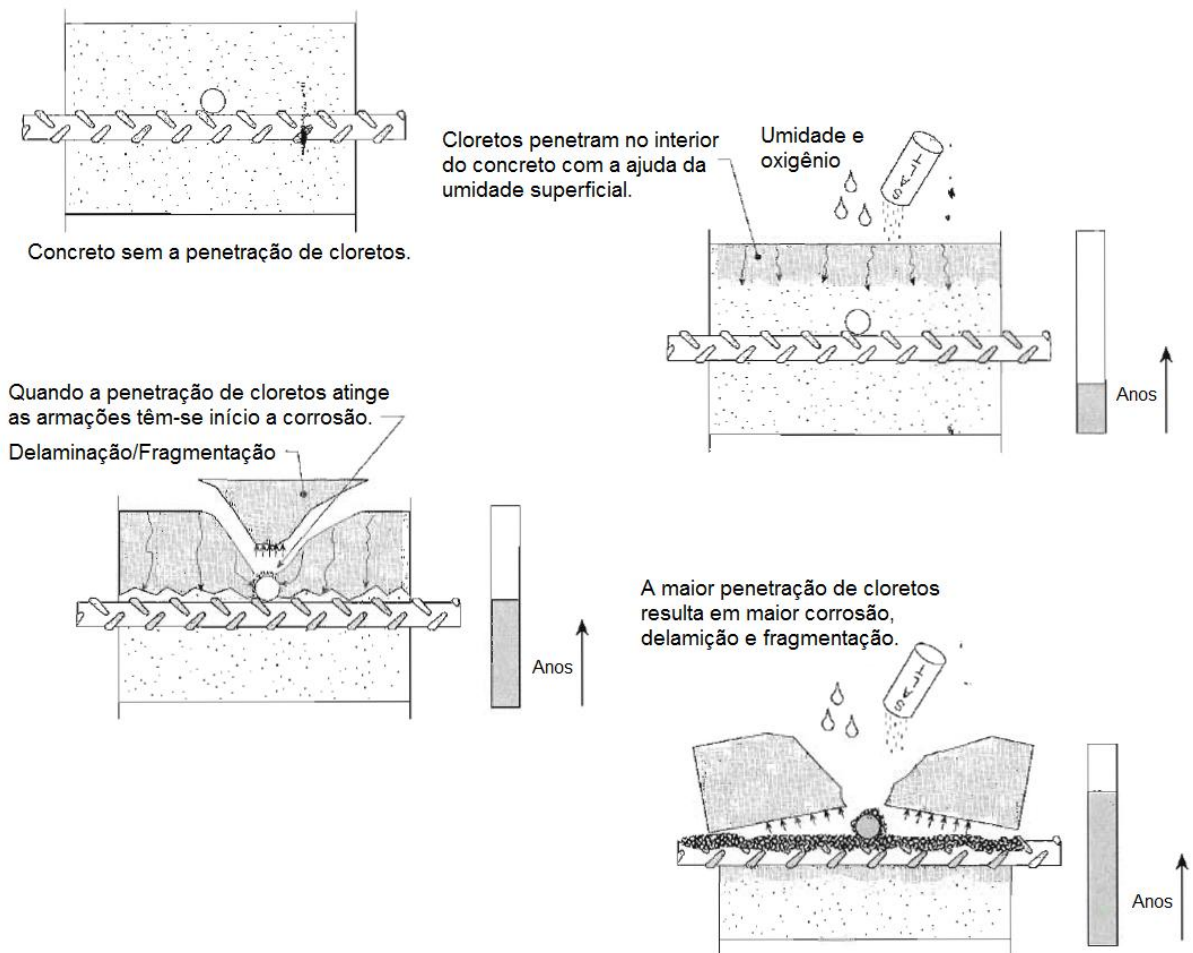


Figura 3-5 – Processo de penetração de íons cloreto no interior do concreto armado.
(Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Os cloretos também podem ser inseridos no concreto no momento de sua fabricação com a utilização de aceleradores de pega que contêm cloreto de cálcio (CaCl_2), impurezas na água de hidratação e agregados. Concretos feitos com água do mar e areia de praia resultarão em concretos com grande presença de cloretos.

A NBR 6118:2014 recomenda como medida preventiva à penetração dos cloretos o uso de concreto de pequena porosidade, valores mínimos de cobrimento das armaduras e um rigoroso controle da fissuração. O uso de cimento composto com adição de escória (CP III) ou material pozolânico (CP IV) também é recomendável. A norma proíbe o uso de aditivos à base de cloreto em estruturas de concreto.

A NBR 12655:2006 apresenta exigências mínimas para concretos em condições especiais de exposição, na qual inclui a exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes. O concreto deve possuir uma relação água/cimento, em massa para concreto com agregado normal de no máximo 0,40 e um valor mínimo de fck igual a 45 MPa, para concreto de agregado normal ou leve.

A NBR 12655:2006 estabelece ainda o valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os elementos presentes no concreto. Os valores estabelecidos são apresentados na Tabela 3-2. A norma determina ainda que nos ensaios para determinação do teor de íons cloreto solúveis em água deve ser seguido o procedimento da ASTM C 1218.

Tabela 3-2 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.
(Fonte: NBR 12655:2006)

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	0,30

A Figura 3-6 apresenta um “pilar sobre o mar após 10 anos de construção, deteriorado devido aos efeitos da interação da carbonatação com íons e cloretos”. (AGUIAR, 2014, p. 109)



Figura 3-6 – Processo de deterioração em pilar sobre o mar. (Fonte: Aguiar, 2014).

3.1.3 *Corrosão das armaduras*

A corrosão das armaduras, conforme apresentado anteriormente, causa trincas, deslocamentos do concreto e perda de seção de aço na área afetada. A Figura 3-7 apresenta fissuras em uma viga causadas pela expansão dos óxidos de ferro durante um processo de corrosão generalizada.



Figura 3-7 – Fissura em viga causada pela expansão dos óxidos gerados na corrosão.
(Fonte: Aguiar, 2014).

As fissuras causadas pela corrosão das armaduras não somente afetam a aparência da estrutura, causando insegurança e mal-estar aos usuários, como também afetam a resistência dos elementos sujeitos ao processo.

Em elementos comprimidos as fissuras e o deslocamento do concreto reduzem a área da seção transversal, e conseqüentemente sua capacidade de carga. Em elementos submetidos à flexão a perda de seção nas armaduras tracionadas torna-se mais importante.

De acordo com EMMONS (1994), estudos realizados em vigas submetidas à flexão mostraram que a resistência começa a ser afetada quando a corrosão atinge 1,5% da área de aço. Com uma corrosão de 4,5% da área de aço a resistência final da viga foi reduzida em aproximadamente 12,0%.

A perda de seção transversal afeta mais substancialmente propriedades como alongamento e resistência a fadiga das barras de aço. A Figura 3-8 demonstra a perda de seção transversal nas armaduras devido ao processo de corrosão.



Figura 3-8 – Perda de seção transversal nas armaduras devido à corrosão. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Em alguns casos a corrosão pode apresentar-se nas regiões de ancoragem das armaduras ou os óxidos gerados pelo processo podem se difundir pelos vazios e poros do concreto não provocando fissuras ou deslocamentos na estrutura. Nesses casos é possível a ocorrência de grandes perdas de seção transversal nas armaduras sem que se perceba podendo ocasionar o colapso repentino do elemento estrutural.

A fissuração e o deslocamento do concreto causados pela corrosão das armaduras são função das seguintes variáveis:

- Resistência à tração do concreto.
- Qualidade do concreto e do cobrimento das armaduras.
- Ligação ou qualidade da interface entre a armadura e o concreto que a envolve.
- Diâmetro da armadura.
- Porcentagem de corrosão, em massa, da armadura.

3.2 Mecanismos de desintegração do concreto

Os mecanismos de desintegração do concreto envolvem a dissolução de seus componentes por ação de substâncias químicas, seu deslocamento por meio de processos expansivos como o ciclo de gelo-degelo ou seu desgaste através de processos de abrasão e cavitação.

Certas soluções químicas possuem ação deletéria sobre os constituintes do concreto causando sua dissolução. As reações químicas que causam danos ao concreto são bem conhecidas e podem ser divididas em: ataque de ácidos, ataque de sulfatos e ataque de álcalis.

3.2.1 Ataque de substâncias ácidas

O ataque de produtos ácidos sobre o concreto endurecido causa a conversão dos compostos de cálcio (hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado) em sais de cálcio de acordo com o tipo do ácido. Dessa forma, os ataques de produtos ácidos atuam sobre toda a matriz cimentícia levando ao enfraquecimento da estrutura.

A velocidade da reação depende principalmente do tipo de sal de cálcio que é gerado na reação. Sais de cálcio menos solúveis proporcionam uma resistência maior ao concreto.

A Figura 3-9 apresenta o mecanismo de deterioração dos ácidos sobre as estruturas de concreto.

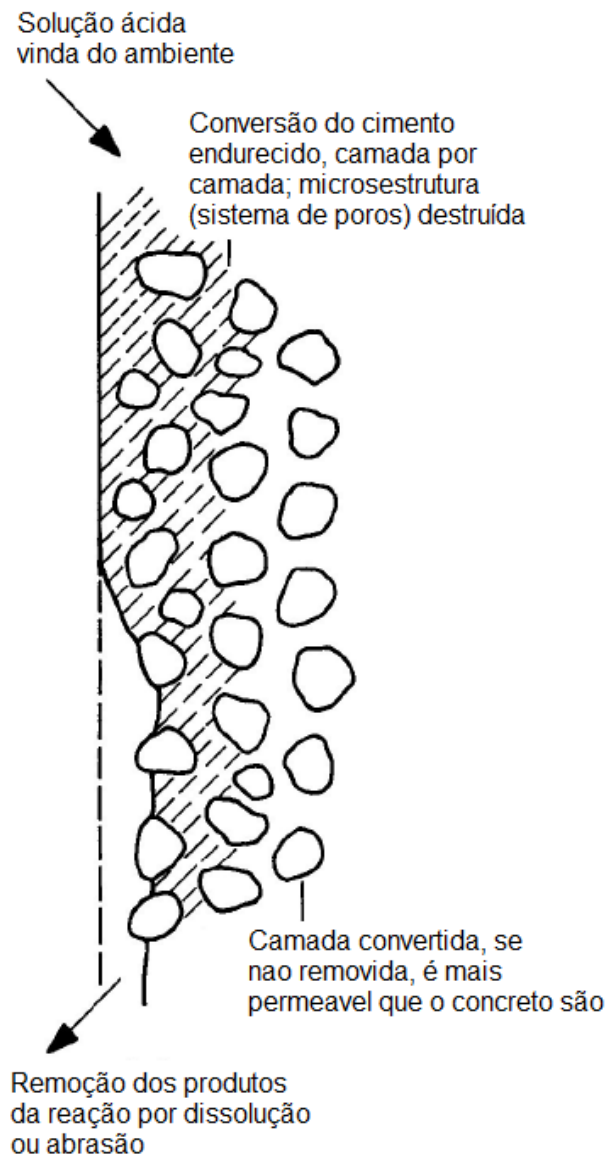


Figura 3-9 – Efeitos do ataque de ácidos. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).

3.2.2 Ataque de sulfatos

De acordo com AGUIAR (2014) os sulfatos podem ter origem nos materiais que compõem o próprio concreto (água de amassamento e agregados) ou ainda do contato da estrutura com solos ou águas ricas com este agente.

A reação dos sulfatos com o aluminato presente no interior do concreto causa sua expansão levando à formação de fissuras generalizadas (Figura 3-10). Essa fissuração facilita ainda mais o acesso dos sulfatos levando à completa desagregação do concreto (Figura 3-11).

A velocidade da reação depende da quantidade da substancia agressiva, da permeabilidade do concreto, da suscetibilidade do concreto (tipo do cimento e disponibilidade de substancias reativas) e da quantidade de água disponível.

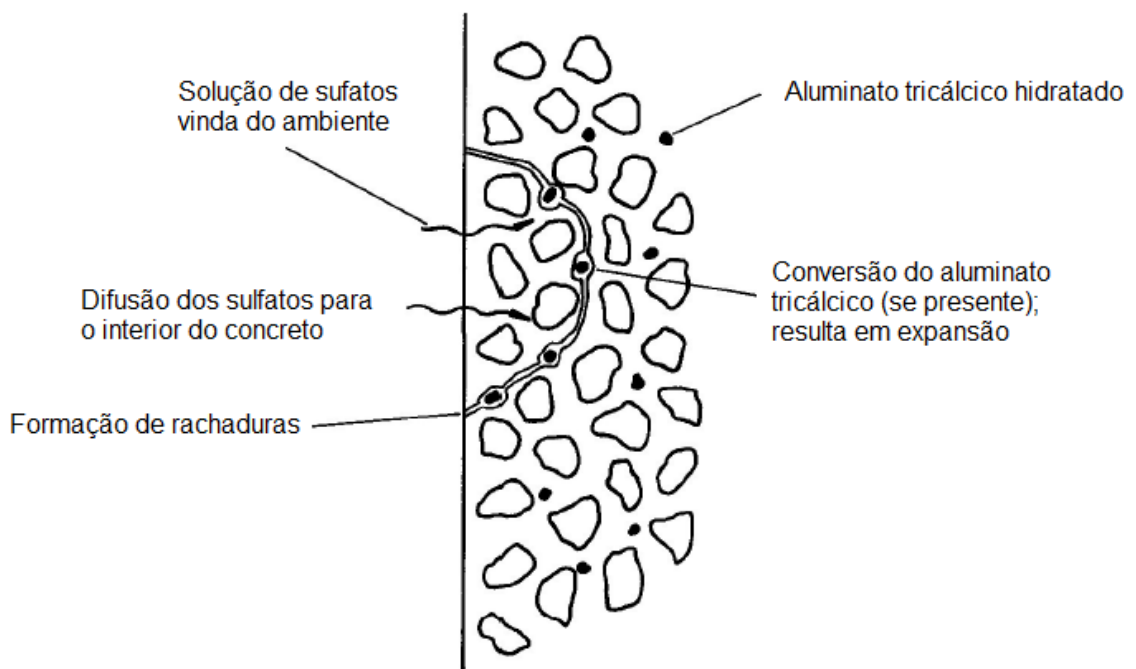


Figura 3-10 – Efeitos do ataque de sulfatos. (Fonte: CEB, 1989 – adaptado).

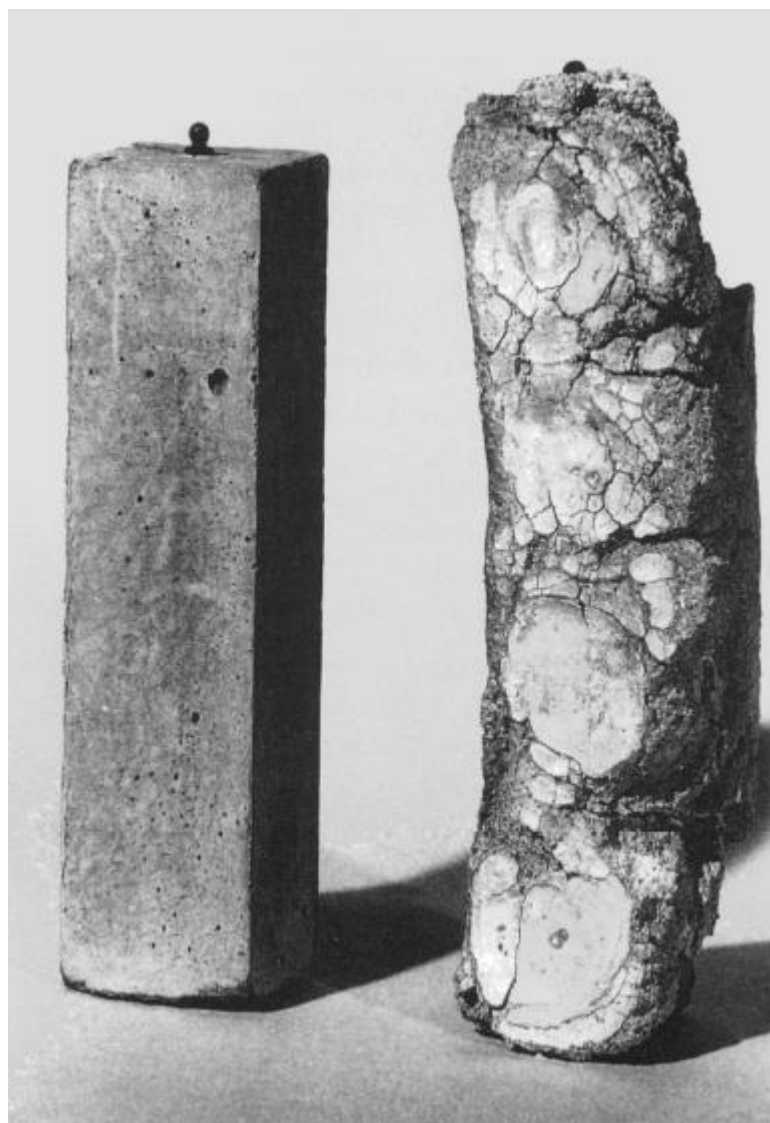


Figura 3-11 – Fissuras causadas pelo ataque de sulfatos. (Fonte: CEB, 1989).

3.2.3 *Reação álcalis-agregados*

A reação álcali-agregado difere do ataque dos sulfatos pelo fato de que na reação álcali-agregado a substância reativa encontra-se presente nos agregados que compõem o concreto.

De acordo com AGUIAR (2014) certos tipos de agregados reagem com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio reagem com o cimento formando um tipo de

gel ao redor dos agregados reativos. Este gel quando exposto a umidades elevadas se expande causando fissuras no concreto (Figura 3-12).

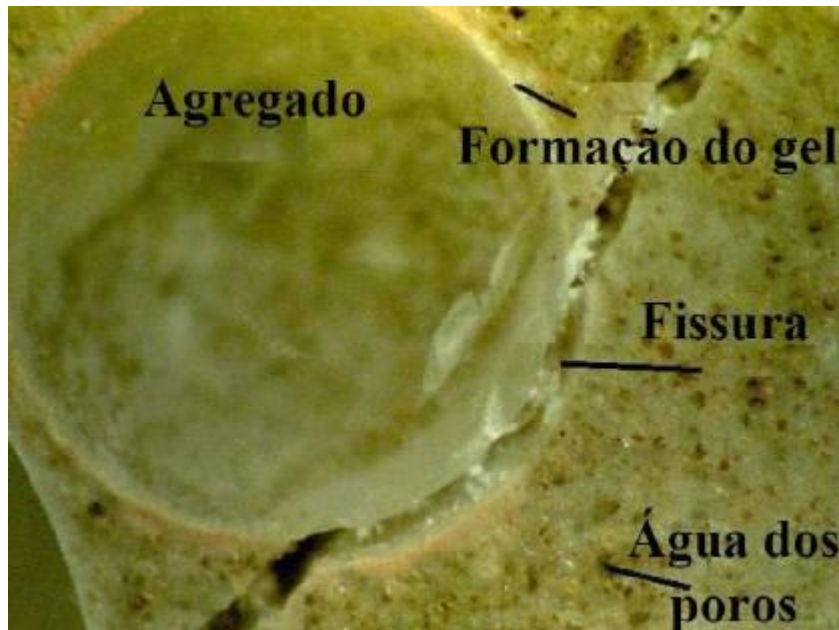


Figura 3-12 – Microscopia mostrando as fissuras da reação álcali-agregado. (Fonte: Aguiar, 2014).

3.2.4 Desintegração por ciclo de gelo-degelo

Apesar de sua ocorrência rara no Brasil a desintegração devida a ciclos de gelo-degelo tem grande importância em países de clima temperado.

Danos causados por ciclos de gelo-degelo ocorrem quando o concreto absorve água e a retém no interior de seus poros e capilares. Ao ser submetida a baixas temperaturas esta água congela aumentando seu volume causando a fratura do concreto. Com a elevação da temperatura esta água retorna a forma líquida preenchendo novamente os vazios do concreto possibilitando a repetição do ciclo. A Figura 3-13 apresenta o processo de desintegração do concreto por ciclo de gelo-degelo.

A velocidade de deterioração das estruturas de concreto devido aos ciclos de gelo-degelo depende dos seguintes fatores:

- Porosidade do concreto e seu aumento.
- Saturação dos poros da estrutura pela umidade.
- Frequência dos ciclos de gelo-degelo.
- Retenção (velocidade de drenagem) de água pela superfície exposta.
- Capacidade de absorção de água pelos agregados.

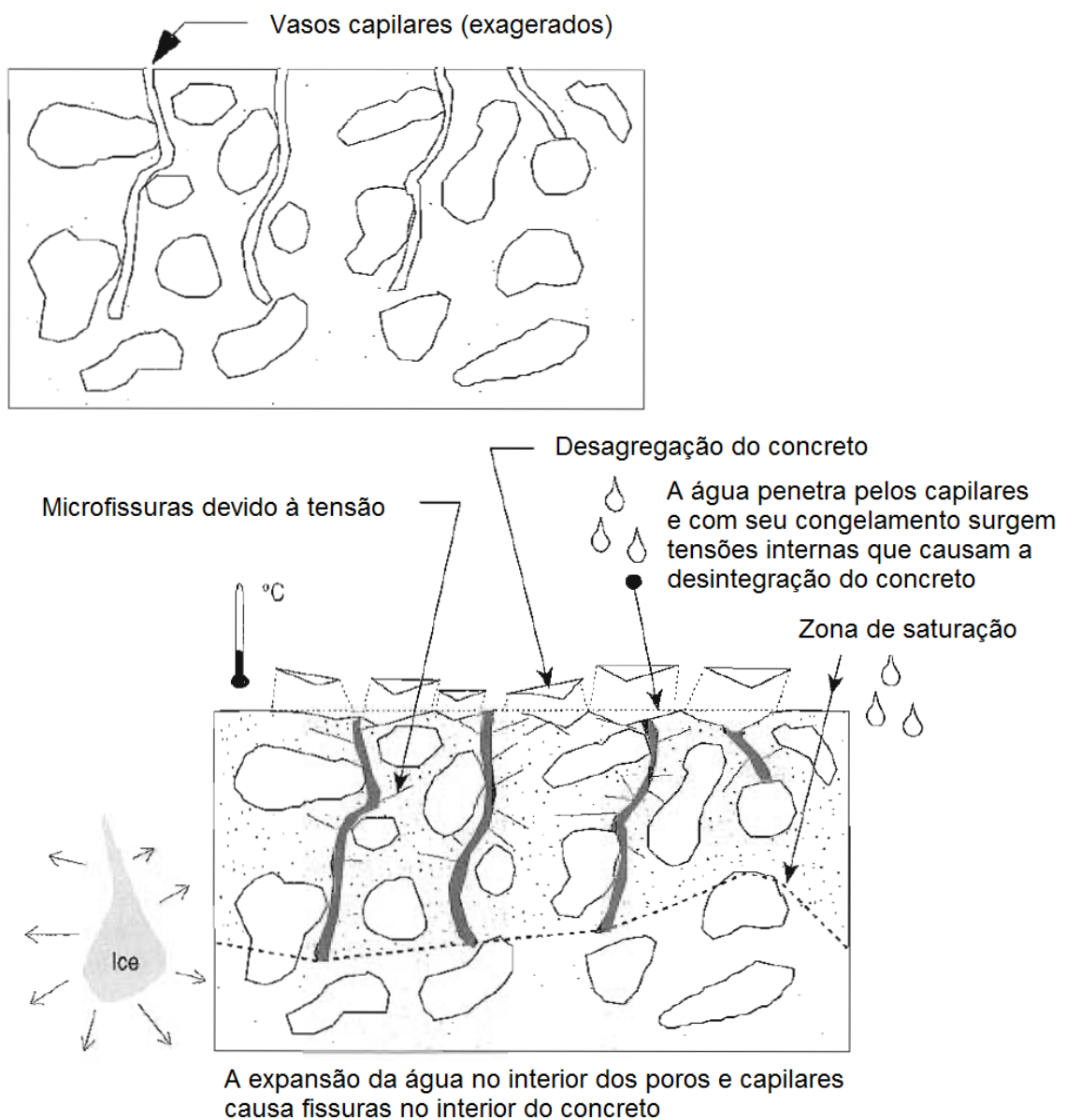


Figura 3-13 – Mecanismo de degradação das estruturas por ciclos de gelo-degelo. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

3.2.5 Desgaste do concreto

O desgaste das estruturas de concreto pode ocorrer devido à cavitação e à abrasão.

Cavitação é a erosão da superfície de concreto devido ao colapso de bolhas de ar que se formam por mudanças de pressão no interior de águas que se movimentam em grandes velocidades.

O fenômeno da cavitação geralmente ocorre nas proximidades de curvas e desníveis. A cavitação causa dano na matriz cimentícia do concreto deixando os agregados mais resistentes em seu lugar. A Figura 3-14 apresenta os efeitos da cavitação em estruturas de concreto.

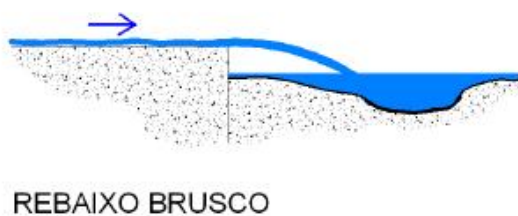


Figura 3-14 – Efeitos da cavitação em estruturas de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014).

A abrasão é o desgaste causado por partículas finas carregadas pela água ou o vento ou pelo atrito de pneus ou outros elementos sobre a estrutura. “A influencia da abrasão é especialmente importante no estudo do comportamento de pisos industriais, pavimentos rodoviários e de pontes” (AGUIAR, 2014, p. 59). Geralmente, a superfície é desgastada igualmente (matriz cimentícia e agregados), conforme apresentado na Figura 3-15.



Figura 3-15 – Desgaste superficial em pavimento de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014).

Entre os fatores que afetam a resistência a abrasão pode-se citar a resistência a compressão do concreto (f_{ck}), as propriedades dos agregados, métodos de acabamento da estrutura, uso de aditivos e processo de cura.

3.3 Efeitos térmicos

A variação da temperatura em estruturas de concreto está diretamente ligada a uma alteração de volume desta estrutura. Alterações no volume causam o surgimento de tensões não previstas na estrutura de concreto que podem variar de acordo com a vinculação da estrutura. A Figura 3-16 apresenta os efeitos da expansão térmica em estruturas de concreto.

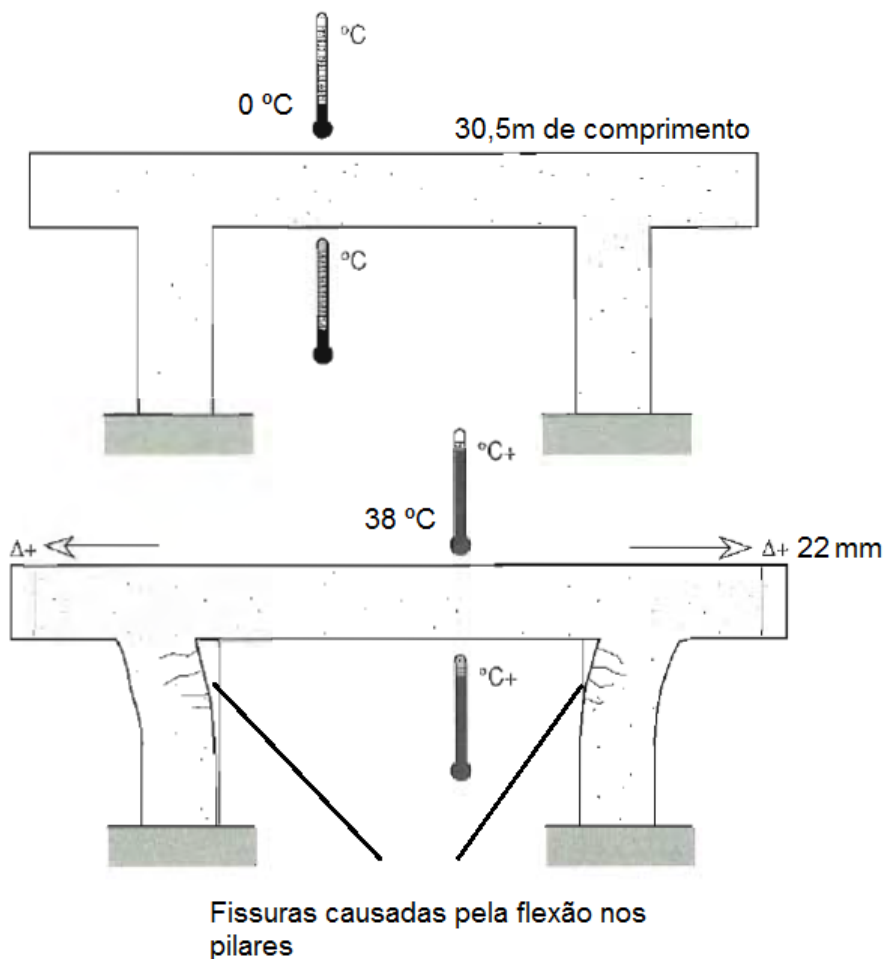


Figura 3-16 – Efeitos da expansão térmica em estruturas de concreto com movimentação restrita. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Outro importante efeito da temperatura sobre as estruturas de concreto ocorre no lançamento do concreto fresco quando ocorrem as reações de hidratação do cimento. Estas reações são exotérmicas e provocam a expansão do concreto fresco. Com seu resfriamento há uma redução no volume do concreto que pode

levar ao surgimento de tensões de tração que provocam as conhecidas fissuras de origem térmica, ou fissuras de retração.

A Figura 3-17 ilustra o processo de formação das fissuras de retração. A Figura 3-18 apresenta um gráfico de elevação de temperatura de uma estrutura de concreto.

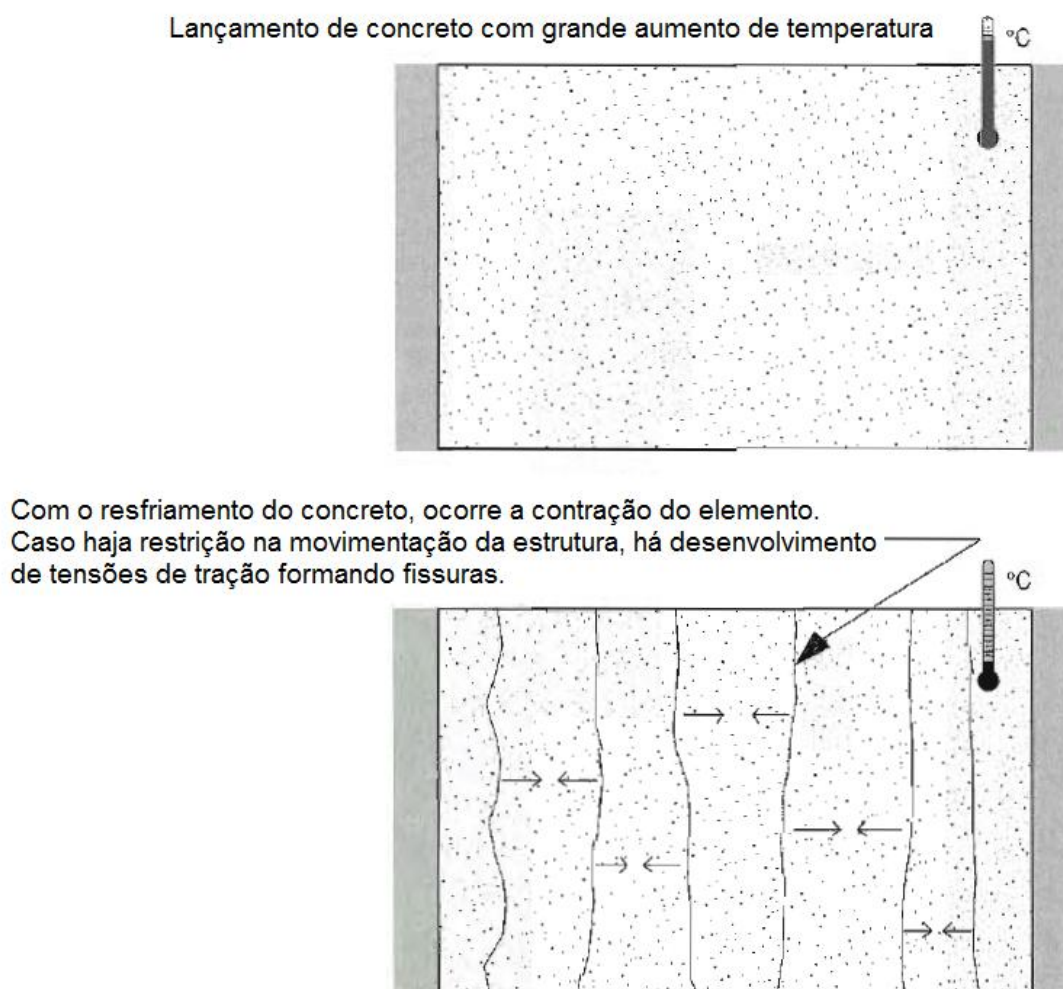


Figura 3-17 – Formação das trincas de retração devido à alta temperatura de hidratação do cimento. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

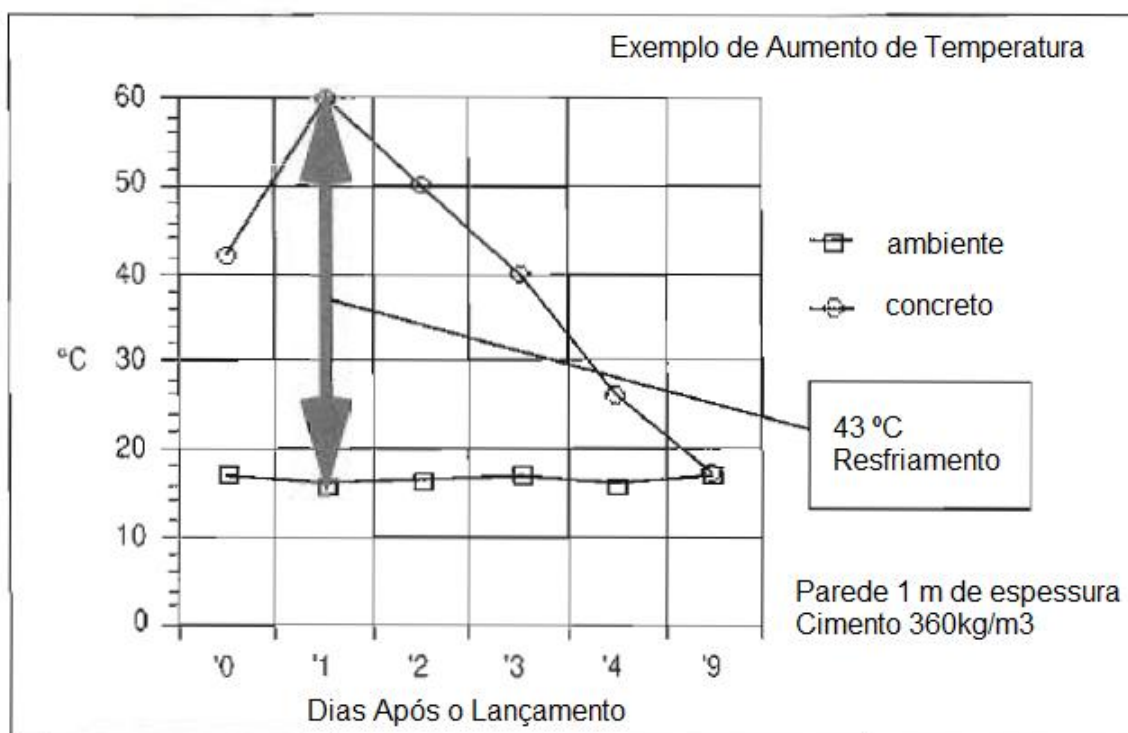


Figura 3-18 – Gráfico de temperatura de uma parede de concreto em função do tempo. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Outra importante fonte de problemas às estruturas de concreto são os incêndios. “Embora a ação do fogo não se propague facilmente para o interior da massa do concreto, quando a estrutura é submetida a altas temperaturas, por um certo período de tempo, há uma perda significativa de resistência do concreto” (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 50).

Os efeitos dos incêndios sobre as estruturas se resumem basicamente em: alteração da cor e perda de resistência da estrutura. A Tabela 3-3 apresenta a evolução do comportamento das estruturas de concreto em situação de incêndio.

Tabela 3-3 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação da temperatura ambiente. (Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 74)

Temperatura em °C	Cor do Concreto	Condição do Concreto	Perda de Resistência
0 a 200	Cinza	Não afetado	0 %
300 a 600	Rosa	Razoavelmente bom	<= 40 %
600 a 900	Rosa a vermelho	Friável, com alta sucção de água	70 %
900 a 1200	Cinza avermelhado	Friável	100 %
>1200	Amarelo	Decomposto	100 %

De acordo com SOUZA e RIPPER (1998) a degradação do concreto ocorre por volta dos 600 °C, e acontece por expansão dos agregados que fraturam o concreto que causam tensões e fissuras em seu interior.

A Figura 3-19 apresenta a estrutura de um pilar danificado devido a ação do fogo utilizado por moradores de rua.



Figura 3-19 – Danos a um pilar devido ao fogo utilizado por moradores de rua. (Fonte: Aguiar, 2014).

3.4 Efeitos do carregamento

O concreto armado é um material estrutural constituído de dois tipos de materiais: concreto e armaduras.

O concreto possui uma excelente resistência à compressão e baixa resistência à tração (cerca de 10% de sua resistência a compressão). Dessa forma, utilizam-se as armaduras de aço para resistir aos esforços de tração que atuam no concreto de forma a se aproveitar as melhores características dos dois materiais.

A Figura 3-20 apresenta o funcionamento básico de uma viga de concreto armado simplesmente apoiada e como o concreto e as armaduras de aço interagem entre si. Este funcionamento pode ser expandido para qualquer elemento estrutural de concreto armado: vigas, pilares, blocos de fundação e lajes.

Dessa forma, é importante observar as prescrições da norma NBR 6118:2014 no que diz respeito aos limites de fissuração e cobrimentos mínimos das armaduras. Toda estrutura de concreto possuirá fissuras e seu controle é de fundamental importância na durabilidade da estrutura.

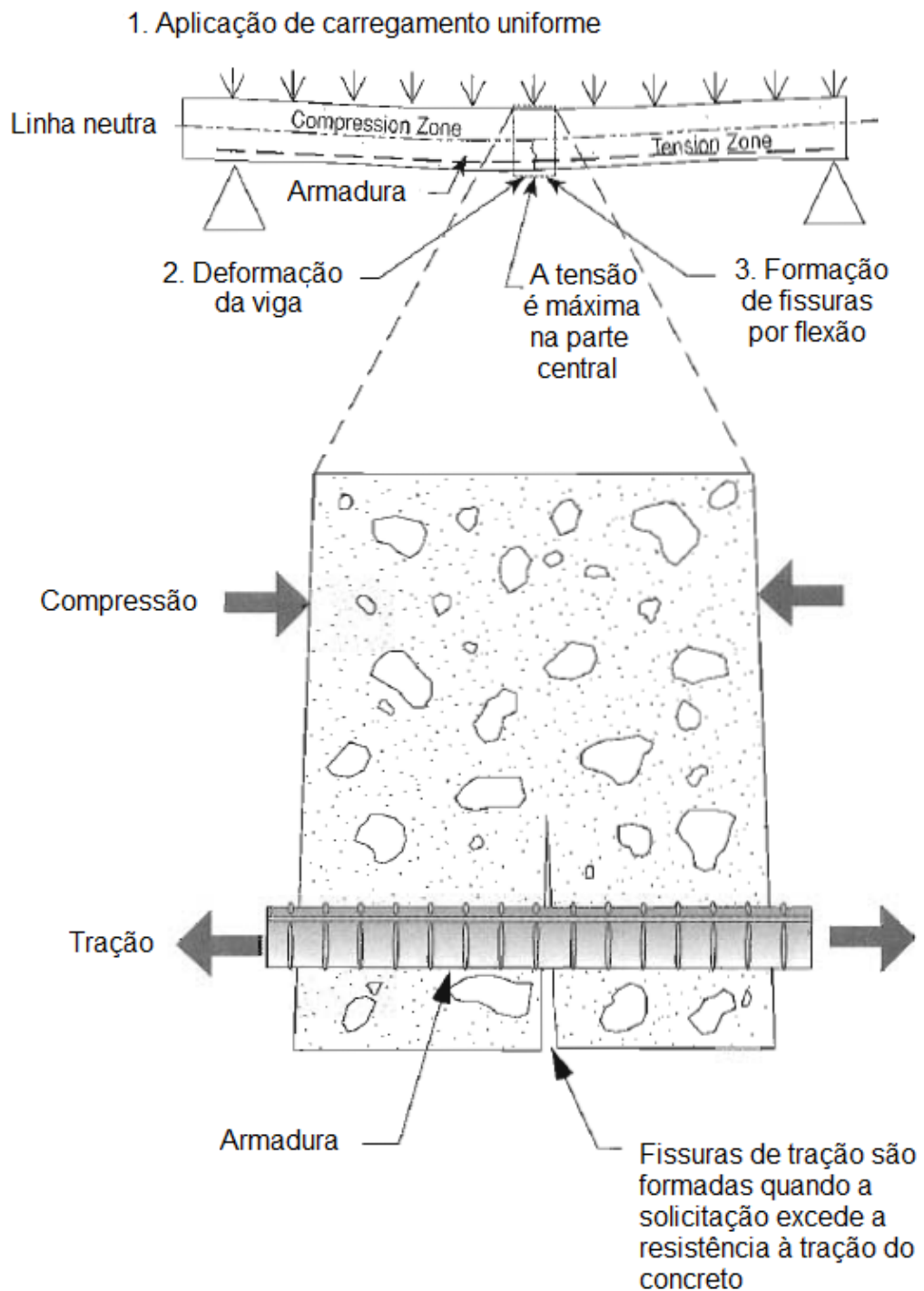


Figura 3-20 – Viga de concreto armado simplesmente apoiada. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

A Figura 3-21 apresenta esquematicamente os tipos de fissuras para vigas de vãos contínuos.

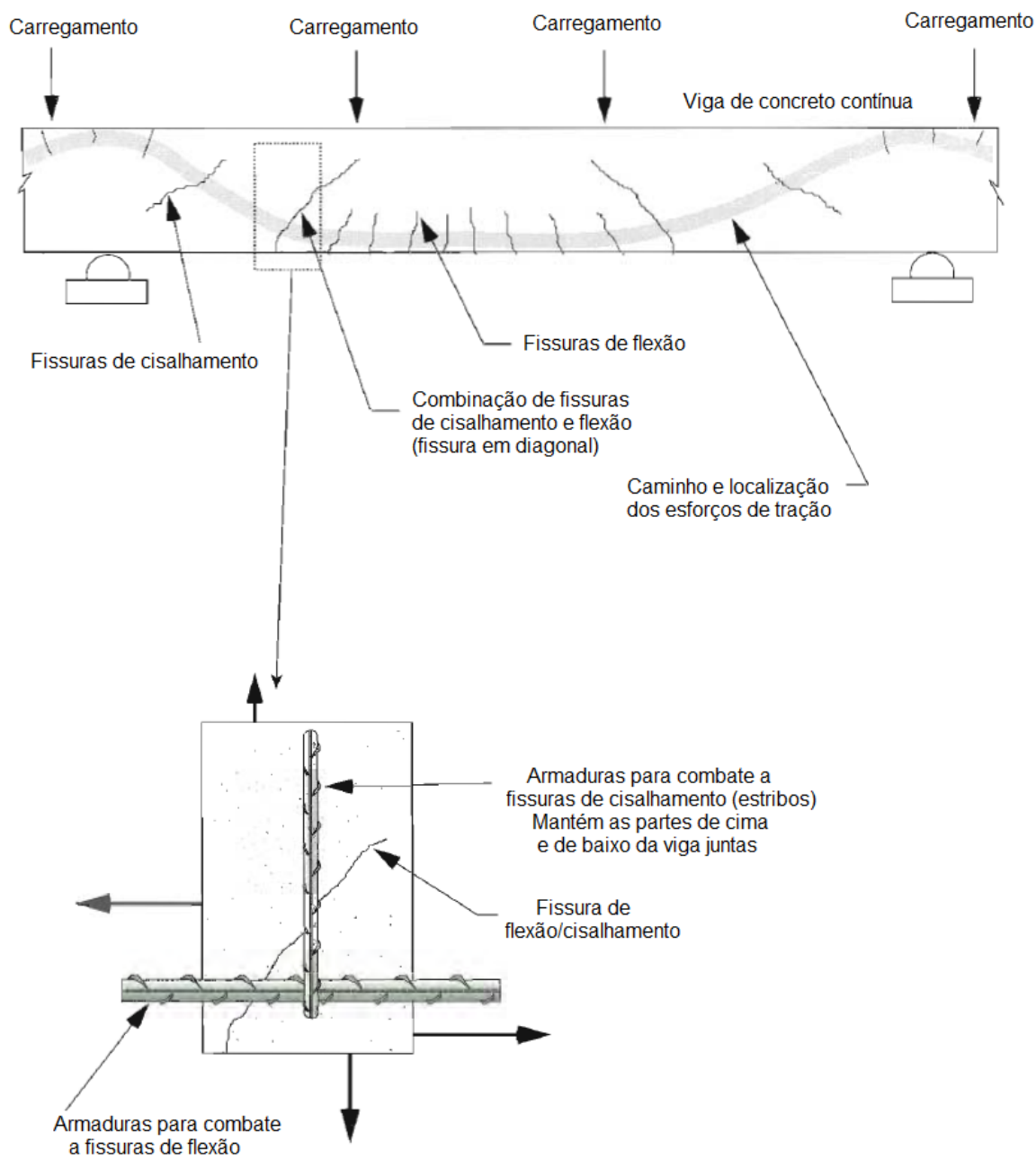


Figura 3-21 – Fissuras em vigas de vãos contínuos. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

A Figura 3-22 apresenta as fissuras mais comuns para os esforços de cisalhamento entre colunas e vigas/lajes.

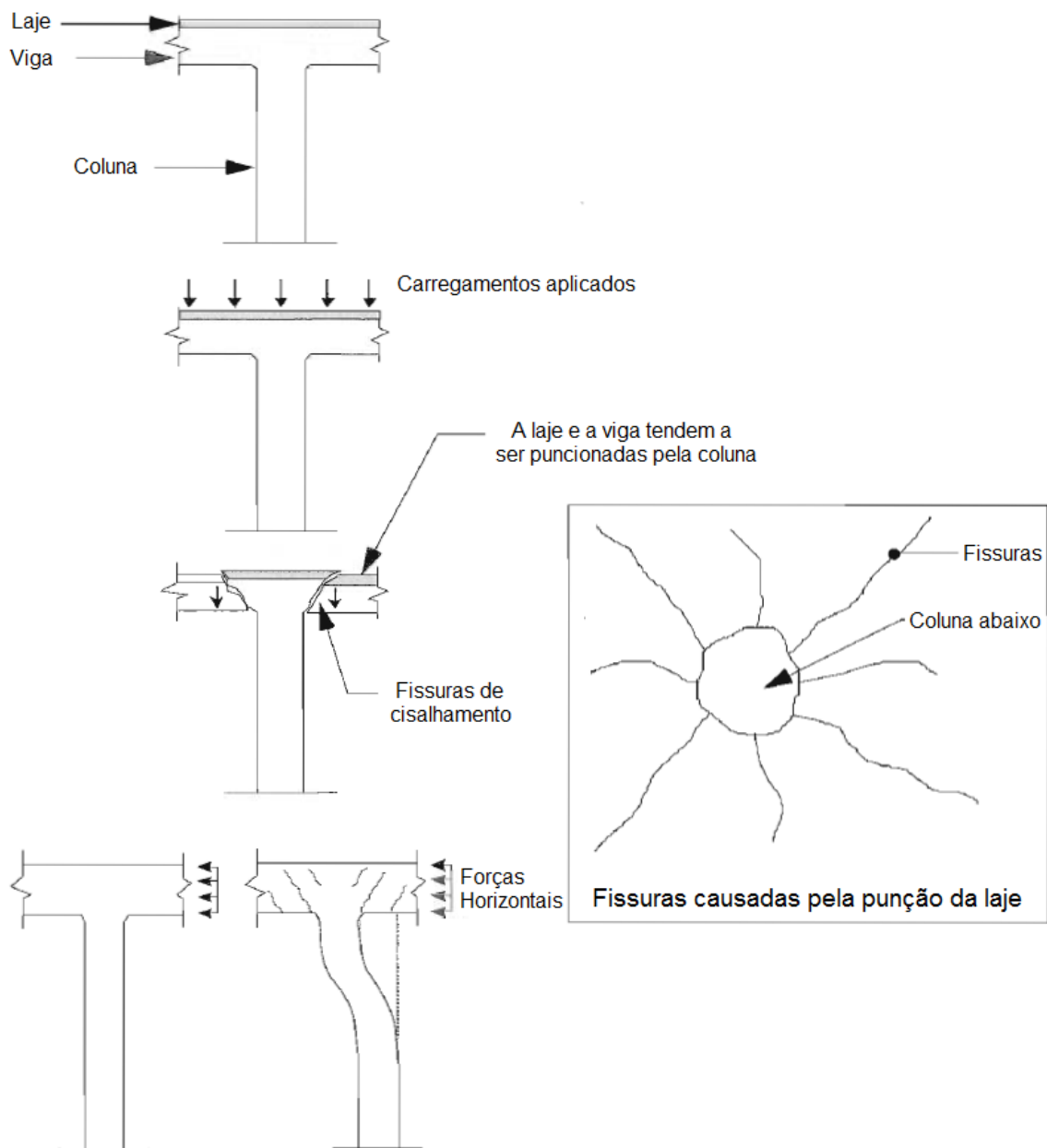


Figura 3-22 – Fissuras causadas por esforços de cisalhamento entre pilares e vigas/lajes. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

Outra falha comum nas estruturas de concreto são os recalques de fundação. De acordo com SOUZA e RIPPER (1998) por um determinado período de tempo as estruturas estarão sujeitas a deslocamentos verticais até que seja atingido o equilíbrio entre o solo e o carregamento aplicado. Estes deslocamentos verticais, quando mal dimensionados, introduzem esforços não esperados nas estruturas causando o aparecimento de fissuras (Figura 3-23).



Figura 3-23 – Situação de recalque de fundação em estruturas de concreto armado.
(Fonte: Souza; Ripper, 1998).

3.5 Falhas de projeto e execução

A construção de estruturas de concreto ainda hoje é um processo bastante artesanal. As diversas matérias-primas utilizadas na construção são trazidas separadamente ao canteiro de obras onde são misturadas, lançadas e moldadas em sua forma final de acordo com o projeto estrutural.

A Figura 3-24 apresenta as diversas etapas de construção de uma estrutura de concreto. De acordo com EMMONS (1994) cada uma das caixas representa uma categoria de problemas que podem surgir durante a construção das estruturas de concreto armado.

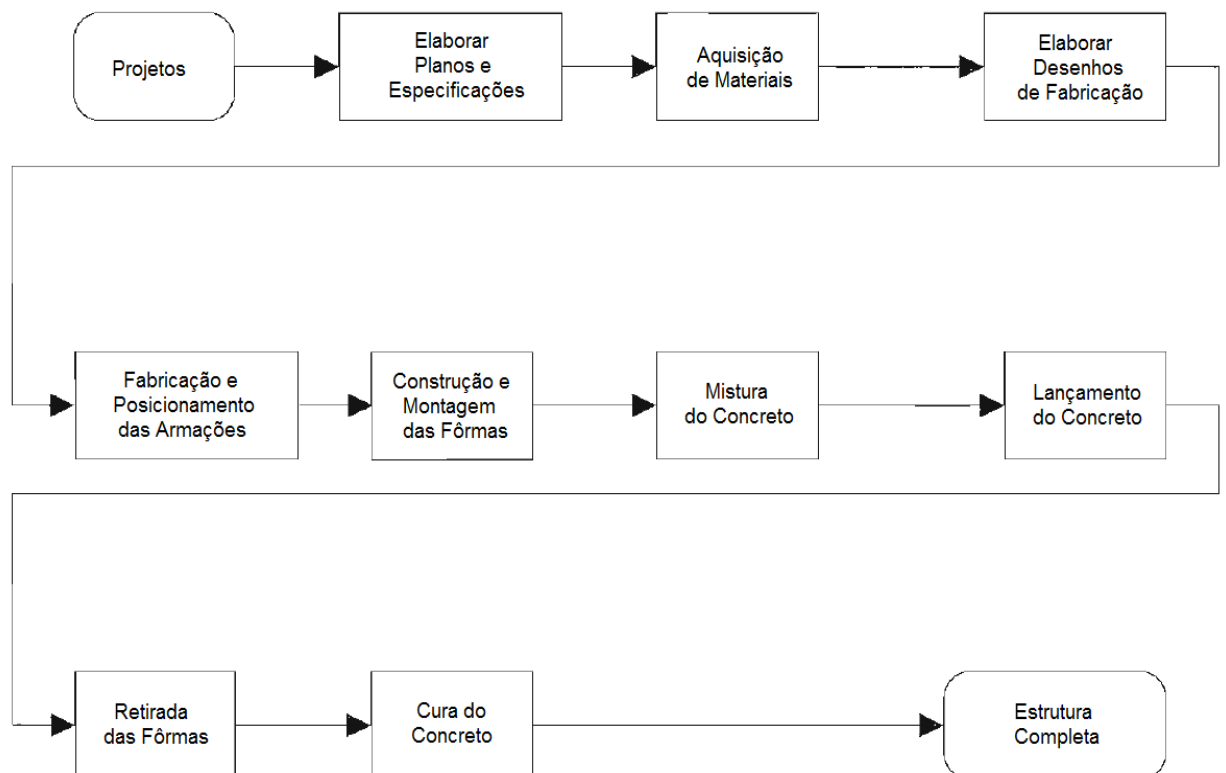


Figura 3-24 – Categorias de possíveis falhas que podem surgir no processo de construção. (Fonte: Emmons, 1994 - adaptado).

Entre as falhas mais comuns pode-se citar: posicionamento incorreto das armações, falhas na escolha e verificação dos materiais, falta de prumo dos elementos, falha nas declividades das superfícies de lajes, utilização incorreta de

materiais e aditivos para o concreto, falhas no adensamento do concreto, abertura de fôrmas, formação de juntas de concretagem, segregação de material, formação de bicheiras, deslocamentos das armaduras durante a concretagem, remoção prematura das fôrmas, remoção incorreta dos escoramentos, retração hidráulica e etc.

Algumas falhas podem ter origens diversas e apresentar os mesmos sintomas. Como exemplo pode-se citar a fissuração excessiva em um elemento onde atuam esforços de flexão. As trincas podem ter origem na falta de armaduras em quantidade suficiente, no seu deslocamento durante a concretagem, no excesso de carga na estrutura ou especificação incorreta do concreto.

4 AVALIAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Conforme apresentado nos itens anteriores as estruturas de concreto podem apresentar inúmeros problemas, muitas vezes semelhantes entre si. A determinação da causa destas manifestações patológicas é fundamental no embasamento da escolha do método recuperação (ou proteção) mais recomendado para cada caso e na escolha dos materiais a serem utilizados neste processo.

“O primeiro procedimento a ser realizado para que o tratamento das patologias seja eficiente é uma análise detalhada das falhas apresentadas. Esta análise deve ser efetuada através de vistoria e perícia técnica na edificação a ser tratada, onde são identificadas as causas dos problemas patológicos.” (VALENTE, 2008:24)

A avaliação das estruturas de concreto armado pode ser realizada de forma reativa ou de forma pró-ativa. A forma reativa é quando se realiza a avaliação após o surgimento das manifestações patológicas e a pró-ativa é quando se realiza avaliações periódicas com o objetivo de se avaliar o desempenho da estrutura antes que os problemas apareçam. No Brasil, em geral, as avaliações são feitas de forma reativa, quando o aparecimento de trincas, deformações ou desgastes das estruturas causam alguma insegurança em seus usuários.

4.1 Normas e procedimentos para avaliação de estruturas

Como as manifestações patológicas possuem várias origens torna-se necessário uma grande quantidade de ensaios e métodos para se avaliar a origem destes problemas. Este capítulo tem como objetivo apresentar os métodos mais comuns de avaliação da qualidade de uma estrutura de concreto armado já existente.

A Figura 4-1 apresentada por Emmons (1994) e adaptado pelo autor deste trabalho apresenta uma relação de ensaios separados de acordo com a propriedade que se deseja avaliar e suas respectivas normas.

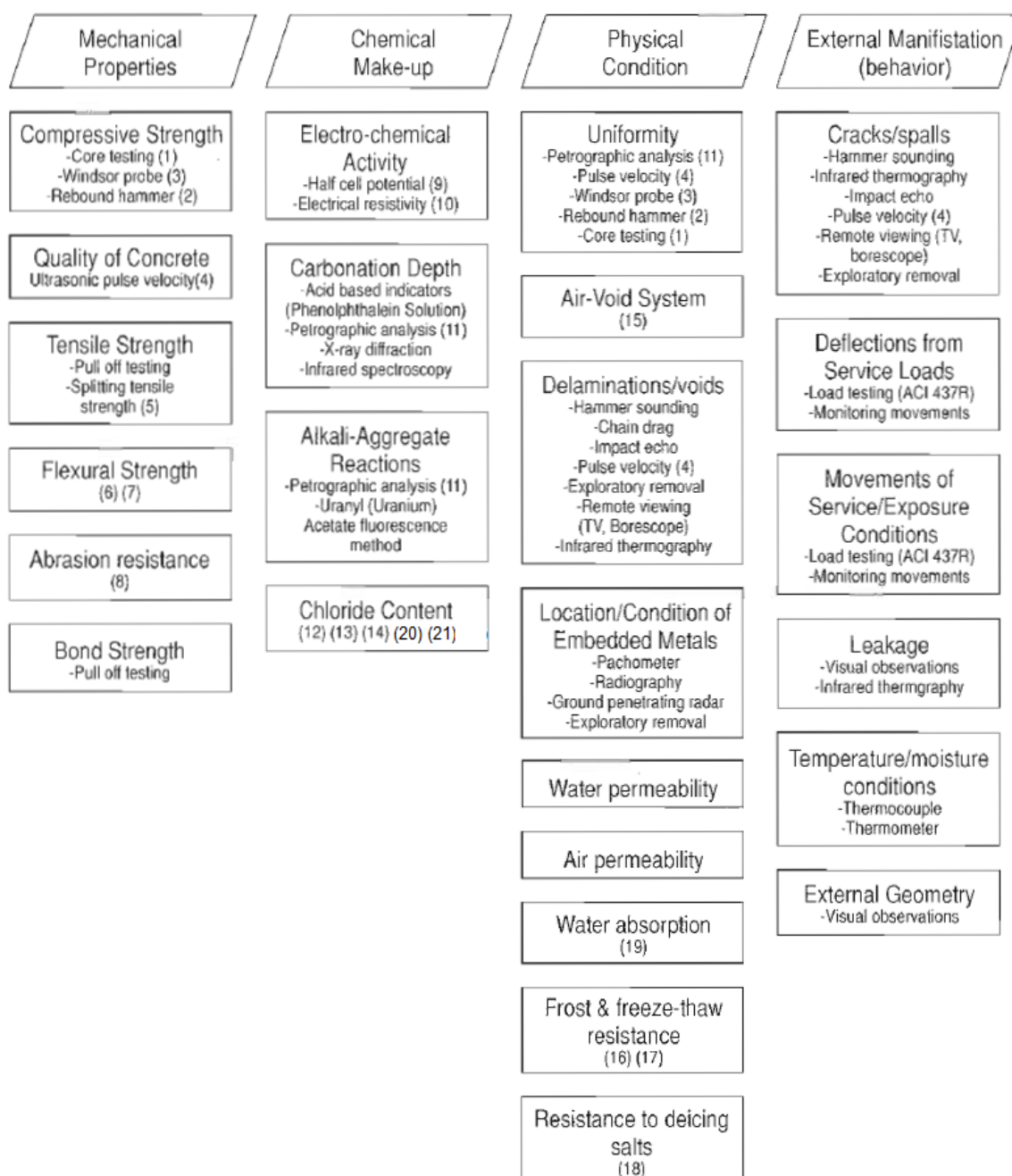


Figura 4-1 – Métodos de ensaio para avaliação de estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994).

A numeração entre parêntesis indicam os normas internacionais utilizadas na especificação dos ensaios apresentadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Normas utilizadas na avaliação das estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado)

N°	Norma	Título
1	ASTM C 42	Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
2	ASTM C 805	Rebound Number of Hardened Concrete
3	ASTM C 803	Penetration Resistance of Hardened Concrete
4	ASTM C 597	Pulse Velocity Through Concrete
5	ASTM C 496	Splitting Tensile Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
6	ASTM C 78	Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
7	ASTM C 293	Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)
8	ASTM C 418	Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
9	ASTM C 876	Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
10	ASTM D 3633	Electrical Resistivity of Membrane-Pavement Systems
11	ASTM C 856	Standard Practice of Petrographic Examination of Hardened Concrete
12	AASHTO T 259	Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration
13	AASHTO T 260	Sampling and Testing for Total Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials
14	AASHTO T 277	Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete
15	ASTM C 457	Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete
16	ASTM C 666	Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
17	ASTM C 671	Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected do Freezing
18	ASTM C 672	Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
19	ASTM C 642	Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
20	ASTM C 1152	Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
21	ASTM C 1218	Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

De acordo com Emmons (1994) os procedimentos de avaliação de uma estrutura devem seguir os seguintes passos:

1. Inspeção visual pela estrutura.
2. Revisão dos dados de engenharia.
 - a. Documentos de projeto e construção.
 - b. Registros de operação e manutenção.
 - c. Registros do concreto (incluindo materiais utilizados).
 - d. Relatórios de inspeções periódicas.
3. Avaliação das condições da estrutura.
 - a. Mapeamento das deficiências.
 - b. Monitoramento.
 - c. Pesquisa conjunta.
 - d. Ensaios e testes.
 - e. Ensaios não destrutivos.
 - f. Análise estrutural.
4. Avaliação final.
5. Relatório das condições da estrutura.

Os resultados das avaliações serão tão precisos quanto os esforços empregados nesta avaliação. Avaliações superficiais ou inspeções visuais jamais terão a precisão de uma avaliação completa que segue todos os passos discriminados acima.

4.2 Condições de serviço e de exposição

A avaliação das estruturas de concreto não devem se limitar a estudos da sua condição física, propriedades mecânicas, composição química e às manifestações externas. A avaliação do ambiente no qual a estrutura se encontra inserida é igualmente importante. Em muitos casos a origem das manifestações patológicas está relacionada com as condições de serviço e de exposição da estrutura. A Figura 4-2 apresenta uma lista de condições a serem consideradas durante a análise das estruturas.

Temperatura	Umidade	Produtos Químicos	Carregamentos
Variação	Variação na umidade relativa	Tipo	Móvel
Frequência	Tipo de contato: Imersão, escoamento	Concentração	Estática
Duração	Frequência	Forma: Gás, líquido, sólido	Impactos
Ciclos de gelo-degelo	Duração	Frequência	Vibrações
Exposição ao sol		Duração	Forma: Gás, líquido, sólido
Proteção nas idades iniciais?			Tamanho/Magnitude
			Frequência
			Duração

Figura 4-2 – Condições a serem consideradas durante a análise de estruturas de concreto armado. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

4.3 Investigação visual

A partir da análise do ambiente e das condições de serviço da estrutura prossegue-se com as investigações visuais e de exploração. Nessa investigação são procurados problemas como fissuras, deslocamentos, vazamentos ou pontos de acumulação de água, movimentações excessivas, pontos de corrosão, armaduras expostas, manchas e descolorações. As Figuras 4-3 a 4-7 apresentam alguns métodos utilizados na realização de inspeções visuais.



Figura 4-3 – Plataformas de inspeção em pontes. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-4 – Caminhão tipo Munck com braço articulado. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-5 – Inspeção por profissionais em altura. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-6 – Inspeções subaquáticas. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-7 – Aparelhos ópticos. (Fonte: Aguiar, 2014).

4.4 Métodos e ensaios para avaliação do concreto

4.4.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão podem ser realizados através da retirada de corpos de prova e sua posterior ruptura em prensas ou através de ensaios de penetração e repique.

Os ensaios com corpos de prova são realizados com base nas normas ASTM C 42 e no Brasil pela ABNT NBR 7680:2015. Os corpos de prova são extraídos de acordo com as especificações da norma e posteriormente rompidos em prensa hidráulica de onde se obtém sua resistência. A Figura 4-8 apresenta a extração de corpos de prova e a Figura 4-9 um ensaio de compressão axial em andamento.



Figura 4-8 – Extração de corpos de prova de estruturas. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-9 – Ensaio de compressão axial. (Fonte: Aguiar, 2014).

O ensaio de resistência à penetração é realizado com base na norma ASTM C 803 e consiste na utilização de um penetrômetro de Windsor que arremessa um pino contra a estrutura de concreto. O comprimento do pino que fica exposto é relacionado com a resistência à compressão do concreto.

É bastante comum realizar um ensaio de compressão axial com extração de corpos de prova para calibrar os ensaios de resistência à penetração.

4.4.2 Resistência de ligação

A determinação da resistência de ligação entre camadas sobrepostas e de revestimento com a base pode ser realizada através do ensaio de arrancamento. Neste ensaio é perfurado um corpo de prova que atinge as duas camadas a serem avaliadas na estrutura. O aparelho de teste é então colado no corpo de prova e se inicia o arrancamento da amostra.

Podem ocorrer três tipos de falhas: falha na camada de base, falha na interface entre as camadas e falha na camada mais externa. O aparelho pode fornecer a força necessária para que se ocorra o arrancamento do corpo de prova e conseqüentemente pode-se obter a resistência à tração da estrutura.

A Figura 4-10 apresenta esquematicamente o funcionamento do ensaio de arrancamento.

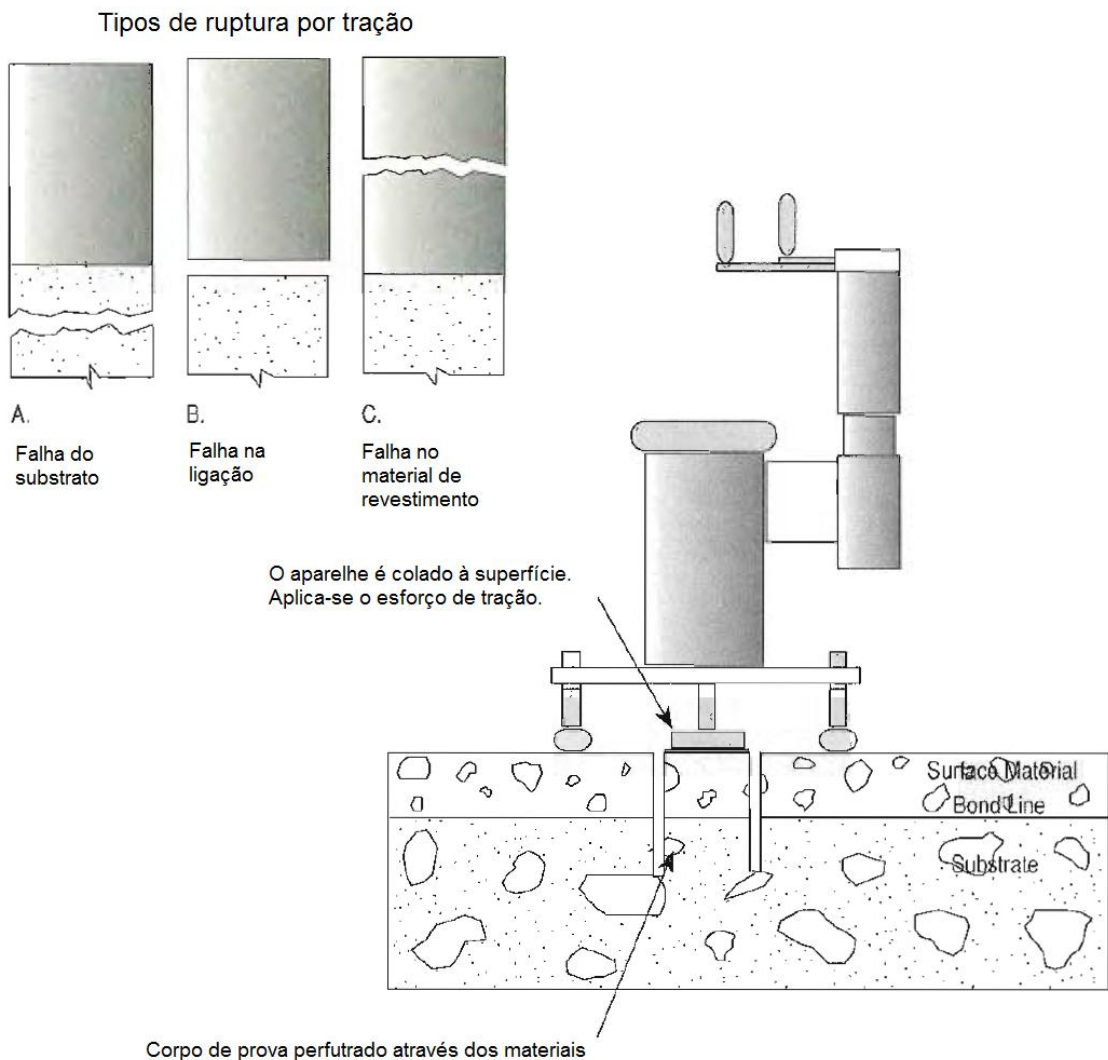


Figura 4-10 – Desenho esquemático de um ensaio de arrancamento. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

4.4.3 Potencial eletroquímico

O ensaio de potencial eletroquímico pode ser utilizado para avaliação do grau de corrosão das armaduras do concreto e é realizado com base na norma ASTM C 876.

O ensaio consiste na ligação de um condutor na armadura e em um sensor que irá coletar os dados ao longo da área. Este sensor consiste em um voltímetro que

obtem a diferenca de potencial na estrutura. É importante que se saiba a localizacao das armaduras na area inspecionada.

Em geral as medidas do potencial eletroquimico podem ser interpretadas como a seguir:

- Menos negativo que -0,20 volts indica uma possibilidade de que não haja corrosão de 90%;
- Entre -0,20 e -0,35 a possibilidade de corrosão é indefinida;
- Mais negativo que -0,35 indica que há uma probabilidade de mais de 90% de que um processo de corrosão esteja ocorrendo;
- Leituras positivas indicam baixa umidade no concreto e as leituras não são válidas.

A Figura 4-11 apresenta um desenho esquemático do equipamento de medição.

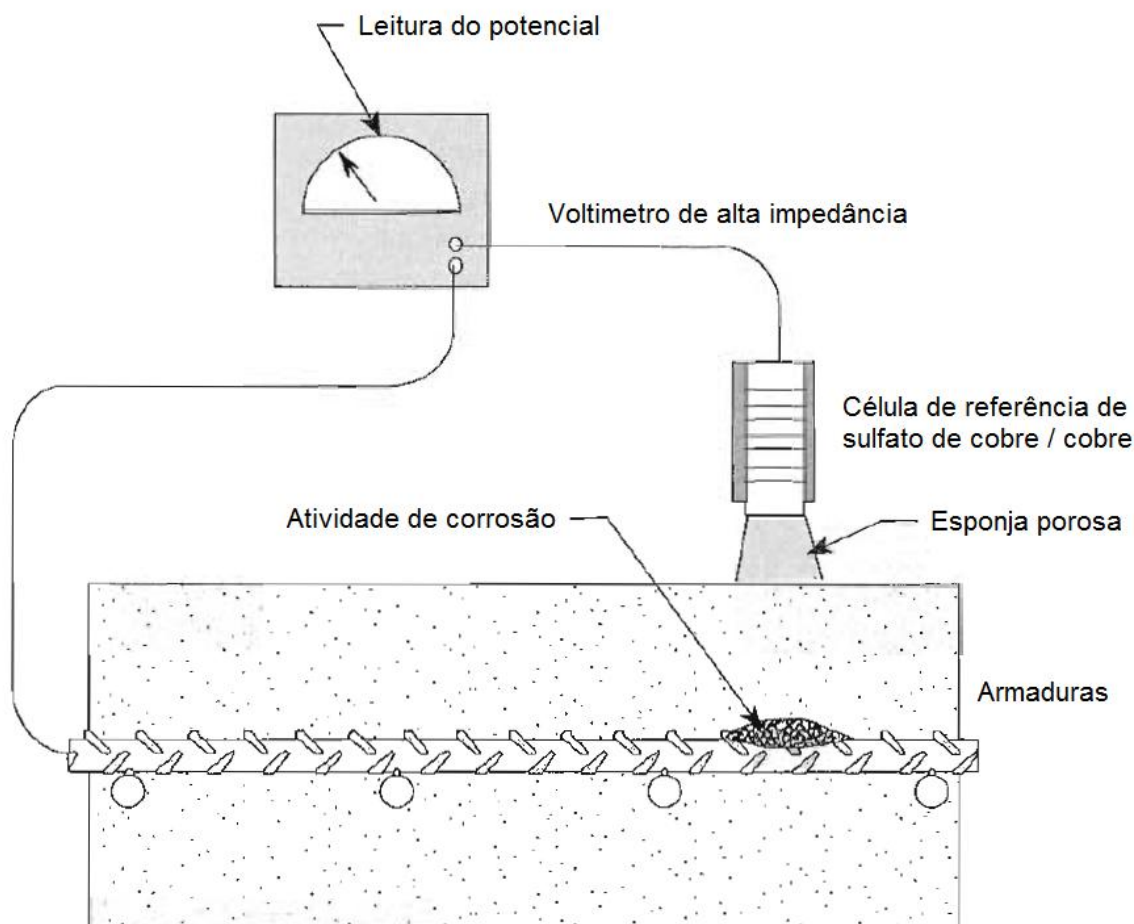


Figura 4-11 – Desenho esquemático de um ensaio de potencial eletroquímico. (Fonte: Emmons, 1994 – adaptado).

4.4.4 Profundidade de carbonatação

O ensaio de profundidade de carbonatação é realizado com a retirada de uma amostra da estrutura. Essa amostra é então submetida à aplicação de uma solução de fenolftaleína, que é um indicador de pH. A solução apresenta-se na cor rosa para níveis de pH maiores que 10.

Não é necessário obter-se o valor exato do pH somente a profundidade da camada carbonatada. A Figura 4-12 apresenta um ensaio de profundidade de carbonatação sendo realizado em um corpo de prova.



Figura 4-12 – Ensaio de profundidade de carbonatação. (Fonte: Aguiar, 2014).

4.4.5 *Reação álcali-agregado*

O ensaio a ser realizado para a determinação da ocorrência de reação álcali-agregado é a análise petrográfica que deve seguir os procedimentos das normas NBR ABNT 15577:2008 e ASTM C 856.

A análise petrográfica é um exame detalhado do concreto com objetivo de determinar sua formação e composição. Para a realização dos ensaios são retiradas amostras do concreto de onde se obtém a identificação dos agregados, informações sobre a interface agregado-pasta, e integridade da pasta de cimento.

A análise petrográfica auxilia na determinação das seguintes características:

- Resistência aos ciclos de gelo-degelo;
- Resistência ao ataque de sulfatos;
- Reatividade álcali-agregado;
- Durabilidade dos agregados;
- Carbonatação;

4.4.6 Presença de cloretos

O ensaio a ser realizado para a detecção da presença de cloretos no interior do concreto é o ensaio de determinação do teor de cloretos. Este ensaio deve seguir as orientações das normas AASHTO T 259, AASHTO T 260 e AASHTO T 277.

O ensaio é realizado retirando-se amostras do concreto pulverizado utilizando um martelo de percussão ou amostras que serão posteriormente pulverizadas no laboratório. As amostras são geralmente retiradas em vários pontos da estrutura investigada. O concreto pulverizado é então analisado em laboratório utilizando um procedimento químico.

A separação dos cloretos que estavam incorporados ao concreto dos que entraram em seu interior após a construção da estrutura é realizada através da comparação entre os resultados das análises obtidos em diferentes profundidades na estrutura investigada. Cloretos que foram introduzidos no concreto durante sua construção terão uma distribuição regular enquanto cloretos que foram introduzidos na estrutura após sua concretagem estarão concentrados em sua superfície.

As Figuras 4-13 a 4-15 apresentam a realização de ensaios de teor de cloretos em estruturas de concreto.

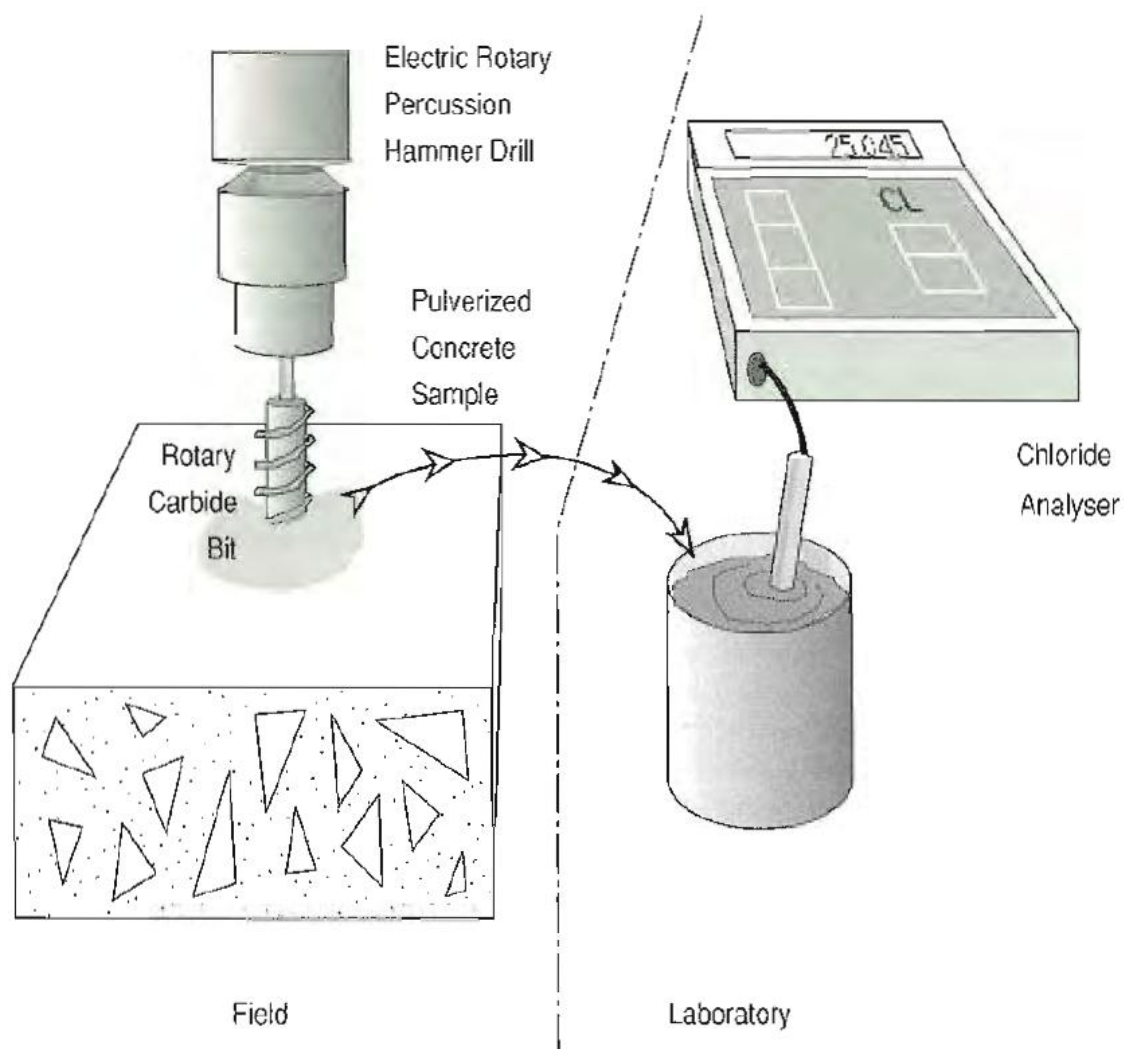


Figura 4-13 – Desenho esquemático de um ensaio de teor de cloretos. (Fonte: Emmons, 1994).



Figura 4-14 – Obtenção do perfil de cloretos em diferentes profundidades em uma peça de concreto. (Fonte: Aguiar, 2014).



Figura 4-15 – Ensaio de teor de cloretos sendo realizado em laboratório. (Fonte: Aguiar, 2014).

4.4.7 Determinação da localização de armaduras no interior do concreto

Outro ensaio de grande importância na avaliação das estruturas é o de localização das armaduras e determinação da espessura da camada de cobrimento. Essa determinação pode ser feita através de aparelhos magnéticos (Profometer, Profoscope), por remoção exploratória do concreto ou ensaios com radiografia e georadar.

Os equipamentos magnéticos são utilizados para a localização das armaduras e se o diâmetro das barras for conhecido é possível se obter a espessura da camada de cobrimento. Em geral estes equipamentos podem detectar armaduras com cobrimentos entre 0 a 75 mm e sua precisão dependerá da quantidade e distribuição das armaduras. Quanto mais congestionada a estrutura (incluindo múltiplas camadas de armaduras) menos precisa será a análise.

A calibração do aparelho é recomendada nos casos onde é possível ter interferências magnéticas devido a utilização de aditivos ou partículas metálicas.

A Figura 4-16 e Figura 4-17 apresentam um desenho esquemático do aparelho de medição e sua utilização em campo respectivamente.

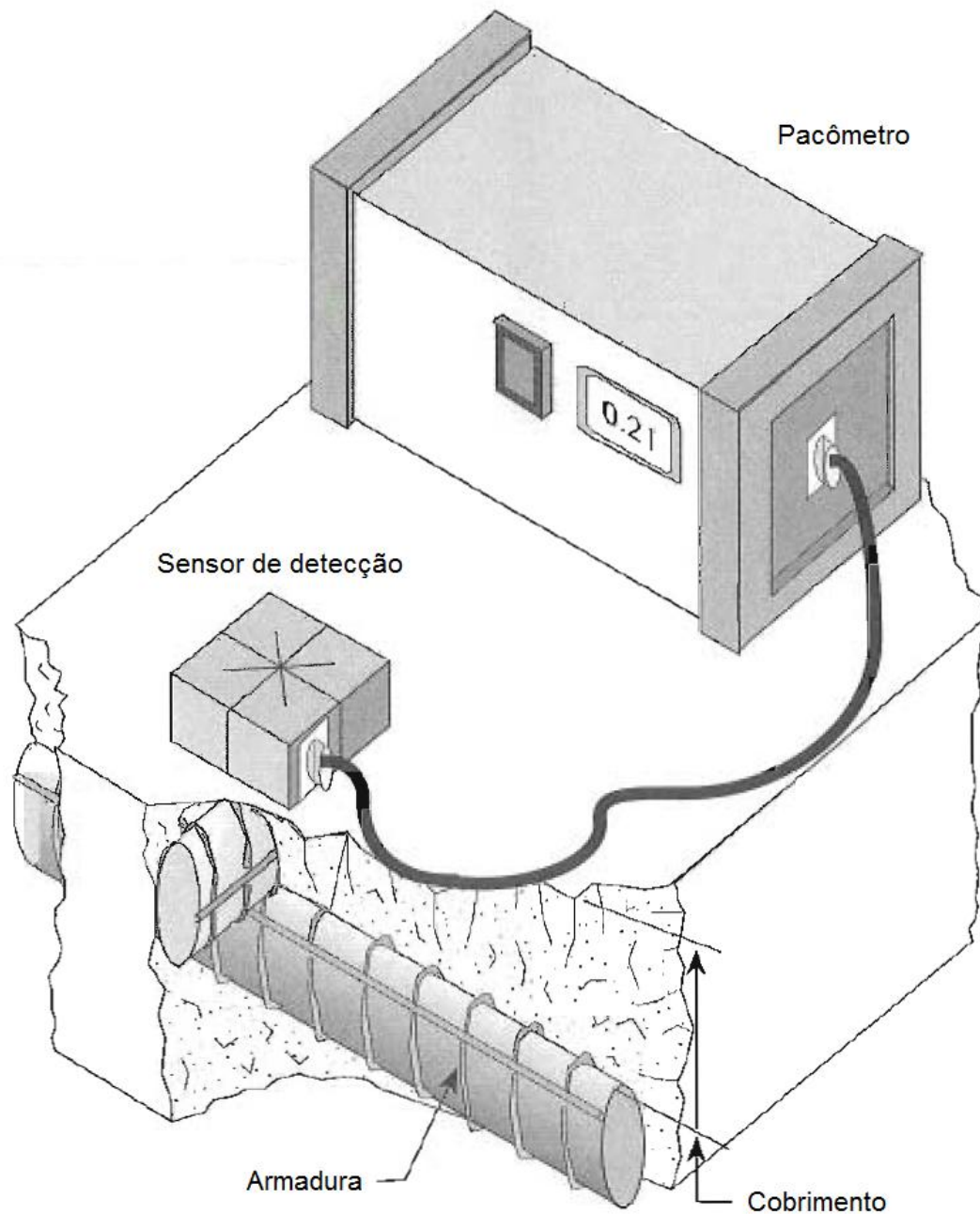


Figura 4-16 – Desenho esquemático de ensaio magnético de localização de armaduras e cobrimento. (Fonte: Emmons, 1994).



Figura 4-17 – Localização de armaduras e determinação de cobrimento através de aparelhos magnéticos. (Fonte: Aguiar, 2014).

5 CONCLUSÃO

O conhecimento das origens, formas de manifestação e os mecanismos de deterioração das estruturas é de fundamental importância para a evolução das diversas etapas envolvidas na construção de estruturas de concreto armado. O conhecimento das falhas mais comuns por todos os envolvidos no processo seja o projetista de estruturas, os construtores ou os proprietários da obra podem embasar a tomada de decisões referente aos procedimentos a serem adotados para garantir a durabilidade e desempenho satisfatórios das estruturas de concreto armado.

As avaliações das condições da estrutura sejam elas reativas ou pró-ativas, são fundamentais para a manutenção do desempenho da estrutura. Apesar de tradicionalmente no Brasil as inspeções pró-ativas serem negligenciadas, as mesmas são bastante interessantes por diminuírem consideravelmente os custos das medidas de recuperação/proteção das estruturas.

Atualmente existem equipamentos e técnicas de fácil acesso e utilização que oferecem informações sobre as condições das armaduras e do concreto. Estes ensaios aliados às inspeções visuais e remoções exploratórias possibilitam ao engenheiro obter a caracterização da estrutura de concreto e determinam a necessidade de análises mais complexas e ensaios em laboratório.

O conhecimento das principais normas e procedimentos de avaliação das estruturas, técnicas de previsão de vida útil e desempenho, podem embasar o engenheiro responsável pelas inspeções a tomar decisões corretas que atendam a critérios técnicos e econômicos trazendo benefícios a todos os envolvidos com a construção das estruturas de concreto armado.

O conhecimento dos processos e técnicas de recuperação de estruturas de concreto armado também pode auxiliar o engenheiro responsável por executar

estes reparos/proteções a realizar a escolha mais acertada de materiais e de processos executivos.

Tendo isso exposto, o objetivo deste trabalho de realizar uma revisão bibliográfica acerca do tema de Patologia das Construções foi atingido. Apesar de não conseguir e nem ser o objetivo deste trabalho esgotar completamente o tema das manifestações patológicas e avaliação das estruturas este trabalho apresenta um resumo conciso e bem fundamentado do tema. A bibliografia utilizada apresenta materiais clássicos de qualidade e reconhecidos pela comunidade acadêmica além de materiais e estudos recentes que trazem o que há de mais moderno no campo da recuperação/proteção das estruturas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J.E. *Patologia e Durabilidade das Estruturas de Concreto*. Notas de aula (especialização em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2014. 298 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2006.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *Durable concrete structures: design guide*. 2 ed. London: Editora Thomas Telford, 1989. 112 p.

EMMONS, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*. Kingston: Editora Means, 1994. 295 p.

ÉRCIO, T. *Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo: Editora Pini, 1989. 194 p.

SOUZA, V.C.M., RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: Editora Pini, 1998. 257 p.

VALENTE, A.P.V. *Avaliação da eficácia de alguns processos de recuperação nas edificações do tribunal de justiça do estado de Minas Gerais*. Dissertação (mestrado em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte: 2008. 190 p.