

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO: ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES
PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS NO ESTADO DE
PERNAMBUCO**

JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO

Porto Alegre
1997

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - Dr^a pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - Dr^a pela Universidade de São Paulo
Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Cláudio de Souza Kazmierczak
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Paulo Roberto do Lago Helene
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Ruy Alberto Cremonini
Dr. pela Universidade de São Paulo

À Deus

Aos meus pais, Jairo e Alzira Andrade

Aos meus irmãos, Gustavo e Fabiana

À Denise

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Prof^a Denise Dal Molin. Com sua capacidade técnica e extrema clareza, soube conduzir o trabalho de uma maneira lúcida e consistente, fazendo juz ao título de *Orientadora*. Obrigado, Denise!

Aos Professores Paulo Helene e Enio Figueiredo pelos comentários e sugestões apontadas no desenvolvimento do trabalho.

À Escola Politécnica de Pernambuco, na pessoa do seu Diretor Prof^o Armando Carneiro e do Chefe do Departamento de Engenharia Civil, Prof^o Sérgio Dias, pelo apoio e pela oportunidade de desenvolver uma parte da pesquisa na Universidade.

Aos Engenheiros Zoroastro Soares, da CONCREPOXI Engenharia e Normando Perboire, da TECNOBETON por ceder os arquivos das empresas para a coleta de dados.

Aos amigos Márcio Carvalho, Rosele Lima e Arnaldo Cardim. Fico contente em saber que tudo começou com a nossa iniciativa. Me sinto orgulhoso de ter parceiros profissionais do quilate de vocês. Valeu por tudo!

Ao pessoal do Núcleo de Desenvolvimento de Pesquisas da Escola Politécnica de Pernambuco: Eliana, Heloísa, Arraes, Rosana e Janilson pelo companheirismo e amizade. À Ceres Zenaide, Juliana Queiroz, Kátia Van Drunen pela ajuda na parte de coleta de dados nas empresas.

À FACEPE - Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco e ao CNPq, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Aos professores do NORIE: Luís Carlos Bonin, Miguel Sattler, Carlos Formoso, Ângela Masuero, Ruy Cremonini, Hélio Greven e Ronaldo Duarte pelas informações técnicas e troca de experiências durante os dois anos de curso.

Aos amigos do NORIE: Tarcísio Abreu, Givanildo Garlet, Eduardo Dubaj, Águida Abreu, Alícia Mimbacas pelo companheirismo e amizade do dia-a-dia.

À Lúcia, pela ajuda sempre presente.

Aos grandes amigos da Casa do Estudante Ana Paula Bernardi, Luciano Menezes, Sandro Valério, Cardivandro Soares, Guilherme Gontijo, Eraly Silva, Girlene e Luziel pelos momentos de descontração e apoio nas horas difíceis.

Não poderia de deixar um muito obrigado especial a duas pessoas que se tornaram verdadeiros irmãos durante tal período: João Ilton e Ivonne Gamboa. Sem a companhia de vocês, as coisas teriam sido bem mais difíceis.

Aos meus pais, Jairo e Alzira Andrade, pelo apoio, carinho, força e confiança, sabendo que todo esse afastamento foi necessário para a conquista de algo melhor no futuro para todos nós. Eu amo vocês!

E, principalmente, à minha namorada, Micheline Joyse, peço desculpas pelas horas em que eu não pude estar ao seu lado em função da realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo do Trabalho	3
1.2 Delimitações do Trabalho	3
1.3 Estruturação do Trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Conceitos de Durabilidade e Vida Útil	10
2.2 Etapas do Processo de Produção das Edificações	18
2.2.1 Planejamento/Projeto	19
2.2.2 Materiais	21
2.2.3 Execução	22
2.2.4 Utilização/Manutenção	24
2.3 Meio Ambiente	29
2.3.1 Concreto em Meio Ambiente Salino	36
2.4 Visão Holística do Processo de Degradação de Estruturas	42
2.4.1 Considerações Quanto aos Modelos de Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado	45
3. CARACTERIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E FORMAS DE REPARO E REFORÇO	50
3.1 Introdução	50
3.2 Banco de Dados	50
3.2.1 Dados gerais da edificação	51
3.2.2 Dados de inspeção	56
3.2.3 Dados dos custos de recuperação	56
3.2.4 Origem das manifestações patológicas nas etapas do processo construtivo	56
3.2.5 Cadastramento das manifestações patológicas e formas de recuperação adotadas	64
3.2.5.1 Definições das principais manifestações patológicas observadas no levantamento	65
3.2.5.2 Principais formas de recuperação empregadas nas estruturas	68
4. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	71
4.1 Em Função do Estado do Concreto: Fresco ou Endurecido	71
4.2 Em Função do Tipo de Edificação	73
4.3 Em Função do Elemento Estrutural mais Afetado	77
4.4 Considerações a Respeito das Manifestações Patológicas	81
5. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS FORMAS DE RECUPERAÇÃO	84
5.1 Edificações Residenciais: Métodos de Intervenção Empregados	85
5.2 Edificações Comerciais/Serviços: Métodos de Recuperação Empregados	89
5.3 Edificações Industriais: Métodos de Recuperação Adotados	92

5.4 Edificações Institucionais: Formas de Recuperação mais Empregadas	95
5.5 Considerações Quanto aos Serviços de Recuperação Estrutural	96
6. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS TRABALHOS DE LEVANTAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E FORMAS DE RECUPERAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	99
7. AVALIAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO	105
7.1 Introdução	105
7.2 Descrição da Estrutura	105
7.2.1 Histórico	105
7.3 Metodologia de Inspeção	107
7.3.1 Inspeções visuais	107
7.3.2 Ensaios de carbonatação	107
7.3.3 Teores de íons cloreto	107
7.3.4 Análise do grau de deterioração da estrutura	108
7.4 Resultados	114
7.4.1 Inspeções Visuais	114
7.4.2 Ensaio de Carbonatação	115
7.4.3 Teores de Cloretos	116
7.4.4 Análise do Grau de Deterioração da Estrutura	118
7.5 Considerações Finais do Estudo de Caso	120
8. ANÁLISE DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO DE PERNAMBUCO	122
8.1 Custos de Recuperação em Função do Entorno	123
8.2 Custos de Recuperação em Função do Tipo de Obra	123
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	128
10. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	131
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relações existentes entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho das estruturas (CEB, 1992)	8
Figura 2.2 - Fases do desempenho de uma estrutura durante a sua vida útil [Adaptada do CEB (1992) e HELENE (1992)]	11
Figura 2.3 - Vida útil das estruturas [adaptado do CEB (1993) e HELENE (1993)]	13
Figura 2.4 - Vida útil de estruturas de concreto (MEHTA, 1994)	17
Figura 2.5 - Microclima e ações atuantes nas edificações	34
Figura 2.6 - Tipos de exposição na zona marinha (CEB, 1992)	38
Figura 2.7 - Efeito da permeabilidade e da espessura do cobrimento do concreto na corrosão de armaduras (TUUTTI, citado por SANDBERG et al, 1996)	40
Figura 2.8 - Limites de penetração de cloretos (em relação à massa de cimento) em corpos-de-prova após 3 anos de exposição ao ambiente do Mediterrâneo (JAEGERMANN, 1990)	41
Figura 2.9 - Modelo holístico de deterioração do concreto (MEHTA, 1994)	44
Figura 2.10 - Fluxograma para a verificação da vida útil das estruturas de concreto armado	46
Figura 3.1 - Distribuição do entorno por tipo de obra atacada	54
Figura 3.2 - Comparação do entorno das obras vistoriadas na Amazônia (ARANHA, 1994) e Pernambuco	55
Figura 3.3 - Distribuição das origens das manifestações patológicas em todos os tipos de edificação	60
Figura 3.4 - Distribuição das origens das manifestações patológicas por tipo de obra no Estado de Pernambuco	62
Figura 3.5 - Origem das manifestações patológicas no Brasil (CARMONA et all, 1988; ARANHA, 1994)	63
Figura 3.6 - Principais manifestações patológicas do concreto no estado fresco (adaptado de ARANHA, 1994)	65
Figura 3.7 - Principais manifestações patológicas no concreto no estado endurecido (adaptado de ARANHA, 1994)	66
Figura 3.8 - Principais materiais empregados para reparos em estruturas de concreto (HELENE, 1992)	68
Figura 3.9 - Materiais mais empregados no reforço de estruturas de concreto (Adaptado de ARANHA, 1994)	69
Figura 3.10 - Classificação das técnicas de reforço das fundações (ARANHA, 1994)	70
Figura 4.1 - Manifestações patológicas: concreto no estado fresco	71
Figura 4.2 - Manifestações patológicas: concreto no estado endurecido	72
Figura 4.3 - Edificações residenciais: principais manifestações patológicas	73
Figura 4.4 - Edificações comerciais: principais manifestações patológicas	74
Figura 4.5 - Edificações industriais: principais manifestações patológicas	75
Figura 4.6 - Obras públicas: principais manifestações patológicas	76
Figura 4.7 - Obras residenciais: elementos estruturais mais afetados	78
Figura 4.8 - Obras comerciais: elementos estruturais mais afetados	79

Figura 4.9 - Obras industriais: elementos estruturais mais afetados	80
Figura 4.10 - Obras públicas: elementos estruturais mais afetados	80
Figura 5.1 - Métodos de reabilitação empregados nas estruturas	84
Figura 5.2 - Distribuição das formas de recuperação nos diferentes tipos de obras	85
Figura 5.3 - Edificações residenciais: sistemas de reparo mais empregados	86
Figura 5.4 - Edificações residenciais: reforços estruturais mais empregados	87
Figura 5.5 - Edificações residenciais: reforços de fundação mais empregados	89
Figura 5.6 - Edificações comerciais/serviços: sistemas de reparo mais empregados	89
Figura 5.7 - Edificações comerciais/serviços: reforços estruturais mais empregados	90
Figura 5.8 - Edificações comerciais/serviços: reforços de fundação mais empregados	91
Figura 5.9 - Edificações industriais: sistemas de reparo mais empregados	92
Figura 5.10 - Edificações industriais: reforços estruturais mais empregados	93
Figura 5.11 - Edificações industriais: reforços de fundação mais empregados	94
Figura 5.12 - Edificações institucionais: sistemas de reparo mais empregados	95
Figura 5.13 - Edificações institucionais: técnicas de reforço mais empregadas	96
Figura 6.1 - Exemplo da distribuição espacial de obras com problemas patológicos	101
Figura 7.1 - Croquis em planta do prédio em análise, com a localização dos pontos de ensaio de cloretos e carbonatação	106
Figura 7.2 - Grau do dano (D) <i>versus</i> Fator de Intensidade do Dano (F_i) (CASTRO, 1994)	112
Figura 7.3- Curva de penetração dos íons cloreto nos elementos estruturais	116
Figura 8.1 - Distribuição dos custos de recuperação em função do entorno	123
Figura 8.2 - Custos de recuperação das obras no estado de Pernambuco	124
Figura 8.3 - Distribuição dos custos de recuperação nas edificações	126
Figura 9.1 - Comparação das soluções para recuperação estrutural no Brasil (CARMONA e MAREGA, 1988), Amazônia (ARANHA, 1994) e Pernambuco	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação das edificações com relação ao uso	52
Tabela 3.2 - Distribuição das obras segundo o entorno	53
Tabela 6.1 - Comparativo da distribuição das manifestações patológicas por tipo de obra no estado de Pernambuco	103
Tabela 7.1 - Grau de deterioração da estrutura	119
Tabela 8.1 - Custos de recuperação de estruturas em concreto armado no Estado de Pernambuco	124
Tabela 8.2 - Custos por metro quadrado das intervenções por tipo de obra	125
Tabela 8.3 - Distribuição dos recursos, em US\$, em função do método de recuperação empregado	126

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Medidas de proteção com seus custos em relação ao custo inicial das obras, com relação ao fenômeno da corrosão das armaduras (GERWICK, 1994)	25
Quadro 2.2 - Interações entre fases e partes envolvidas no processo construtivo de edificações [JESSEN citado pelo CEB (1992)]	28
Quadro 2.3 - Classes de exposição para o concreto com relação às condições ambientais (CEB, 1992)	33
Quadro 2.4 - Correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração (CEB, 1992)	39
Quadro 3.5 - Classificação do entorno no Estado de Pernambuco	52
Quadro 3.6 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de planejamento/projeto e materiais do processo construtivo (ARANHA, 1994)	57
Quadro 3.7 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de execução e utilização do processo construtivo (ARANHA, 1994)	58
Quadro 3.8 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de execução e utilização do processo construtivo (ARANHA, 1994) (Continuação)	59
Quadro 6.1 - Análise das manifestações patológicas: metodologia 1	100
Quadro 6.2 - Análise das manifestações patológicas: metodologia 2	100
Quadro 6.3 - Obras institucionais afetadas pela corrosão de armaduras	103
Quadro 7.1- Famílias de elementos estruturais, danos e fatores de ponderação (F_p) (CASTRO, 1994)	110
Quadro 7.2 - Fator de intensidade do dano (F_i) (CASTRO, 1994)	111
Quadro 7.3 - Fator de relevância (F_r) para as famílias de elementos (CASTRO, 1994)	114
Quadro 7.4 - Resultados do ensaio de carbonatação	115
Quadro 7.5 - Resultados das análises de cloretos	116
Quadro 7.6 - Distribuição dos elementos estruturais avaliados	118
Quadro 7.7 - Danos observados no Pilar P09	118
Quadro 7.8 - Classificação dos níveis de deterioração do elemento (CASTRO, 1994)	119
Quadro 7.9 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura (CASTRO, 1994)	119

DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Jairo José de Oliveira Andrade

RESUMO

Recentemente, importantes pesquisadores e instituições a nível mundial têm desenvolvido grande esforço na execução de levantamentos de problemas em vários tipos de edificações, pois a catalogação e análise das ocorrências consistem em um ponto de partida para qualquer investigação dessa área. O estudo sistemático dos problemas a partir de suas manifestações características permite uma análise mais aprofundada de suas causas, subsidia com informações os trabalhos de reparo e manutenção das estruturas, além de poder contribuir para o entendimento do processo de produção, de modo a minimizar a incidência total de problemas.

Desta forma, realizou-se no Estado de Pernambuco um levantamento das principais manifestações patológicas e das formas de recuperação empregadas nas estruturas, onde coletou-se dados relativos a serviços de reparo e reforço de estruturas em concreto armado nas empresas que trabalham com recuperação das mesmas. Foram cadastradas 189 obras compreendendo o período de 1978 a 1996, classificando-as de acordo com o entorno onde as mesmas estão inseridas e o tipo de uso da edificação.

A partir de tais dados obteve-se o percentual de ocorrência das principais manifestações patológicas nos diversos tipos de edificação. Primeiramente observou-se que os pilares foram os elementos que apresentaram um maior índice de degradação, seguido de vigas e lajes, devido principalmente à ação da corrosão de armaduras e das fissuras provocadas pelas movimentações de origem estrutural. Tais manifestações estão diretamente associadas ao estabelecimento de procedimentos inadequados nas etapas de planejamento/projeto e execução do processo construtivo.

Face ao grande percentual de danos associado à corrosão das armaduras encontrado no levantamento, realizou-se um estudo de caso para se verificar o nível de degradação de uma estrutura atacada por tal fenômeno. Os resultados encontrados mostraram que a obra objeto do estudo apresentava níveis críticos de deterioração, necessitando de intervenção imediata para restabelecer a sua funcionalidade.

Através das análises realizadas pode-se concluir que a maioria dos danos que ocorrem nas edificações poderiam ser minimizados caso houvesse um efetivo controle de qualidade durante o processo construtivo, aliado a um programa de manutenção preventiva das estruturas de concreto armado.

DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: ANALYSIS OF THE STRUCTURES DETERIORATION IN PERNAMBUCO STATE

Jairo José de Oliveira Andrade

ABSTRACT

Recently recognized researchers and institutions around the world have done great efforts in order to better understand the main problems found in some kind of buildings. The creation of a catalogue of usual problems and the correspondent analysis is the first step for any survey in this area. A systematic study of those most common occurrences would allow a better analysis of their causes. This kind of study could be subsidized with information collected from repair and maintenance companies that work with the structure repairing.

In this way, a survey was developed in Pernambuco state, Brazil, studying the main damages and the different techniques used for rehabilitation of those structures. The collection was carried out into companies that work in this area. A total of 189 buildings were studied and classified according to the external conditions that they face and the use of building.

With this data, an incidence percentage of main problems was obtained, depending on the use of the buildings. It was detected that columns are the elements with highest rate of degradation, mainly because of the corrosion of reinforcement and cracks provoked by structural movements. These problems are directly associated with use of inadequate procedures on the planning/project stage and in the construction stage.

Facing the high percentage of damages associated with corrosion of reinforcement found in this survey, it was developed a case study in order to verify the degradation level of a structure attacked with this phenomenon. The results obtained showed that the building under study presented critical levels of deterioration, with the need of an immediate intervention to achieve functional re-establishment.

Through the analysis of the 189 buildings it was concluded that the majority of damages occurred in buildings in Pernambuco could be minimized with an effective quality control during the construction phase and a adoption of maintenance program for reinforced concrete structures.

1. INTRODUÇÃO

Dentre uma grande variedade de materiais empregados para a construção de habitações para a moradia do homem, sem dúvida o concreto é aquele que tem uma maior gama de utilizações dentro da sociedade moderna. É praticamente inconcebível dissociar o desenvolvimento tecnológico da humanidade do desenvolvimento e do uso do concreto. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), estima-se que o atual consumo mundial de concreto é da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano.

A utilização em larga escala do concreto como material de construção se deve a algumas características que o mesmo apresenta e que são extremamente peculiares, tais como a facilidade de execução de elementos de diversas formas e tamanhos, a disponibilidade dos materiais constituintes e, principalmente, pelo menor custo se comparado a outras opções de construção existentes, principalmente com as estruturas metálicas.

Todo o meio técnico admitia que o concreto era um material que não necessitava de maiores cuidados de manutenção, em função do excelente desempenho que se observava nas obras construídas com tal material. Desta forma, o mesmo foi largamente empregado em uma grande variedade de ambientes e sob condições de exposição extremamente desfavoráveis.

Contudo, tais paradigmas estavam começando a desmoronar quando se observou um aumento significativo de estruturas que apresentavam algum processo de deterioração nos últimos anos. Nas construções antigas, os materiais apresentavam baixas resistências mecânicas, sendo, por isso, submetidos a baixas tensões de serviço, com um elevado coeficiente de segurança. Assim, as estruturas nesse período tinham grande massa e inércia considerável, apresentando-se mais resistentes aos processos de degradação. Atualmente, com o avanço da ciência dos materiais, da teoria das estruturas, do concreto armado e dos processos cada vez mais industrializados de fabricação, os materiais chegaram a elevadas resistências mecânicas e as construções passaram a admitir um aumento considerável nas suas tensões de serviço, dando origem a uma concepção de estruturas mais esbeltas e econômicas. Porém, esse avanço tornou as estruturas cada vez mais suscetíveis a ataques de agentes agressivos, fazendo com que surgisse um elevado número de manifestações patológicas nas edificações.

A importância do estudo da Patologia das Construções está, em primeiro lugar, na necessidade de divulgação das manifestações patológicas mais incidentes; em segundo lugar, no conhecimento da evolução dos problemas — quanto antes detectadas menor o custo para reparo dos elementos danificados (STEEN, 1991). Além disso, tal estudo pode fornecer subsídios para prevenção,

através de controle de qualidade mais apurado de pontos específicos, subsidiar a revisão das normas, condicionar novos métodos construtivos e subsidiar as correções de forma a otimizar os custos de reparação (DAL MOLIN, 1988).

Segundo a literatura (MEHTA, 1993; SILVA FILHO, 1994) existem dois fatores básicos que controlam a questão da durabilidade das estruturas: o concreto em si, como material compósito e, desta forma, heterogêneo, e as condições do meio ambiente circundante das estruturas. Ambos os fatores exercem um tipo de influência na durabilidade. Até o presente momento, as relações existentes entre os dois fatores não estão perfeitamente explicadas, em função da dificuldade em se mensurar certas características com o conhecimento disponível até agora pelo meio técnico.

As propriedades do concreto como material de construção estão intimamente relacionadas com as medidas tomadas nas diversas etapas do processo construtivo - planejamento/projeto, materiais, execução e utilização/manutenção. Atualmente observa-se a falta de atenção que é dada pelo meio técnico-científico a algumas das etapas de tal processo, como o caso da manutenção de estruturas. Deve-se ter em mente que um adequado controle de qualidade de absolutamente todas as etapas é um fator fundamental para a obtenção de obras duráveis.

Por outro lado, deve-se observar que o meio ambiente e o sinergismo existente entre o mesmo e o concreto são fatores que tem uma grande influência sobre a durabilidade das estruturas. Contudo, ambos são extremamente difíceis de serem avaliados, principalmente em função da grande quantidade de agentes envolvidos na determinação dos mesmos.

A consideração de tais fatores são de suma importância para se avaliar a vida útil das estruturas, principalmente aquelas que se localizam em áreas com uma elevada agressividade ambiental, como é o caso das estruturas localizadas nas áreas industriais e salinas. Na Região Nordeste do Brasil, a grande maioria das capitais está localizada na orla marítima, isto é, as estruturas de concreto armado estão sob condições adversas de agressividade ambiental. Desta forma, um trabalho em tal região é de suma importância para se verificar as possíveis causas das degradações e, assim, alertar o meio técnico para que se tomem medidas preventivas a fim de que se obtenham obras duráveis.

Deve-se observar também os elevados custos envolvidos nas recuperações das estruturas degradadas. Avaliações feitas por organizações e comitês formados por especialistas em corrosão e proteção contra a corrosão estimaram que as perdas causadas por tal fenômeno variam de 1,25 a 3,50% do Produto Nacional Bruto (PNB) de países em vias de desenvolvimento ou desenvolvidos (ANDRADE & GONZÁLEZ, 1978). HOAR (1971) estimou que o setor da construção civil era responsável por 18,3% dos custos totais, ou seja, 0,6% do PNB. Utilizando esses índices, e realizando um simples exercício para estimar os custos da corrosão e

proteção no Brasil, onde o PNB foi, em 1991, da ordem de 300 bilhões de dólares, chegaria-se ao valor de 1,8 bilhão de dólares gastos anuais relativos ao setor da construção (FIGUEIREDO, 1994).

Face as considerações apresentadas anteriormente, observa-se que uma análise das formas de degradação mais incidentes nas edificações é de suma importância para se avaliar o grau de durabilidade das estruturas de concreto armado atualmente.

1.1 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal a realização de um levantamento das manifestações patológicas que ocorrem nas estruturas de concreto armado, identificando as causas mais comuns de degradação e formas de reparo, recuperação e/ou reforço utilizados em tais estruturas no Estado de Pernambuco. Desta maneira, procurou-se contribuir para um melhor entendimento das formas de deterioração existentes nas estruturas de concreto armado na região Nordeste do Brasil.

1.2 Delimitações do Trabalho

A delimitação mais característica do presente trabalho ocorreu principalmente com relação ao banco de dados que compõe o levantamento. Em virtude das limitações de tempo e de recursos, não houve condições de se abranger todo o conjunto universo de dados referentes às intervenções realizadas nas edificações, pois seria extremamente difícil reunir todos os dados necessários para tal análise. Além disso, no presente trabalho não se tem o registro das pequenas recuperações que são geralmente realizadas pelos proprietários das obras, onde os dados referentes a tais serviços não eram catalogados e, assim, não puderam ser avaliados.

Outra consideração que deve ser realizada diz respeito à distribuição espacial das obras que compunham o banco de dados. Tal distribuição era extremamente aleatória e dependente do número de casos encontrados de cada tipo de edificação. Assim, a grande maioria das obras estavam concentradas em determinados pontos da região, não se tendo uma amostragem completa de toda a área pesquisada.

Desta forma, com os dados disponíveis, pôde-se inferir muitas das considerações aqui realizadas, tanto com relação às manifestações patológicas

quanto com relação às formas de recuperação adotadas nas estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco.

1.3 Estruturação do Trabalho

O presente estudo está estruturado de acordo com a sequência abaixo:

No primeiro capítulo, que é a *Introdução* do trabalho, estão descritos os objetivos e justificativas da pesquisa realizada, juntamente com as delimitações da mesma.

No *Capítulo 2* está apresentada uma breve revisão bibliográfica dos assuntos relacionados ao tema durabilidade das construções. Tal capítulo tem como objetivo maior mostrar os conceitos de durabilidade e vida útil das edificações, bem como os fatores que tem uma influência significativa em tais propriedades, como é o caso das propriedades do material e das características do meio ambiente, dando ênfase ao meio ambiente salino, pois é um dos grandes responsáveis pela degradação das estruturas atualmente. Logo após, são discutidas as diversas formas empregadas atualmente na tentativa de se modelar a vida útil das estruturas.

No *Capítulo 3*, está apresentada a metodologia empregada para a realização do trabalho de levantamento das manifestações patológicas e das formas de reparo e reforço empregadas nas estruturas de concreto armado, bem como uma caracterização do banco de dados utilizado para as análises efetuadas nos capítulos posteriores.

As análises das principais manifestações patológicas que ocorreram nas estruturas de concreto armado no estado de Pernambuco estão apresentadas no *Capítulo 4*, enquanto que as considerações referentes aos trabalhos de recuperação e reforço das mesmas no referido estado estão colocadas no *Capítulo 5*. Em tais capítulos, as análises foram realizadas levando em consideração o tipo de obra e os elementos estruturais mais atingidos pelos diversos tipos de dano.

No *Capítulo 6* estão descritas algumas considerações com relação aos métodos utilizados nos trabalhos de levantamento de manifestações patológicas realizados no Brasil. Tais considerações foram realizadas baseando-se nos resultados obtidos nos capítulos anteriores, juntamente com uma comparação dos trabalhos realizados por diversos pesquisadores em outras regiões do País.

No *Capítulo 7* está exposto um estudo de caso realizado em uma estrutura atacada pela corrosão das armaduras. Em tal capítulo está apresentado um breve histórico da obra, toda a metodologia empregada para a realização das inspeções e os resultados das mesmas.

As considerações com relação ao montante financeiro gasto na recuperação das estruturas localizadas no estado de Pernambuco estão apresentadas no *Capítulo 8*. Finalmente, as conclusões finais do trabalho, bem como as sugestões para o desenvolvimento de novas pesquisas, estão colocadas no *Capítulo 9*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente observa-se que inúmeros pesquisadores estão se dedicando ao estudo da durabilidade das edificações. Tal interesse é devido à grande quantidade de danos que estão ocorrendo nas estruturas de concreto, principalmente através do efeito combinado da agressividade ambiental com os problemas de ordem estrutural que interagem nas mesmas, juntamente com o emprego de práticas executivas inadequadas durante as diversas etapas do processo construtivo (ARANHA, 1994).

Em virtude de tais problemas que estão ocorrendo nas estruturas de concreto armado, principalmente nos últimos 30 anos, uma grande quantidade de Reuniões Técnicas, Simpósios e Congressos estão sendo realizados ao redor do mundo a fim de debater sobre os diversos aspectos relacionados com o tema. Dentre os eventos desta natureza que já foram realizados, será feita aqui uma breve descrição de alguns daqueles que tiveram uma maior repercussão no meio técnico-científico nos últimos 3 anos.

Em março de 1994, teve lugar na Califórnia, USA, o *V. Mohan Malhotra Symposium* promovido pelo ACI - American Concrete Institute (MEHTA, 1994a). Em tal simpósio verificou-se a publicação de mais de 30 artigos relacionados a todos os aspectos da durabilidade das estruturas atualmente, desde a escolha dos materiais constituintes do concreto, passando pelos procedimentos construtivos, métodos de ensaio até o estabelecimento de um programa de garantia de qualidade das estruturas.

Em maio do mesmo ano em Nince, França, realizou-se o *P. K. Mehta Symposium on Durability of Concrete* durante a Terceira Conferência Internacional sobre Durabilidade do Concreto, promovido pelo ACI e pelo CANMET - Canada Center for Mineral and Technology (KAMAL e AÏTCIN, 1994). Na ocasião foram discutidos alguns aspectos teóricos a respeito da durabilidade das estruturas, juntamente com a apresentação de numerosos estudos de caso em obras expostas a diversos tipos de ambiente que sofreram algum processo de degradação.

Em 1996, no mês de junho, realizou-se um evento intitulado *Concrete in the Service of Mankind: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection* na Escócia, UK (DHIR e JONES, 1996). Em tal evento, privilegiou-se os aspectos relacionados ao reparo de estruturas degradadas, incluindo desde uma correta avaliação dos danos até uma análise da durabilidade dos materiais de reparo empregados nas reabilitações.

Já em agosto de 1996 realizou-se em New Brunswick, Canadá, o *Odd E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures*, também promovido pelo CANMET/ACI (MEHTA, 1996). Durante o evento dedicou-se especial atenção às

estruturas expostas em ambientes altamente agressivos, com ênfase no estudo do desempenho das construções em concreto em tais condições de utilização.

O reflexo de tal preocupação por parte da comunidade técnico-científica mundial com o tema durabilidade das estruturas fez com que fosse realizado no Brasil o Congresso Internacional sobre Concreto de Alto Desempenho e Desempenho e Qualidade das Estruturas de Concreto, também em junho de 1996 (PRUDÊNCIO et al., 1996). Em tal evento reuniu-se uma significativa parte dos pesquisadores que trabalham com a questão da durabilidade do concreto, cujo assunto foi tema de um curso internacional durante a realização do referido congresso.

De tal forma, verifica-se que a durabilidade das estruturas é um assunto de fundamental importância dentro da Engenharia Civil, sendo objeto de estudo por uma significativa parcela da comunidade técnico-científica mundial. Tal interesse é devido a uma sucessão de acontecimentos que ocorreram nos últimos anos no campo da construção em concreto, que serão sumarizados a seguir.

Antigamente as estruturas só eram concebidas e projetadas para satisfazerem às condições de segurança e estabilidade perante as solicitações de origem mecânica que interagem na mesma. Os aspectos relacionados à questão de durabilidade e desempenho que as estruturas deveriam apresentar durante a sua vida útil não eram levados em consideração, visto que imaginava-se que o concreto armado conservava as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas praticamente inalteradas ao longo do tempo.

Contudo, observou-se que tais paradigmas estavam caindo por terra quando começou-se a observar os elevados índices de degradação que as estruturas vêm apresentando. Segundo JOHN (1987), um processo de degradação é aquele que ocorre quando há uma transformação dos materiais ao interagirem com o meio ambiente. Tal afirmação é ratificada pelo CEB (1992), que mostra de forma clara a estreita dependência existente entre a estrutura e o meio ambiente onde a mesma está inserida. Mais ainda: o Código apresenta que o microclima, que é formado pela interação entre o meio ambiente nas proximidades das edificações, é o fator mais importante a ser considerado na avaliação da durabilidade. Porém, o efeito do clima será discutido mais detalhadamente no item 2.3.

A interdependência existente entre os diferentes fatores que influem na durabilidade e a sua correspondência com o desempenho das estruturas pode ser resumida na Figura 2.1, extraída do CEB (1992), que mostra a influência de cada um deles no processo de degradação das estruturas. Pode ser notado que o transporte de substâncias químicas agressivas que se movimentam através da rede de poros do concreto, juntamente com os parâmetros que controlam esse transporte, e o contato permanente que existe entre o meio ambiente e a estrutura através da porosidade do concreto constituem os principais elementos

que afetam a durabilidade das estruturas, dando origem ao aparecimento dos diversos tipos de processos de degradação, tanto no concreto quanto na armadura.

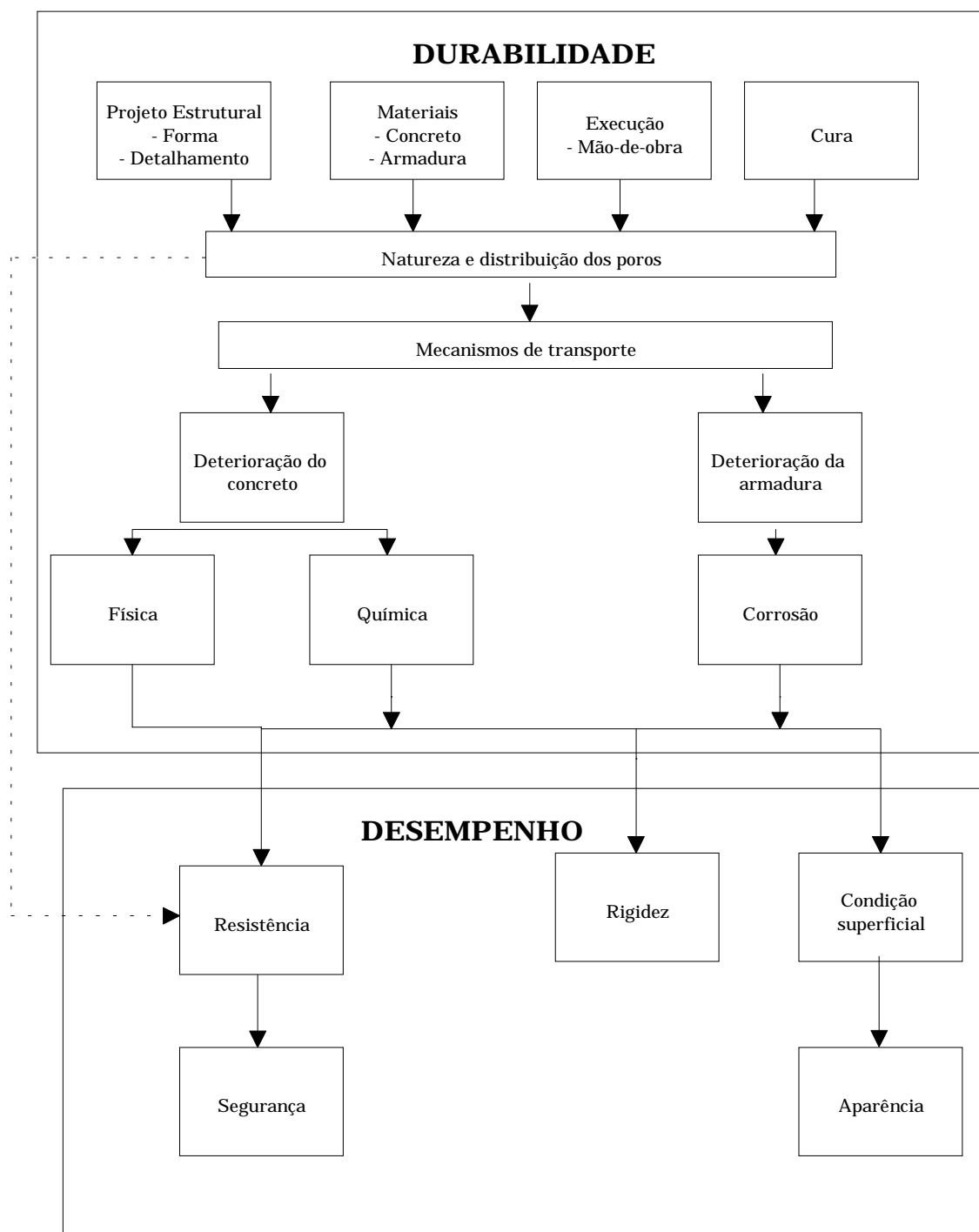


Figura 2.1 - Relações existentes entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho das estruturas (CEB, 1992)

Através de uma análise da Figura 2.1 percebe-se a grande quantidade de fatores que interagem na durabilidade e no desempenho das estruturas. Todavia, observa-se que os diversos tipos de manifestações patológicas que ocorrem nas estruturas de concreto dificilmente apresentam uma única causa,

sendo geralmente resultantes do sinergismo existente entre diversos fatores que promovem as formas de degradação. Assim, verifica-se que a determinação da durabilidade e da vida útil de uma obra é extremamente difícil de ser realizada, principalmente em função das seguintes considerações (SOMERVILLE, 1985):

- A durabilidade é uma questão multidisciplinar, não podendo ser resolvida através de simples ensaios de laboratório, teorias e/ou aproximações numéricas;
- é um problema eminentemente temporal, onde o acúmulo de experiência e resultados satisfatórios leva um certo tempo para acontecer. Durante tal período, verifica-se a ocorrência de uma grande quantidade de mudanças tecnológicas, que têm que ser absorvidas pelas pessoas e/ou instituições que tratam do tema. De certa forma, o estudo da durabilidade fica extremamente condicionado a tais mudanças, onde os parâmetros estabelecidos para certos fatores – como as condições ambientais e os critérios de desempenho – podem mudar nesse período, invalidando assim os resultados obtidos anteriormente;
- não existe uma determinação de quanto um material ou estrutura é ou não durável. Correntemente, existe uma preocupação em se fazer uma estrutura “mais durável”. Contudo, tal conceito é eminentemente qualitativo, pois a durabilidade de uma estrutura está intimamente relacionada com a vida útil que é desejada, que por sua vez varia de acordo com uma série de fatores que até o presente momento ainda não estão bem definidos;
- para o proprietário de uma estrutura, a questão dos custos é extremamente importante na definição da durabilidade da mesma. Projetar para uma determinada vida útil depende de uma série de fatores – qualidade do projeto e construção, nível de manutenção e previsões de mudanças durante o uso (meio ambiente ou carregamento, entre outros). Todas essas medidas estão associadas a um determinado custo, que nem sempre é proveniente de uma mesma fonte de desembolso. Desta forma, a questão dos custos ao longo da vida útil das edificações depende de uma série de fatores, que nem sempre podem ser mensurados na etapa de projeto das mesmas; e
- ao se especificar a vida útil de uma estrutura em 50 ou 100 anos, tem-se que ter em mente que tal número tem que ser traduzido nos fatores que têm influência no desempenho da estrutura – tecnológicos, de projeto, construção, manutenção, ambientais e de carregamento. O conhecimento de tais fatores, bem como o sinergismo existente entre os mesmos, não está perfeitamente explicado até o presente momento, tornando a tarefa de se projetar as estruturas para que atinjam níveis mais elevados de desempenho e consequente durabilidade extremamente difícil.

Conforme mostrado anteriormente, observa-se que existe uma variedade de fatores que influem na determinação da durabilidade das estruturas. O presente trabalho não tem a pretensão de englobar todos os aspectos que têm influência significativa em tal propriedade, mas sim apresentar alguns pontos relevantes sobre cada um deles, tentando-se correlacionar ao máximo as considerações de cunho tecnológico com àquelas relacionadas à prática executiva, a fim de se apresentar os conceitos básicos para a obtenção de obras duráveis.

2.1 Conceitos de Durabilidade e Vida Útil

Muitos autores já deram algumas definições do que seria durabilidade das estruturas. SILVA FILHO (1994), em sua dissertação de Mestrado, apresentou a evolução que ocorreu em tal conceito, na visão de uma significativa parcela de pesquisadores que tratam do assunto. De acordo com o comitê 201 do ACI, citado por MEHTA e MONTEIRO (1994), durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente.

O conceito de durabilidade mais difundido e aplicado atualmente é aquele proposto pelo CEB-FIB MC-90 (1990), que faz algumas considerações para a obtenção de estruturas duráveis. Segundo o Código, “as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e operadas de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, elas mantenham sua segurança, funcionalidade e a aparência aceitável durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem requerer altos custos para manutenção e reparo”.

Vale ressaltar que tal definição pode ser considerada a mais completa, por levar em consideração todos os aspectos relacionados à durabilidade durante a vida útil prevista das edificações, levando-se em consideração a ação do meio ambiente. Para MASTERS, citado por MAILVAGANAM (1992), nenhum material é, por si só, durável ou não durável. Segundo o autor, é a interação existente entre o material e as suas condições de utilização é que vai determinar a durabilidade do mesmo.

O conceito de durabilidade pode ser difícil de ser quantificado e usado de maneira corrente, no dia-a-dia. Isto leva à introdução do conceito de vida útil como um termo operacional que aborda de forma quantitativa a questão da durabilidade das estruturas (ROSTAM, 1994). Segundo a ASTM (1982), vida útil é o período de tempo após a instalação de um material, componente ou sistema, em que as propriedades do mesmo ficam acima de valores mínimos aceitáveis. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando suas

propriedades, sob dadas condições de uso, deterioram a tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada insegura ou antieconômica.

Desta forma, a durabilidade de uma estrutura pode ser representada pelo binômio desempenho/tempo, conforme pode ser observado na Figura 2.2, extraída do CEB (1992) e de HELENE (1992). No momento de se projetar uma estrutura, já deve-se ter uma definição tanto da vida útil exigida para a mesma – que é função das características do material, do meio ambiente circundante e das condições de utilização – quanto dos critérios de desempenho especificados para esse período. Tais critérios podem ser resumidos a um valor de desempenho mínimo, conforme indicado na Figura 2.2.

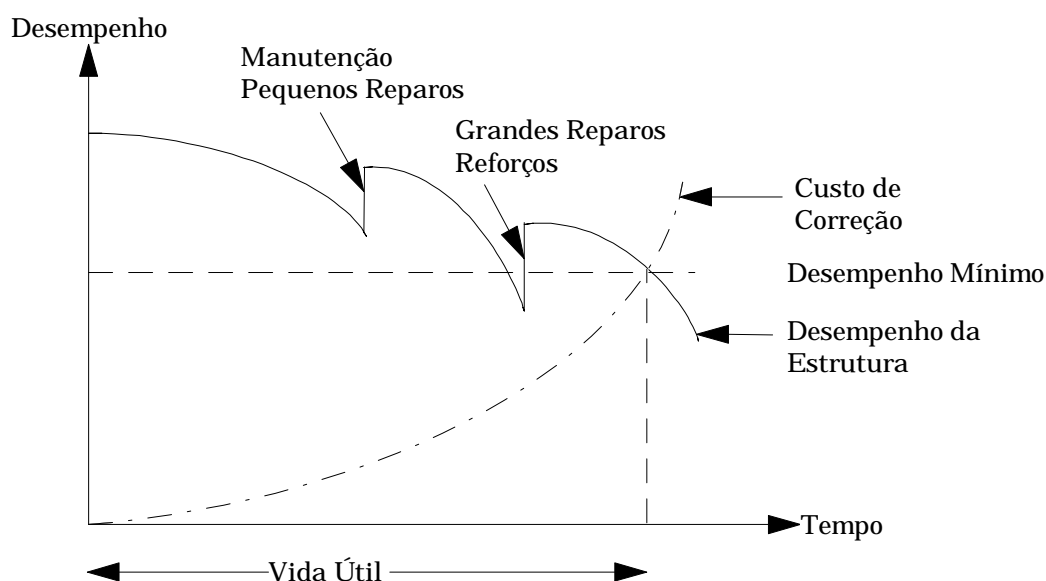


Figura 2.2 - Fases do desempenho de uma estrutura durante a sua vida útil [Adaptada do CEB (1992) e HELENE (1992)]

Quando a estrutura começa a perder a sua funcionalidade em função de algum tipo de deterioração, pode haver a necessidade da realização dos reparos ou reforços, dependendo da gravidade da degradação. Cabe salientar que, à medida que os danos evoluem, os custos necessários para as correções dos mesmos aumentam exponencialmente, através da chamada Lei de Sitter ou Lei dos Cinco (SITTER, 1986). Segundo o autor, cada dólar gasto por unidade de área construída empregado corretamente na etapa de projeto das estruturas corresponde a 5 dólares gastos nas atividades de manutenção. No caso de reparos em pequenas extensões tal valor sobe para 25 dólares e, no caso dos grandes reforços, substituições e/ou demolições o valor chega a 125 dólares. De acordo com ROSTAM, citado por CASTRO (1994), apesar de tais valores de custos terem caráter genérico e aproximado, tal lei é aceita como indicativa do potencial de gastos que podem ser evitados quando se previnem os danos desde as primeiras etapas do processo construtivo.

Desta forma, as medidas necessárias para estimar a vida útil são escolhidas levando-se em consideração tanto as condições do meio ambiente aonde a estrutura estará inserida quanto o grau de importância da mesma. Além disso, deve-se considerar que a vida útil de uma edificação depende tanto do comportamento dos elementos estruturais quanto do comportamento dos elementos não estruturais, que apresentam uma vida útil diferenciada e devem ser considerados durante o projeto, construção e a utilização da estrutura (CEB, 1992). Como exemplo, SOMERVILLE (1985) cita que a vida útil da pintura externa de uma estrutura é de 3 a 5 anos, enquanto as instalações elétricas e de aquecimento têm uma vida de serviço de 15 a 20 anos, que por sua vez apresentam uma vida útil inferior à própria estrutura, que é geralmente de 50 anos.

Atualmente, toda a comunidade científica está preocupada em tentar determinar a vida útil das estruturas com um máximo de confiabilidade, principalmente aquelas que desempenham funções importantes dentro de uma determinada situação e onde são gastos grandes volumes de recursos para a sua construção e manutenção, como é o caso das pontes, barragens e estruturas off-shore. Segundo HELENE (1993), o prognóstico de tal conceito nada mais é do que a previsão da deterioração das estruturas baseados em três aspectos: nas características dos materiais, nas condições de exposição e nos modelos de deterioração. O primeiro modelo utilizado para a determinação da vida útil das estruturas foi proposto por TUUTTI, citado por ANDRADE (1988), que realizou os seus estudos considerando a degradação devida ao fenômeno da corrosão das armaduras. Segundo a autora, tal modelo é extremamente qualitativo, porém apresenta uma grande utilidade para a formulação conceitual dos diversos fenômenos de degradação. Observa-se que a maioria dos trabalhos relacionados à deterioração das estruturas levam em consideração tal modelo, em função da sua extrema simplicidade descritiva.

Os modelos atualmente propostos consideram que a degradação das estruturas ocorrem em duas etapas (CEB, 1993):

- período de iniciação: durante tal fase não há perda da funcionalidade das estruturas, mas alguma barreira de proteção foi quebrada pela penetração dos agentes agressivos no interior dos elementos. Como exemplo pode-se citar o avanço da frente de carbonatação, penetração de cloretos, acúmulo de sulfatos e lixiviação do concreto;
- período de propagação: nesta fase os fenômenos de degradação agem de maneira efetiva, promovendo os diversos tipos de manifestações patológicas atualmente verificadas nas estruturas.

Dentro desta concepção, HELENE (1993) apresenta quatro tipos de vida útil que as estruturas podem apresentar (Figura 2.3):

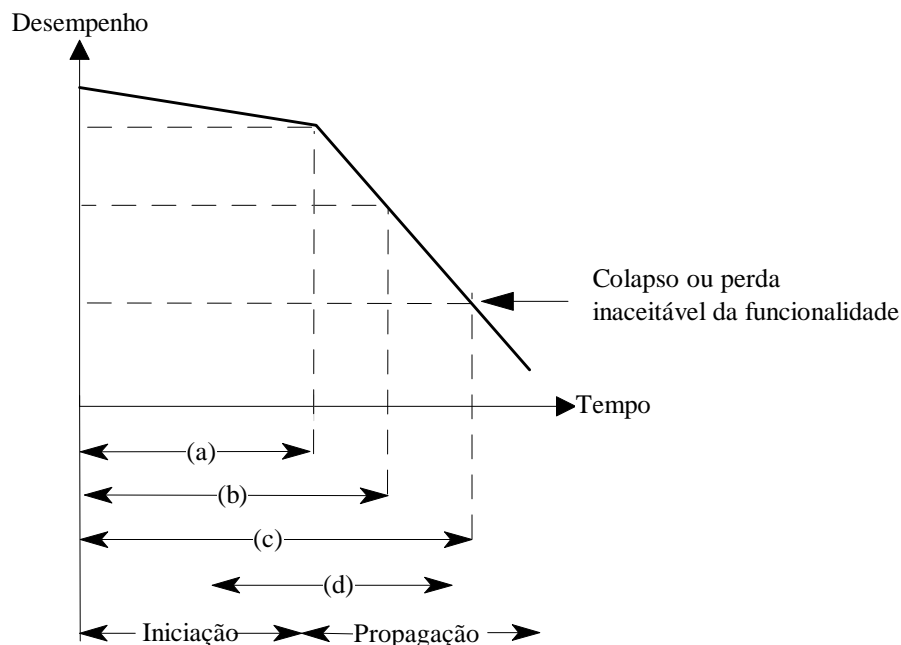


Figura 2.3 - Vida útil das estruturas [adaptado do CEB (1993) e HELENE (1993)]

- vida útil de projeto (a), que é também chamado período de iniciação. Nesta etapa, os agentes agressivos ainda estão penetrando através da rede de poros do revestimento do concreto, sem causar danos efetivos à estrutura. O valor usualmente adotado para tal vida útil nas estruturas de concreto armado convencionais é de 50 anos, enquanto que para pontes tal período pode se estender para 100 ou até 200 anos, no caso das barragens;
- vida útil de serviço ou de utilização (b), onde os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar, como fissuração do concreto por ataque químico ou manchas devidas à corrosão de armaduras. Esta vida útil é muito variável de caso para caso, pois em certas estruturas não se admitem determinados tipos de manifestações – como manchas ocasionadas pela lixiviação em concreto aparente – e em outras elas só serão levadas em consideração quando chegam a níveis que possam comprometer a funcionalidade ou segurança das estruturas;
- vida útil total (c), que corresponde à ruptura e colapso parcial ou total da estrutura; e
- vida útil residual (d), que corresponde ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções contado após uma vistoria e/ou possível intervenção na mesma.

De acordo com as considerações realizadas até o presente momento, verifica-se que tanto o conceito de durabilidade quanto o de vida útil são extremamente subjetivos, onde os fatores que governam tais propriedades são altamente variáveis. Assim, uma das possibilidades existentes de se inferir a vida útil das estruturas é através da modelagem dos três fatores que exercem

uma influência significativa na mesma citados anteriormente - as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Um dos modelos genéricos elaborados com a finalidade de se prever a vida útil das estruturas foi proposto por OBERHOLSTER (1986), conforme apresentado abaixo:

Vida Útil = $f(m_1, m_2, \dots, m_n; a_1, a_2, \dots, a_n; n_1, n_2, \dots, n_n; T)$, onde:

$[m_1 \dots m_n]$ são as características do material;

$[a_1 \dots a_n]$ são as características do ambiente;

$[n_1 \dots n_n]$ são as atividades de manutenção; e

T é o tempo.

Tal proposição leva em consideração os fatores que têm uma grande influência no desempenho das estruturas, devendo contudo ser considerado como um modelo conceitual e meramente qualitativo. O que se observa atualmente é o grande desafio de tentar verificar se todos os fatores podem ser correlacionados através da função f . Levando-se em consideração que tanto as características do material quanto as do meio ambiente - aliado ao sinergismo existente entre ambos - são extremamente variáveis no decorrer do tempo, tal função pode ser extremamente difícil ou até mesmo impossível de ser estabelecida.

Todavia, na tentativa de se identificar parâmetros quantitativos para se determinar a vida útil das estruturas, muitos pesquisadores estão se dedicando ao estudo dos fatores que têm influência direta nos processos de degradação. Uma grande parte dos esforços realizados atualmente por uma parcela considerável da comunidade científica mundial está sendo direcionado para a modelagem dos fatores que influenciam na corrosão das armaduras, por ser a manifestação patológica que mais ataca as estruturas e que sua evolução compromete significativamente a segurança estrutural das obras (HELENE, 1993).

HELENE (1993), em sua tese de livre docência, apresentou alguns modelos matemáticos para previsão da vida útil de obras atacadas pelo fenômeno corrosivo. Tais modelos são baseados nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos através da rede de poros do concreto, como a difusão - através da Lei de Fick - e a permeabilidade - traduzida pela Lei de Darcy. FUNAHASHI (1990) elaborou um programa em elementos finitos para se verificar o avanço da frente de penetração de cloretos em elementos estruturais. Tal programa leva em consideração parâmetros extremamente variáveis em tal processo, como a temperatura, quantidade de sal empregado (no caso de utilização em climas frios para degelo de estradas e pontes), tipo e qualidade do concreto utilizado. BJEGOVIC et al (1995) construíram um modelo

computacional para simulação do processo de difusão de íons cloreto no concreto - baseando-se na solução da segunda Lei de Fick -, objetivando-se a previsão da vida útil de estruturas. Ainda na linha de modelagem do comportamento da penetração dos íons cloreto no concreto, PAPADAKIS et all (1996) e ROELFSTRA et all (1996) apresentaram modelos matemáticos que consideram os processos físico-químicos de tal movimentação visando o estabelecimento de medidas para proteção do concreto.

Além da penetração de cloretos, a modelagem do avanço da frente de carbonatação também é objeto de pesquisas por alguns grupos de estudos. PAPADAKIS et all (1991) e LOO et all (1994) desenvolvem seus trabalhos tentando modelar a carbonatação do concreto, baseando-se no processo de difusão de CO_2 pela rede de poros do mesmo. PAPADAKIS et all (1991a) apresentaram um conjunto de equações que leva em consideração tanto aspectos microestruturais, como a evolução da porosidade com o tempo - que é influenciada pelo processo de hidratação do cimento - quanto aspectos ambientais, como a umidade relativa, para a predição da velocidade de carbonatação do concreto. SCHIESSL, citado por HELENE (1993), propôs um modelo matemático que leva em consideração uma grande quantidade de fatores, que tornam a determinação da profundidade carbonatada extremamente difícil, tais como as condições ambientais, a dosagem e composição do concreto e as dimensões do componente estrutural.

Cabe aqui realizar uma consideração relevante: a grande maioria dos autores salientam que, apesar dos resultados encontrados através das proposições estudadas serem extremamente animadores, mais trabalhos devem ser conduzidos nessa linha de pesquisa para que os modelos possam ser completamente validados. Tal observação é compartilhada por HELENE (1993), que cita que determinados modelos e formulações ainda são extremamente complexas, pouco práticas e de utilidade discutível.

Como pode-se observar através das considerações realizadas até o presente momento, uma grande quantidade de pesquisas está sendo conduzida no sentido de se prever a vida útil das estruturas. Porém, deve-se ter um extremo cuidado com tais investigações, pois as incertezas implícitas nesse conceito são difíceis de serem quantificadas. MEHTA (1994) é um dos autores que são da opinião de que a modelagem de tais parâmetros é extremamente difícil de ser realizada, em virtude da complexidade existente entre as diversas formas de deterioração. Existem, segundo o autor, três elementos que devem ser levados em consideração no momento de se tentar estabelecer um modelo confiável para predição da vida útil das estruturas: uma definição precisa do material - no caso o concreto -, do meio ambiente e um arquivo de dados de resultados de ensaios acelerados de durabilidade. Desta forma, observa-se que

existe uma extrema dificuldade para a definição desses três fatores, conforme apresentado a seguir:

- os ensaios acelerados de durabilidade são realizados objetivando-se determinar um fator que relacione os resultados de degradação obtidos através de um ensaio acelerado e os resultados obtidos através da verificação da evolução do dano nos componentes quando expostos a condições naturais de envelhecimento (DIAS, 1993). Contudo, conforme a ASTM (1982), a relação entre tais fatores raramente é tão simples, pois tanto a complexidade existente entre as formas de degradação que ocorrem na prática quanto a consequente dificuldade de se modelar tal comportamento em laboratório são condicionantes do sucesso dessa linha de investigação. Além disso, como cita SOMERVILLE (1985), a obtenção dos dados de campo é uma tarefa que apresenta um custo extremamente elevado, pois a quantidade de dados que tem que ser obtida é alta, a fim de minimizar a grande variabilidade existente no processo;
- o concreto é um sistema complexo que muda temporalmente, principalmente com relação aos seus aspectos microestruturais. A porosidade do mesmo varia continuamente, em função da penetração de água, CO₂, O₂ e agentes agressivos (MEHTA, 1994), além de responder às ações impostas pelo meio ambiente, como as mudanças de umidade, pressão e temperatura. Desta forma, a modelagem do comportamento de tal material é extremamente variável, apresentando um nível de confiabilidade muito baixo; e
- entre os fatores que governam o comportamento das estruturas no decorrer do tempo, sem dúvida a ação das condições climáticas é o fator mais variável que existe. A modelagem dos diversos tipos de ambientes é extremamente complexa, onde qualquer tentativa da realização de tal esforço resultará em valores apenas orientativos, com um reduzido grau de confiabilidade. Além disso, existe o efeito sinérgico que pode ocorrer entre os diversos tipos de meio ambiente, aliado ao fato de que, sob as mesmas condições ambientais, alguns mecanismos de degradação agem mais intensamente, enquanto outros têm sua ação reduzida significativamente (MEHTA, 1994).

Como mencionado anteriormente, a realização de ensaios de longa duração é extremamente importante, porém apresentam grandes dificuldades de execução devido às variáveis espaciais e temporais implícitas nos mesmos. Contudo, SAKAI (1996) apresentou um experimento que é considerado o mais longo teste de envelhecimento em condições naturais observado até o presente momento, onde foi realizado um estudo em corpos-de-prova com mais de 100 anos de idade submetidos a condições severas de exposição. Os resultados mostraram que, apesar do período de tempo decorrido, a microestrutura dos espécimes ainda mudava continuamente, com a formação de diversos componentes da pasta e a dissolução de outros.

De acordo com as considerações apresentadas anteriormente, a curva de predição da vida útil das estruturas não pode ser considerada de uma maneira tão simplista, em virtude da grande quantidade de fatores intervenientes nos processos de degradação. MEHTA (1994) propõe uma nova forma de consideração da vida útil das estruturas, como pode ser observada na Figura 2.4.

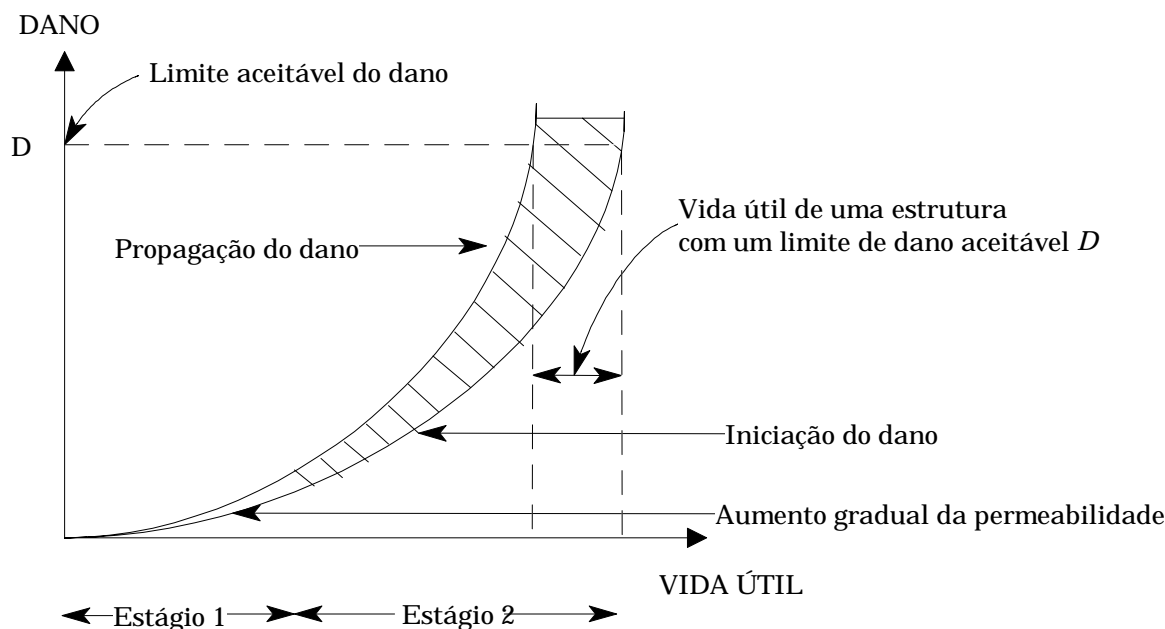


Figura 2.4 - Vida útil de estruturas de concreto (MEHTA, 1994)

De acordo com o autor, a vida útil de uma estrutura não pode ser descrita como tendo uma forma linear, onde há uma clara tendência de comportamento. Segundo o modelo proposto, o concreto permanecerá em perfeito estado enquanto a baixa permeabilidade do mesmo estiver garantida (AÏTCIN, 1994). Devido ao efeito das condições ambientais, de carregamento e da interação dos mesmos com a estrutura do concreto, os agentes de degradação penetram no interior do mesmo, dando início aos processos de deterioração. Em função da grande quantidade de causas e efeitos que tais processos podem causar, o comportamento da degradação de uma estrutura estaria melhor representado pela área hachurada do gráfico. A maior duração do Estágio 1 - ou de iniciação - estaria intimamente relacionada com a qualidade tanto dos materiais quanto da execução do concreto, enquanto que a longevidade do Estágio 2 - ou de propagação - estaria intimamente relacionada com o tipo de estrutura e com a interação do concreto com o meio ambiente aonde o mesmo estará inserido.

O que se verifica atualmente é que, para o projeto de estruturas de concreto armado, a normalização brasileira (NBR 6118, 1978) coloca que, estabelecido o meio ambiente onde a estrutura estará inserida, define-se uma

determinada qualidade do concreto (através da relação a/c) e a espessura de cobrimento que o mesmo deverá apresentar, objetivando-se alcançar a vida útil pré-definida na norma, que é de 50 anos para as obras convencionais. Contudo, segundo HELENE (1995), uma nova abordagem deve ser dada à tal processo. O autor propõe que, especificadas as condições ambientais, se determine qual a vida útil de projeto que a estrutura terá que cumprir. A partir desta definição, pode-se combinar de uma maneira clara e inteligente tanto a resistência do concreto quanto a espessura de cobrimento das armaduras, a fim de que se tenha um desempenho adequado da estrutura durante a vida útil prevista. De acordo com o CEB (1993), as medidas que devem ser tomadas para se garantir a vida útil de uma estrutura devem objetivar o aumento do período de iniciação e tentar assegurar uma baixa velocidade de propagação do dano através da vida útil da estrutura. O que se observa é que tais medidas não podem ser tomadas de uma maneira global para todos os tipos de estruturas, em virtude da variabilidade que há entre todos os fenômenos envolvidos no processo.

Desta forma, observa-se que há um consenso geral entre os pesquisadores que trabalham com a durabilidade das estruturas: os dois fatores que influenciam de uma maneira bastante relevante em tal característica são a própria estrutura - cujo nível de durabilidade depende intimamente das medidas que são tomadas durante as etapas do seu processo de produção - e o meio ambiente - que determina as condições de exposição aonde a mesma estará inserida. Algumas considerações a respeito de tais fatores serão analisados nas próximas seções.

2.2 Etapas do Processo de Produção das Edificações

Com o desenvolvimento das pesquisas na Engenharia Civil, observou-se que os aspectos concernentes à durabilidade das estruturas estavam sendo analisados de uma maneira muito simplista, sem se deter em alguns itens de relevância sob um ponto de vista mais global, que exercem uma grande influência nos processos de deterioração das estruturas. Tais fatores estão principalmente relacionados à falta de uma avaliação mais completa das ações a que uma estrutura estará sujeita na fase de planejamento/projeto e o emprego de práticas construtivas inadequadas quando na execução do empreendimento.

Se observa atualmente a inexistência de uma visão sistêmica do processo construtivo, que deveria levar em conta aspectos relacionados ao desempenho da estrutura como um todo. IDORN et all (1992) afirmam que uma rigorosa observância das etapas de produção da estrutura de concreto é um dos pontos que devem ser objeto prioritário de estudo por parte da comunidade científica atualmente. A carência de integração que se observa entre os participantes do processo (proprietário, projetista, construtor e usuário) é um dos fatores

principais que conduzem a tal afirmação (AİTCIN, 1994). O autor mostra que os conhecimentos necessários para que se obtenha estruturas duráveis estão disponíveis, mas tais informações não estão sendo manipuladas pelas pessoas certas, em virtude de uma completa ausência de comunicação entre os responsáveis pelo processo construtivo. MOKSNES et all (1996) salienta que o sucesso de qualquer empreendimento está intimamente ligado ao estabelecimento um adequado sistema de controle entre todas as etapas do processo construtivo, ou seja, deve-se ter um melhor gerenciamento das atividades relacionadas à construção das estruturas.

Desta forma, não há uma preocupação em se padronizar um conjunto de procedimentos aplicáveis a todos os componentes do processo construtivo que poderiam garantir o desempenho mínimo para satisfazer não só aspectos de cunho estrutural, mas também àqueles relacionados ao comportamento da estrutura sob determinadas condições de utilização em um meio ambiente especificado. Assim, as principais providências que devem ser tomadas nas etapas do processo construtivo a fim de que se obtenham obras duráveis serão objeto de discussão nas seções posteriores.

2.2.1 Planejamento/Projeto

Tal etapa é de importância fundamental na definição das condições de durabilidade que uma estrutura apresentará durante a sua vida útil, pois os fatores que mais influem na durabilidade das obras – as características do concreto, as condições de carregamento e de exposição – são determinados em tal fase do processo construtivo.

A primeira grande mudança que deve ocorrer é de paradigma, e não técnica. Alguns autores (CUSENS, 1985; MEHTA, 1994; SHILSTONE, 1994) comentam que as estruturas devem ser projetadas baseados em outros critérios, que não exclusivamente a resistência mecânica. Um exemplo claro disto é dado por AİTCIN (1994), que diz que, sob o ponto de vista estrutural, é possível construir uma edificação com um concreto com resistência mecânica de 20 MPa. Todavia, em zonas altamente agressivas, como a costa da Noruega ou nas áreas adjacentes ao Golfo Pérsico, o emprego de tal concreto em uma estrutura teria consequências desastrosas, em virtude do elevado risco de corrosão de armaduras a que o mesmo estaria sujeito. MASLEHUDDIN et all (1994) confirmam tal assertiva citando que, em condições altamente desfavoráveis de utilização, a durabilidade de um concreto é uma característica mais desejável que a resistência mecânica.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a evolução ocorrida na atividade do cálculo estrutural. Antigamente, os métodos de cálculo ainda não eram tão desenvolvidos quanto são hoje em dia. As estruturas tinham uma

grande massa e uma inércia considerável, fazendo com que as mesmas fossem mais resistentes aos processos de degradação. Atualmente, com o desenvolvimento crescente da teoria das estruturas e do cálculo estrutural, as mesmas estão ficando cada vez mais esbeltas, sendo mais sujeitas à ação de agentes agressivos.

Quando se fala em falhas que ocorrem na etapa de planejamento/projeto, a primeira associação realizada é com a ocorrência de erros de cálculo. Contudo, segundo SOMERVILLE (1985), os problemas que ocorrem em tal etapa raramente são ocasionadas por tais fatores, mas sim devido a um detalhamento deficiente, inobservância do meio ambiente aonde a estrutura estará inserida, e a interação existente entre os diversos tipos de elementos que compõem a estrutura, sejam eles estruturais ou não.

Atualmente sabe-se que a relação a/c é um dos principais fatores que influenciam na durabilidade do concreto. O estabelecimento de relações a/c adequadas a determinadas condições de exposição é um fator fundamental para a garantia tanto de durabilidade quanto de resistência de uma estrutura, pois observa-se um substancial ganho de resistência com a redução de tal relação, além de minimizar significativamente a permeabilidade do mesmo à penetração e/ou fluxo de água no seu interior (SCHISSL, 1988). Aliado a isso, verifica-se que concretos com elevada relação a/c tendem a segregar quando são lançados nas fôrmas, constituindo-se assim pontos preferenciais para a passagem dos agentes agressivos para o interior do concreto.

Juntamente com a relação a/c, o conteúdo de cimento do concreto também deve ser levado em consideração, pois uma alta quantidade desse material pode provocar fissuras por retração por secagem ou tensões de origem térmica em elementos excessivamente robustos (concreto massa). Um baixo teor prejudicará a trabalhabilidade do concreto, resultando em uma mistura não coesa, aumentando assim a porosidade do material. Desta forma, uma escolha adequada da quantidade de cimento presente em uma mistura de concreto deve ser levada em consideração para a obtenção de obras duráveis.

A definição da espessura de cobrimento das armaduras adequada a uma determinada agressividade ambiental é outro parâmetro que têm influência preponderante na durabilidade das estruturas. Com o crescimento dos grandes centros urbanos e das plantas industriais, a agressividade ambiental está aumentando consideravelmente, aliado ao crescimento das obras civis localizadas na zona marinha, fazendo com que as estruturas, que já não foram concebidas para tais condições de exposição, ficassem expostas a tais ambientes sem um tipo de proteção adequada (WÖRNER, 1993). Desta forma, a adoção de espessuras de cobrimento compatíveis deve ser objetivada, a fim de garantir uma maior proteção tanto ao concreto quanto à armadura.

Outro ponto que deve ser considerado na etapa de projeto é com relação aos detalhes construtivos das estruturas (AÏTCIN, 1994). Segundo o CEB (1992), o projeto estrutural compreende tanto os conceitos arquitetônicos quanto a escolha da melhor forma estrutural possível. Ambos os fatores determinam a geometria da estrutura, juntamente com as partes que serão expostas da mesma. Desta forma, o Código enfatiza veementemente a necessidade da seleção de formas arquitetônicas e estruturais adequadas, a fim de minimizar a concentração de tensões e agentes agressivos em determinadas partes da estrutura. Além disso, deve-se alertar para o fato de que a complexidade existente em muitos projetos facilita a ocorrência de diversos fenômenos de degradação, principalmente em virtude do acúmulo de água em grande parte das superfícies expostas. Assim, a existência de um projeto de drenagem eficiente, principalmente sobre as juntas de dilatação e em áreas com grandes quantidades de armadura, reduziria significativamente a probabilidade de danos às estruturas. Estudos realizados por ASHTON et all (1982) mostraram que o detalhamento arquitetônico influi diretamente na dinâmica dos fluxos de vento e das chuvas nas superfícies verticais em determinadas partes da edificação.

Desta forma, WEST (1985) sumariza algumas recomendações a fim de que se projete uma estrutura para a durabilidade, principalmente quando a mesma estará inserida em um meio ambiente agressivo. Com tais medidas objetiva-se obter um concreto denso, com a redução da relação a/c, uso de adições, aliado à especificação de um cobrimento de concreto adequado com o tipo de exposição da estrutura.

2.2.2 Materiais

As pesquisas sobre o desenvolvimento de novos materiais, ou as modificações que são realizadas nos materiais tradicionais – como as adições que são incorporadas ao cimento, o emprego de aditivos como os incorporadores de ar, aliado ao uso de cimentos com baixos teores de C_3A e cimentos com baixos teores de álcalis, entre outras – devem ser analisadas cuidadosamente, a fim de que não tenham efeitos adversos para a durabilidade das estruturas (MEHTA, 1993). Tal pensamento é compartilhado por AL-AMONDI (1995), que afirma que as mudanças ocorridas principalmente no processo de fabricação do cimento nos últimos 30 anos tiveram efeitos negativos nas suas propriedades físico-químicas, levando a um desempenho insatisfatório dos mesmos quando expostos a determinadas condições de exposição.

Com a profusão dos processos tecnológicos e das técnicas construtivas que estão sendo descobertas a cada dia, verificou-se que os materiais de construção vão sendo submetidos a condições de carregamento e exposição que não eram

admitidas em épocas anteriores. Porém, há de se considerar o fato de que tais componentes têm que ser testados não só com relação às suas propriedades mecânicas, mas também devem ser avaliados os critérios de desempenho sob condições específicas de exposição onde os mesmos estarão inseridos. Tal procedimento já era proposto por JOHN (1987), que ressalta a importância da avaliação da durabilidade na seleção de novos materiais. Nestes casos, é necessário prever como este novo produto responderá ao uso prolongado, sob a ação de agentes agressivos que variam de local para local, determinando-se inclusive que reações podem decorrer do contato entre tal material e seus vizinhos na estrutura.

Com o crescente desenvolvimento de novos métodos de ensaio laboratoriais para os materiais de construção, principalmente o concreto, verificou-se que os mesmos tem uma grande vulnerabilidade a certas substâncias agressivas, substâncias essas que estão presentes na maioria dos ambientes onde as estruturas estão inseridas. Todavia, ressalvas tem que ser feitas com relação a tais ensaios em laboratório. A grande maioria dos experimentos são realizados em um ambiente onde todas as condições são consideradas controladas, excetuando-se o fator que se deseja investigar. Porém, quando uma estrutura está inserida no meio ambiente e sob as condições de utilização previstas, observa-se que os diversos fatores que influenciam nos processos de degradação interagem simultaneamente, de uma maneira muito mais complexa daquelas simuladas em condições ideais (ASTM, 1982; DIAS, 1993; MEHTA, 1993). Assim, existe uma dificuldade em se modelar a ação de tais ações em laboratório, sendo mais aconselhável a avaliação do desempenho dos materiais em estruturas acabadas.

2.2.3 Execução

Nenhum dos procedimentos estabelecidos nas etapas anteriores terá efeito sobre a durabilidade das estruturas se não houver um perfeito controle na etapa de execução do processo construtivo.

Nesta fase, as atividades relacionadas à produção do concreto (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura) são as que mais influenciam na durabilidade do mesmo (CÁNOVAS, 1988). AITCIN (1994) cita casos em que se encontram elementos de concreto adjacentes que apresentam níveis de desempenho totalmente diferentes, sob uma mesma condição de exposição, em função das diferenças encontradas no processo de execução dos mesmos.

CUSENS (1985) apresentou um trabalho de análise realizado pelo ACI, mostrando que 74% dos erros que ocorrem na etapa de construção estão relacionados a procedimentos inadequados estabelecidos durante o lançamento e cura do concreto, aliado a problemas no posicionamento da armadura. Quando

são tomados cuidados em tais etapas, verifica-se uma diminuição da quantidade das fissuras provocadas por dessecação superficial ou movimentação térmica, que são as portas de entrada dos agentes de degradação para o interior do concreto (GERWICK, 1994).

Além disso, após o lançamento do concreto, deve-se ter um extremo cuidado com a vibração dos elementos estruturais. Os efeitos de uma vibração inadequada podem originar uma excessiva exudação interna, fazendo com que haja um acúmulo de água na zona de transição agregado/pasta e armadura/pasta, aumentando desta forma a quantidade de microfissuras no interior do concreto. Além disso, tal problema provoca o acúmulo de água entre a forma e o concreto, resultando no chamado efeito parede, onde a camada de cobrimento de concreto fica com uma relação a/c maior, elevando assim a permeabilidade da mesma (SILVA FILHO, 1994).

Conforme descrito anteriormente, a especificação de uma espessura de cobrimento adequado às armaduras é um fator decisivo para a garantia de durabilidade das estruturas. Segundo MAILVAGANAM (1992), uma grande parte dos cobrimentos especificados pelas Normas e Códigos de Prática são aparentemente razoáveis. Todavia, o maior problema identificado é a inobservância de tais cobrimentos no momento da execução da estrutura. O autor cita o exemplo de que, adotando-se uma variabilidade de aproximadamente 5 mm para a espessura de cobrimento, juntamente com erros na relação a/c (devido ao excesso de água adicionada à mistura para melhorar a trabalhabilidade do concreto, prática muito comum nos canteiros de obra) aliada a deficiências na fixação das armaduras à fôrma, certamente se terá uma redução significativa da espessura de cobrimento das armaduras, aliada a ocorrência de um concreto com alta permeabilidade.

Desta forma, observa-se que a espessura do concreto de cobrimento, aliada à qualidade do mesmo, determinam a sua resistência à maioria dos fenômenos de degradação. HELENE (1995a) ressalta, com extrema propriedade, que a qualidade efetiva do concreto superficial de cobrimento e proteção à armadura depende, dentre outros fatores, da adequabilidade da fôrma, do aditivo desmoldante e, preponderantemente, da cura destas superfícies. Assim, um cuidado especial deve ser tomado com àquelas superfícies que são expostas precocemente devido à desmoldagem, como o caso do fundo de lajes, laterais de vigas e faces de pilares e paredes.

Com o avanço das técnicas construtivas, como a indústria de prémoldados, novos componentes foram adicionados ao concreto (como os aceleradores de pega) para agilizar os processos de cura e desforma das peças estruturais. Porém, tais materiais, em determinadas proporções e/ou quando são aplicados de forma inadequada, podem trazer danos à estrutura interna dos elementos a longo prazo, diminuindo assim a vida útil dos mesmos.

2.2.4 Utilização/Manutenção

Observa-se atualmente uma extrema carência de um planejamento adequado da atividade de manutenção que as estruturas deveriam sofrer durante o seu período de utilização. NEVILLE, citado por MEHTA (1993), afirma que tal atividade não deve ser relegada a segundo plano, sob pena de se ter grandes problemas durante o período de utilização da edificação. PERKINS (1986) vai mais longe, afirmando que é fora da realidade se esperar que uma estrutura se mantenha como nova sem nenhuma atividade de manutenção durante a sua vida útil. No caso específico das estruturas de concreto, há de se considerar que os vários elementos de a mesma é composta são, na sua grande maioria, formados por materiais diferentes (juntas de concretagem, elementos de drenagem, conexões, instalações, entre outros) que têm vida útil de serviço diferenciadas (PERKINS, 1986; CEB, 1992). Assim, os aspectos relacionados à inspeção e manutenção, tanto das estruturas quanto desses elementos, são de suma importância para se ter um desempenho satisfatório do conjunto global.

Segundo o CEB (1992), antes mesmo da entrega da obra deve-se realizar uma inspeção inicial e se preparar um manual de manutenção, para que as atividades especificadas no mesmo sejam desenvolvidas durante a vida útil das edificações. Vale salientar que um plano completo de manutenção não é definitivo, onde os ajustes que se fizerem necessários devem ser realizados oportunamente. De acordo com SCHIESSL et al (1996), o tipo, quantidade e a sequência das atividades de manutenção dependem intimamente do grau de agressividade presente no meio ambiente, do nível de sensibilidade da estrutura e das consequências que determinadas falhas podem causar em termos de vida útil da mesma. Desta forma, tal planejamento deve ser objeto de um registro completo do comportamento de uma estrutura durante o período de utilização, formado através das inspeções de rotina efetuadas. Tais dados são de importância preponderante na definição das próximas atividades que serão realizadas na estrutura.

É principalmente na etapa de utilização da estrutura que os danos provocados pelas manifestações patológicas começam a ser mais evidentes, ocasionando assim uma grande elevação dos custos nas edificações (MAYS, 1992). Atualmente as obras são construídas tendo-se como objetivo apenas uma redução do seu custo inicial, não se dando a atenção devida aos seus custos durante a sua vida útil (*life cycle costs*). Segundo PEACOCK, citado por SELLEY (1987), existem quatro principais falhas cometidas pelos engenheiros no momento da realização do projeto das edificações, que trazem consequências adversas ao desempenho das mesmas:

- detalhamento insatisfatório;
- seleção inadequada dos materiais, componentes ou sistemas;

- falta de uma padronização adequada; e
- considerações inadequadas das condições de utilização da edificação.

A inobservância de tais fatores na etapa de projeto das edificações faz com que os custos de manutenção das mesmas tenham uma tendência ao crescimento exponencial (GERWICK, 1994). Segundo o autor, a atividade de manutenção é mais facilmente observada em obras de grande responsabilidade, como pontes, viadutos, túneis e estruturas off-shore. Em tais obras, não é apenas o custo do reparo que é considerado como sendo o custo total, mas estão inclusos os custos indiretos, representados principalmente pela dificuldade de acesso para a realização dos trabalhos, aliado aos custos provocados pela interrupção dos serviços.

Atualmente existem muitas formas preventivas para se minimizar o efeito dos diversos tipos de danos que podem ocorrer nas estruturas. Porém, na maioria das vezes não se sabe a relação custo/benefício entre a utilização de uma determinada medida com relação aos custos iniciais das edificações. A fim de contribuir para solucionar tal problema, GERWICK (1994) realizou um estudo comparando as medidas que foram adotadas em pontes, estruturas marinhas e plantas industriais a fim de maximizar a vida útil das obras sob o ponto de vista da corrosão de armaduras, comparando os custos das mesmas com os custos iniciais das construções, como pode-se observar pelo Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Medidas de proteção com seus custos em relação ao custo inicial das obras, com relação ao fenômeno da corrosão das armaduras (GERWICK, 1994)

Nº	Medidas Adotadas	%
1	Adoção de baixas relações a/c através do uso de aditivos superplastificantes	2,0
2	Incorporação de cinza volante como substituição de parte do cimento	0,0
3	Aplicação de um cimento adequado em quantidade apropriada	1,0
4	Uso de agregados impermeáveis e não reativos	2,0
5	Adição de microssílica	3,0
6	Aumento do cobrimento em 1,5 cm	4,0
7	Pré-resfriamento em uma mistura de concreto	3,0
8	Tratamento das fôrmas	10
9	Uso de selantes	2,0
10	Emprego de camadas de proteção externa	20
11	Misturas com inibidor de corrosão, do tipo nitrito de cálcio	8,0
12	Revestimento epóxi da armadura	8,0
13	Armadura galvanizada	8,0
14	Armadura inoxidável	100
15	Proteção catódica	30
16	Adição de armadura para minimizar a abertura de fissuras	15-30
17	Utilização de armadura inoxidável ou uma malha empregada com epóxi no cobrimento de concreto, incluindo o concreto adicional necessário para conter a malha	40
18	Utilização de camadas de proteção, como as membranas e concretos modificados com látex	15-20
19	Uso de cobrimento composto por fibra de vidro	40-60

Vale salientar que tais comparações foram realizadas nos Estados Unidos no ano de 1994, constituindo-se apenas valores indicativos entre as diversas medidas tomadas. Desta forma, a aplicação das ponderações apresentadas não seria válida para o caso do Brasil, em virtude das diferenças espaciais e temporais existentes. Analisando-se o Quadro 2.1, observa-se que um grande número de combinações pode ser realizada, desde aquelas mais simples às mais complexas, com um determinado custo para a sua realização, conforme pode-se observar através dos exemplos abaixo:

- O emprego de baixas relações a/c (1), aliado ao emprego de cimentos com adições (2), adequados para as condições de exposição (3), com agregados não reativos (4) e com um revestimento compatível (6) teria um custo de aproximadamente 9% a mais com relação ao custo inicial, porém garantiria um período de 20 anos com uma baixa atividade de manutenção. Esses foram os procedimentos adotados em um porto no Kuwait (GERWICK, 1994), construído em 1962, onde só foram detectados os primeiros sinais de corrosão de armaduras em 1992.
- O uso de (1), juntamente com (2), (3), (4), (6), com o emprego de um revestimento a base de epóxi na armadura (12) e o uso de selantes (9) acarretaria em um custo adicional de 19%, mas, em contrapartida, estenderia o período de vida útil de uma estrutura para 80 anos ou mais, com um período de manutenção praticamente negligível durante um período de 40-50 anos. Tais alternativas foram aplicadas na Alsea Bridge nos EUA, onde a estrutura estava inserida em um local de grande agressividade ambiental.

SHEELEY (1987) faz uma análise extremamente interessante dos custos ao longo da vida útil das estruturas. O autor propõe que se realize, desde o momento da concepção do projeto de uma obra, uma avaliação do montante financeiro que será gasto nas atividades de manutenção da mesma durante a sua vida útil. Sem dúvida, existirão grandes incertezas no momento da realização de tal projeção, principalmente em função da variabilidade de ações que podem ocorrer em uma estrutura durante tal período de tempo. Contudo, à medida que trabalhos dessa natureza vão sendo realizados, tais variações vão sendo conhecidas, permitindo assim um ajuste adequado das atividades propostas em uma primeira aproximação.

Um dos maiores problemas observados é a extrema falta de interesse dos empresários da construção civil com a atividade de manutenção. Na concepção dos mesmos, suas responsabilidades e compromissos com a obra terminam no momento da entrega das chaves aos clientes, não se tendo a preocupação em acompanhar o desempenho das suas estruturas no decorrer do tempo. A visão imediatista das construtoras faz com que as mesmas não desenvolvam planos de manutenção adequados, onde tais atividades ficam, na maioria das vezes, a cargo dos proprietários das obras, que por sua vez contratam profissionais que

não possuem um conhecimento técnico adequado para a resolução de tais tipos de problemas.

Através das considerações apresentadas anteriormente, observa-se a grande quantidade de fatores que exercem influência significativa na durabilidade das estruturas. Nem sempre consegue-se ter um controle completo de todas as atividades envolvidas nas etapas do processo construtivo, em virtude da variabilidade existente e da interdependência entre as mesmas (SAKAI, 1996). Para alguns pesquisadores (SOMERVILLE citado por BASHEER et al, 1994; HELENE, 1995a) os fatores que apresentam uma influência decisiva na durabilidade das estruturas podem ser sumarizados como sendo os 4C:

- Composição (traço)
- Compacidade (adensamento)
- Cobrimento
- Cura

Verifica-se assim que todos esses fatores se reportam às atividades relacionadas à produção da estrutura de concreto. Tais atividades não podem ser encaradas independentemente, desconsiderando os efeitos que podem aparecer nas etapas posteriores em função da adoção de determinadas medidas nas etapas precedentes. Desta forma, os fatores apresentados nessa seção, que têm importância na definição da durabilidade das estruturas, podem ser sumarizados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Interações entre fases e partes envolvidas no processo construtivo de edificações [JESSEN citado pelo CEB (1992)]

FASE	PARTE ENVOLVIDA	INTERAÇÕES
Definição	Cliente (proprietário)	Define o uso da edificação
Planejamento	Consultor	* Definição das condições ambientais * Vida útil
Projeto	Consultor Arquiteto Engenheiro	* Materiais de construção * Seleção da forma estrutural * Detalhes importantes Normas e Códigos de Prática * Carregamentos * Impacto ambiental Segurança durante a vida útil planejada Especificações técnicas
Aprovação do projeto	Cliente Autoridades	Regulamentação da documentação Fiscalização
Construção	Construtor Consultor Cliente	Cronograma de execução * Constituintes do concreto * Programação de testes e ensaios * Dosagem do concreto * Execução Controle de qualidade Registros do controle de qualidade
Entrega preliminar da obra	Construtor Consultor Cliente	Certificado parcial de entrega da obra
Período de manutenção inicial	Construtor	* Correção de pequenas falhas
Entrega definitiva da obra	Construtor Consultor Cliente/Usuário	Certificado final de entrega da obra
Período de uso	Usuário Consultor de manutenção Usuário Consultor especializado	Inspeção inicial Elaboração do programa de manutenção Inspeções de rotina * Manutenção preventiva * Manutenção e renovação * Manutenção e reparo

** Ações que influem diretamente na durabilidade*

Em virtude da grande quantidade de fases e agentes que participam do processo de produção das edificações, deve-se ter uma preocupação constante com o fluxo de informações existente entre os mesmos, a fim de que as medidas que são tomadas em cada etapa sejam rigorosamente obedecidas nas etapas posteriores, bem como deve-se avaliar os efeitos que as modificações implementadas posteriormente possam trazer à vida útil das estruturas. Em função disso, um banco de dados com todas as informações disponíveis a respeito da estrutura deve ser criado, tanto para dar subsídios para a reestruturação das rotinas de inspeção a serem realizadas, quanto para definir em que etapa do processo construtivo ocorreram as falhas que levaram ao aparecimento dos defeitos nas edificações, apontando assim responsabilidades, caso ocorra algum problema desta natureza.

Um aspecto que também deve ser levado em consideração diz respeito à qualidade da mão-de-obra envolvida nas diferentes etapas. A grande maioria das ocorrências de degradação das estruturas registradas pode ser atribuída ao desconhecimento dos procedimentos adequados de projeto e construção, ausência de programas de treinamentos e motivação da mão-de-obra ou devido à simples falta de atenção às atividades realizadas (SOMERVILLE, 1985; CEB, 1992; SCHIESSL et al, 1996). Desta forma, um esforço coordenado entre o meio técnico-acadêmico deve ser realizado para se repassar todas as novas teorias, tecnologias e experiências adquiridas para o maior número de pessoas envolvidas nas atividades de projeto, construção e manutenção das estruturas.

Como foi descrito ao longo dessa seção, verifica-se que uma grande parte dos processos de degradação que ocorrem nas estruturas de concreto podem ser minimizados através de um adequado controle de todas as atividades envolvidas no processo construtivo das edificações. Contudo, de nada adiantaria se ter atenção em tais procedimentos caso não houvesse uma preocupação em se classificar as diversas formas de agressividade ambiental aonde as estruturas estão inseridas. Tais aspectos serão discutidos na próxima seção.

2.3 Meio Ambiente

O emprego do concreto na Construção Civil cresceu em demasia, sobretudo após a Segunda Guerra Mundial, graças à versatilidade, durabilidade e resistência desse material. Porém, apesar desses benefícios, as superfícies expostas de concreto são suscetíveis a agressões do meio ambiente, em alguns casos, após poucos meses depois de concluída a obra. Esta degradação é ainda mais significativa em edificações localizadas em grandes centros urbanos, industriais e atmosferas marinhas.

Consequentemente, uma avaliação adequada da agressividade ambiental ou atmosfera circundante, com base em dados e registros meteorológicos, é um fator essencial para se prever a durabilidade das estruturas de concreto, devendo ser explorada na parte de planejamento da edificação. Tal colocação é ratificada por ROSTAM (1994), que afirma que é nesta etapa que podem ser tomadas providências para a construção de estruturas duráveis. MIRCEA et al (1994) afirmam que a avaliação do comportamento dos elementos estruturais aos diversos tipos de agressividade ambiental é de extremo interesse dos especialistas atualmente, a fim de que se ofereçam subsídios para o correto projeto de estruturas duráveis. Tal pensamento é compartilhado por RIGDEN et al (1996), que realizaram um extenso trabalho de vistoria e análise em um conjunto de pontes em Londres. Em tal estudo os autores procuraram estabelecer algumas correlações entre as diversas formas de degradação

encontradas e o meio ambiente onde tais estruturas estavam inseridas, verificando que um grande número de estruturas que apresentaram falhas prematuras estavam localizadas em áreas altamente agressivas tanto ao concreto quanto à armadura. Nestes casos, a maioria dos serviços de recuperação foram realizados quando as estruturas apresentavam baixas idades, geralmente menor que 50 anos.

Segundo ASHTON et al (1982), o meio ambiente pode ser definido como a localidade onde as estruturas estão inseridas. Contudo, tal conceito pode ser considerado como sendo extremamente subjetivo, pois o autor não coloca uma definição rígida com relação aos limites dos diversos tipos de meio ambiente existentes. Já o CEB (1993) se refere às condições ambientais como sendo o conjunto de ações físicas e químicas aonde o concreto está exposto e que não são consideradas como efeitos de carregamento ou devido às movimentações que podem ocorrer em função de problemas de ordem estrutural.

Atualmente, observa-se que existe uma grande quantidade de estruturas de concreto que estão expostas em ambientes altamente agressivos, como o Golfo Pérsico (MASLEHUDDIN et al, 1994) e a costa da Noruega (GJØRV, 1996). AL-AMOUNDI (1995) cita que as condições climáticas presentes nas áreas próximas ao Golfo da Arábia, os chamados *sabkhas*¹, são extremamente prejudiciais à durabilidade das estruturas. Segundo o autor, a quantidade de sais presente no solo nessas regiões – especialmente Mg^{++} e Cl^{-} – é entre 4 e 5 vezes maior que àquelas encontradas nas águas próximas a tais localidades.

Como pode-se verificar, existe uma grande quantidade de ambientes onde a deterioração das estruturas ocorre mais rapidamente. A redução da vida útil das obras inseridas nesses ambientes é geralmente atribuída a alguns dos fatores abaixo citados:

- avaliação inadequada do ambiente circundante, que geralmente apresenta elevadas concentrações de cloretos e sulfatos;
- presença de altas temperaturas e umidades, com variações sazonais extremas, que, juntamente com a presença de ventos intensos, provocam fissurações de origem térmica; e
- contaminação da água contida no solo.

Um estudo realizado por MIRCEA et al (1994) em elementos de concreto armado expostos a diversos tipos de meio ambiente – urbano, salino e industrial, com predominância de cloretos e nitratos – em um período de 10 a 12 anos mostrou a influência dos mesmos na degradação dos elementos, onde aqueles que foram expostos às áreas mais agressivas apresentaram problemas sérios de corrosão de armaduras.

¹ expressão arábica que representa as regiões que apresentam um elevado grau de salinidade, em função da ocorrência de elevadas temperaturas e taxas de evaporação

Um dos fatores que influenciam de maneira decisiva na durabilidade das estruturas é a temperatura. Tal fator é diretamente responsável pelo aumento da velocidade das reações químicas, principalmente no caso a corrosão de armaduras, devendo ser considerada na análise de durabilidade das estruturas de concreto (FIGUEIREDO, 1994). Segundo ASHTON et all (1982), a temperatura pode afetar o desempenho dos materiais de duas formas: causando movimentações dos componentes da edificação através das tensões de contração e expansão dos mesmos, ocasionando as microfissuras, e através das diferenças existentes entre os diversos coeficientes de expansão térmica dos componentes do concreto. Em função disso, um maior cuidado deve ser tomado na previsão e manutenção das juntas de dilatação nas estruturas, principalmente no caso de obras com grandes superfícies de concreto expostas a variações sazonais e até diárias de temperatura. Além disso, as questões de deterioração química nas estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical são mais graves e intensas que nas estruturas similares situadas em climas temperados (HELENE, 1993), em função principalmente das altas temperaturas observadas em tais localidades.

Para ASHTON et all (1982), muitos fatores influem na questão da temperatura do concreto, como a mudança de temperatura atmosférica, radiação solar, as características térmicas do material, velocidade do vento e as trocas de calor observadas dentro dos ambientes. Nota-se que tais fatores são extremamente variáveis, onde a determinação da temperatura superficial de um componente é extremamente difícil de ser determinada.

Além de problemas com relação à durabilidade, MASLEHUDDIN et all (1994) citam que as estruturas de concreto inseridas em ambientes que apresentam altas temperaturas, e que não foram curadas adequadamente, podem apresentar uma redução de resistência da ordem de 30 a 40%. O autor também comenta que o processo corrosivo e a solubilidade dos sais são acelerados com o aumento da temperatura e que as flutuações térmicas causam ciclos de expansão/contração e umedecimento/secagem na massa de concreto, causando microfissuras em virtude da incompatibilidade térmica existente entre os diversos componentes do mesmo.

Outro fator importante a ser considerado é a condição da mistura existente nos poros do concreto. Tal componente é considerado como um agente direto nos processos de degradação (nos casos que envolvem degradação por ataque químico), como meio para as reações (como no caso da corrosão de armaduras) ou como um elemento do microclima (ASHTON et all, 1982). AL-AMOUNDI (1995) cita que o efeito das misturas com altas concentrações de sais presentes no Golfo Pérsico é extremamente prejudicial à durabilidade das estruturas. Tais concentrações facilitam a cristalização das substâncias nos poros do concreto, levando assim à degradação do elemento. Também deve ser

observado que as altas taxas de evaporação, juntamente com a presença constante de ventos que ocorrem na região, são fatores que colaboram para que haja uma maior deterioração das estruturas.

Desta forma, fica bem claro que, a fim de se verificar os efeitos imediatos de um determinado dano, deve-se ter uma avaliação precisa do microclima que atua nas imediações do elemento comprometido. Para períodos mais longos de observação - anuais, por exemplo - uma análise dos dados climáticos coletados de uma estação meteorológica fornecerá subsídios valiosos para a determinação das condições sob as quais o dano ocorreu.

Por conseguinte, muitas instituições e pesquisadores estão se preocupando em avaliar o nível da agressividade ambiental às estruturas de concreto. HELENE (1993) classifica o grau de exposição com base em atmosferas clássicas, deixando a consideração do microclima para uma classificação à parte. Ambas, micro e macro condições de exposição, são determinantes da maior suscetibilidade aos processos de degradação, podendo ter efeito sinérgico ao atuarem simultaneamente na mesma direção e no mesmo componente estrutural. Como referência, pode-se adotar (HELENE, 1993):

- atmosfera rural com $UR \leq 65\%$ em 95% do tempo → agressividade nula - grau 1
- atmosfera urbana com $UR \leq 65\%$ em 95% do tempo → agressividade branda - grau 2
- atmosfera marinha → agressividade média - grau 3
- atmosfera industrial com $UR \leq 65\%$ em 95% do tempo → agressividade média - grau 4
- atmosferas combinadas urbana/industrial ou urbana/marinha ou ainda com $UR \geq 65\%$ podem ser classificadas adicionando-se um grau ao maior individual. Em regiões com temperatura ambiente inferior a 18°C em 95% do tempo, a corrosão é menor e podem ser classificadas reduzindo-se de um grau os valores indicados anteriormente.

Segundo o CEB (1992), é de extrema dificuldade avaliar a ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto, visto que há uma interdependência entre os diversos fatores que o compõem. Ainda assim, o órgão propõe uma classificação das classes de exposição a que as estruturas de concreto estão sujeitas, com relação à agressividade ambiental, conforme mostrado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Classes de exposição para o concreto com relação às condições ambientais (CEB, 1992)

Classe de Exposição		Condições Ambientais
1		Meio ambiente seco, como: <ul style="list-style-type: none"> interior de edificações comuns ou escritórios; componentes externos que não são expostos às intempéries ou contato com o solo ou água; localidades com umidade relativa alta apenas em um curto período do ano (UR > 60% em um período menor que 3 meses por ano).
2	a	Meio ambiente úmido sem gelo: <ul style="list-style-type: none"> interior de edificações onde a umidade é alta; componentes externos expostos às intempéries, mas sem sofrer a ação do gelo; componentes em contato com água ou solo não agressivo, sem o contato com gelo.
	b	Meio ambiente frio e úmido: <ul style="list-style-type: none"> componentes externos expostos às intempéries, em água ou solo não agressivo.
3		Meio ambiente sob a ação do frio e agentes de degelo: <ul style="list-style-type: none"> componentes externos expostos às intempéries, em água ou solo não agressivo, submetidos à ação do frio e dos sais de degelo.
4	a	Meio ambiente salino: <ul style="list-style-type: none"> componentes na zona de molhagem ou submersos na água do mar com uma de suas faces expostas ao ar; componentes em atmosfera salina (área costeira).
	b	Meio ambiente salino sob ação do gelo: <ul style="list-style-type: none"> componentes na zona de molhagem ou submersos na água do mar com uma de suas faces expostas ao ar; componentes em atmosfera salina (área costeira).
5*	a	Meio ambiente fracamente agressivo quimicamente (gás, líquido ou sólido)
	b	Meio ambiente fracamente agressivo quimicamente (gás, líquido ou sólido)
	c	Meio ambiente fracamente agressivo quimicamente (gás, líquido ou sólido)

*A classificação número 5 pode ocorrer isoladamente ou combinada com as demais classificações

Como pode-se verificar, existe uma grande quantidade de ambientes que exercem uma determinada influência no desempenho de uma edificação. Além disso, deve-se considerar o efeito sinérgico existente em determinados ambientes. NOVOKSHCHENOV (1995) realizou uma análise de um complexo industrial localizado no Golfo Pérsico que apresentava um problema grave de corrosão das armaduras. Os resultados do estudo mostraram que o grande índice de degradação encontrado ocorreu principalmente em função da atmosfera marinha – fonte de íons cloretos – aliado ao microclima gerado pelo complexo industrial – fonte de sulfatos –, que agiram simultaneamente, acelerando o processo corrosivo.

Desta forma, face a grande variedade e interação existente entre os diversos tipos de ambiente, um dos pontos mais importantes a ser verificado na definição da agressividade ambiental às estruturas de concreto é o microclima, que se refere à interação que ocorre entre o meio ambiente (ou macroclima) e a

superfície da estrutura (ASHTON et all, 1982; CEB, 1993). A definição dessa interação, baseada em observações do macroambiente, é um fator fundamental na definição da vida útil das estruturas, pois é nessa zona onde a ação da umidade e agentes agressivos vão interagir com a camada de cobrimento do concreto, conforme mostrado na Figura 2.5

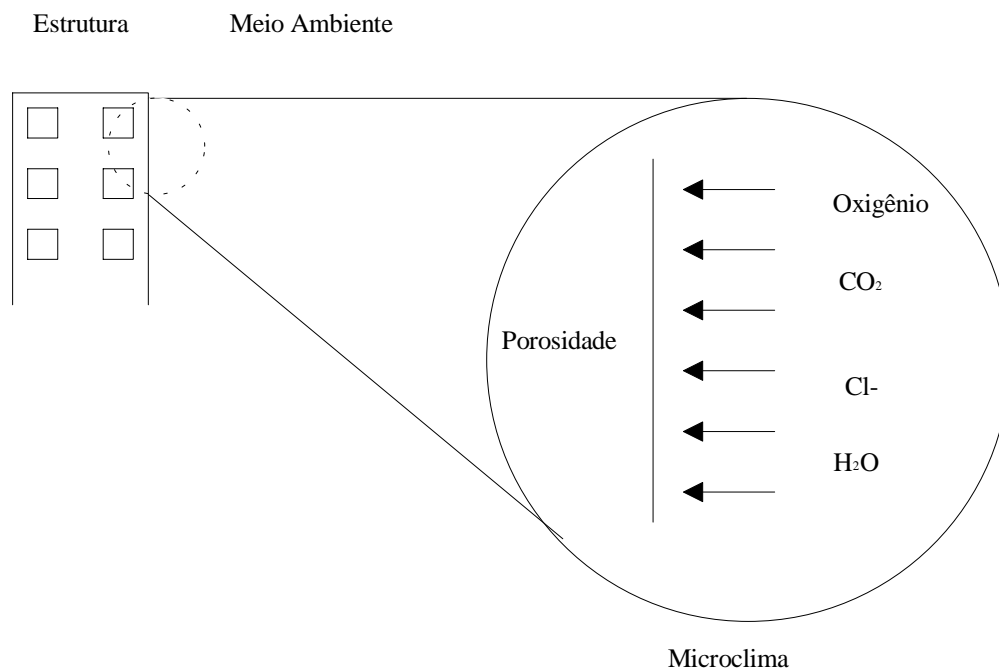


Figura 2.5 - Microclima e ações atuantes nas edificações

O microclima é muito mais variável que o macroclima, pois as estruturas de concreto podem estar sujeitas a uma maior ou menor variação de fatores como umidade e temperatura em certas áreas, fato que acontece após uma chuva, ou em lajes que recebem radiação solar intensa durante o dia e resfriam à noite, por exemplo.

Porém, não é só no exterior das edificações que os efeitos do microclima se fazem presentes. O interior de certas estruturas tem um microclima diferenciado (como câmaras frigoríficas, ambientes mais úmidos, interiores de tubulações de esgoto, entre outros), apresentando problemas tais como o de condensação e evaporação, ou seja, ciclos intensos de molhagem e secagem que aceleram os processos de degradação. Um exemplo de tal variação é dado por MEHTA, SCHIESSL e RAUPACH, citados por HELENE (1993). Tais autores afirmam que a profundidade de carbonatação em uma estrutura pode estar numa relação de 1 : 0,7 : 0,2 segundo esteja o concreto em ambiente de laboratório, em ambiente externo protegido da ação das chuvas ou em ambiente externo à intempérie, respectivamente.

Segundo ASHTON et all (1982), os materiais se deterioram devido a um sinergismo existente entre os diversos tipos de processos de degradação envolvidos – sejam eles físicos, químicos ou biológicos. Tais processos interagem de uma maneira mais efetiva na superfície dos elementos estruturais, onde os fenômenos de transporte de substâncias pela rede de poros do concreto são influenciados de uma maneira mais significativa pelos aspectos microclimáticos presentes em cada situação em particular. Por exemplo: em uma mesma edificação, que está inserida em um determinado macroambiente, podem existir fachadas que apresentem danos maiores do que outras, em função da maior temperatura incidente na mesma ou ação da névoa salina, caso a mesma esteja localizada perto da orla marítima. Desta forma, o efeito do microclima tanto pode acarretar diferentes manifestações patológicas em edificações localizadas em um mesmo meio ambiente quanto em partes diferentes de uma mesma estrutura.

Como pode-se observar pelas considerações feitas acima, os fatores ambientais influenciam de maneira efetiva no processo de deterioração das estruturas. Cabe ressaltar que tais fatores não causariam nenhum tipo de efeito nas mesmas se o concreto realmente desempenhasse o seu papel protetor, impedindo que os agentes agressivos presentes nos diferentes tipos de ambiente penetrassem no seu interior. Segundo SILVA FILHO (1994), os mecanismos de penetração destes agentes agressivos estão diretamente relacionados com a porosidade da camada de cobrimento do concreto, que serve como ponte de ligação entre o meio ambiente e o interior do mesmo.

Além da porosidade excessiva existente na camada de cobrimento do concreto, a presença e a movimentação da água nessa rede de poros influencia diretamente nos processos de degradação, principalmente àqueles relacionados a alterações químicas no concreto ou na armadura (corrosão), sendo a cinética desses processos governada diretamente pela possibilidade de acesso e movimentação de água carreando os agentes agressivos para o interior do material (SILVA FILHO, 1994).

Tomando-se como exemplo a corrosão das armaduras como principal forma de degradação das estruturas de concreto armado (ARANHA, 1994), HELENE (1993) apresenta a correlação existente entre tal processo e as condições ambientais. Segundo o autor, tais condições podem ter grande influência não só na redução do período de iniciação do processo corrosivo, contribuindo para a despassivação precoce da armadura, como também na taxa de corrosão durante o chamado período de propagação da corrosão. A velocidade de aço corroído é grandemente acelerada em atmosferas urbanas, industriais e marinhas, como resultado de uma maior velocidade de redução da alcalinidade do concreto devida à presença de íons em suspensão ou dissolvidos no vapor d'água. Ao penetrarem no concreto, esses íons também contribuem para a

diminuição da resistividade elétrica, aumentando a condutividade do eletrólito e, conseqüentemente, a taxa de corrosão.

Em um trabalho recente, HELENE (1995) apresentou um conjunto de aspectos que devem ser verificados na consideração do nível de agressividade que uma estrutura de concreto pode estar submetida, onde a classificação da agressividade do meio ambiente, a correspondência entre tal agressividade e a resistência à deterioração do concreto, e a vida útil desejada são fundamentais para tal avaliação.

Desta forma, observa-se que existe uma grande quantidade de ambientes que podem atacar uma estrutura, conforme apresentado no Quadro 2.3. Através de uma observação ao referido Quadro, verifica-se que o meio ambiente salino é um dos mais agressivos às estruturas de concreto, podendo provocar uma grande quantidade de danos ao mesmo. Em função disso, alguns aspectos relacionados ao desempenho do concreto nesse tipo de ambiente serão objeto de considerações na próxima seção.

2.3.1 Concreto em Meio Ambiente Salino

De acordo com MEHTA e BREMNER (1996), a condição de exposição associada à área salina é um dos tipos de ambiente mais severos às estruturas de concreto na natureza. Segundo os autores, a determinação do comportamento do concreto situado em regiões de clima temperado e seco é relativamente fácil, se comparada à grande variedade de ações incidentes sobre o concreto quando submetido à zona salina.

Muitas pesquisas já foram realizadas a fim de se determinar a ação dos agentes agressivos nas obras localizadas em tal tipo de ambiente. Como exemplo, pode-se citar um trabalho de investigação nas estruturas localizadas na área costeira da Croácia realizado por BJEGOVIC et al (1995), onde os resultados mostraram que uma grande quantidade de pontes estão com níveis de deterioração excessivamente altos. Segundo EL-SAYED (1987), muitas das estruturas localizadas em áreas costeiras do Egito apresentaram um elevado grau de deterioração em um período curto de tempo, entre 9 e 27 anos de idade.

Um dos fatores que podem causar a deterioração das estruturas de concreto armado nesse tipo de região é a presença de cloretos, principalmente os de sódio e magnésio, quer em forma de cristais, quer presentes em gotículas de água arrastadas pelo vento. É um fato amplamente conhecido que as estruturas de concreto quando estão localizadas em ambientes onde há uma grande quantidade de íons cloreto são severamente atacadas pela corrosão de armaduras, através da penetração dos íons pela rede de poros do concreto (RODRÍGUEZ et al, 1994).

Em tal tipo de ambiente, o período de iniciação depende principalmente da quantidade de cloretos que vai se acumulando na superfície do concreto e da velocidade de penetração dos mesmos para o seu interior (JAERGEMANN, 1990). O período de propagação é função da resistividade do concreto, do conteúdo da mistura presente nos poros do mesmo, da disponibilidade de oxigênio e da temperatura ambiente.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), outra fonte de degradação das estruturas localizadas na área salina é a pressão de cristalização dos sais dentro da rede de poros do concreto. Tal fenômeno ocorre quando uma face da estrutura está sujeita a condições de molhagem e outras a condições de secagem, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão das armaduras em elementos armados e protendidos e devido à erosão física provocada pela ação das ondas e objetos flutuantes. A título de informação, GERWICK, citado por MEHTA (1993), afirma que a força do impacto das ondas nas estruturas off-shore localizadas no Mar do Norte chega a um valor de 30 t/m².

Observa-se que nas regiões litorâneas, a direção preferencial dos ventos determina de forma marcante as fachadas que estarão submetidas a um grau superior de ataque. As partículas de água do mar contendo sais dissolvidos, inclusive cloretos em suspensão na atmosfera, são arrastadas pela força dos ventos e depositadas por impactação na superfície das estruturas de concreto. Segundo HELENE (1993), além da ação dos ventos, a gravidade e a energia cinética das gotas das chuvas geram um diferencial de pressão suficiente para empurrar a água com as substâncias agressivas – especialmente os íons cloretos – para o interior da massa de concreto. Cabe ressaltar que a evaporação normal da água do mar não carrega cloretos, mesmo porque esse fenômeno corresponde a uma separação das partículas dissolvidas e uma decantação das partículas em suspensão na água. Águas agitadas e vento, no entanto, favorecem que partículas de água e névoa salina sejam transportadas em suspensão pelo ar.

Consequentemente, as estruturas terão sempre na sua superfície a presença de uma pequena camada de água que, sob determinadas condições de umidade relativa (acima de 90%), permanecem até duas vezes mais tempo do que se as estruturas estivessem localizadas no interior do continente (ASHTON et al, 1982). Isso significa que os processos de deterioração apresentam uma duração correspondente à presença de tal filme de água nas estruturas, admitindo-se no caso de que todas as demais condições ambientais permaneçam constantes.

Segundo o CEB (1992), existem muitos tipos de exposição em meio ambiente salino, cada um com níveis de agressividade diferentes. A representação esquemática das zonas básicas de exposição está representada na Figura 2.6.

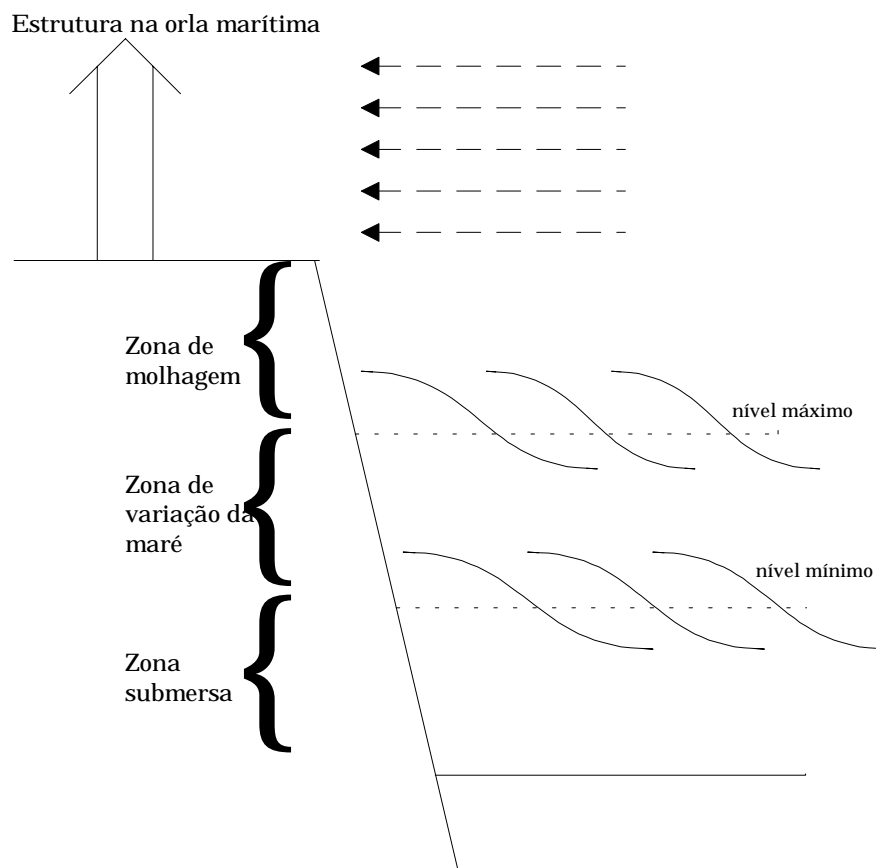


Figura 2.6 - Tipos de exposição na zona marinha (CEB, 1992)

Segundo HELENE (1993), em um meio ambiente marinho, as estruturas de concreto localizadas na região de variação e respingos de maré são as mais atacadas, pois tem cloretos, água e oxigênio suficientes para o processo da corrosão das armaduras. Tal fato está associado à garantia da presença dos agentes necessários para se dar início ao processo corrosivo, que são:

- oxigênio existente na atmosfera;
- alta umidade relativa, que faz com que os poros do concreto estejam parcialmente saturados, garantindo o eletrólito necessário ao desenvolvimento das reações químicas; e
- presença dos íons cloretos.

Ainda segundo o autor, observações realizadas em estruturas de concreto armado com 24 anos de idade, situadas em regiões ao nível do mar, submersas, e nas regiões de respingos de maré mostraram que as zonas submetidas a ciclos de molhagem e secagem (típicos de zonas de respingo de maré) concentraram os cloretos dentro da estrutura, ao mesmo tempo que também se mostraram atacadas pela corrosão, tanto por observação visual, quanto por mapeamento a partir de potenciais de corrosão. Em termos de vida útil de projeto, a partir dos coeficientes de difusão encontrados, HELENE (1995) cita que a faixa pode variar

entre 6 a 10 anos para a região de respingos da maré, 15 a 18 anos para a região correspondente ao nível máximo da maré e 30 a 35 anos para a região submersa no mar, referidos a um mesmo concreto e cobrimento da armadura.

Reforçando tais considerações, o CEB (1992) coloca que existe uma correspondência entre a localização das estruturas de concreto e o tipo de deterioração que pode ocorrer nas mesmas, conforme pode se observar pelo Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração (CEB, 1992)

Área	Características	Tipos de deterioração
Zona de atmosfera marinha	o concreto nunca está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos pode cair a medida que as construções se afastam do mar, mas, em alguns casos, dependendo do tipo da costa e da direção preferencial dos ventos, a névoa salina pode penetrar até muitos quilômetros do litoral;	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão da armadura induzida por cloretos • danos causados pelo efeito do frio
Zona de molhagem	se localiza acima do nível da maré alta, estando sujeita a ação direta da água do mar, através da molhagem do concreto pelas ondas;	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão da armadura induzida por cloretos • abrasão pela ação do impacto das ondas • danos causados pelo efeito do frio
Zona da variação das marés	o concreto fica constantemente submetido a molhagens e secagens contínuas;	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão da armadura induzida por cloretos • abrasão pela ação das ondas, gelo ou outros objetos • ataque biológico causado por microorganismos • ataque químico ao concreto
Zona submersa	concreto está permanentemente submerso.	<ul style="list-style-type: none"> • ataque químico ao concreto • ataque biológico causado por microorganismos

MEHTA e GERWICK (1982) apresentaram uma interrelação existente entre a fissuração do concreto e a corrosão de armaduras que ocorre nas estruturas localizadas em meio ambiente marinho. Baseando-se em observações de campo, os autores apresentaram um modelo de deterioração do concreto, onde as ações físico-químicas que atuam principalmente na zona de variação das marés são responsáveis pela abertura de fissuras no mesmo, ocasionando assim o início do processo corrosivo. Desta forma, os autores recomendam que, a fim de garantir a baixa permeabilidade do concreto, deve-se ter um cuidado especial com as condições de execução das estruturas, a fim de evitar que as

microfissuras existentes no interior do mesmo se intercomunicarem, aumentando assim a penetração de agentes deletérios.

As diferenças existentes entre dois tipos de concreto - um altamente permeável e outro onde a impermeabilidade foi mantida - expostos em ambiente salino estão apresentadas na Figura 2.7.

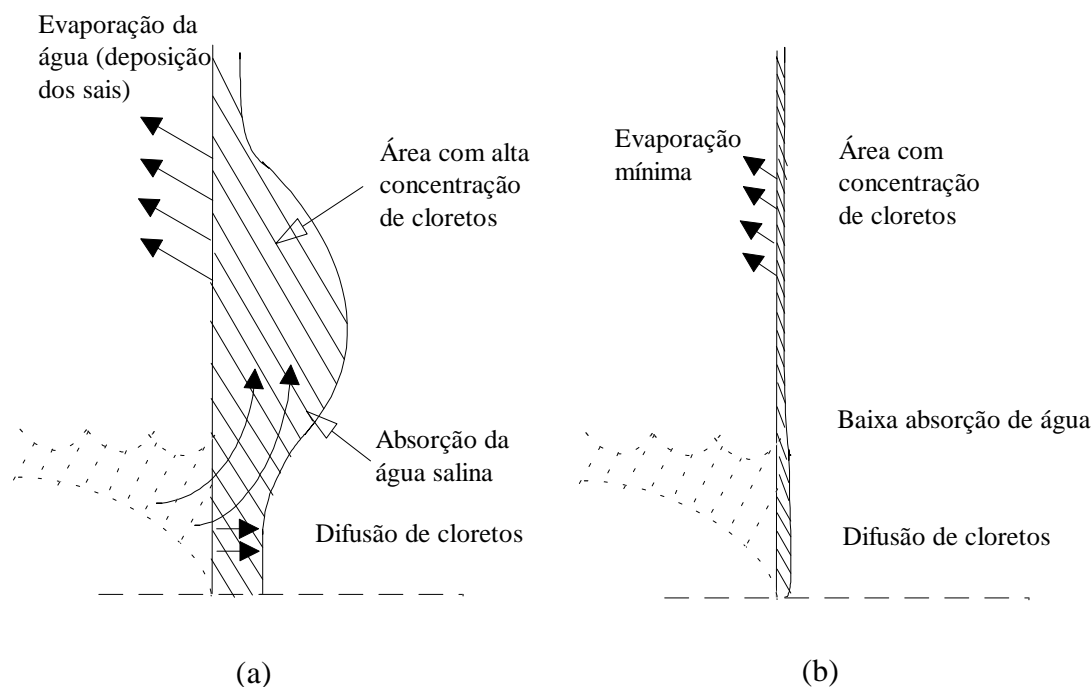


Figura 2.7 - Efeito da permeabilidade e da espessura do cobrimento do concreto na corrosão de armaduras (TUUTTI, citado por SANDBERG et al, 1996)

Em concretos que apresentam uma alta permeabilidade (a), a difusão de cloretos ocorre de uma maneira mais intensa, fazendo com que a armadura fique praticamente inserida dentro de uma matriz totalmente contaminada por cloretos. Já no caso onde se teve o cuidado de se empregar um concreto denso e bem compactado (b), o fenômeno de difusão de cloretos se dá de uma maneira mais discreta, fazendo com que haja uma baixa absorção de água pelo concreto e, assim, a quantidade de íons que penetra no material é extremamente baixa.

Desta forma, pode-se observar que nas obras localizadas em tal região, a correspondência existente entre a relação a/c e a espessura de cobrimento do concreto deve ser rigorosamente observada, a fim de impedir que a frente de avanço dos íons cloretos chegue até a armadura. JAEGERMANN (1990) realizou um estudo experimental em corpos-de-prova que ficaram expostos ao clima altamente salino do Mediterrâneo durante 3 anos. No final dos ensaios, o autor construiu um gráfico que correlaciona a profundidade de penetração de cloretos com a relação a/c , conforme mostrado na Figura 2.8. Através do gráfico pode-se observar que um concreto que apresente uma relação a/c de 0,4 necessita de uma

espessura de cobrimento de, no mínimo, 3 cm para que a frente de cloretos não atinja a armadura, em um período de 3 anos de exposição. Quando se aumenta a relação a/c para 0,5 deve-se prescrever um cobrimento mínimo de 4 cm para que a armadura permaneça passivada, para um mesmo período de exposição.

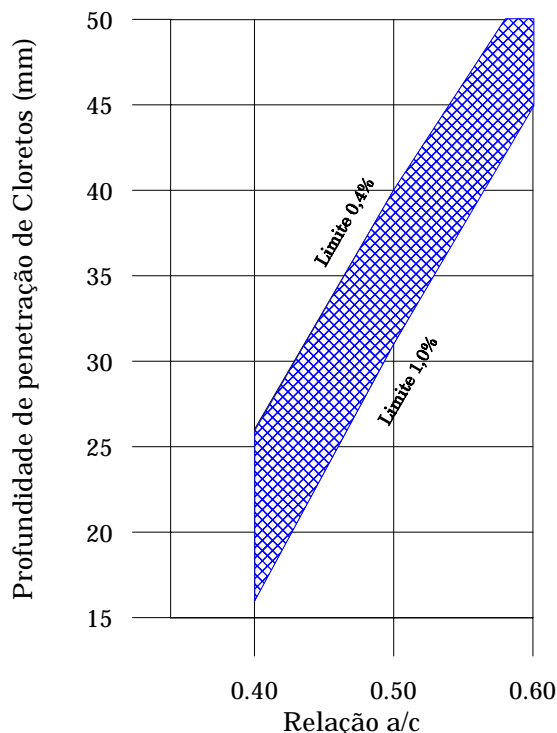


Figura 2.8 - Limites de penetração de cloretos (em relação à massa de cimento) em corpos-de-prova após 3 anos de exposição ao ambiente do Mediterrâneo (JAEGERMANN, 1990)

PAGE et all, citados por FUNAHASHI (1990), confirmam os resultados encontrados por JAEGERMANN (1990), afirmando que a velocidade de difusão dos íons cloretos no interior do concreto aumenta de 4 a 5 vezes quando se eleva a relação a/c de 0,4 para 0,6.

Cabe ressaltar que tais dados experimentais foram coletados em um período de apenas três anos de exposição a um ambiente altamente agressivo. Tal período de tempo é muito pequeno se comparado à vida útil de uma estrutura de concreto armado. Desta forma, a melhor maneira de se minimizar o ataque dos agentes agressivos nas obras localizados em meio ambiente marinho é, sem sombra de dúvida, o emprego de medidas de proteção e prevenção. De acordo com GJØRV (1996), medidas como o aumento da camada de cobrimento do concreto e da resistência do mesmo à penetração dos íons cloreto devem ser pontos fundamentais a serem levados em consideração na etapa de planejamento das obras.

Deve-se ter em mente que a permeabilidade do concreto é a propriedade que mais interessa aos responsáveis pela construção de estruturas que vão ser

expostas a tais tipos de ambiente (BUENFELD et all, 1984; MOKSNES et all, 1996). Desta forma, todos esses efeitos de origem climática interagem simultaneamente e acumulativamente, ocasionando um aumento significativo da permeabilidade do concreto, reduzindo a sua durabilidade. A fim de minimizar tais efeitos, MEHTA e MONTEIRO (1994) sumarizaram em dois pontos os procedimentos que devem ser levados em consideração no momento da construção de obras localizadas em ambiente marinho:

- deve-se garantir a baixa permeabilidade do concreto à penetração de agentes agressivos, através de procedimentos adequados durante a execução da estrutura; e
- deve-se observar que os fenômenos de deterioração apresentados no Quadro 2.4 são extremamente diferentes e variam de acordo com a estrutura. Desta forma, cuidados especiais devem ser tomados para proteção das diversas partes que são expostas das obras.

Conforme exposto nos itens anteriores, há toda uma preocupação do meio científico com relação à durabilidade das estruturas. Porém, tal assunto é altamente complexo, onde verificou-se que há uma grande quantidade de fatores intervenientes nos processos de degradação que as estruturas de concreto armado estão sofrendo. Desta forma, na próxima seção será apresentado o conceito de visão holística aplicado ao estudo da durabilidade das estruturas, a fim de propor um outro enfoque sobre tal tema.

2.4 Visão Holística do Processo de Degradação de Estruturas

Conforme discutido anteriormente, existe um sinergismo entre todos os fatores responsáveis pela degradação das estruturas. A determinação do efeito combinado que existe entre o meio ambiente e as propriedades microestruturais do concreto é extremamente difícil de ser mensurado, devido à grande variabilidade existente entre os dois fatores (MEHTA, 1994). Além disso, BOB (1996) cita que a aleatoriedade existente entre as diversas formas de degradação e a falta de um conhecimento adequado dos mesmos são dois fatores que tornam extremamente incertas as tentativas de se modelar temporalmente o comportamento das estruturas.

Assim como o meio ambiente, duas das três fases do concreto – a pasta e a interface agregado/pasta – estão em constante processo de mudança no decorrer do tempo. Um simples modelo estático não seria representativo de tais transformações, pois a porosidade e a permeabilidade do concreto mudam continuamente em virtude da penetração de água, CO₂, O₂ e substâncias como cloretos e sulfatos no interior do mesmo (BASHEER et all, 1994).

Além disso, certos processos físico-químicos, como a própria hidratação do cimento e/ou partículas pozolânicas, dissolução dos produtos de hidratação e consequente formação de outros produtos também influenciam no contínuo processo de mudança que o concreto apresenta. Por conseguinte, é extremamente difícil modelar um sistema que muda continuamente, onde há uma carência de informações a respeito de uma grande parte dos seus elementos constituintes e onde muitos deles apresentam variações grandes no decorrer do tempo.

Consequentemente, face à dificuldade existente em se determinar a interação existente entre os diversos fenômenos responsáveis pela degradação de estruturas, uma nova conceituação para a abordagem do problema se faz necessária. Desta forma, MEHTA (1994) propôs um modelo holístico de deterioração das estruturas, que pode ser observado na Figura 2.9. O termo holístico vem do grego *holos*, e afirma que o perfeito entendimento de um fenômeno ou processo não pode ser deduzido a partir da soma de cada uma das partes constituintes dos mesmos, e sim através de uma visão global, que leve em consideração a interação existente entre tais partes que contribuem para o funcionamento do todo.

Essa visão global do processo de degradação das estruturas não é considerada uma nova linha de pensamento pelos pesquisadores interessados na durabilidade das estruturas, pois, segundo MEHTA (1993), essa forma de abordagem dos diversos fenômenos que promovem a degradação das estruturas já tinha sido proposta por VALENTA, em 1968. Nessa época, o autor já fazia referência à importância dos aspectos microestruturais na permeabilidade e consequente durabilidade do concreto, alertando para o fato de que os problemas de deterioração das estruturas são influenciados diretamente pelo comportamento da microestrutura do concreto que, por sua vez, são oriundos de falhas que ocorrem na execução do processo construtivo.

Tal modelo de degradação vem de encontro ao chamado reducionismo da ciência (MEHTA, 1994), onde todo fenômeno complexo é simplificado e as suas partes são estudadas separadamente. Segundo CALEJJA citado por MEHTA (1993), muitos pesquisadores estudam campos relacionados à pesquisa em cimento e em concreto, usando os mesmos princípios e aplicando os mesmos métodos de investigação, chegando contudo a resultados parciais, não apresentando conclusões definitivas sobre o assunto. O emprego deste procedimento de pesquisa é válido, porém há de se considerar que existe uma diferença significativa quando tenta-se correlacionar partes diferentes de um mesmo processo para explicar o fenômeno global, principalmente quando se trata de se explicar um sistema que apresenta uma alta variabilidade, como é o caso da durabilidade das estruturas.

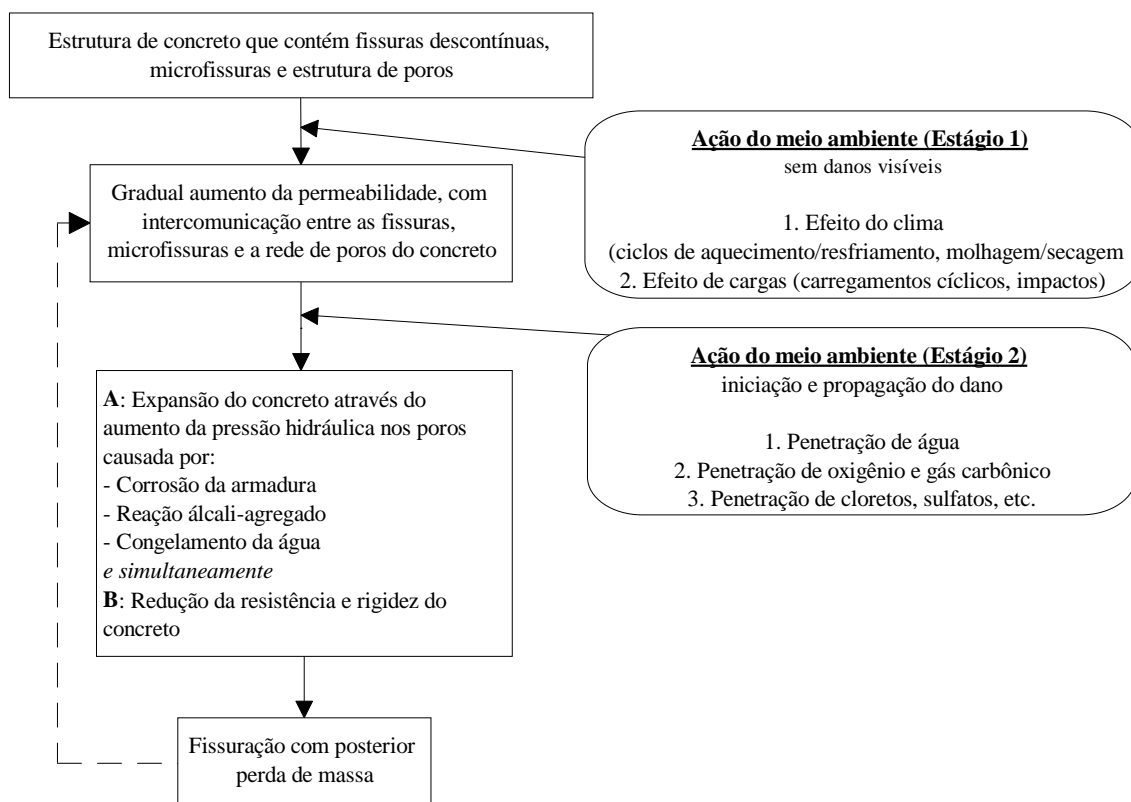


Figura 2.9 - Modelo holístico de deterioração do concreto (MEHTA, 1994)

De acordo com GERWICK (1994), as microfissuras que estão presentes no interior do concreto desde o seu lançamento localizam-se principalmente na interface agregado/pasta e armadura/pasta. Além disso, as mesmas podem se formar em virtude da incompatibilidade térmica existente entre a pasta, o agregado e a armadura, pelo efeito das condições climáticas e de carregamento, ciclos de molhagem/secagem e congelamento/degelo. Através de tais ações, as microfissuras se intercomunicam entre si e com as microfissuras superficiais, provocando a penetração de substâncias agressivas (água, CO_2 , O_2 , cloretos e/ou sulfatos) para ao interior da massa de concreto, dando início aos diversos tipos de degradação posteriores.

Verifica-se que o modelo apresentado na Figura 2.9 leva em consideração o efeito do meio ambiente em dois estágios. Durante o primeiro estágio, as condições climáticas e de carregamento facilitam a propagação das microfissuras, até que as mesmas se intercomunique. Como efeito de tal interação, há um aumento da permeabilidade do concreto, facilitando a penetração dos agentes de degradação, que são responsáveis pelo aumento da pressão do fluido nos poros do concreto, aliado a uma diminuição da rigidez e resistência do mesmo, com conseqüente fissuração e posterior perda de massa.

Desta forma, IDORN et all (1992) colocam que uma verificação da microestrutura dos materiais através de análises petrográficas e técnicas de

microscopia eletrônica é de grande importância na determinação das mudanças que ocorrem nos mesmos quando são sujeitos aos diferentes processos de degradação. Tais verificações periódicas realizadas em estruturas acabadas mostrariam as variações que ocorrem na microestrutura dos elementos (porosidade, presença de microfissuras, entre outros), oferecendo mais subsídios para um melhor entendimento da evolução dos tipos de dano.

MEHTA e BREMNER (1996) citam que a carência de uma visão holística é a principal responsável pelo grande índice de degradação que as estruturas estão apresentando. De acordo com os autores, os engenheiros responsáveis pelo projeto e construção das estruturas devem dar uma maior atenção aos casos de estruturas que estão apresentando algum processo de deterioração, pois a análise do desempenho das mesmas oferecem subsídios importantes para que se projete estruturas mais duráveis.

Como pode ser notado através das considerações realizadas até o presente momento, a obtenção de obras duráveis é um objetivo procurado por todo o meio técnico-científico atualmente. Todos os esforços são atualmente direcionados em três principais linhas de investigação: na determinação dos efeitos dos diversos tipos de materiais no comportamento do concreto a longo prazo, na classificação da agressividade ambiental e sua interação com as construções, e nos modelos de previsão da vida útil das estruturas. Desta forma, com base na bibliografia pesquisada, serão realizadas algumas considerações com relação à modelagem da vida útil das estruturas, conforme descrito no próximo tópico.

2.4.1 Considerações Quanto aos Modelos de Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado

Como pode ser verificado anteriormente, a durabilidade e a conseqüente previsão da vida útil das estruturas estão sendo objeto de pesquisa dentro da Engenharia Civil. Observa-se o esforço realizado por uma grande parcela de pesquisadores no sentido de se tentar estabelecer uma modelagem adequada para representar a curva desempenho *versus* tempo das estruturas. Todos os esforços nesse sentido estão direcionados para o estudo da corrosão das armaduras pois, além de ser o fenômeno que apresenta um maior índice de ocorrência nas estruturas de concreto, tal tipo de degradação pode reduzir significativamente a vida útil das estruturas. Tal colocação é confirmada pela observação de inúmeros casos de deterioração amplamente relatados na bibliografia ocasionados por tal dano, sendo assim o alvo de estudos para as tentativas de modelagem.

Até o presente momento foram apresentadas duas linhas de pensamento com relação à previsão da vida útil das estruturas. Existem aqueles pesquisadores (PAPADAKIS et al, 1991) que tentam prever o comportamento da

curva de desempenho das estruturas através da utilização de determinados modelos matemáticos – geralmente representados pelas Leis de Fick e de Darcy – para o transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas de concreto. Em contrapartida, há aqueles que salientam a extrema dificuldade existente em se modelar tais parâmetros (MEHTA, 1994), principalmente em função da grande quantidade de fenômenos envolvidos e suas interações.

Desta forma, a fim de contribuir para o esclarecimento de tais dúvidas, serão realizadas algumas considerações de caráter mais genérico e qualitativo, que se encontram sumarizadas na Figura 2.10.

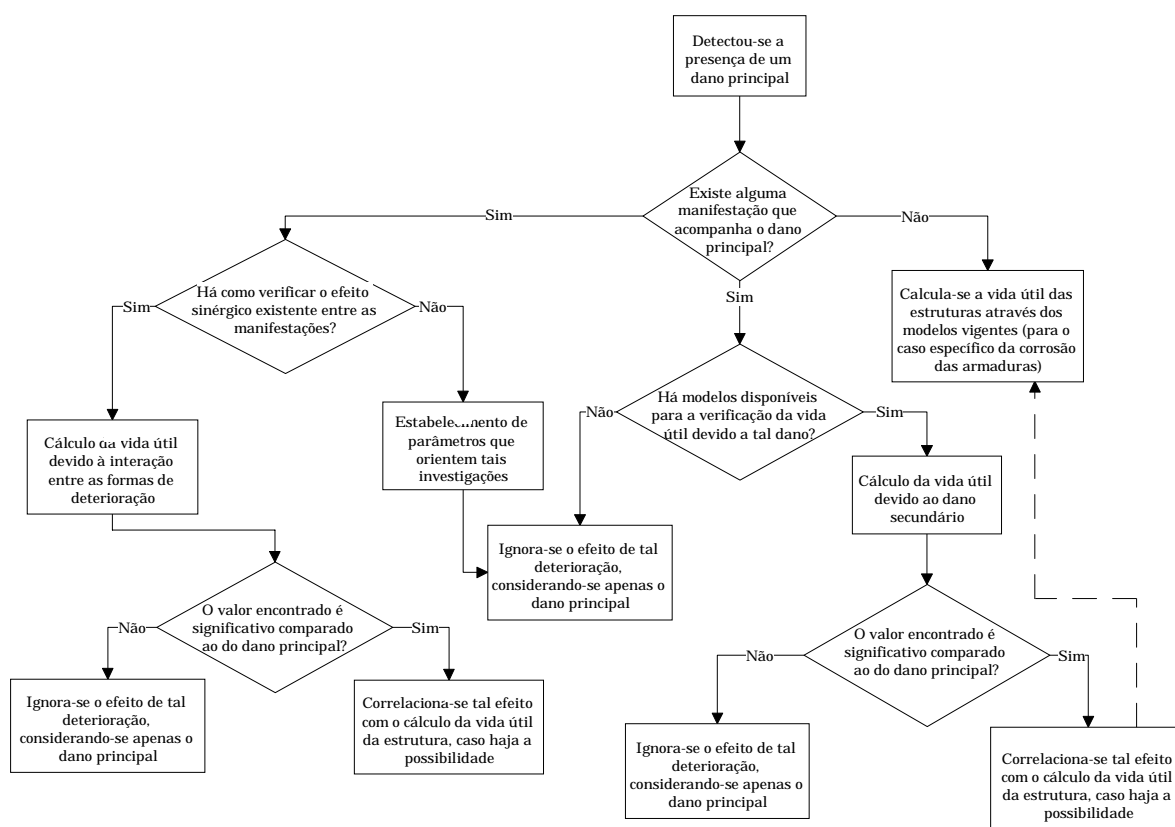


Figura 2.10 - Fluxograma para a verificação da vida útil das estruturas de concreto armado

Primeiramente, pode-se verificar que a grande totalidade dos fenômenos modelados são relacionados aos fatores responsáveis pela corrosão das armaduras no concreto: a carbonatação e os íons cloretos, cujos fenômenos de transporte de substâncias agressivas podem ser modelados através das Leis mencionadas anteriormente. Contudo, apesar de ser o fenômeno que mais compromete a durabilidade das estruturas, não é o único a atacá-las, pois existem as demais formas de manifestações patológicas, como ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado, que podem agir simultaneamente. Outro caso de interação pode ser citado baseando-se nos fatores responsáveis pela

corrosão de armaduras: a carbonatação e os íons cloretos. Caso se verifique a presença de ambos agredindo um elemento de concreto armado, pode-se dizer que à medida que a frente de carbonatação avança pelo cobrimento do concreto, vai havendo uma colmatação dos poros pela formação de CaCO_3 , fazendo com que a velocidade de penetração dos íons cloretos seja significativamente reduzida, alterando assim o período de iniciação do processo corrosivo.

Desta forma, considerando-se apenas os efeitos da corrosão das armaduras, teria-se uma vida útil de x anos para uma determinada estrutura. Contudo, ao se introduzir uma outra manifestação patológica no processo, observaria-se que tal valor de vida útil poderia ser maior ou menor, em função do nível de dano que a mesma poderia causar na estrutura e/ou em função do efeito sinérgico que poderia ocorrer entre tal dano e a corrosão das armaduras. Desta forma, a vida útil da estrutura poderia estar dentro de uma faixa de variação $a \cdot x \cdot b$, ou, simplesmente $x \pm \varepsilon$.

Seguindo com o raciocínio apresentado, o próximo passo é saber se há a possibilidade de se determinar o valor de ε com o conhecimento acumulado disponível até o presente momento. Tal determinação pode ser dividida em duas possibilidades. Na primeira, tentaria-se verificar se o valor de tal fator é significativo ou não, se comparado com o efeito da corrosão de armaduras. Por exemplo: admita-se que em uma estrutura que foi objeto de algum tipo de intervenção tenha-se chegado a um valor de 8 anos para a vida útil residual, devido à corrosão de armaduras. Admita-se também que em tal obra tenha se diagnosticado a presença de ataque por sulfatos, e a vida útil da mesma, em virtude de tal manifestação, seja de 6 meses a mais ou a menos em comparação com a corrosão de armaduras, por exemplo. Desta forma, a vida útil da estrutura seria de 8 anos \pm 6 meses. Assim, com base em tais valores, uma pergunta pode ser formulada: será que esses seis meses são significativos o suficiente na vida útil da estrutura, ou podem ser considerados como uma incerteza do modelo, onde o mesmo poderia ser incluído em uma faixa de valores para a corrosão de armaduras? Deve-se verificar a ordem de grandeza que tal degradação apresenta e se este valor pode estar implícito ou não nas formulações propostas atualmente.

Na segunda possibilidade, o valor de ε é considerável, mas até o presente momento não se tem informações suficientes sobre todos os fatores que influem na determinação desse parâmetro, como os ambientais, os microestruturais e os relacionados à própria forma de deterioração. Assim, maiores investigações devem ser realizadas sobre o referido ponto de pesquisa, a fim de que se tenham resultados satisfatórios sobre os mesmos.

Desta forma, o que se observa é a adoção de dois tipos de sistemas para se prever a vida útil das estruturas: um determinístico, que se baseia nas equações de movimento de fluidos nos poros do concreto para a determinação do tempo

necessário para que os agentes de degradação provoquem a deterioração das estruturas, e outro que considera a grande variabilidade implícita em tais processos de degradação – traduzida pelas considerações realizadas nos parágrafos anteriores – chamado de probabilístico, cujas bases conceituais foram lançadas por MEHTA (1994). O emprego do método probabilístico – cujas teorias são largamente utilizadas no ramo da engenharia estrutural (ANG e TANG, 1975; DER KIUREGHIAN, 1996) – para a determinação da deterioração das estruturas com relação à corrosão de armaduras está sendo objeto de estudo por parte de alguns pesquisadores (LI, 1995; BOB, 1996). Segundo os autores, os fatores que influenciam decisivamente nos processos de deterioração são as propriedades do material e o meio ambiente, conforme discutido anteriormente. Como esses fatores são extremamente aleatórios, o estudo do mecanismo da corrosão das armaduras deveria ser realizado baseando-se nas teorias de confiabilidade. As comparações dos resultados obtidos através da realização de tais modelos com determinações experimentais conduzidas pelos autores apresentaram bons ajustes, mostrando que a abordagem proposta pode ser utilizada na previsão da vida útil das estruturas.

Esta linha de estudos foi empregada por KERSNER et al (1996), que apresentaram um modelo para a carbonatação do concreto através da utilização de uma abordagem probabilística. Os autores colocam que tal abordagem tem um nível maior de confiabilidade para o estudo da carbonatação do concreto em relação ao emprego das técnicas determinísticas. Ainda segundo os autores, o empregos das técnicas de confiabilidade para a determinação das atividades de recuperação de estruturas devem ser utilizadas, pois permitem um maior grau de certeza nas determinações obtidas.

PREZZI e MONTEIRO (1996) realizaram um estudo onde verificou-se a capacidade de proteção de diversos tipos de concreto com relação à corrosão de armaduras. Foram analisados 10 traços de diferentes composições e, no final, aplicou-se os princípios da confiabilidade para se analisar aquelas misturas que apresentariam uma pior performance com relação à propriedade estudada. Tais análises foram comparadas com um experimento realizado por ZHANG e GJØRV (1990), que colocaram corpos-de-prova expostos por mais de 7 anos a um ambiente marinho. A comparação entre os resultados obtidos foi extremamente satisfatória, mostrando que o emprego das técnicas da confiabilidade na durabilidade das estruturas são viáveis, diminuindo significativamente as incertezas existentes em tal processo.

Assim, observa-se que alguns pesquisadores estão começando a usar as técnicas de confiabilidade aplicadas à durabilidade e previsão de vida útil das estruturas, principalmente em função do nível de aleatoriedade característico de uma grande parte dos fatores envolvidos nos processos de degradação. Contudo, mais estudos devem ser conduzidos para a verificação da aplicabilidade dos

modelos propostos, pois até o presente momento as modelagens realizadas são extremamente complexas, onde a aplicação para a determinação da vida útil das estruturas não está perfeitamente explicada. Porém, segundo PREZZI e MONTEIRO (1996), os resultados das avaliações que são realizadas com o emprego das análises de confiabilidade ajudam na tomada de decisão entre várias alternativas, com uma minimização extrema dos custos envolvidos em tal escolha.

Desta forma, uma grande quantidade de fatores influem na modelagem da vida útil das estruturas, fazendo com que as tentativas de investigação nessa área sejam revestidas de um grau de incerteza razoável. Contudo, o esforço que está sendo realizado nesse sentido é, sem dúvida, um excelente ponto de partida para se avaliar a vida útil das estruturas, objetivando-se aumentar a durabilidade das mesmas.

3. CARACTERIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS UTILIZADO NO LEVANTAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E FORMAS DE REPARO E REFORÇO

3.1 Introdução

A Região Nordeste do Brasil é uma área altamente prejudicial à durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, principalmente em função da elevada agressividade ambiental característica da mesma. A maioria das capitais dos estados que compõem a região estão localizadas na orla marítima, onde a ação de substâncias agressivas presentes na atmosfera, aliada à ocorrência de altas temperaturas médias juntamente com o teor de umidade elevado, torna o ambiente propício para o desenvolvimento de uma grande variedade de processos de degradação nas estruturas.

Recentemente, importantes pesquisadores e instituições a nível mundial têm desenvolvido grande esforço na execução de levantamentos de problemas em vários tipos de edificações, pois a catalogação e análise das ocorrências consistem em um ponto de partida para qualquer investigação dessa área. O estudo sistemático dos problemas a partir de suas manifestações características permite um estudo mais aprofundado de suas causas, subsidia com informações os trabalhos de reparo e manutenção das estruturas, além de poder contribuir para o entendimento do processo de produção, de modo a minimizar a incidência total de problemas (DAL MOLIN, 1988).

Embora já se possa contar com um certo número de levantamentos de casos patológicos registrados, como por exemplo no Rio Grande do Sul (CREMONINI, 1988; DAL MOLIN, 1988 e SILVA, 1993), no Espírito Santo (SILVA, TRISTÃO e MACHADO *apud* ARANHA, 1994), em Santa Catarina (SANTANA *apud* ARANHA, 1994), na Região Sudeste (CARMONA e MAREGA, 1988), na Região Norte (ARANHA, 1994) e na Região Centro-Oeste (NINCE, 1996), ainda não se tem notícias a respeito de um trabalho dessa natureza na Região Nordeste que possa identificar os principais tipos de manifestações patológicas que ocorrem nas edificações, bem como identificar em qual etapa do processo construtivo deve-se atribuir a origem dos problemas e os custos de recuperação. Desta forma, visando contribuir para um melhor entendimento de tais fatores, será apresentada a seguir a metodologia utilizada para a realização de um trabalho de coleta e análise de dados de manifestações patológicas e formas de recuperação realizado no estado de Pernambuco.

3.2 Banco de Dados

O banco de dados foi montado a partir das consultas aos arquivos das duas empresas que realizam a maioria dos trabalhos de recuperação de estruturas no estado de Pernambuco. Tais arquivos foram analisados, de onde retirou-se informações de laudos técnicos de vistorias, projetos de reparo e/ou reforço estrutural, diários de obras e pastas de entrega de obra. Eventualmente, a fim de esclarecer alguns pontos que não estavam devidamente descritos nos relatórios, foram realizadas entrevistas junto ao corpo técnico das empresas.

Os dados coletados correspondem às intervenções efetuadas nas estruturas de concreto armado no período de 1978 à 1996. Vale salientar que neste trabalho as obras catalogadas se referem às estruturas construídas em concreto armado convencional, não tendo sido coletados dados referentes às obras de arte (pontes, viadutos, barragens, e outros) e obras especiais (reservatórios, piscinas, cisternas, arrimos e/ou obras de contenção, praças esportivas, e outros). Tal restrição com relação à tipologia das obras se deu principalmente em função das singularidades existentes no processo de produção dos diversos tipos de construção. As obras de arte e especiais são geralmente executadas com um controle maior do processo, não refletindo a tendência construtiva característica de grande parte das edificações correntes.

Cabe salientar que as mesmas dificuldades detectadas por outros pesquisadores quando na realização de levantamentos anteriores foram também verificadas durante a execução do presente trabalho. Um dos maiores problemas observados foi a inexistência de certas informações básicas que seriam necessárias para o completo preenchimento da ficha de cadastramento de obras, como o ano de construção das edificações, por exemplo. Tal dado é de suma importância no que diz respeito às atividades de manutenção das estruturas, pois uma avaliação levando o mesmo em consideração indica em que período da vida útil das edificações houve a necessidade de intervenção. A partir de tal análise, pode-se estabelecer um planejamento adequado das atividades de manutenção em períodos específicos durante a vida das edificações.

Os dados referentes a cada obra individualmente foram anotados em uma ficha de cadastramento de obras, semelhante àquela elaborada por ARANHA (1994), onde catalogou-se as seguintes informações:

3.2.1 Dados gerais da edificação

- a) Cliente ou proprietário, nome e endereço da obra;
- b) Uso: em função das diferenças existentes com relação à quantidade de obras cadastradas, optou-se por realizar uma classificação levando-se em consideração o tipo de utilização de cada obra. As mesmas foram divididas em

residenciais, comerciais/serviços, industriais e institucionais (obras públicas), onde a quantidade de dados referente a cada tipo de edificação pode ser verificada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das edificações com relação ao uso

Tipo de edificação	Quantidade	%
Residencial	109	57,7
Comercial/Serviços	43	22,7
Industrial	20	10,6
Institucional	17	9,0

Pode-se observar que a grande maioria das obras catalogadas foram aquelas de uso residencial e comercial/serviços. Conseqüentemente, ressalvas devem ser feitas com relação à quantidade de dados coletados das edificações industriais e institucionais. Tais quantidades podem não ser significativas do ponto de vista estatístico, mas certamente oferecem excelentes indicativos tanto da incidência das manifestações patológicas que ocorrem nas edificações quanto das formas de recuperação empregadas nas mesmas. Além disso, a quantidade de dados coletados dos tipos de obra mencionados não difere daquelas catalogadas nos levantamentos realizados no país anteriormente.

c) Entorno: Como já foi mencionado no Capítulo 2, o entorno, atualmente, deve ser considerado como uma variável importante no momento das análises das causas de degradação das estruturas. Assim, dentro do estado de Pernambuco, classificou-se o meio ambiente onde as obras coletadas estão localizadas, conforme apresentado no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Classificação do entorno no Estado de Pernambuco

Entorno	Localização
Área Salina	0 - 1 km do litoral
Área Urbana	1 km - 6 km do litoral
Periferia Urbana	6 - 15 km do litoral
Área Rural	> 15 km do litoral
Água Doce	Obras localizadas nas margens de rios
Área Industrial	Obras localizadas em atmosfera industrial

Vale salientar que, ao se tomar como referência a cidade de Recife e classificando-a com relação ao Brasil, chega-se à conclusão que todas as obras existentes em tal capital estão inseridas na área salina, em função da própria localização da mesma. Porém, objetivando-se verificar a influência do entorno na distribuição das diferentes formas de degradação nas obras dentro do Estado de

Pernambuco, classificou-se o mesmo em regiões a partir da orla marítima, conforme mostrado no Quadro 3.5.

Cabe ressaltar também que no presente trabalho não se verificou o efeito de superposição de diferentes tipos de meio ambiente onde determinadas obras estão inseridas, pela dificuldade em se realizar uma determinação desta natureza.

Os dados coletados foram agrupados segundo o tipo de obra, conforme pode-se observar na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Distribuição das obras segundo o entorno

	Área urbana	Periferia urbana	Água doce	Área salina	Área industrial	Área rural	Total
Residencial	45	2	-	62	-	-	109
Comercial	24	1	-	17	-	1	43
Industrial	3	1	-	4	11	1	20
Institucional	6	1	1	6	-	3	17
Total	78	5	1	89	11	5	189
%	41,3	2,7	0,5	47,0	5,8	2,7	

Observa-se que a maior quantidade de obras coletadas está localizada na área salina, com um índice de 47%, seguido da área urbana, com 41,3%. Assim, dentro da região delimitada, tem-se que a maioria das edificações localizam-se onde a ação da névoa salina atinge o mais alto grau de agressividade.

Tais índices somados chegam ao valor de 88,3%, mostrando que, além da condição de exposição extremamente desfavorável, a grande maioria das obras atacadas por algum processo de deterioração estão localizadas na capital, onde há uma maior concentração das mesmas. Uma provável justificativa para o baixo percentual observado de obras localizadas nas áreas próximas às margens de rios, rural e na periferia urbana é a pequena quantidade de obras que existem nestas regiões, além do fato de que os problemas que ocorrem nas edificações nestas áreas são geralmente solucionados pelos próprios proprietários, que não recorrem aos escritórios especializados em recuperação de estruturas. Assim, em função disso, admite-se que o número de obras que sofreram algum tipo de recuperação seja provavelmente bem maior em tais áreas, contudo as intervenções realizadas nas mesmas que não foram devidamente registradas.

A fim de se analisar mais detalhadamente o efeito do meio ambiente nas edificações, dividiu-se as mesmas em função da sua utilização, conforme pode-se observar na Figura 3.1.

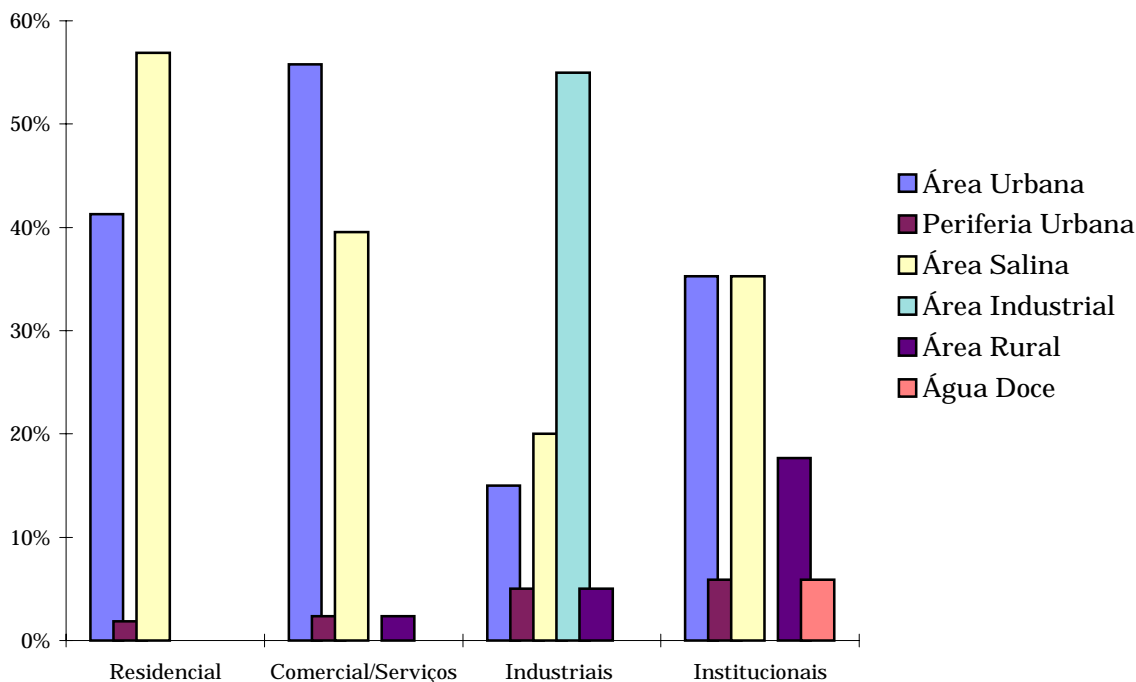


Figura 3.1 - Distribuição do entorno por tipo de obra atacada

Através de uma análise da Figura 3.1 pode-se verificar que, no caso das obras residenciais, a maioria das edificações que sofreram algum tipo de dano estão localizadas na área salina (57%) e na área urbana (41%), que têm como característica a alta densidade populacional. Observa-se que uma boa parte de tais edificações está sujeita a um ataque mais intenso dos íons cloreto presentes em suspensão na atmosfera, pois uma grande quantidade de obras que apresentaram algum processo de degradação estavam situadas apenas a alguns quarteirões da orla marítima.

Nas obras comerciais, o grande percentual de manifestações patológicas ocorreu na área urbana (56%) e na área salina (40%). Tais índices são perfeitamente explicáveis ao se levar em consideração que a grande maioria das obras comerciais ficam em áreas de grande movimentação, geralmente no centro das cidades, que são locais de grande concentração urbana.

Nas obras industriais verifica-se o grande número de edificações que estão inseridas na área industrial (55%), seguido pela área salina (20%) e pela área urbana (15%). Observa-se que as estruturas localizadas nas grandes plantas industriais são severamente agredidas por fenômenos patológicos, pois em tais ambientes são gerados microclimas específicos, com índices elevados de H_2S , SO_2 e NO_x que são substâncias altamente prejudiciais às condições de durabilidade das obras. Aliado a tal quadro, vale salientar que existe ainda a presença dos íons cloretos na atmosfera da região, fazendo com que os níveis de agressividade ambiental neste tipo de obra seja extremamente alto.

Verificou-se que os maiores percentuais de ocorrência nas obras públicas tiveram lugar nas áreas urbana (35%), salina (35%) e rural (18%). Com relação a tal tipo de obra, o universo de edificações amostradas não pode ser considerado significativo, mas com os dados disponíveis pode-se realizar algumas observações relacionadas sobretudo à ausência de um programa adequado de manutenção nas obras pertencentes ao poder público, onde os serviços de recuperação só são requisitados quando a edificação se encontra em um estado crítico de degradação.

A fim de se inferir a influência do entorno nos danos às edificações, realizou-se uma comparação entre o meio ambiente circundante das obras localizadas na Região Amazônica (ARANHA, 1994) e aquelas situadas no Estado de Pernambuco, conforme pode ser observado na Figura 3.2.

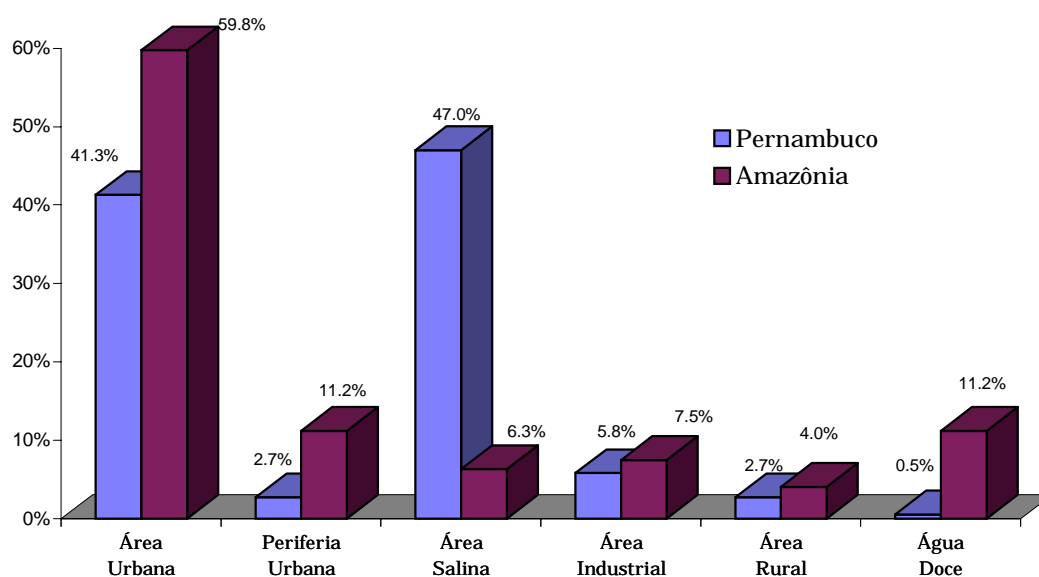


Figura 3.2 - Comparação do entorno das obras vistoriadas na Amazônia (ARANHA, 1994) e Pernambuco

Verifica-se claramente que a ação das manifestações patológicas está intimamente relacionada com o entorno aonde as mesmas estão inseridas. A diferença mais significativa se deu na área salina, sem dúvida o grande fator responsável pela degradação das estruturas no estado de Pernambuco. Em ambas as regiões brasileiras, pode-se observar que um grande percentual das obras que sofreram algum processo de degradação estavam localizadas na área urbana, devido principalmente à alta densidade de edificações existentes em tal área; nas áreas industriais e rurais observou-se um equilíbrio relativo entre os danos que ocorreram nas edificações.

Uma análise criteriosa do meio ambiente onde uma edificação que apresenta algum tipo de dano está inserida é um dos primeiros passos que devem ser tomados para um efetivo diagnóstico do problema. Deve-se considerar

ainda que o estabelecimento dos procedimentos mais adequados de recuperação das estruturas também é condicionado a tal assertiva. Todavia, em virtude da dificuldade na obtenção e escassez de dados relacionados a este tema, muitos estudos ainda devem ser conduzidos no sentido de se caracterizar melhor os ambientes – especialmente os microclimas e sua interação com as estruturas de concreto – que promovem a degradação das estruturas atuais.

3.2.2 Dados de inspeção

Registrou-se neste item a data de chamada e a origem possível da mesma, a fim de se saber qual o sintoma preponderante de dano que aparecia nas edificações.

3.2.3 Dados dos custos de recuperação

Em tal campo foram coletados dados necessários à realização da estimativa de custos de recuperação nas obras. Anotou-se a área, em m^2 , que foi recuperada e o custo total da recuperação feita, incluindo material e encargos com mão-de-obra. Os valores das recuperações foram transformados em dólar, a fim de homogeneizar os dados. A partir de tais considerações, obteve-se o custo por metro quadrado de recuperação para cada tipo de obra.

3.2.4 Origem das manifestações patológicas nas etapas do processo construtivo

Verifica-se atualmente uma grande preocupação em tentar se estabelecer em quais das etapas do processo construtivo (planejamento/projeto, materiais, execução e utilização) ocorrem as falhas que podem levar à ocorrência dos diversos tipos de manifestações patológicas nas edificações. Segundo HELENE (1992) e ARANHA (1994), um adequado diagnóstico do problema deve indicar em qual etapa do processo o dano se originou, pois uma mesma manifestação patológica pode ter mais de uma causa, que teve origem em uma das etapas do processo construtivo.

Para proceder tal análise, utilizou-se no presente estudo a classificação apresentada por ARANHA (1994), que realizou um trabalho minucioso de catalogação das causas dos diversos tipos de danos, associando-as com a etapa do processo construtivo onde os mesmos podem ocorrer. Tais informações estão sumarizadas no Quadro 3.6 (origem atribuída às etapas de planejamento/projeto e materiais) e Quadro 3.7 (origem atribuída às etapas de execução e utilização).

Quadro 3.6 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de planejamento/projeto e materiais do processo construtivo (ARANHA, 1994)

Planejamento/Projeto	Materiais
<p>a) Avaliação inadequada das condições de utilização da estrutura:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fck incompatível; - cobrimento insuficiente da armadura; - abertura excessiva de fissuras; e - tipo de cimento inadequado. <p>b) Especificações:</p> <ul style="list-style-type: none"> - escolha inadequada da cor da superfície do concreto; - abatimento incompatível; e - ausência de especificação quanto ao tipo de aditivo empregado. <p>c) Sobrecarga:</p> <ul style="list-style-type: none"> - má concepção do projeto e - avaliação incorreta das cargas atuantes/erros de cálculo. <p>d) Detalhes construtivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausência de ressalto ou pingadeiras; - presença de zonas que permitam o acúmulo de água; - ausência de detalhamento: passagem de dutos e eletrodutos; e - juntas de concretagem e de dilatação (falta de previsão ou previsão inadequada). <p>e) Composição do concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - alto ou baixo consumo de cimento; - alta relação água/cimento; - alta proporção de agregados finos; - alta finura do cimento; - cimento com alta proporção de C₃A e C₃S; - deficiência granulométrica dos agregados; e - sistema de cura inadequado. <p>f) Definição das armaduras:</p> <ul style="list-style-type: none"> - concentração excessivas de barras; - barras de diâmetro elevado; - disposição inadequada de barras de armaduras; - cobrimento insuficiente de emendas por transpasse; - ausência de armaduras para absorver momentos volventes; e - armaduras insuficientes em zonas de mudança de direção dos esforços. <p>g) Definição de formas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - cargas subestimadas; - projeto incompleto ou execução incorreta devido à ausência de projeto; e - não previsão de ações a serem estabelecidas nas operações de desforma. <p>h) Fundações:</p> <ul style="list-style-type: none"> - falta de investigação do subsolo; - tipo de fundação inadequada à situação; e - adoção de diversos tipos de fundação na mesma estrutura. 	<p>a) Cimento:</p> <p>a.1) Compra e recebimento: falta de controle das características físicas, químicas e mecânicas limitadas por normas;</p> <ul style="list-style-type: none"> - não obtenção das resistências mecânicas à compressão estabelecidas nas normas aos 3, 7 e 28 dias. <p>a.2) Armazenamento inadequado, propiciando o início do processo de hidratação.</p> <p>b) Agregado miúdo: compra, recebimento e armazenamento</p> <ul style="list-style-type: none"> - excesso de material pulverulento (> 3% em concretos submetidos a desgaste superficial e > 5% nos demais tipos de concreto) - excesso de torrões de argila (>1,5%) e materiais friáveis; - excessos de impurezas orgânicas (>300 ppm); - excesso de materiais carbonosos (>0,5% em concreto aparente e > 1% nos demais tipos de concretos); - excesso de sais solúveis (principalmente sulfatos e cloretos) (>2 %); - deficiência de materiais finos; e - armazenamento deficiente, permitindo contaminação dos materiais. <p>c) Agregado graúdo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - excesso de material pulverulento (partículas de silte e argila) (> 1%); - excesso de torrões de argila e materiais friáveis (>1% em concreto aparente, >2% em concreto submetido a desgaste superficial e > 3% nos demais casos); - excesso de materiais carbonosos (>0,5% em concreto aparente e > 1% nos demais tipos de concretos); - dimensão máxima característica incompatível com a densidade da armadura, dimensão de formas e sistema de transporte do concreto; - granulometria deficiente; e - armazenamento deficiente. <p>d) Aço: compra, recebimento e armazenagem</p> <ul style="list-style-type: none"> - aço com resistência à tração inferior à especificada em projeto; e - estocagem em local e de maneira inadequada. <p>e) Madeira: compra, recebimento e armazenagem</p> <ul style="list-style-type: none"> - tábuas ou pranchas deformadas; - madeira absorvente em demasia; - fôrmas de baixa qualidade, com número excessivo de nós; e - estocagem deficiente, permitindo a contaminação e empenamento das peças. <p>f) Água:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pH fora dos limites recomendados entre 5,0 e 8,0; - excesso de matéria orgânica (expresso em oxigênio consumido > 300 mg/l); - excesso de resíduo sólido (> 5000 mg/l); - excesso de sulfatos (expresso em íons SO₄ > 300 mg/l); - excesso de açúcar (> 5 mg/l); e - excesso de cloretos (expresso em íons Cl⁻ > 500 mg/l).

Quadro 3.7 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de execução e utilização do processo construtivo (ARANHA, 1994)

Execução	Utilização
<p>a) Execução das armaduras: a.1) Dobramento: ângulo de dobramento das barras inferior ao mínimo admissível a.2) Montagem das armaduras: - pouco cuidado quanto à disposição das barras; - deficiente instalação das barras; - baixa qualidade dos espaçadores (espessura variada, traço diferente do traço de concreto da estrutura e baixa resistência à compressão); - ausência ou distanciamento excessivo dos espaçadores; - troca de bitola da armadura; - falta de proteção das armaduras (deslocamentos, deformações); e - utilização de barras corroidas.</p> <p>b) Execução das fôrmas b.1) Montagem: - armação inadequada nos cantos; - espaçamento inadequado entre gravatas; - deficiente contraventamento das escoras; - escora fora de prumo ou excessivamente esbelta; - apoio inadequado de escoras; - utilização de fôrmas danificadas ou deformadas; e - falta de estanqueidade das fôrmas. b.2) Desforma: - ausência de produto anti-aderente (desmoldante); - alteração do diagrama de solicitações; - falta de planejamento quanto à manutenção do escoramento parcial em lajes; - desforma precoce; e - desforma violenta.</p> <p>c) Execução do concreto c.1) Dosagem: - ausência de dosagem; e - medição incorreta dos materiais. c.2) Mistura: - ordem inadequada de colocação dos materiais; - tempo de mistura dos materiais insuficiente ou excessivo e/ou ordem inadequada de colocação dos mesmos na betoneira; e - betoneira com volume de materiais além de sua capacidade ótima. c.3) Transporte: - equipamentos e/ou velocidade de transporte inadequados; e - transporte inadequado.</p>	<p>a) Ações Previsíveis: - ausência de planos de inspeção e manutenção; - presença de agentes agressivos; e - sobrecargas excessivas (quando pela ausência de informação nos projetos e/ou inexistência de manual de utilização ocorre carregamento além do estabelecido em projeto).</p> <p>b) Ações Imprevisíveis: - alteração das condições e exposição da estrutura; - incêndios; - abalos provocados por obras vizinhas; - paralisação da obra por longo período; e - choques acidentais.</p>

**Quadro 3.7 - Causas das manifestações patológicas atribuídas às etapas de execução e utilização do processo construtivo (ARANHA, 1994)
(Continuação)**

<p>c.4) Lançamento:</p> <ul style="list-style-type: none">- altura de lançamento excessiva;- lançamento inadequado, provocando movimentação das armaduras;- lançamento em pontos localizados, sobrecarregando excessivamente as fôrmas;- temperatura ambiente muito baixa ($< 4^{\circ}\text{C}$);- baixa umidade relativa do ar e/ou vento excessivo na superfície do concreto e/ou temperatura ambiente elevada, sem cuidados especiais;- interrupção da concretagem de forma inadequada; e- desobediência a planos de concretagem. <p>c.5) Adensamento:</p> <ul style="list-style-type: none">- vibração das armaduras, provocando deslocamento das barras em relação ao concreto já adensado, propagando esforços à massa de concreto adjacente, já adensado;- vibração excessiva pelo uso de equipamento inadequado, duração excessiva ou aplicação de procedimentos incorretos de operação; e- vibração insuficiente causada por espaçamento excessivo entre pontos de penetração, duração insuficiente ou falta de interpenetração entre as camadas. <p>c.6) Cura:</p> <ul style="list-style-type: none">- falta de proteção da superfície do concreto contra a perda da água de amassamento; e- adoção do sistema de cura inadequado ao tipo de exposição da estrutura.	
--	--

Em virtude da grande variedade de causas que podem provocar o aparecimento de uma determinada manifestação patológica, a classificação da origem dos danos nas etapas do processo construtivo é extremamente difícil de ser realizada. Além disso, nos relatórios pesquisados nem sempre estava explicitada em que etapa ocorreu o dano, constando apenas dados referentes à sua forma de ocorrência.

Consequentemente, determinadas manifestações patológicas tiveram origem em mais de uma etapa do processo construtivo, onde verifica-se que das 189 obras cadastradas no levantamento obteve-se um número total de 318 origens com relação às etapas do processo de produção das edificações, cuja distribuição percentual pode ser observada na Figura 3.3.

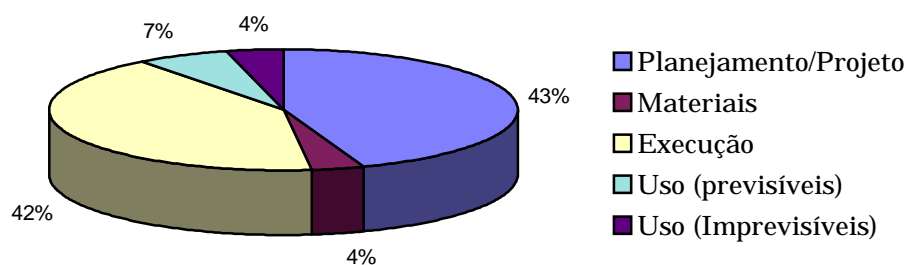


Figura 3.3 - Distribuição das origens das manifestações patológicas em todos os tipos de edificação

Através de uma análise da Figura 3.3, observa-se que um grande número de danos tiveram origem nas etapas de planejamento/projeto e execução, que somadas chegam a um índice de 85%.

Uma das possíveis explicações para valores tão altos na etapa de planejamento/projeto é o fato de que, na Região, os valores do f_{ck} especificados pelos calculistas variavam entre 15 e 18 MPa. Assim, o concreto apresenta-se altamente poroso, sem resistência à penetração dos agentes agressivos, que na Região têm um nível consideravelmente alto, conforme discutido anteriormente. Tal fato mostra o paradigma que existe na construção civil de que as estruturas só são dimensionadas para resistir aos esforços mecânicos solicitados, não se pensando em termos de durabilidade e da vida útil das

mesmas. Também verifica-se que não há um detalhamento adequado do projeto, bem como uma falta de compatibilidade entre os diversos projetos (arquitetônico, estrutural, entre outros), ocasionando problemas que, na maioria das vezes, não são sanados de maneira adequada em obra, gerando soluções que são simplesmente paliativas para os problemas encontrados.

Na etapa de execução, como ocorre na grande maioria dos levantamentos efetuados, o índice encontrado foi alto (42%). Possivelmente este valor mostra a falta de cuidado com os procedimentos relativos à execução do próprio concreto, como dosagem, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura. É principalmente nesta etapa do processo construtivo que se define se a estrutura construída será durável ou não. A execução de um concreto denso, bem proporcionado e bem curado é considerada a primeira linha de defesa contra os diversos processos de degradação existentes atualmente (METHA, 1993).

Além disso, verifica-se que uma grande parte dos problemas foi devido à ocorrência de cobrimento insuficiente das armaduras. Tal falha que ocorre nas peças estruturais está associada tanto à etapa de planejamento/projeto, pela inadequada estimativa das condições onde a estrutura estará inserida, quanto à etapa de execução, pela ausência ou deficiência no uso de espaçadores, não garantindo assim o cobrimento mínimo estabelecido no projeto. A ocorrência desse tipo de defeito é responsável por uma grande parte dos processos de degradação que ocorrem nas estruturas de concreto armado, principalmente a corrosão de armaduras, pois os agentes agressivos atingem mais rapidamente a armadura, iniciando assim o processo corrosivo.

Observa-se ainda a baixa incidência sobre os materiais de construção (4%), o que mostra que os materiais são adequados às obras executadas, havendo apenas alguns problemas relacionados ao controle no armazenamento dos mesmos, principalmente no caso do cimento que é estocado de maneira inadequada, permitindo-se que haja uma deterioração do material.

Feitas tais análises de cunho geral, optou-se por distribuir as origens dos processos de degradação por tipo de obra, conforme pode ser visualizado na Figura 3.4.

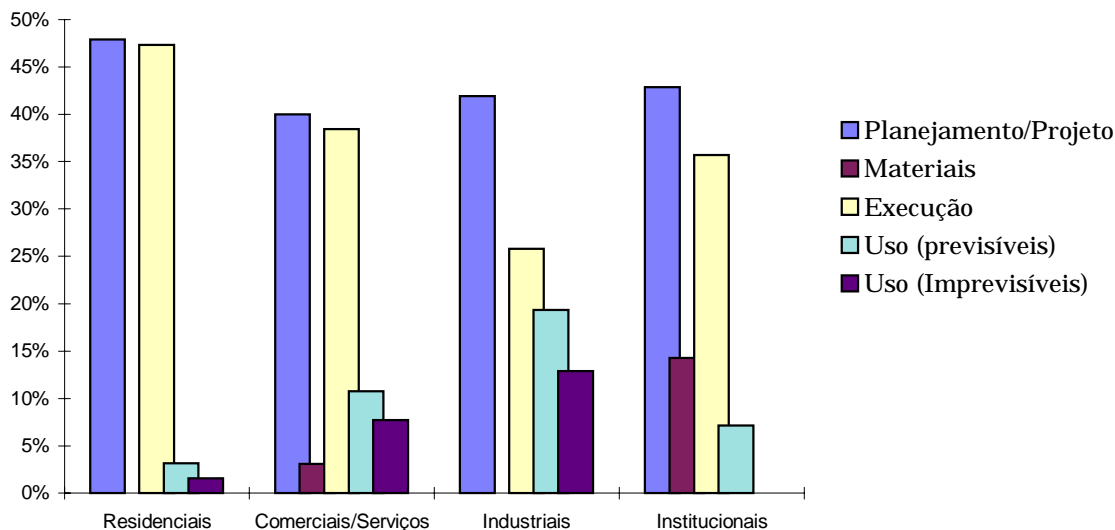


Figura 3.4 - Distribuição das origens das manifestações patológicas por tipo de obra no Estado de Pernambuco

Observando-se a Figura 3.4, pode-se confirmar que os maiores índices de problemas patológicos tiveram origem nas etapas de planejamento/projeto e execução, independentemente da utilização imposta à edificação. Tais valores se mostram elevados para os quatro grupos de edificações indistintamente, devido ao fato de que não existem diferenças significativas com relação ao método construtivo empregados nas mesmas. Como todas as estruturas são construídas em concreto armado tradicional, tem-se que as falhas que ocorrem durante o planejamento/projeto das obras, aliadas às práticas executivas inadequadas que ocorrem durante a construção, são praticamente as mesmas para todos os tipos de edificação, como já foi mencionado anteriormente.

Também pode ser verificado que as obras comerciais/serviços e industriais foram as responsáveis pela grande maioria de problemas que ocorreram na etapa de utilização das obras, tanto devido àqueles danos considerados imprevisíveis quanto aos danos que poderiam ser previstos durante as etapas de produção da edificação. O alto índice de problemas relacionados ao uso previsível pode ser explicado pela falta de uma manutenção preventiva nas obras, contribuindo ainda mais para que os erros que são cometidos nas etapas anteriores não sejam verificados e corrigidos adequadamente, passando assim despercebidos. A ausência de tal procedimento faz com que as intervenções nas estruturas só sejam realizadas quando os danos atingiram níveis elevados de deterioração. Os danos relacionados aos usos imprevisíveis são relacionados principalmente à ocorrência de incêndios nas obras comerciais/serviços, enquanto que nas obras

industriais tais danos foram provocados por choques acidentais provocados pela movimentação de equipamentos pesados nas instalações.

A partir dos dados catalogados, realizou-se uma comparação entre as origens das manifestações patológicas nas diversas etapas do processo construtivo das edificações nacionais, conforme observado na Figura 3.5.

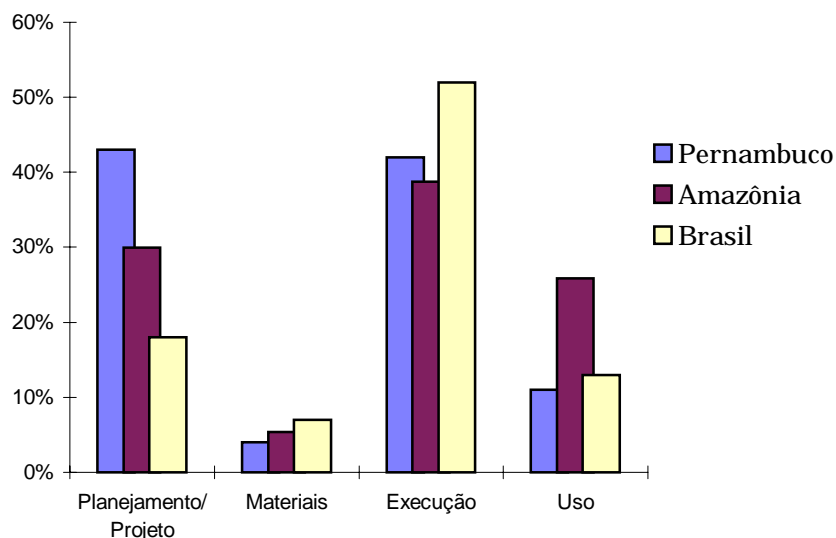


Figura 3.5 - Origem das manifestações patológicas no Brasil (CARMONA et all, 1988; ARANHA, 1994)

Verifica-se que a grande maioria dos danos que ocorrem nas obras têm uma maior concentração nas etapas de planejamento/projeto e execução do processo construtivo. A diferença existente entre os percentuais relativos ao planejamento/projeto pode ser explicada pela grande variabilidade de ações que podem ser tomadas em tal etapa, onde cada uma das medidas adotadas têm consequências significativas em termos de durabilidade das construções a longo prazo.

Dentro de tal linha de raciocínio, há de se considerar que é nessa etapa onde o projetista pode determinar o grau de exposição a que a estrutura estará sujeita, definindo assim procedimentos de proteção que podem variar, refletindo características regionais de concepção das obras. Assim, no estado de Pernambuco, as obras estão mais sujeitas a um efeito mais intenso da agressividade ambiental e, se as medidas adotadas para a construção (especificação de um concreto mais compacto e menos permeável) e proteção (adoção de sistemas de pinturas protetoras) das mesmas não forem satisfatórias, os danos provocados pelo efeito do ambiente podem se manifestar mais intensamente.

Já no caso dos problemas que ocorrem na etapa de execução das obras, observa-se que não há uma diferença significativa entre os valores encontrados nos levantamentos. Tal consideração mostra a uniformidade existente entre as técnicas construtivas que são empregadas nas edificações, que geralmente apresentam os mesmos pontos críticos, onde a propensão à ocorrência de procedimentos inadequados é comum. Assim, pode-se dizer que os problemas verificados durante a concretagem dos elementos estruturais (armaduras muito densas, concreto com baixa trabalhabilidade, adensamento e curas inadequadas, entre outros) são os mesmos, independente da região pesquisada.

3.2.5 Cadastramento das manifestações patológicas e formas de recuperação adotadas

Da mesma maneira realizada por ARANHA (1994), as manifestações patológicas e as formas de recuperação empregadas nas estruturas foram contabilizadas considerando que cada tipo de manifestação ocorrida em cada peça da estrutura (bem como cada tipo de reparo e/ou reforço empregado para a correção das manifestações) era considerada como sendo uma ocorrência, independente do número de vezes que a mesma se repetia na estrutura. Assim tais dados foram agrupados por elemento estrutural e posteriormente catalogados por tipo de obra.

Tanto as manifestações patológicas quanto as formas de recuperação adotadas nas estruturas foram classificadas baseadas no trabalho de ARANHA (1994), que fez uma pesquisa abrangente na literatura a respeito de tais assuntos. Assim, serão apresentadas aqui apenas as definições de cada termo empregado na ficha de coleta de dados, pois as informações a respeito das manifestações e das formas de recuperação estão amplamente descritas na literatura disponível (CÁNOVAS, 1988; HELENE, 1992; ARANHA, 1994).

3.2.5.1 Definições das principais manifestações patológicas observadas no levantamento

a) Concreto no estado fresco

Manifestação Patológica	Definição
Segregação do Concreto	Decorre da falta de homogeneidade de uma mistura, quando os compostos de uma massa heterogênea, como o concreto, separam-se, não mais distribuindo-se uniformemente
Ninhos de Concretagem	São vazios deixados na massa do concreto, devido à dificuldade de penetração do mesmo por ocasião do lançamento ou deficiência de adensamento, não permitindo o completo preenchimento das fôrmas
Alterações Geométricas	São modificações, com relação ao especificado em projeto, na geometria dos elementos estruturais, podendo ser de nível, de planeza, de esquadro ou nas dimensões das seções acima das tolerâncias
Concreto Contaminado	É proveniente da contaminação dos materiais constituintes do concreto no momento da sua execução por algum tipo de substância química, capaz de produzir efeitos deletérios no mesmo (ex. impregnação dos agregados por cloretos e sulfatos ou a utilização de agregados reativos com os álcalis do cimento)
Assentamento Plástico	São fissuras provocadas pela restrição à sedimentação das partículas sólidas do concreto quando encontram algum tipo de obstáculo (armaduras ou agregados maiores)
Dessecação Superficial	São fissuras que ocorrem quando há uma perda excessiva da água de amassamento do concreto, seja por evaporação, por absorção dos agregados ou absorção das fôrmas.
Cobrimento de Armadura Insuficiente*	Ocorre quando o cobrimento especificado das armaduras nos elementos estruturais é insatisfatório, face às condições de exposição a que a estrutura estará sujeita, podendo ter origem nas etapas de planejamento/projeto ou na execução do processo construtivo

Figura 3.6 - Principais manifestações patológicas do concreto no estado fresco (adaptado de ARANHA, 1994)

* O cobrimento de armadura insuficiente não é considerado na literatura como uma manifestação patológica, e sim como uma falha que ocorre em algumas das etapas do processo construtivo. Porém, a sua inclusão no levantamento foi considerada importante, devido ao elevado índice de ocorrência do mesmo nas obras aliado ao fato de que tal erro pode trazer graves consequências em termos de durabilidade das estruturas

b) Concreto no estado endurecido

Manifestação Patológica	Definição
Corrosão de armaduras	É um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, denominados de produtos de corrosão, os quais ocupam um volume significativamente superior ao volume original das armaduras, o que sujeita o concreto a elevadas tensões de tração geradas pelos produtos de expansão, ocasionando a fissuração e o posterior lascamento do cobrimento de concreto
Problemas estruturais	Considerou-se como problemas estruturais o somatório de todas as fissuras ocasionadas pelos esforços de flexão, cortante, compressão, torção, ação de momentos volventes e tração nos diversos tipos de elementos estruturais, causadas por sobrecargas e/ou deficiências no dimensionamento
Detalhes construtivos	São fissuras provocadas pela ausência ou deficiência de detalhes, embora o dimensionamento em geral atenda aos esforços a que a peça encontra-se submetida
Desagregação do concreto	Reside na separação da massa do concreto endurecido em partes diversas, em geral com despreendimento de agregados, podendo ser provocada tanto por ataque químico quanto pela adoção de um traço pobre ao concreto
Ataque químico	Considerou-se as fissuras, dissolução e remoção de compostos da pasta de cimento, desagregação e/ou lascamento do concreto provocadas pela presença de substâncias químicas deletérias que penetraram através do mesmo no estado endurecido, sendo classificadas nesse ítem a lixiviação do concreto, reação álcali-agregado e reações expansivas com sulfatos
Recalque diferencial	São fissuras que ocorrem quando as fundações são submetidas a deformações diferenciadas ao longo do plano das mesmas
Infiltrações	Consiste na penetração de umidade ou líquidos na massa do concreto endurecido, em geral através de fissuras, ninhos e juntas de concretagens mal executadas, ou devido à alta permeabilidade do concreto
Deformação excessiva	São deformações acima dos limites estabelecidos em norma provocadas por sobrecargas e/ou deficiência ou posicionamento incorreto das armaduras nos diversos tipos de elementos estruturais

Figura 3.7 - Principais manifestações patológicas no concreto no estado endurecido (adaptado de ARANHA, 1994)

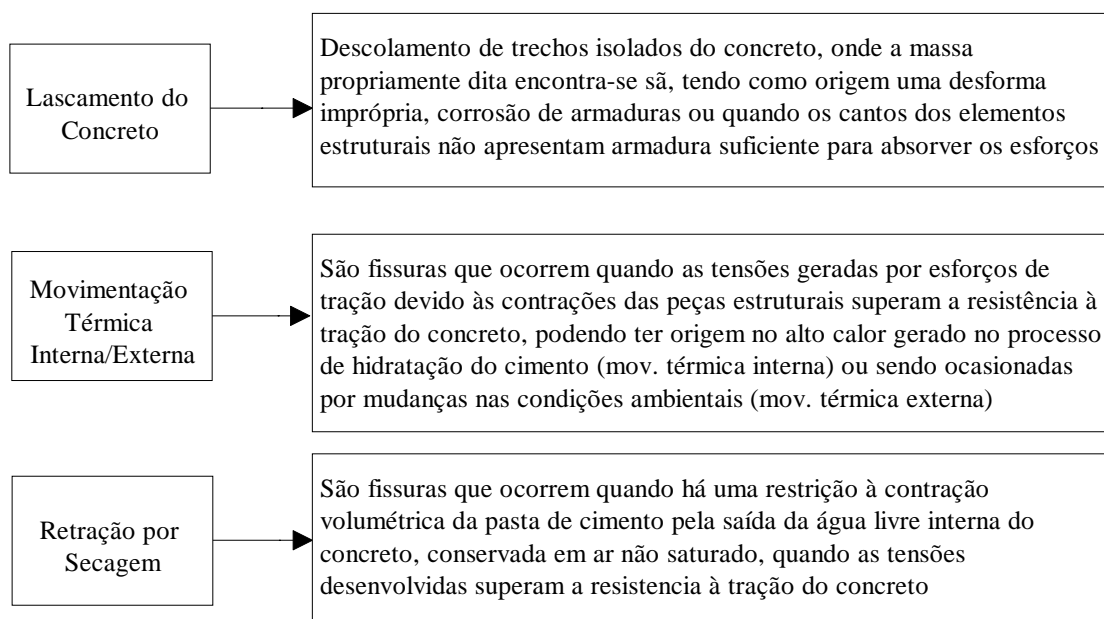


Figura 3.7 - Principais manifestações patológicas no concreto no estado endurecido (adaptado de ARANHA, 1994) (Continuação)

3.2.5.2 Principais formas de recuperação empregadas nas estruturas

Os métodos de recuperação estrutural foram divididos segundo o tipo de intervenção que é empregado em cada obra que apresente uma manifestação patológica. Assim, segundo ARANHA (1994), existem 03 tipos de técnicas empregadas para a recuperação estrutural:

- Sistemas de reparos (Figura 3.8): são empregados quando não há a necessidade da incorporação de um novo elemento e/ou incremento das seções de aço e concreto da estrutura existente, tendo como finalidade básica a simples recomposição da seção estrutural do elemento afetado;

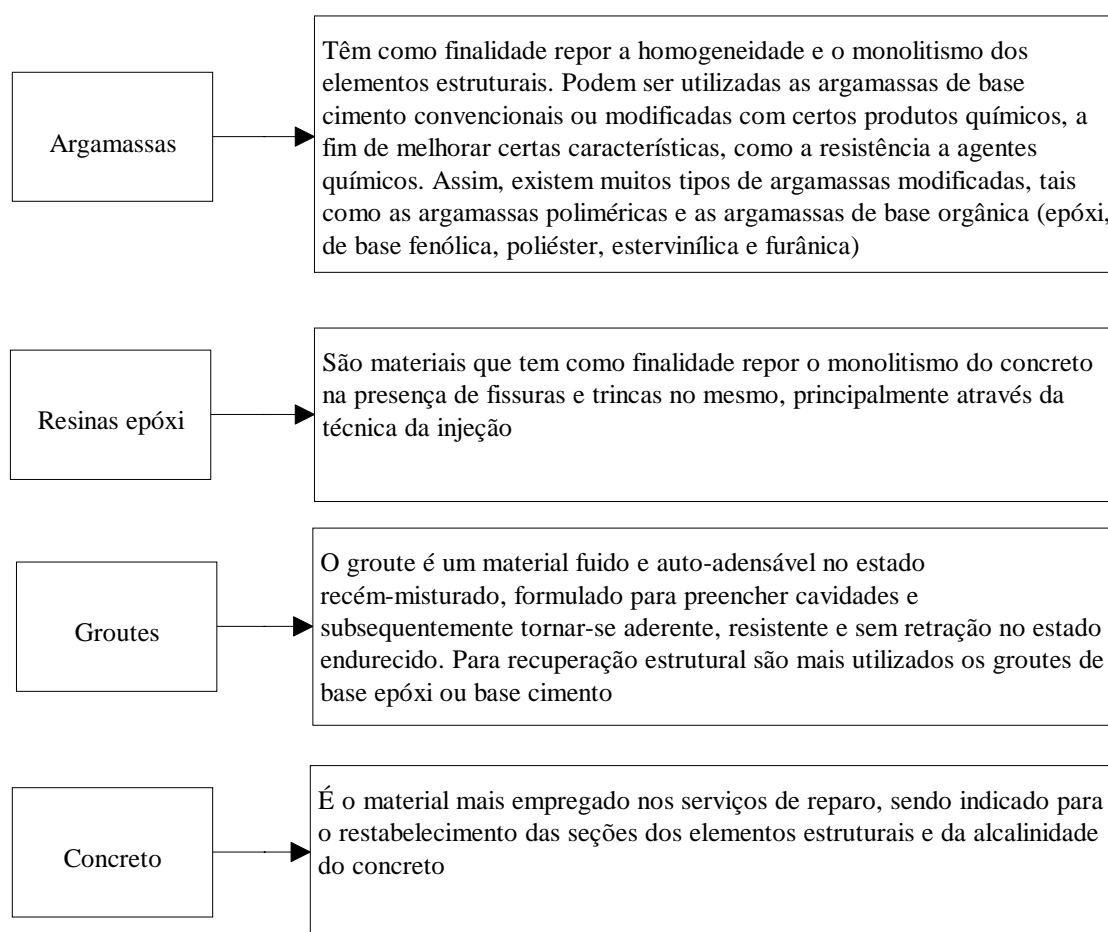


Figura 3.8 - Principais materiais empregados para reparos em estruturas de concreto (HELENE, 1992)

- Reforços estruturais: seu emprego se faz necessário no momento que se deseja aumentar a capacidade resistente de um elemento. É geralmente conseguido quando se deseja repor as condições de estabilidade da estrutura, que pode ter sido perdida devido à ação de cargas excessivas e/ou quando a deterioração do elemento chega a níveis críticos, comprometendo a segurança estrutural. Os

principais tipos de reforços empregados nas estruturas estão apresentados na Figura 3.9

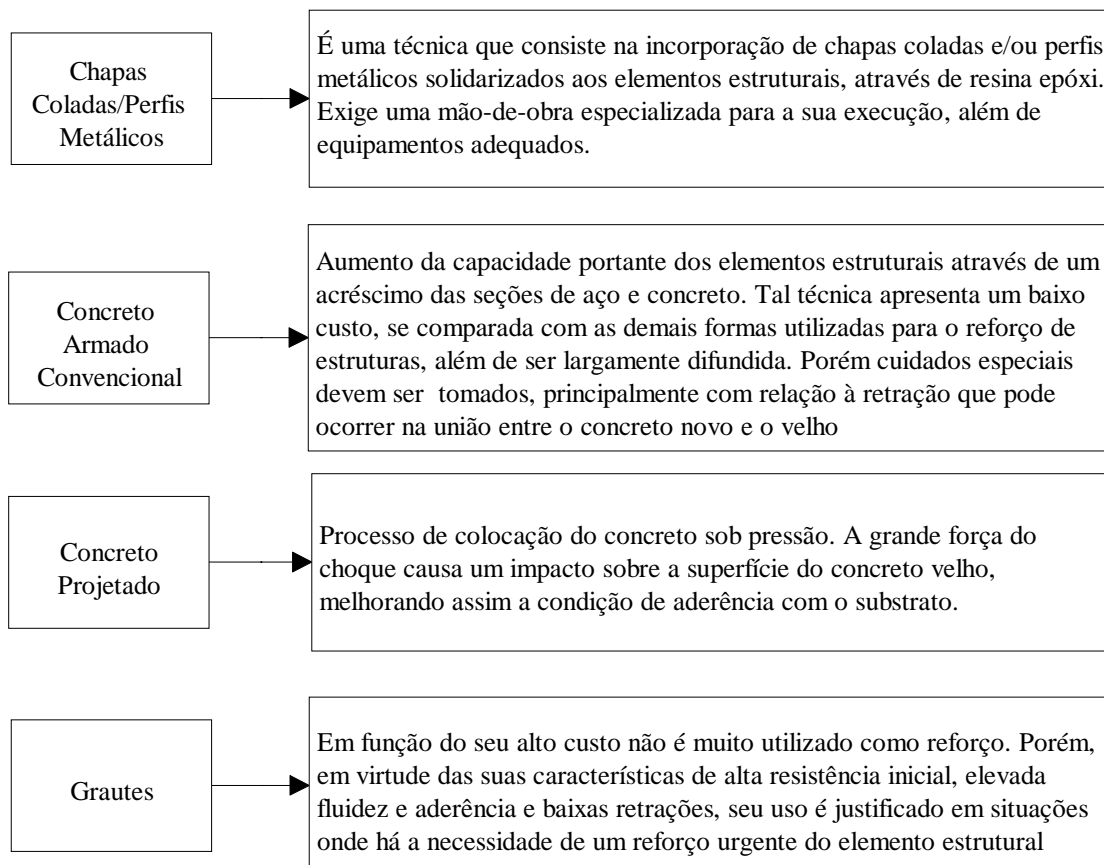


Figura 3.9 - Materiais mais empregados no reforço de estruturas de concreto (Adaptado de ARANHA, 1994)

- Reforços de fundações (Figura 3.10): compreende o incremento da capacidade portante das fundações através da incorporação de novos elementos ou da redução da taxa de sollicitação junto ao subsolo por meio de aumento das seções dos elementos estruturais.

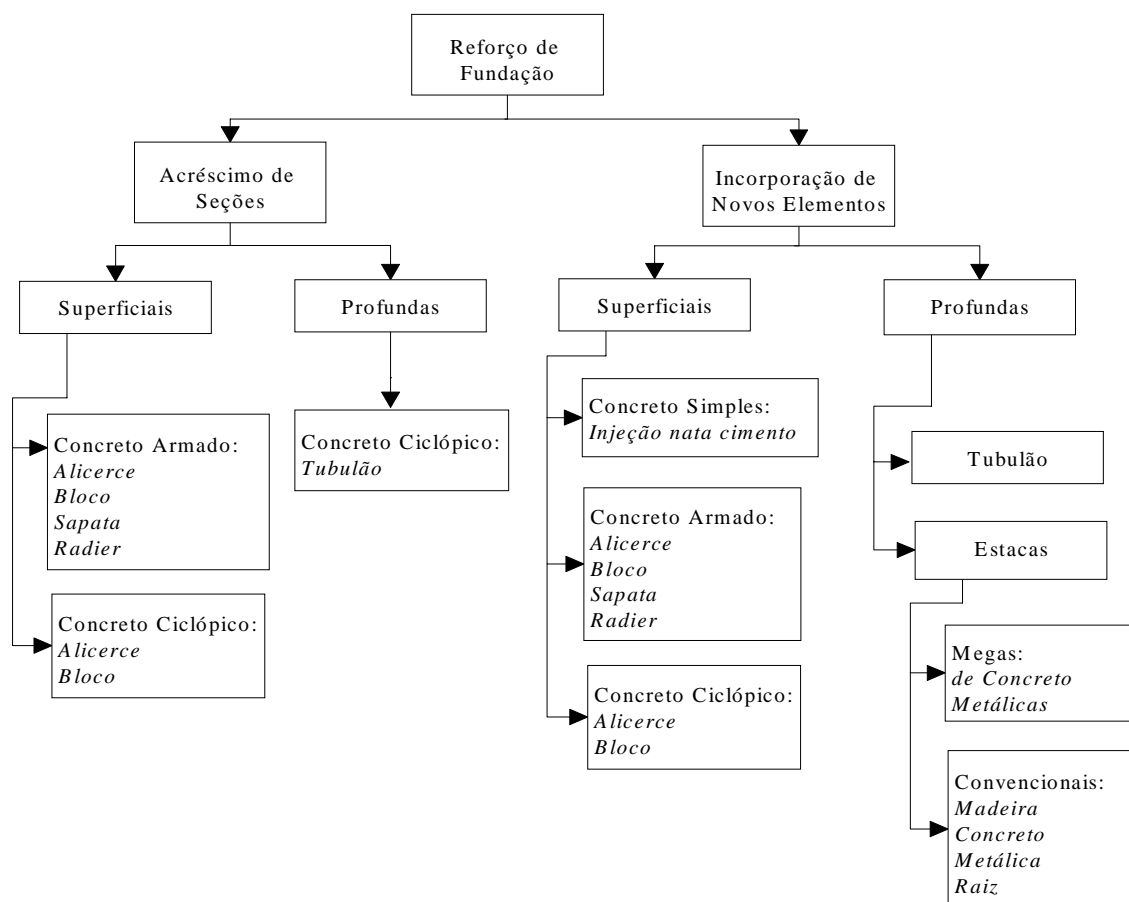


Figura 3.10 - Classificação das técnicas de reforço das fundações (ARANHA, 1994)

4. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

A partir dos dados coletados, realizou-se uma análise das principais manifestações patológicas que ocorreram nas estruturas de concreto, conforme descrito a seguir.

4.1 Em Função do Estado do Concreto: Fresco ou Endurecido

Foram elaborados gráficos que mostram a distribuição percentual das manifestações patológicas do concreto nos estados fresco e endurecido, conforme visualiza-se nas Figura 4.1 e 4.2.

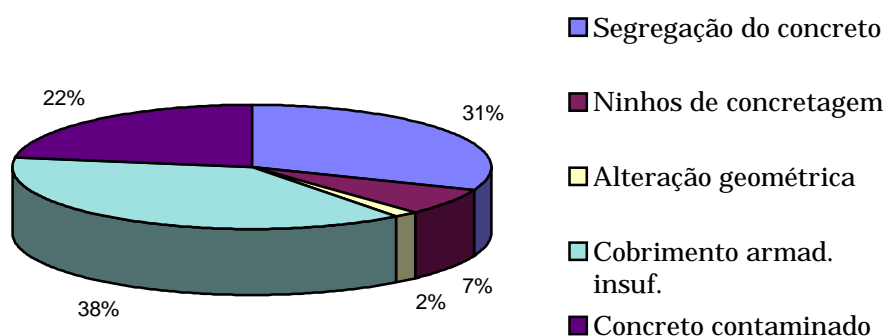


Figura 4.1 - Manifestações patológicas: concreto no estado fresco

Observa-se que, dentre as manifestações patológicas do concreto no estado fresco, o somatório das ocorrências relativas à segregação do concreto, ninhos de concretagem e cobertura de armadura insuficiente chega a um valor de 76%. Verifica-se na literatura (CÁNOVAS, 1988) que tais manifestações patológicas têm origem nas etapas de planejamento/projeto e/ou execução, mostrando que a utilização de procedimentos inadequados nestas etapas podem levar à ocorrência de elevados percentuais de problemas no concreto, que poderiam ser facilmente evitados através de certas ações, tais como:

- a) Na etapa de planejamento/projeto:
 - elaborar concretos com uma trabalhabilidade adequada;
 - dimensionar as peças estruturais com densidades de armadura que permitam uma concretagem eficiente.

b) Na etapa de execução:

- Cuidados na concretagem das peças, principalmente nas etapas de transporte, lançamento e adensamento; e
- Garantia da espessura de cobrimento das armaduras através do uso de espaçadores adequadamente distribuídos.

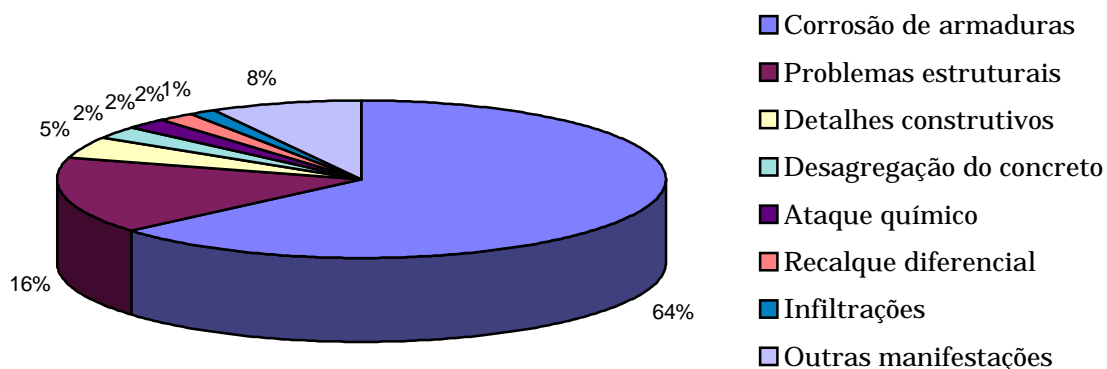


Figura 4.2 - Manifestações patológicas: concreto no estado endurecido

Observa-se que na Figura 4.2 que, entre as manifestações patológicas do concreto no estado endurecido, o maior percentual encontrado é o de corrosão de armaduras, com 64% das manifestações identificadas, seguido dos problemas estruturais, que apresentaram um índice de 16%; a insuficiência e/ou ausência de detalhes construtivos alcançou um índice de 5%; a ocorrência de desagregação do concreto (2%), ataque químico (2%), recalque diferencial (2%) e infiltrações (1%) vieram logo após. A totalização das demais manifestações patológicas chegou a um índice de 8%.

Observa-se o pequeno número de casos relativos à recalque diferencial (2%). Apesar da maior parte da cidade de Recife ter um subsolo formado por uma camada espessa de argila orgânica mole, que oferece uma resistência baixíssima, verificou-se que a maior parte das edificações estão construídas sobre estacas de concreto com elevada profundidade, que chegam até uma camada mais resistente. A grande maioria dos casos de tal manifestação patológica se refere às fundações de casas simples em sapatas, apoiadas em terreno mole, onde geralmente não há a preocupação de se realizar um estudo geotécnico completo do terreno onde as mesmas serão construídas.

4.2 Em Função do Tipo de Edificação

Partindo-se da premissa de que todas as edificações apresentavam uma estrutura de concreto armado convencional, optou-se por realizar uma classificação onde a forma de utilização das mesmas foi considerada como parâmetro para tal divisão, conforme mostrado no item 3.2. Assim, as obras foram divididas em residenciais, comerciais/serviços, industriais e institucionais.

As principais manifestações patológicas que ocorrem nas edificações residenciais podem ser observadas na Figura 4.3.

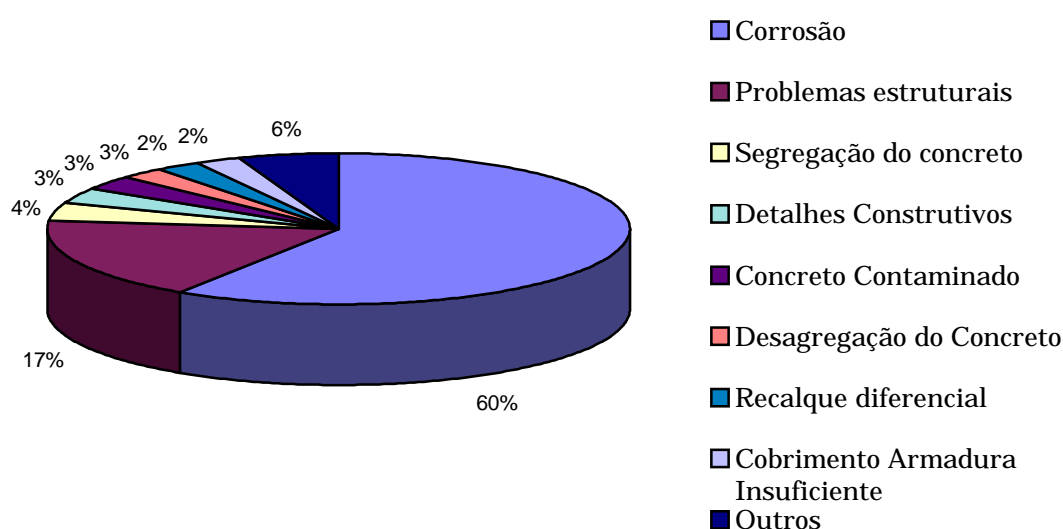


Figura 4.3 - Edificações residenciais: principais manifestações patológicas

Observa-se o elevado índice de corrosão de armaduras (60%), seguidos de problemas relacionados a movimentações estruturais (17%) e segregação do concreto (4%). Tais manifestações patológicas estão diretamente relacionadas a falhas que geralmente ocorrem durante as etapas de planejamento e execução da estrutura de concreto, como a ocorrência de cobrimentos insuficientes das armaduras e procedimentos inadequados estabelecidos durante as etapas de lançamento e adensamento.

Nas obras comerciais, assim como pode ser observado na Figura 4.4, o fenômeno da corrosão das armaduras foi o responsável pela maior parte dos danos (29%), seguidos por detalhes construtivos (19%), problemas de ordem estrutural (16%), deformação excessiva (11%), fissuras provocadas por incêndio (7%), cobrimento insuficiente de armaduras (4%), aparelho de apoio danificado (2%) e a presença de fungos nas superfícies de concreto aparente (2%), com o somatório das demais manifestações alcançando o índice de 10%.

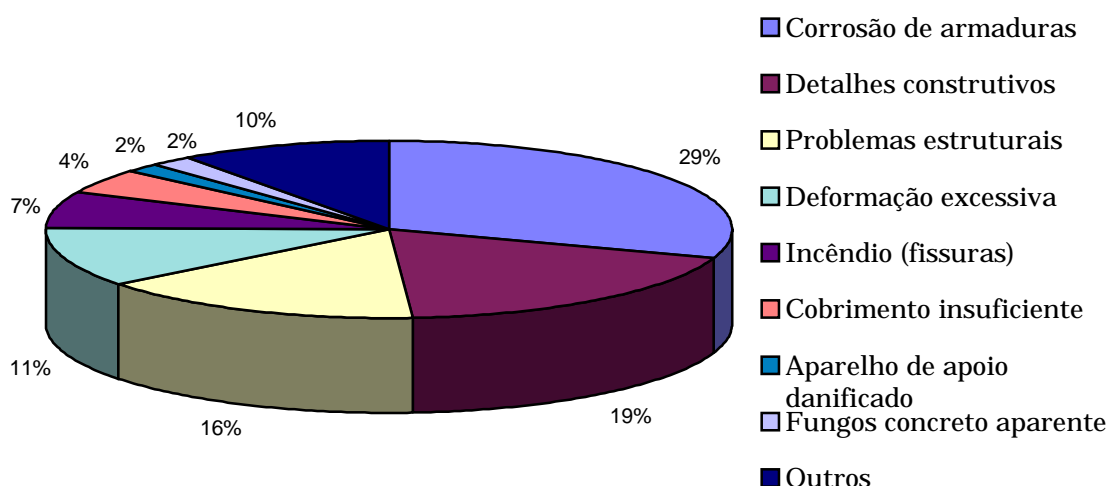


Figura 4.4 - Edificações comerciais: principais manifestações patológicas

Nesse grupo de obras constatou-se o alto índice relacionado com a ausência e/ou deficiência de detalhes construtivos. Em obras comerciais, a concepção arquitetônica adotada, principalmente nas fachadas (a fim de chamar a atenção dos prováveis clientes), privilegia a ação dos agentes e mecanismos de degradação. Excessos de brises, arestas, inexistência de um projeto de drenagem adequado e a ausência de ressaltos e/ou pingadeiras, entre outros fatores, podem causar o acúmulo de água na superfície dos elementos estruturais, facilitando o transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto.

Como pode ser verificado, registrou-se a ocorrência de incêndios graves nesse tipo de edificação, pois nas mesmas há uma grande quantidade e variedade de materiais, que na sua maioria são altamente comburentes, acumulados em estoque inadequadamente. Assim, através do aumento de temperatura nos elementos estruturais, há a ocorrência de elevadas deformações e fissurações, havendo a necessidade de demolição e reconstrução do elemento estrutural na maioria dos casos.

Nas obras industriais, a corrosão de armaduras foi o fenômeno responsável por um índice de 73% das manifestações patológicas registradas, seguido de ataque químico (12%), cobrimento insuficiente da armadura (8%), desagregação do concreto (2%), fissuras provocadas por movimentações estruturais (2%), concreto de capeamento fraturado (1%) e as demais formas de dano, que somadas chegaram a um índice de 2% (Figura 4.5).

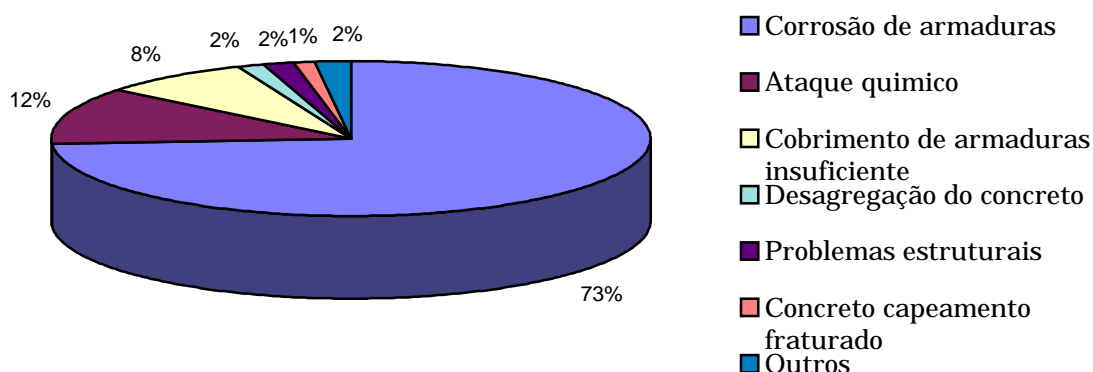


Figura 4.5 - Edificações industriais: principais manifestações patológicas

Os resultados mostrados na Figura 4.5 mostram que a ação do microclima gerado pelas atmosferas agressivas presentes nessas áreas é altamente prejudicial à durabilidade das estruturas de concreto. As substâncias agressivas presentes em grandes concentrações nesse tipo de ambiente² penetram no concreto através da rede de poros do mesmo, causando uma grande variedade de fenômenos de degradação tanto do concreto quanto da armadura. Para se minimizar tal efeito nas obras que vão ser submetidas a tais condições de exposição, deve-se especificar um revestimento de armaduras mais espesso e constituído por um concreto de baixa permeabilidade.

No caso das obras públicas (Figura 4.6) verifica-se também o grande índice relacionado à corrosão de armaduras (58%), seguido de segregação do concreto (10%), infiltrações nos elementos estruturais (9%), ocorrência de revestimentos insuficientes para a armadura do concreto (6%); a ocorrência de problemas estruturais teve um índice de 5%, seguido de deformação excessiva (3%) e dos problemas nos aparelhos de apoio (3%). A soma das demais manifestações patológicas alcançou um índice de 7%.

² tais como o H₂S, SO₂ e NO_x suspensas em vapor d'água ou sob a forma de gases

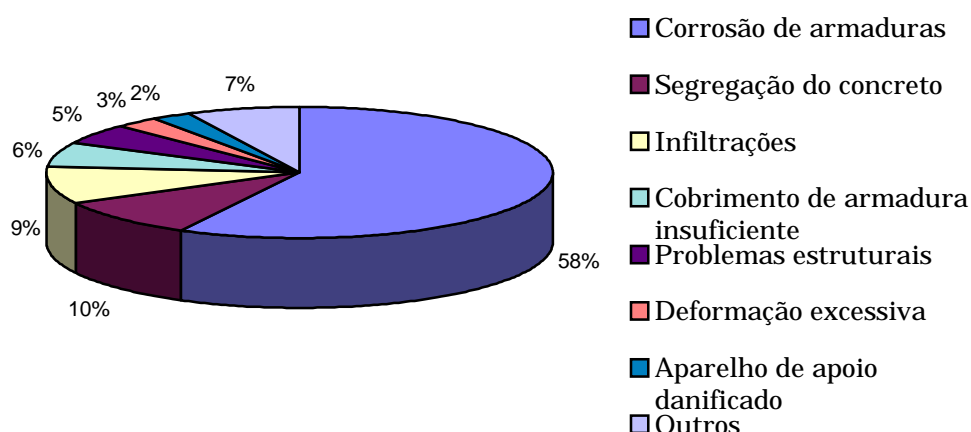


Figura 4.6 - Obras públicas: principais manifestações patológicas

Uma análise das figuras relacionadas com as manifestações patológicas nos diversos tipos de edificação mostrou que, independente da utilização destinada à obra, o fenômeno da corrosão de armaduras apareceu com índices extremamente altos. Alguns fatores podem contribuir em conjunto ou isoladamente para o percentual observado, tais como:

- elevado grau de agressividade ambiental, em virtude da ação dos íons cloreto que estão presentes na atmosfera altamente agressiva da região;
- deficiências de planejamento/projeto, como a especificação de cobrimentos das armaduras insuficientes aliado a um concreto com alta porosidade e de baixas resistências mecânicas ($\bullet 15$ MPa);
- utilização de uma concepção arquitetônica e detalhamento estrutural que não privilegiam os aspectos de durabilidade, como no caso de obras que apresentam pilares sacados do restante da estrutura, favorecendo a ação dos agentes de degradação;
- emprego de práticas executivas equivocadas, como o adensamento incorreto, onde a agulha do vibrador encosta na armadura, ocasionando uma separação entre a mesma e o concreto, facilitando a penetração dos agentes agressivos; e
- ocorrência de manifestações patológicas já existentes (como segregação do concreto e ninhos de concretagem), que contribuem significativamente para que as armaduras tivessem reduzida a sua proteção física e química.

Logo após a corrosão de armaduras, verifica-se que as fissuras decorrentes das movimentações estruturais, segregação do concreto e a ausência e/ou insuficiência de detalhes construtivos são os fatores causadores de um elevado percentual de manifestações patológicas. Algumas considerações podem ser feitas com relação às origens de tais tipos de ocorrência, tais como:

- a) Etapa de planejamento/projeto:
 - armaduras ou ancoragens insuficientes; e
 - transmissão inadequada de esforços.
- b) Etapa de execução:
 - posicionamento incorreto das armaduras;
 - descuidos durante a concretagem; e
 - concreto produzido com resistência à compressão inferior à estabelecida em projeto.
- c) Etapa de utilização:
 - esforços não previstos.

Deve ser considerado o fato de que as fissuras provocadas por movimentação estrutural e a presença de ninhos de concretagem e/ou segregação do concreto, se não tratadas convenientemente, podem ser fatores importantes para o início do processo corrosivo (RAHARINAIVO at all, 1986; CEB, 1992), uma vez que são heterogeneidades na massa do concreto por onde os agentes agressivos podem penetrar com uma maior facilidade e rapidez à armadura, provocando a despassivação da mesma. Assim, o índice de corrosão encontrado pode ser agravado em virtude da presença de tais manifestações patológicas, pois são locais com uma alta tendência à ocorrência de tal fenômeno, principalmente se for levado em consideração o meio ambiente onde tais estruturas estão inseridas.

4.3 Em Função do Elemento Estrutural mais Afetado

Contabilizadas as manifestações patológicas, verificou-se onde as mesmas estavam distribuídas por elemento estrutural. No caso das obras residenciais, verificou-se que a maioria das manifestações patológicas ocorreram em pilares, com um índice de 70%, seguido de vigas (14%), lajes (10%), sapatas (4%), escadas (1%) e demais elementos (1%). A distribuição das manifestações patológicas por elemento estrutural para tal grupo de edificações está apresentada na Figura 4.7.

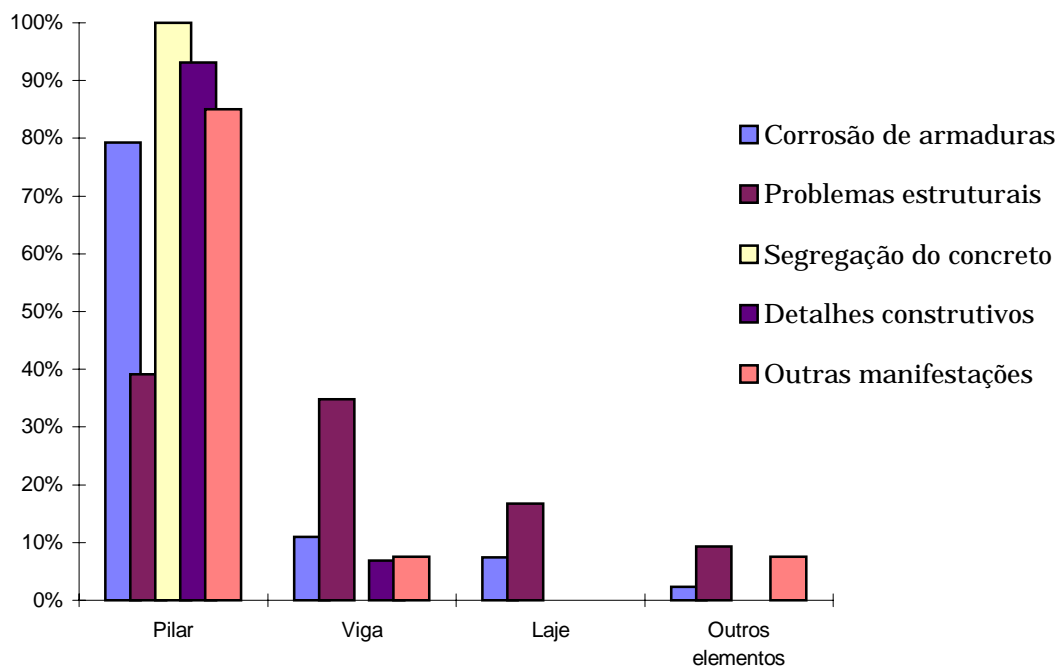


Figura 4.7 - Obras residenciais: elementos estruturais mais afetados

As principais manifestações patológicas que ocorreram em pilares foram a corrosão de armaduras (79%), segregação do concreto (100%), ausência e/ou deficiência de detalhes construtivos (93%) e problemas estruturais (39%). Para vigas, os percentuais maiores foram devidos aos problemas estruturais (35%), seguido da corrosão de armaduras (11%), enquanto que nas lajes os índices mais altos foram provocados por problemas estruturais (17%). Pode-se verificar que o somatório dos danos em um elemento estrutural ultrapassa o valor de 100%, pois na grande maioria dos casos analisados as manifestações patológicas ocorriam de forma simultânea nos diversos tipos de elementos estruturais³.

Com relação às obras comerciais, as vigas foram os elementos estruturais mais atingidos (37%), seguidas pelos pilares (30%) e pelas lajes (27%). De acordo com a Figura 4.8, verificou-se que nos pilares os problemas originários dos problemas estruturais atingiram um valor de 43%, seguidos das fissuras causadas pela ação do fogo (42%) e pelo fenômeno da corrosão das armaduras (41%).

Nas vigas, a ausência e/ou deficiência de detalhes construtivos atingiu um valor excessivamente alto (73%), seguido de problemas estruturais (37%), corrosão das armaduras (32%) e deformação excessiva (28%). Tais manifestações patológicas têm uma íntima ligação entre si, pois são estágios intermediários que podem levar à ocorrência da corrosão de armaduras.

³ como em casos de pilares que apresentam segregação do concreto juntamente com o problema da corrosão de armaduras, fissuras por deficiências de detalhamento e/ou solicitações mecânicas não previstas

Pode ser observado que nas lajes houve uma grande quantidade de casos relacionados a deformação excessiva (58%), seguidos por fissuras devido à ocorrência de incêndio (38%) e a corrosão de armaduras (24%).

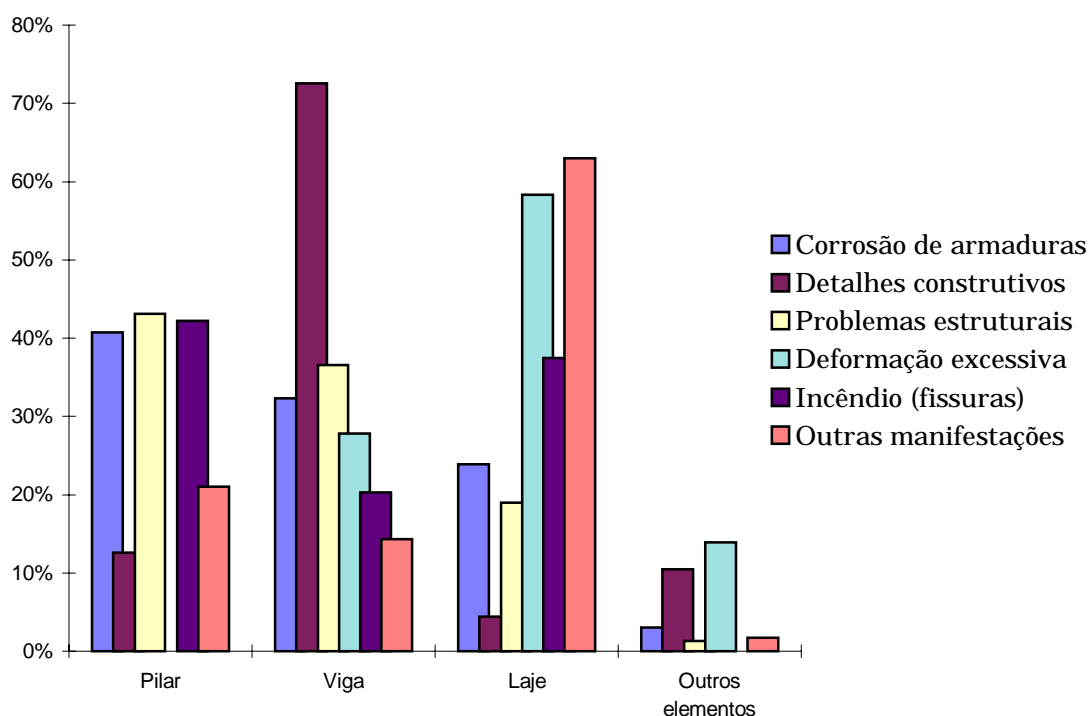


Figura 4.8 - Obras comerciais: elementos estruturais mais afetados

Nas obras industriais os pilares apareceram como os elementos estruturais mais suscetíveis à ocorrência de danos, apresentando um índice de 66%, seguido pelas vigas (24%) e lajes (5%). Através da distribuição das manifestações patológicas nos diversos tipos de elementos estruturais (Figura 4.9) verifica-se que os pilares foram os elementos que apresentaram um efeito combinado de uma grande quantidade de danos, onde os mais incidentes foram devidos à desagregação do concreto (92%), seguido por um cobrimento insuficiente da armadura (90%), ataque químico (81%) e corrosão de armaduras (63%). Nas vigas os maiores índices foram atribuídos a corrosão de armaduras (31%), seguido pelos problemas estruturais (21%) e demais manifestações (12%). Nas lajes os problemas mais significativos foram devidos aos problemas estruturais (71%), seguidos de cobrimento insuficiente da armadura (10%) e as demais manifestações patológicas, que atingiram um índice de 33%.

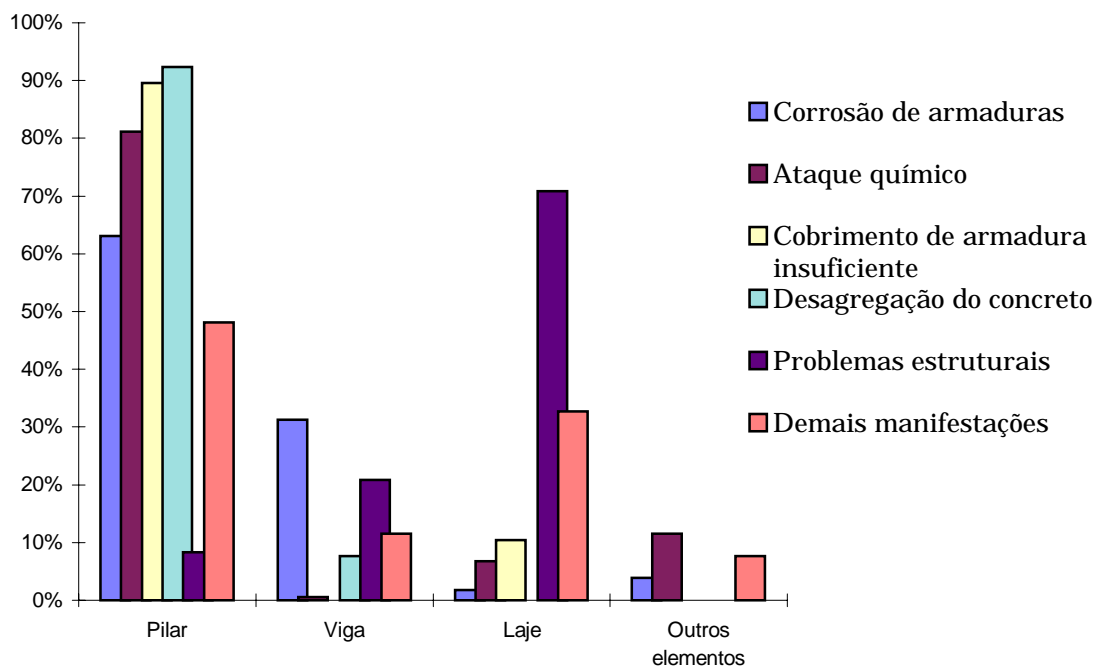


Figura 4.9 - Obras industriais: elementos estruturais mais afetados

Nas obras públicas mais uma vez os pilares foram os elementos estruturais mais afetados (54%), seguido pelas lajes (36%), vigas (9%) e outros elementos (1%). Na Figura 4.10 pode-se observar a distribuição das manifestações por elemento estrutural.

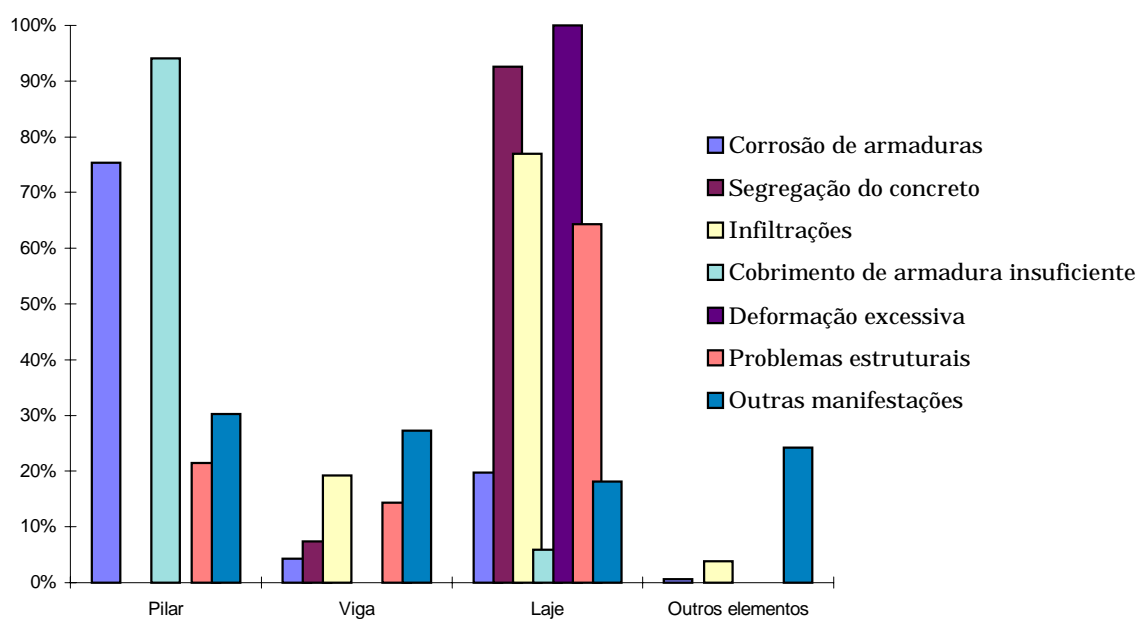


Figura 4.10 - Obras públicas: elementos estruturais mais afetados

Através de uma análise da Figura 4.10 pode-se tecer os seguintes comentários:

- em pilares houve um índice de 94% para o cobrimento de armadura insuficiente, seguido pela corrosão de armaduras (75%), dos problemas estruturais (21%) e a presença de outras manifestações (30%);
- nas vigas houveram problemas relacionados a infiltração (19%), problemas estruturais (14%), segregação do concreto (7%), corrosão de armaduras (4%) e as demais manifestações (27%);
- verificou-se que, dentro do grupo das obras públicas, o elemento que mais apresentou problemas de degradação foi a laje. A totalidade dos problemas de deformação excessiva (100%) ocorreu em tal elemento estrutural, juntamente com um alto índice de segregação do concreto (93%), a ocorrência de infiltrações (77%) e problemas estruturais (64%).

4.4 Considerações a Respeito das Manifestações Patológicas

Pode-se observar através das figuras anteriores que os pilares foram os elementos estruturais que apresentaram um maior grau de degradação. As manifestações patológicas ocorreram de maneira simultânea em tal elemento, tais como a corrosão de armaduras, segregação do concreto e a presença de fissuras, mostrando que existe um inter-relacionamento de caráter evolutivo entre danos de menor grau⁴ até aqueles com graus elevados de degradação, que podem levar o elemento atingido a estados limites últimos de segurança estrutural.

Vale salientar que, nas obras residenciais, todas as ocorrências de segregação do concreto ocorreram em pilares. Muito provavelmente esse tipo de dano tenha um índice de ocorrência bem maior que o registrado, pois a maior parte das vistorias às obras foi realizada em elementos que apresentavam algum tipo de revestimento. Tal forma de degradação está relacionada principalmente a dois problemas que ocorrem durante a concretagem dos pilares: primeiramente há uma dificuldade de vibrar o concreto logo após o lançamento, em virtude do comprimento limitado da agulha do vibrador. Além disso, existe a segregação que ocorre no pé do pilar observada logo após a concretagem, devido ao excesso de altura de lançamento e à absorção pelas fôrmas de uma grande quantidade da pasta lançada, não conferindo ao concreto a homogeneidade devida naquele trecho.

⁴ admite-se que danos de menor grau sejam aqueles referentes às manifestações patológicas que, em um primeiro momento, não venham a causar efeitos significativos em termos de segurança estrutural nas edificações.

Aliado a tal fato deve-se ressaltar a grande densidade de armadura que geralmente ocorre nos pilares, principalmente no trecho entre o térreo e o primeiro e/ou segundo pavimentos. No momento do detalhamento das armaduras de tais elementos devem ser adotados certos procedimentos a fim de garantir que as peças possam ser concretadas de maneira eficiente, evitando assim o surgimento de problemas de segregação e/ou ninhos de concretagem nas mesmas, garantindo assim uma compacidade satisfatória para tais elementos.

Observa-se que, no caso específico das obras industriais, a corrosão de armaduras, o cobrimento insuficiente e a ocorrência de ataques químicos em elementos estruturais atingiram valores muito altos. Nesse tipo de edificação, onde o concreto está submetido à ação de uma grande quantidade de agentes agressivos, principalmente durante os processos de armazenagem e processamento das matérias-primas, pode-se notar o efeito evolutivo das manifestações patológicas. Um elemento de concreto localizado em um ambiente onde há uma ação bastante significativa de tais agentes de degradação, onde não se teve o cuidado de garantir uma espessura mínima de cobrimento da armadura aliada à utilização de um concreto com alta permeabilidade⁵, pode apresentar problemas de desagregação (ataque por agentes agressivos expansivos) e, posteriormente, o fenômeno da corrosão de armaduras.

Nas vigas a grande maioria dos danos foram provocados pela corrosão das armaduras, seguido de problemas estruturais e da ausência e/ou deficiência de detalhes construtivos. Assim como no caso dos pilares, devem ser tomadas certas providências nas etapas de planejamento/projeto e execução desse tipo de elemento para que se minimize os efeitos de tais manifestações patológicas, como a especificação de um cobrimento adequado das armaduras, uma avaliação correta do estado de tensões a que tal componente vai estar submetido e a definição de uma concepção estrutural e detalhamento que privilegiem os aspectos de durabilidade.

Nas lajes ocorreram diversos tipos de danos. Nas obras públicas constatou-se o elevado número de problemas oriundos de sobrecargas em tais elementos, muito provavelmente devido à grande quantidade de cargas permanentes que são colocadas sobre os mesmos. Tais cargas, que têm um valor muito superior àqueles estabelecidos em projeto, ocasionam deformações excessivas, dando origem a toda uma variedade de manifestações patológicas nesses elementos.

O excessivo índice de segregação do concreto encontrado nas lajes é um fator que pode ter contribuído para a diminuição da capacidade resistente das mesmas, visto que são peças com espessuras extremamente reduzidas e qualquer descontinuidade que ocorra pode provocar infiltrações, com

⁵ alta relação a/c juntamente com o emprego de procedimentos inadequados de cura

consequente diminuição da resistividade do concreto e, posteriormente, o fenômeno da corrosão de armaduras.

Independente do tipo de elemento estrutural afetado, verificou-se que a grande quantidade de danos que ocorrem nas edificações poderia ser minimizada se houvesse um controle de qualidade efetivo durante o processo construtivo, aliado a um programa de manutenção preventiva das estruturas. Geralmente as empresas que trabalham com recuperação estrutural só são chamadas quando o dano atinge um grau elevado de degradação, onde não há muita coisa a ser feita. A implantação de um programa de manutenção rotineira, intercalada com inspeções detalhadas, é de importância preponderante para se avaliar o desempenho da estrutura no decorrer do tempo, nas condições de utilização previstas, garantindo assim que ela permaneça acima de um patamar mínimo de desempenho durante a sua vida útil.

5. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS FORMAS DE RECUPERAÇÃO

Após uma análise das principais manifestações patológicas que ocorreram nas edificações, foram feitas algumas considerações com relação aos métodos de recuperação adotados nas mesmas. Desta forma, os resultados referentes às análises das formas de recuperação empregadas em todos os tipos de obras podem ser observados na Figura 5.1.

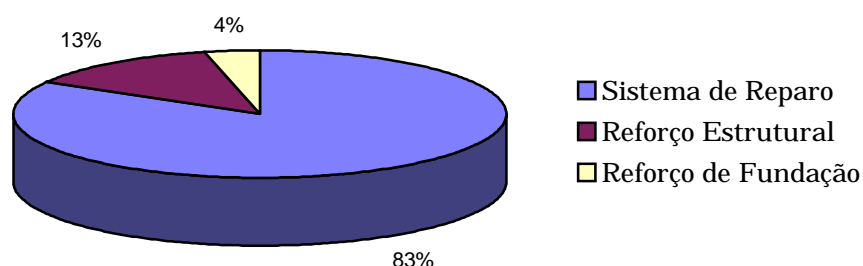


Figura 5.1 - Métodos de reabilitação empregados nas estruturas

Através da análise da Figura 5.1 pode-se verificar que a maioria dos problemas patológicos são corrigidos com o emprego de sistemas de reparo (83%), seguido do emprego de técnicas de reforço estrutural (13%) e de reforços de fundação (4%).

Assim, os tipos de recuperação foram catalogados em função do tipo de obra, sendo a distribuição de tal informação mostrada na Figura 5.2.

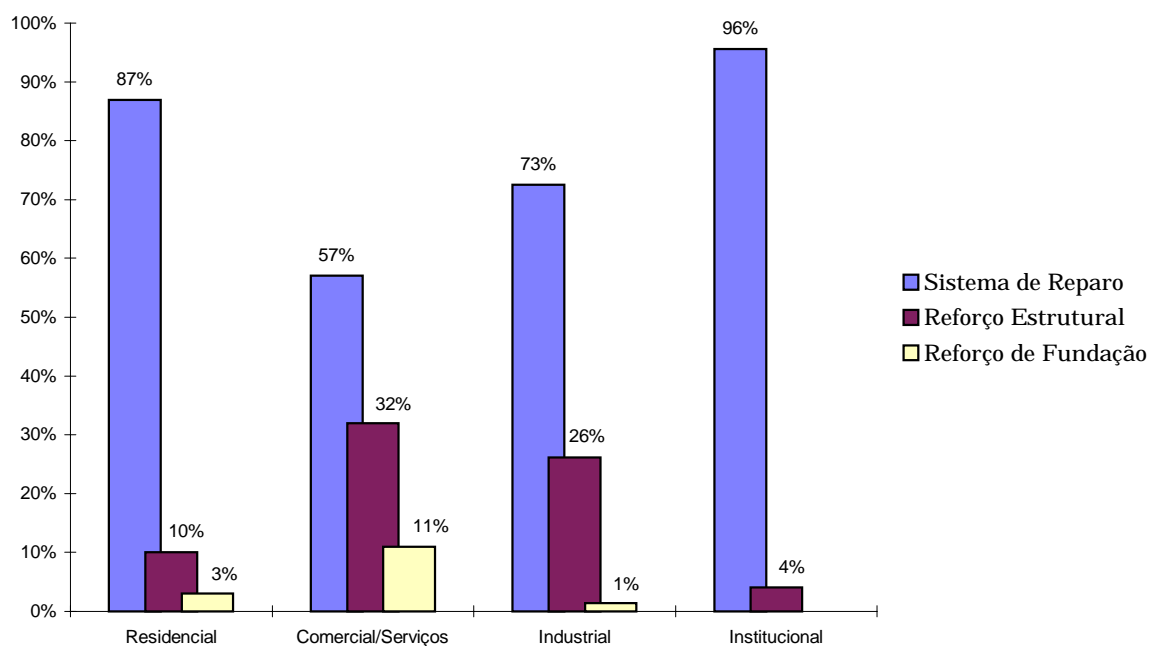


Figura 5.2 - Distribuição das formas de recuperação nos diferentes tipos de obras

Pode-se verificar que, independente do tipo de utilização da obra, os sistemas de reparo foram os responsáveis pela grande maioria dos métodos de intervenção nas estruturas, seguido do reforço estrutural. Tal constatação pode ser explicada pelo efeito evolutivo característico das diversas manifestações patológicas, pois geralmente os reparos são empregados quando o dano está restrito à pequenas extensões. Os reforços são empregados quando o dano já atingiu um nível tal que comprometa a segurança estrutural, onde o emprego dos sistemas de reparo seria tecnicamente desaconselhável.

5.1 Edificações Residenciais: Métodos de Intervenção Empregados

De acordo com a Figura 5.3 pode-se observar que um grande percentual dos sistemas de reparo utilizados nas edificações residenciais foi devido ao emprego da argamassa epóxi (55%), seguido pela injeção de resina epóxi (31%); o emprego de pinturas superficiais de proteção ao concreto obteve um percentual de 5%. Observa-se a baixa incidência de uso do graute convencional e da colagem com resina epóxi, com um índice de 2% para ambos.

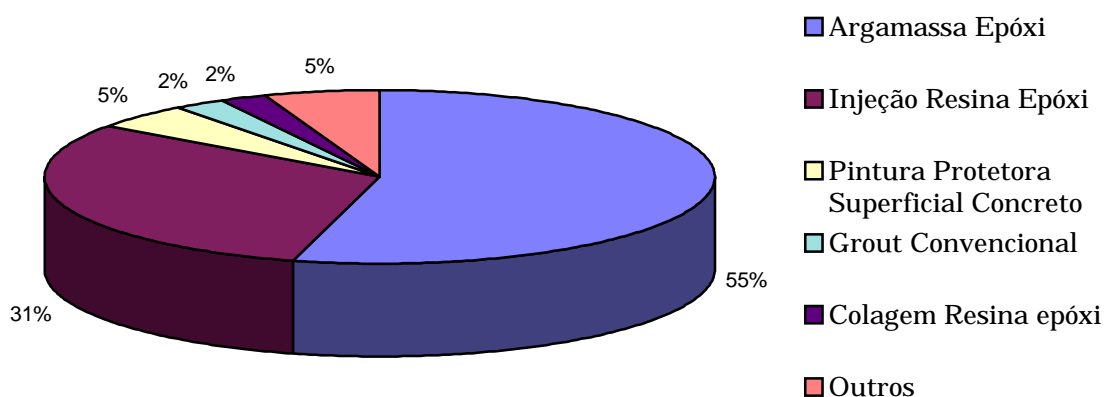


Figura 5.3 - Edificações residenciais: sistemas de reparo mais empregados

As argamassas epóxi têm uma grande utilização nas obras residenciais, principalmente para a correção dos problemas relacionados à corrosão das armaduras. São geralmente aplicadas em pequenas superfícies onde há uma nítida ação do processo corrosivo, com destacamento do concreto e a exposição da armadura. Assim, tais argamassas são utilizadas para proteger a armadura e reconstituir a seção da peça, devolvendo o monolitismo ao elemento.

Já as injeções epóxi são empregadas para a correção dos diversos tipos de fissuras que ocorrem nos elementos, sendo provocadas principalmente pela ação de movimentações de ordem estrutural. Tal técnica é muito utilizada, mas certos cuidados devem ser tomados, principalmente no que diz respeito à aplicação do produto, a fim de que a dosagem dos componentes da injeção seja adequada e o pot-life⁶ do produto seja obedecido.

Observa-se o baixo índice atribuído às pinturas utilizadas para proteção do concreto. O ideal é que, no final de cada operação de reparo, se aplique uma camada de pintura de base epóxi, a fim de minimizar a penetração de agentes agressivos para o interior do reparo.

Segundo HELENE (1992), as argamassas epóxi são compostos que possuem uma elevada resistência mecânica e química, com o seu emprego sendo recomendado quando a estrutura está localizada em um meio ambiente altamente agressivo ou onde há uma exigência maior do desempenho dos reparos, reforços e proteções. Sua aplicação fica restrita a pequenos volumes e espessuras, em virtude da sua alta aderência ao substrato e o baixo módulo de deformação longitudinal (baixas retrações).

⁶ Pot-life, ou tempo para aplicar o adesivo, é o prazo total, após a mistura dos componentes, em que o material ainda adere (ARANHA, 1994)

Além disso, tais sistemas têm a propriedade de combater as expansões das reações residuais de oxidação, que são impossíveis de serem evitadas, sobretudo nas armaduras das peças mais densamente armadas (pilares, por exemplo) que podem provocar microfissurações na argamassa de cimento, reiniciando o ataque dos agentes de degradação.

Outro fato que deve ser levado em conta é a facilidade de aplicação de tal tipo de sistema de reparo. Após a mistura cuidadosa dos componentes (resina + endurecedor) pode-se aplicar o produto com uma colher de pedreiro, tendo-se apenas o cuidado de preencher toda a área a ser reparada.

Sob o item outros foram agrupados os reparos realizados através de colmatagem com argamassas expansivas, injeção de base graute, pinturas superficiais de base epóxi, microconcretos e argamassas projetadas, tratamento de junta de dilatação, impermeabilização, substituição de aparelhos de apoio e recomposição do capeamento.

Os reforços estruturais empregados nas edificações residenciais são mostrados na Figura 5.4.

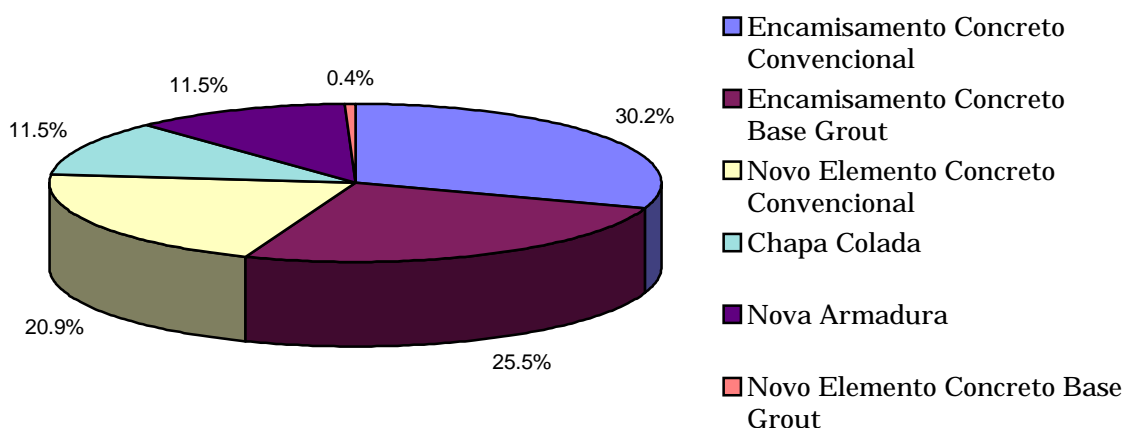


Figura 5.4 - Edificações residenciais: reforços estruturais mais empregados

Constata-se que a grande maioria dos reforços é feita através do encamisamento das peças com concreto convencional, com um índice de 30,2%; logo após vem o encamisamento com concreto de base graute (25,5%), seguido da inclusão de um novo elemento em concreto convencional (20,9%). O emprego da chapa colada e o acréscimo da área de aço nos elementos atingiram um índice de 11,5% cada um e a confecção de novos elementos, utilizando-se um concreto de base graute, teve um índice extremamente baixo (0,4%).

O encamisamento com de concreto convencional é bem utilizado em função das vantagens que o mesmo possui, principalmente as econômicas, em relação

aos outros tipos de reforços. Tal sistema é geralmente utilizado quando o nível de corrosão de armaduras em pilares chega a valores altos, havendo a necessidade premente de restabelecer o monolitismo do elemento. Porém tal técnica apresenta principalmente três inconvenientes:

- o aumento da seção do elemento estrutural, podendo causar grandes transtornos, principalmente em pilares de grandes dimensões;
- há a possibilidade de ocorrência do fenômeno da retração no sentido longitudinal que ocorre em pilares, que podem gerar tensões na interface da aderência entre o concreto novo e o velho; e
- há de se considerar ainda a dificuldade existente durante a execução do reforço, principalmente no momento do lançamento do concreto.

Em contrapartida, o encamisamento de elementos com concreto de base graute é uma excelente alternativa tecnicamente, porém torna-se extremamente inviável devido ao elevado custo do material, quando empregado em grandes volumes. Contudo, em tal tipo de edificação, tal forma de reforço teve um alto índice de utilização muito provavelmente em função da necessidade urgente de resistências iniciais elevadas nos concretos dos pilares, que apresentavam um nível crítico de deterioração.

O emprego de novos elementos em concreto convencional ocorreu principalmente pelo acréscimo de vigas e pilares a uma edificação. Tal alternativa se fez necessária em virtude das grandes deformações que ocorreram em função de sobrecargas em lajes, tendo-se que moldar novas vigas para diminuir os vãos das mesmas. Além disso, certos pilares apresentavam um nível crítico de degradação, onde a corrosão de armaduras praticamente deteriorou todo o aço existente nos mesmos, provocando elevadas expansões com consequente desagregação do concreto. Tais pilares não tinham nenhuma condição de absorver qualquer tipo de esforço, fazendo com que houvesse a necessidade de criação de novos elementos para absorver os mesmos.

Observou-se que a utilização de chapa colada ocorreu em toda a sua totalidade em vigas de concreto, devido a problemas relacionados a esforços de flexão; a colocação de novas armaduras ocorreu em uma grande maioria nos pilares, principalmente em função da diminuição da área de aço em virtude da ação do processo corrosivo. Nestes casos, se uma barra de um elemento tiver sua seção reduzida de uma determinada percentagem - 20% da armadura principal - sua substituição se torna obrigatória.

Através de uma análise da Figura 5.5 pode-se notar que a grande maioria dos reforços de fundações foram executados através do encamisamento dos elementos com concreto convencional (73%), seguido pela execução de estacas raiz (23%) e injeção de nata de cimento (4%). Todas essas formas de recuperação estão diretamente ligadas a uma má prospecção geotécnica do subsolo,

desconsiderando os efeitos dos empuxos laterais em estacas devido a uma camada de argila orgânica mole predominante na cidade de Recife, que podem causar rupturas nas mesmas; no caso das fundações superficiais, há uma inadequada estimativa da resistência do terreno, onde são construídas edificações sobre sapatas que invariavelmente apresentam o problema de recalque diferencial.

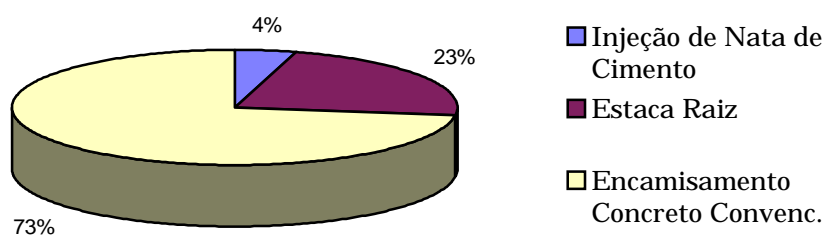


Figura 5.5 - Edificações residenciais: reforços de fundação mais empregados

5.2 Edificações Comerciais/Serviços: Métodos de Recuperação Empregados

A distribuição dos sistemas de reparo mais utilizados nas edificações comerciais está apresentada na Figura 5.6.

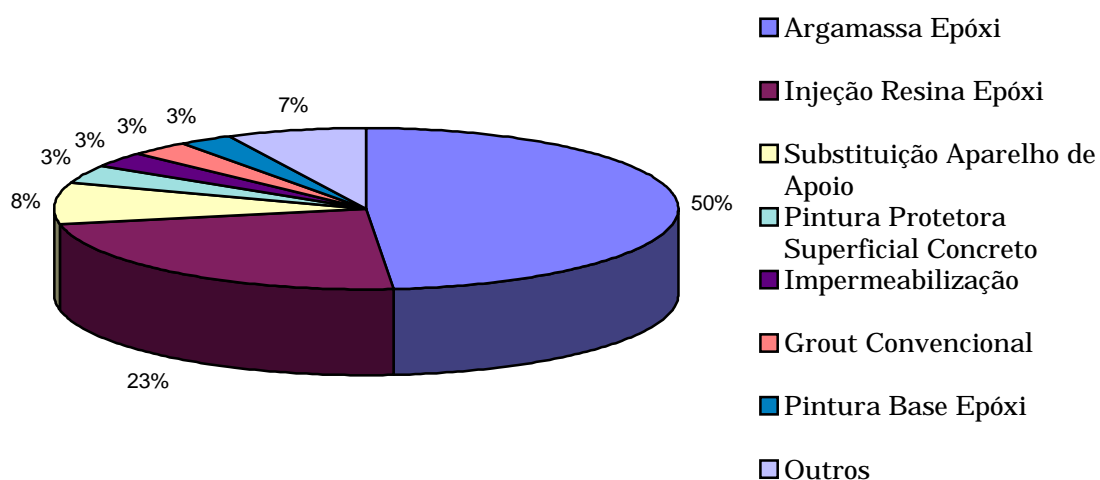


Figura 5.6 - Edificações comerciais/serviços: sistemas de reparo mais empregados

Assim como pode-se verificar para o caso das edificações residenciais, os produtos com base epoxídica foram largamente empregados nas obras comerciais. A argamassa epóxi e a injeção de resina epóxi foram os sistemas mais adotados na recuperação de estruturas, apresentando um percentual de 50% e 23% de utilização, respectivamente. Logo após houve a necessidade da substituição de aparelhos de apoio (8%), seguido da utilização de uma pintura protetora superficial do concreto (3%), impermeabilização (3%), o emprego de graute convencional (3%) e uma pintura protetora de base epóxi (3%). No item outros estão agrupados os seguintes sistemas de reparo: colmatagem com argamassa expansiva, argamassa expansiva projetada, ancoragem epóxica, tratamento de juntas de dilatação e graute projetado, que apresentaram índices de ocorrências individuais menores que 2%.

A grande parte dos sistemas epóxi foram utilizados em pilares, vigas e lajes que apresentavam o problema da corrosão de armaduras, juntamente com as fissuras provocadas pelas movimentações estruturais⁷ e deformações excessivas. Os aparelhos de apoios foram colocados tanto em função de problemas de deterioração dos mesmos quanto na verificação da não existência de tal tipo de elemento nos dentes Gerber, causando fraturas e esmagamento nos elementos estruturais.

Os reforços mais utilizados nas edificações comerciais/serviços foram (Figura 5.7):

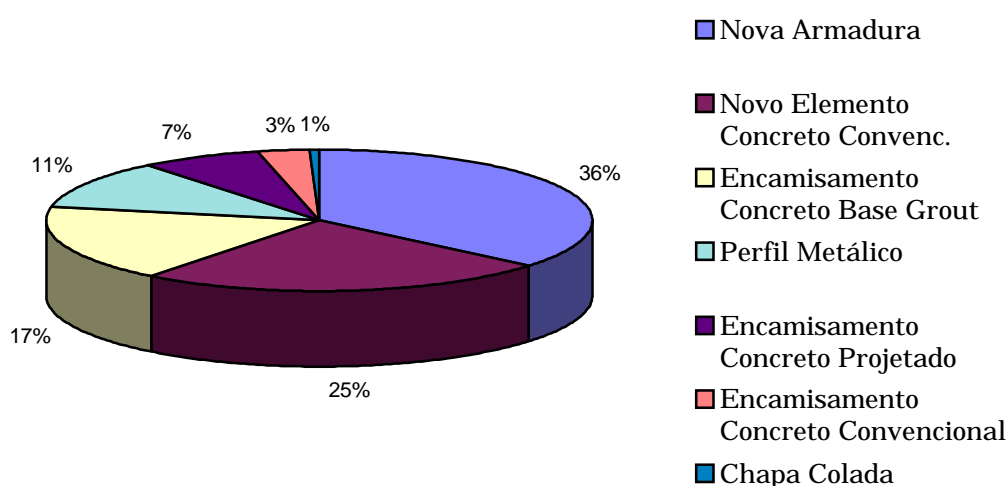


Figura 5.7 - Edificações comerciais/serviços: reforços estruturais mais empregados

⁷ conforme descrito no item 3.2.5.1

- colocação de uma nova armadura nos elementos estruturais (36%), devido à redução de seção de aço provocada pela corrosão de armaduras, juntamente com a exigência de aumento da capacidade resistente dos elementos;
- execução de novos elementos em concreto convencional (25%), necessários em função da reduzida capacidade portante dos elementos pré-dimensionados, que ocasionavam deformações excessivas principalmente em vigas e lajes;
- perfis metálicos (11%) e chapa colada (1%), que foram aplicados em vigas que deformaram-se por esforços de flexão e em lajes que apresentaram deformações excessivas provocadas por incêndios, a fim de restaurar a sua condição inicial de estabilidade; e
- encamisamento dos diversos tipos de elementos, sendo usados concretos com base graute (17%), concretos projetados (7%) e concretos convencionais (3%). Tais métodos de reforço foram utilizados para eliminar os problemas gerados pela corrosão de armaduras e pelos problemas de ordem estrutural que ocorreram nas peças. Pode-se verificar que os elementos que apresentavam um nível mais crítico com relação aos processos de degradação foram reparados com os concretos projetados e base graute, em função da necessidade da obtenção de concretos com altas resistências iniciais, e aqueles que apresentavam um nível intermediário de dano eram encamisados com o concreto convencional.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 5.2, a maior quantidade de problemas em fundações ocorreu neste tipo de edificação, com um índice de 11%. As formas de reforço empregadas para solucionar tais problemas podem ser observadas na Figura 5.8.

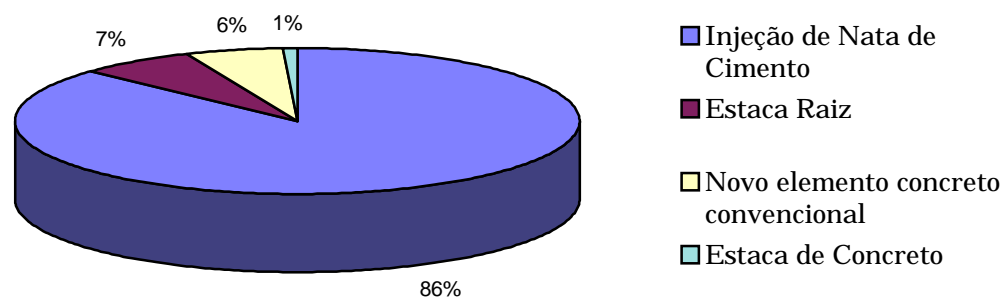


Figura 5.8 - Edificações comerciais/serviços: reforços de fundação mais empregados

O elevado percentual relativo ao emprego de injeção de nata de cimento no subsolo (86%) foi devido a uma tentativa de melhorar o mesmo sob as fundações em sapatas, aumentando a sua capacidade resistente através de uma melhor compactação. As estacas raiz (7%) foram empregadas para minimizar os efeitos de recalques diferenciais que ocorreram em pilares e os novos elementos de concreto convencional (6%) se fizeram necessários para minimizar os efeitos de sobrecarga que ocorriam em grupos de sapatas.

5.3 Edificações Industriais: Métodos de Recuperação Adotados

Nas edificações industriais, verificou-se que existe uma diferença entre os métodos de correção empregados na reabilitação das estruturas. Na Figura 5.9 pode-se verificar que, dentre os diversos sistemas de reparo existentes, a grande maioria de danos foram recuperados com o emprego de graute convencional (86%), seguido da argamassa epóxi (6%), imprimação das ferragens com resina epóxi (2%), injeção de resina epóxi (2%) e argamassa epóxi estruturada por tecido de vidro (2%). O somatório das seguintes formas de reparo deu origem a categoria outros, que apresentou um índice de 2% de ocorrência: impermeabilização, pintura de base epóxi, tratamento de juntas de dilatação e injeção de graute.

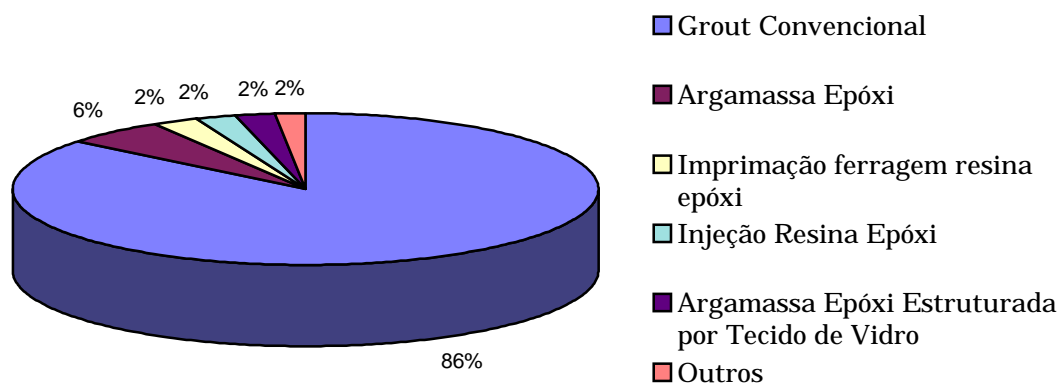


Figura 5.9 - Edificações industriais: sistemas de reparo mais empregados

O alto percentual de utilização do graute convencional como método de reparo se deve em virtude da grande incidência de corrosão de armaduras em vigas e pilares de tal tipo de obra. Na maioria das vezes as peças apresentavam-se extremamente danificadas, havendo a necessidade imediata de se ter uma

reconstituição da seção do elemento estrutural. Além disso, o método foi escolhido a fim de se evitar paradas extremamente longas nos equipamentos para que os trabalhos de recuperação fossem realizados satisfatoriamente, em função do desenvolvimento de altas resistências iniciais que esse tipo de reparo oferece.

Outro tipo de vantagem desse sistema de reparo é a alta fluidez que o mesmo apresenta, aliado a uma boa aderência, o que o torna adequado para a aplicação em elementos densamente armados, como no caso de vigas e pilares.

As diferentes utilizações dos sistemas epóxi também foram aplicadas nas edificações industriais, chegando o seu somatório ao índice de 12%. As argamassas e as resinas epóxi foram empregadas em pequenos reparos, onde o dano foi detectado antes de chegar a comprometer a estabilidade estrutural do elemento; enquanto que as imprimações com resina epóxi e as argamassas estruturadas com tecido de vidro foram soluções especiais encontradas para casos de corrosão de armaduras e ataque químico.

Os tipos de reforços estruturais empregados nas obras industriais foram (Figura 5.10):

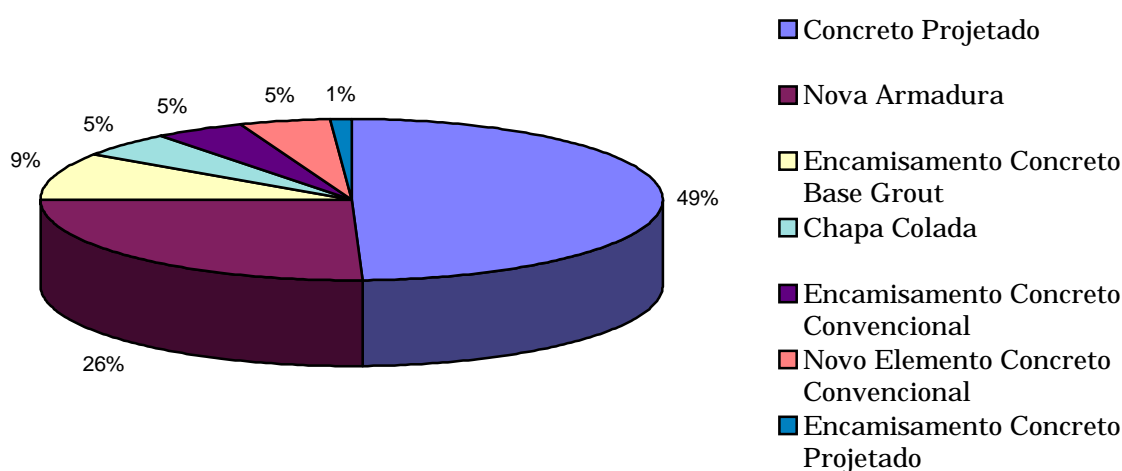


Figura 5.10 - Edificações industriais: reforços estruturais mais empregados

- concreto projetado (49%), que foi empregado em lajes e pilares que apresentaram deterioração elevada por ataque químico, juntamente com o problema da corrosão de armaduras. Tal tipo de reforço foi recomendado em função do elevado grau de degradação que tais elementos apresentavam, chegando a serem considerados pontos críticos da estrutura, recomendando-se uma recuperação de emergência para os mesmos.

- adição de nova armadura (26%), principalmente devido ao fato da redução substancial da área de aço dos elementos pela corrosão de armaduras e ataque químico;
- encamisamento realizado com concreto de base graute (9%), em concreto convencional (5%) e em concreto projetado (1%), mostrando que a maioria dos elementos estavam em estágios avançados de deterioração, tanto por corrosão de armaduras quanto por ataque químico ao concreto, havendo a necessidade imediata da reconstituições das seções dos mesmos;
- confecção de novos elementos em concreto convencional (5%), na maioria dos casos lajes - na sua superfície - e pilares - principalmente no seu terço inferior - degradados pela ação de agentes químicos; e
- chapa colada (5%), empregadas em reforço de vigas que apresentaram problemas de flexão com corrosão de armaduras.

Com relação aos reforços de fundação (Figura 5.11), os mesmos foram empregados para se sanar problemas de ataque químico na extremidade superior de estacas e/ou tubulões, através de encamisamento com concreto convencional (20%). Os produtos de origem química escorriam pela rede coletora localizada no solo corroendo o concreto das canaletas, atacando as fundações da estrutura.

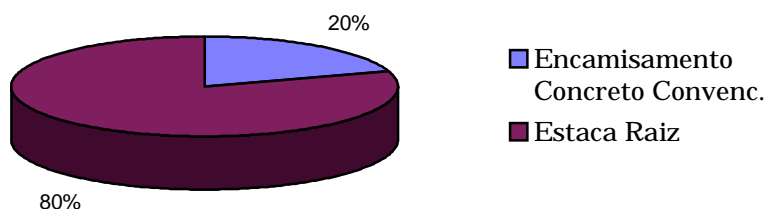


Figura 5.11 - Edificações industriais: reforços de fundação mais empregados

As estacas raiz (80%) eram empregadas para melhorar o solo, onde as fundações de galpões eram apoiadas sobre sapatas que recalçavam em virtude da baixa resistência existente no terreno.

5.4 Edificações Institucionais: Formas de Recuperação mais Empregadas

Nas obras públicas verificou-se que entre os sistemas de reparo mais adotados (Figura 5.12) os sistemas epóxi tiveram um alto percentual de utilização: as argamassas epóxi foram as mais empregadas (46%), seguido das injeções em resina epóxi (35%). Tais recuperações foram empregadas essencialmente em obras que apresentavam o problema de corrosão de armaduras.

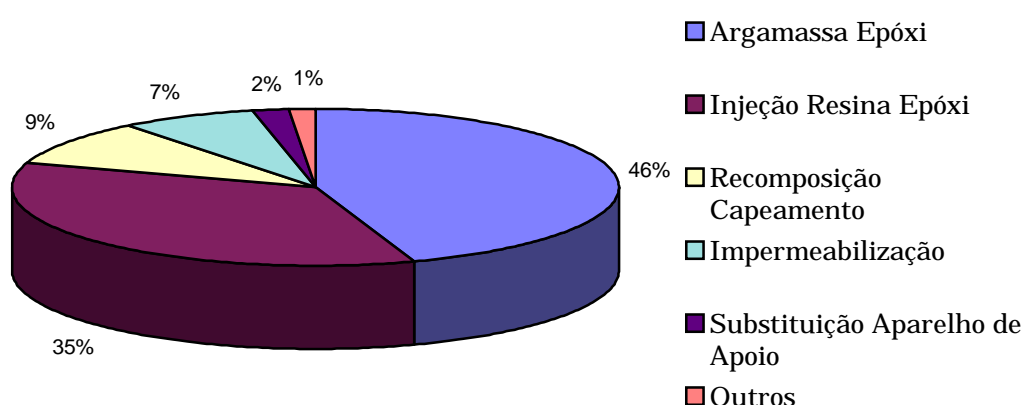


Figura 5.12 - Edificações institucionais: sistemas de reparo mais empregados

Logo após vieram a recomposição do capeamento (9%), a impermeabilização em lajes (7%) e a substituição de aparelhos de apoio (2%). Sob o item outros foram contabilizadas as seguintes formas de reparo: colmatagem com graute, colagem com resina epóxi, tratamento de juntas de dilatação e ancoragem epóxica.

As técnicas de reforço empregadas nas obras públicas podem ser observadas na Figura 5.13. Verifica-se que a utilização do concreto projetado juntamente com a colocação de uma nova armadura atingiram um valor de 54%, seguido do emprego de chapas coladas em vigas (18%), da execução de novos elementos em concreto convencional (14%) e do encamisamento com concreto convencional (14%). Vale salientar que tais dados não podem ser considerados significativos, em virtude do baixo índice de ocorrência de reforços em tal tipo de obra, porém são um bom indicador da utilização dos mesmos.

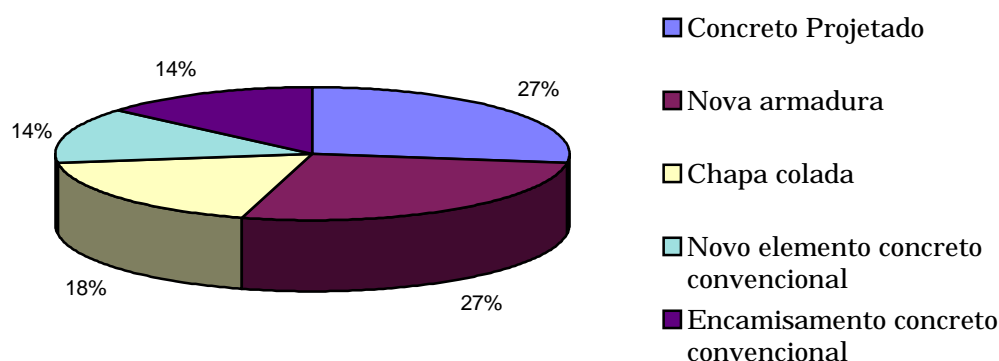


Figura 5.13 - Edificações institucionais: técnicas de reforço mais empregadas

No banco de dados pesquisado não foi encontrada nenhuma ocorrência de problemas de fundações neste tipo de obra.

5.5 Considerações Quanto aos Serviços de Recuperação Estrutural

Através de uma análise das figuras relativas ao emprego dos sistemas de reparo, pode-se constatar o emprego maciço de produtos com base epoxídica. As argamassas epóxi e as injeções de resina epóxi foram utilizadas na correção de problemas relacionados principalmente com a corrosão de armaduras e as fissuras ocasionadas pelas movimentações estruturais. Exceção é feita apenas nas obras industriais, onde o emprego do graute e do concreto projetado juntos atingiram um índice de 87%. Tal fato pode ser explicado pelo alto percentual de problemas relacionados com a corrosão de armaduras e ataques químicos em grande parte dos elementos estruturais, provocados pela alta agressividade existente nesse tipo de ambiente.

Existe contudo um fator agravante nesse quadro: tais danos só foram detectados quando o emprego de reparos superficiais e em pequenas dimensões já não eram suficientes para solucionar o problema, em virtude da extensão provocada pela degradação. Os elementos que eram atingidos por tais mecanismos de deterioração apresentavam um quadro típico: lascamento e expulsão do cobrimento do concreto, em função da expansão da armadura provocada pela corrosão e fissuração do próprio concreto ocasionada por reações químicas expansivas, levando à desagregação do mesmo.

Para que esse quadro não se repita em novos empreendimentos, maiores cuidados devem ser tomados com relação à manutenção das estruturas, a fim de que os fenômenos de degradação não venham a causar comprometimentos substanciais à segurança das peças. Além disso, vale ressaltar que as recuperações em concreto projetado e com groutes são mais onerosas que as demais, em virtude do preço elevado do produto e da mão-de-obra necessária à execução, que é mais especializada. Portanto, mantendo-se um programa de inspeção regular em tais obras, evita-se que os danos atinjam tais níveis, minimizando com isso os custos de recuperação.

Com relação aos métodos empregados para o reforço estrutural, observou-se que a grande maioria dos mesmos baseou-se no incremento das seções dos elementos, com a inclusão de novas armaduras aliado ao emprego do encamisamento das peças com algum tipo de concreto, seja ele convencional, de base graute ou projetado. Tais soluções se mostraram como sendo as mais adequadas para tais casos, onde a definição do tipo de concreto variou com a necessidade mais ou menos premente de reabilitação do elemento.

O emprego de chapas coladas e perfis metálicos ficaram restritos a poucos casos, por serem métodos que apresentam dificuldades técnicas e operacionais para a sua execução, exigindo uma equipe altamente qualificada aliada a equipamentos especiais para que os trabalhos realizados sejam satisfatórios.

Com relação aos esforços de fundação, cabe salientar que a maioria das manifestações patológicas e, conseqüentemente, as formas de recuperação que ocorrem nas fundações não são facilmente diagnosticadas, em função das mesmas encontrarem-se enterradas. Muito provavelmente aqueles danos verificados nas mesmas só puderam ser identificados quando os mesmos provocaram algum tipo de repercussão na estrutura, como fissurações devido a recalques, sobrecargas, etc. Assim, as análises foram realizadas com dados que podem não ser significativos do ponto de vista estatístico, mas são indicativos das formas mais utilizadas para sanar os problemas encontrados.

Assim, observou-se que as escolhas mais adotadas para estabilização de solos foram a injeção de nata de cimento e a estaca raiz. Tais métodos são considerados extremamente práticos, apresentando um custo baixo, fazendo com que a sua aplicação seja extremamente difundida.

Há de se considerar que tais métodos apresentam uma vantagem significativa: uma limitação das edificações é com relação ao seu pé direito, que não permitem a utilização de um bate estacas convencional para esse tipo de serviço. No caso das estacas raiz, o equipamento necessário para a execução das estacas é uma broca perfuratriz que tem reduzidas dimensões, sendo adequadas às circunstâncias locais; outra vantagem que o método apresenta é a sensível redução das vibrações no terreno, que agravariam significativamente o estado das fundações existentes.

Em função disso, observou-se a baixa incidência da cravação de estacas como alternativa para correção dos problemas, em função do alto custo das mesmas e das dificuldades executivas existentes.

A utilização do concreto convencional, tanto para a confecção de novos elementos de concreto quanto para o encamisamento das fundações existentes, tiveram como objetivo aumentar a seção dos elementos, principalmente as sapatas, minimizando assim os esforços resultantes sobre o terreno.

6. CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS TRABALHOS DE LEVANTAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E FORMAS DE RECUPERAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Ao se proceder uma análise comparativa entre os trabalhos realizados por DAL MOLIN (1988), ARANHA (1994), NINCE (1996) e o presente estudo, verificou-se que existem diferenças significativas entre os métodos de coleta e análise dos dados, tanto das manifestações patológicas empregadas nas estruturas de concreto armado quanto das formas de recuperação adotadas nas mesmas.

Em sua dissertação de mestrado, DAL MOLIN (1988) já colocava que deveria se estabelecer uma sistemática de catalogação e divulgação de dados de manifestações patológicas. Tal ponto de vista é compartilhado por ARANHA (1994), que mostra a dificuldade encontrada para o estabelecimento de uma análise comparativa entre os diversos tipos de trabalhos efetuados no Brasil, em função da adoção de diversos métodos para a coleta e apresentação dos resultados.

Com a finalidade de contribuir para tal sistematização, serão feitas considerações com relação aos trabalhos de levantamentos de manifestações patológicas e formas de reparo e reforço em estruturas de concreto armado realizados mais recentemente no Brasil. Cabe deixar bem claro que não se pretende questionar a validade de tais estudos, pois a importância dos mesmos é incontestável. Apenas serão realizadas algumas considerações para tornar mais claras as informações que tal tipo de trabalho pode oferecer.

Através de uma análise dos levantamentos efetuados por DAL MOLIN (1988) e NINCE (1996), observou-se que as autoras admitiram que cada tipo de problema, com a mesma causa, que ocorria em determinada edificação, era contabilizado apenas uma vez, independente do número de vezes e lugares diferentes em que se manifestava na mesma.

Ao contrário dos trabalhos citados acima, o levantamento realizado por ARANHA (1994) e o presente estudo levam em consideração a quantidade de danos que aparecem em cada obra individualmente, contabilizando-se cada uma das manifestações ocorridas em cada peça da estrutura como uma ocorrência.

Tanto uma quanto outra forma de se realizar os levantamentos são extremamente importantes, pois apresentam informações que devem ser levadas em consideração no momento da realização de uma análise global do quadro em questão. Cabe salientar que o objetivo de um trabalho de levantamento dessa natureza não é apenas uma simples análise de frequência entre os dados coletados, mas também observar como os mesmos estão distribuídos nas edificações e o grau de comprometimento das estruturas em função do nível de ocorrência de determinados processos de degradação. Com base em tais

informações, pode-se tomar as medidas corretivas adequadas para cada caso específico, com a minimização de custos e prazos para a sua execução.

Para explicar mais detalhadamente as diferenças existentes entre as formas de coleta e análise de dados, formulou-se um pequeno exemplo hipotético. Considere-se duas edificações que serão admitidas como sendo o universo total de amostras catalogadas, com a coleta de dados sendo realizada sob os dois pontos de vista mencionados anteriormente. Na edificação A foram anotados 9 ninhos de concretagem e verificou-se a ocorrência de apenas 1 ponto de corrosão de armaduras, enquanto que na edificação B observou-se a presença de 10 ninhos de concretagem e a ocorrência de 90 pontos de corrosão de armaduras. Com tais dados, tem-se condições de se realizar 2 tipos de análises:

Metodologia 1:

Ao se realizar a análise tomando-se como base a primeira forma de coleta, teria-se na edificação A a ocorrência de um caso de corrosão de armaduras e outro de ninhos de concretagem; na edificação B também teria-se um caso para corrosão e outro para ninhos de concretagem (Quadro 6.1).

Quadro 6.1 - Análise das manifestações patológicas: metodologia 1

	Edificação A	Edificação B	Total
Corrosão de Armaduras	1 caso	1 caso	2 casos
Ninhos de Concretagem	1 caso	1 caso	2 casos
Total	2 casos	2 casos	4 casos

Assim, pode-se dizer que 50% dos casos ocorreram pela incidência do processo corrosivo e que os restantes 50% eram devido à presença dos ninhos de concretagem, estando tais manifestações distribuídas uniformemente nas obras.

Metodologia 2:

Contudo, se a análise fosse feita considerando-se a quantificação das ocorrências por obra, teria-se a seguinte estatística (Quadro 6.2):

Quadro 6.2 - Análise das manifestações patológicas: metodologia 2

	Edificação A	Edificação B	Total
Corrosão de Armaduras	1 caso	90 casos	91 casos
Ninhos de Concretagem	9 casos	10 casos	19 casos
Total	10 casos	100 casos	110 casos

Desta forma:

Corrosão de Armaduras = $91/110 = 82,7 \%$

Ninhos de concretagem = $19/110 = 17,3 \%$

Além disso, pode-se afirmar que a maior concentração de manifestações ocorreu na edificação B, com 91% dos casos, enquanto que a edificação A teve apenas 9% do total de ocorrências.

Ambos os métodos estão corretos do ponto de vista da análise, porém as informações que interessam ao pesquisador com o levantamento têm que ser bem definidas na etapa de planejamento do estudo, a fim de se evitar que sejam coletados dados pouco relevantes ao objetivo do trabalho.

O primeiro método de análise mostra o percentual de edificações atingidas por uma manifestação ou um conjunto de manifestações patológicas simultaneamente, além de apresentar a distribuição espacial das obras atacadas, indicando onde há uma maior probabilidade de ocorrência de certas manifestações patológicas em determinadas regiões de uma área delimitada. Tal fato pode ser observado através do exemplo mostrado na Figura 6.1, composto por um universo total de 15 obras, com 4 obras apresentando a ocorrência de ninhos de concretagem, 8 com corrosão de armaduras e 3 apresentando as duas manifestações patológicas simultaneamente.

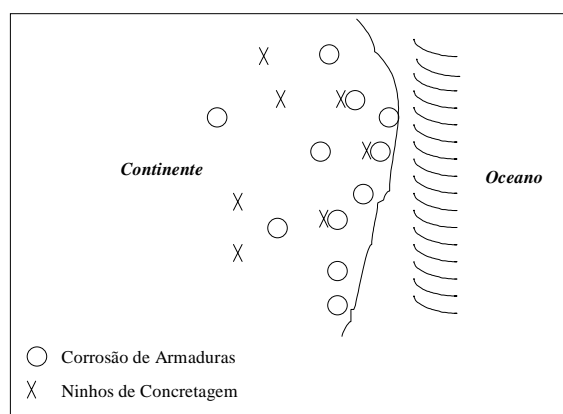


Figura 6.1 - Exemplo da distribuição espacial de obras com problemas patológicos

Verifica-se que a ocorrência de corrosão de armaduras está mais concentrada em uma área localizada próxima à orla marítima, onde a ação dos íons cloretos se dá mais intensamente, enquanto que a ocorrência de ninhos de concretagem se dá de forma uniforme, pois tal manifestação patológica está mais diretamente ligada a problemas de execução da estrutura de concreto, sendo a sua ocorrência independente de fatores ambientais.

Contudo, tal método não mostra a intensidade do dano relacionado a uma determinada manifestação patológica em uma obra ou conjunto de obras qualquer. Assim, como no caso 1 do exemplo fornecido (Quadro 6.1), poder-se-ia concluir que tanto a corrosão de armaduras quanto os ninhos de concretagem são danos que apresentam a mesma magnitude. Entretanto, como pode ser mostrado no Quadro 6.2, a corrosão de armaduras teve uma quantidade bem maior de pontos de incidência, mostrando que os esforços de recuperação devem ser direcionados primeiramente para a correção de tal dano.

Todavia, mesmo com todas as considerações mostradas anteriormente, as informações fornecidas por tal método são necessárias pois, além de mostrar o número de obras que apresentam algum processo de degradação, priorizam a intervenção em determinados problemas que ocorrem em zonas consideradas críticas, como no caso da corrosão de armaduras na área salina.

A segunda forma de análise mostra o grau de comprometimento de um conjunto de estruturas com relação a uma determinada manifestação patológica. Tal informação é de extrema importância, porque apresenta qual a manifestação (ou conjunto de manifestações patológicas) que está deteriorando a estrutura com uma maior intensidade. Assim, como na edificação B do caso 2 (Quadro 6.2), o esforço maior deve ser direcionado para sanar os casos de corrosão das armaduras, pois além de haver uma maior quantidade de pontos de ocorrência, tal fenômeno é considerado extremamente grave no que diz respeito às condições de durabilidade e vida útil de uma obra.

No caso do levantamento efetuado no estado de Pernambuco, verificou-se que a distribuição de certas manifestações patológicas deu-se de uma maneira uniforme dentro da área objeto do estudo. Porém, algumas manifestações ocorreram em pontos concentrados, evidenciando que naquele local existe uma maior probabilidade de ocorrerem danos em função de certos fatores (ambientais, de projeto, de execução, etc.), conforme pode-se observar na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Comparativo da distribuição das manifestações patológicas por tipo de obra no estado de Pernambuco

	Residenciais		Comerciais		Industriais		Públicas	
	2*	1**	2	1	2	1	2	1
Corrosão de Armaduras	60%	46%	28%	22%	74%	36%	59%	18%
Problemas estruturais	10%	11%	21%					
Fissuras	6%	9%	4%	7%			3%	3%
Segregação do concreto	4%	4%					10%	6%
Detalhes construtivos	3%	4%	17%	5%				
Concreto contaminado	3%	1%						
Desagregação do concreto	3%	0,5%			2%	2%		
Recalque	2%	3,1%						
Cobrimento insuficiente	2%	2%	4%	3%	8%	7%	6%	6%
Deformação excessiva			8%	10%				
Incêndio (fissuras)			6%	2%				
Sobrecarga			2%	4%			3%	3%
Ataque químico					12%	15%		
Flexão					1%	8%		
Concreto capeamento fraturado					1%	2%		
Infiltrações							9%	12%

* *corresponde à metodologia 2*

** *corresponde à metodologia 1*

Como exemplo, pode-se citar o caso da corrosão de armaduras em obras públicas. Na catalogação por ocorrência de pontos de manifestação em cada obra, o índice encontrado foi de 59% para tal problema. Contudo, quando foi contabilizada por obra, o valor cai para 18%, independente da quantidade de manifestações que o dano presente em cada obra. Isso quer dizer que a magnitude do problema pode variar desde um pequeno lascamento em um pilar do térreo em uma obra até uma ocorrência generalizada em pilares e vigas em outra obra pois, segundo o método de análise, em ambas as obras a corrosão de armaduras foi contabilizada como sendo apenas uma ocorrência. Assim, tal diferença entre os percentuais mostra que, dentro do universo total, existe um conjunto de obras onde o número de elementos estruturais atacados pela corrosão de armaduras foi alto, conforme pode ser verificado no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 - Obras institucionais afetadas pela corrosão de armaduras

OBRA	ENTORNO	USO	ELEMENTO	MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA	QUANTIDADE
A	Área Urbana	Institucional	Viga	Corrosão de Armaduras	4
B	Periferia Urbana	Institucional	Pilar	Corrosão de Armaduras	16
C	Periferia Urbana	Institucional	Laje	Corrosão de Armaduras	2
D	Área Urbana	Institucional	Laje	Corrosão de Armaduras	6
E	Água Doce	Institucional	Viga	Corrosão de Armaduras	1
F	Área Rural	Institucional	Viga	Corrosão de Armaduras	2
G	Área Rural	Institucional	Laje	Corrosão de Armaduras	24
H	Área Salina	Institucional	Pilar	Corrosão de Armaduras	106
I	Área Salina	Institucional	Marq.	Corrosão de Armaduras	1

Como pode ser visto, na obra H a quantidade de pontos de ocorrência da corrosão de armaduras em pilares foi superior à maioria das observações,

fazendo com que haja uma maior concentração de dados em uma única obra. Tal explicação justifica o fato de que a distribuição das manifestações se dá não só de forma aleatória dentro de um determinado conjunto de obras, mas que a quantidade de elementos estruturais atacados em cada obra também varia significativamente.

Tal comportamento também pode ser observado ainda com relação a corrosão de armaduras nas obras residenciais, comerciais/serviços e industriais. Nas obras residenciais, tal fenômeno se mostrou distribuído em 46% do total de obras pesquisadas, enquanto que, contabilizando-se uma ocorrência para cada ponto de corrosão de armaduras verificado em cada obra, o seu índice chega a 60%. Tal diferença pode indicar que existem pontos do Estado de Pernambuco que apresentam uma melhor condição para a iniciação e propagação do processo corrosivo, como no caso das estruturas localizadas na orla marítima.

Já no caso da ocorrência de sobrecargas, pode-se observar que não houve variações entre os resultados obtidos utilizando-se os dois métodos de análise, tanto para obras comerciais quanto para as obras públicas, mostrando que tal dano não se apresenta concentrado em pontos determinados da região, distribuindo-se aleatoriamente dentro da área pesquisada.

Com tais considerações pode-se afirmar que ambos os métodos de coleta e análise de dados são complementares, pois é de extrema importância se saber tanto em que áreas uma determinada manifestação patológica se mostra mais evidente, quanto o nível de degradação de um conjunto de obras em função de uma manifestação patológica ou da interação existente entre duas ou mais manifestações.

Assim, uma maior atenção deve ser dada ao fato da necessidade da sistematização dos trabalhos de levantamento das manifestações patológicas e formas de reparo e reforço nas estruturas, podendo-se enumerar algumas vantagens propiciadas pela realização de tal esforço:

- apresenta, dentro de uma determinada região objeto do levantamento, os pontos de concentração de certas manifestações patológicas;
- determina áreas prioritárias para o estabelecimento de cuidados especiais com relação à execução de estruturas novas, como redução da relação a/c e especificação de sistemas de proteção para as superfícies expostas de concreto localizadas em áreas altamente prejudiciais com relação à agressividade ambiental;
- direciona mais eficazmente onde devem ser alocados os recursos necessários para a reabilitação de estruturas; e
- canaliza os esforços relacionados às atividades de manutenção de estruturas novas e existentes, com o objetivo de minimizar os efeitos dos agentes que possam desencadear as diversas manifestações patológicas.

7. AVALIAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO

7.1 Introdução

Em virtude do alto índice encontrado para o problema da corrosão de armaduras no concreto nas estruturas localizadas no Estado de Pernambuco, realizou-se um estudo de caso para se verificar as possíveis causas de tal fenômeno patológico, suas manifestações típicas na Região e tentar identificar em quais das etapas do processo construtivo houveram falhas que propiciaram o desencadeamento do processo corrosivo.

Vale salientar que trabalhos dessa natureza são extremamente importantes e estão sendo realizados em grande quantidade ao redor do mundo (WEST, 1985; SHALABY e DAOUD, 1990; MAYS, 1992; NOVOKSHCHENOV, 1995), pois dão informações significativas sobre as influências dos efeitos climáticos e construtivos sobre a degradação das estruturas. No Brasil, estudos dessa natureza já foram conduzidos por FIGUEIREDO e ANDRES (1989), que realizaram inspeções em instalações industriais que apresentavam um elevado índice de agressividade devido à utilização de produtos químicos e por CASCUDO e REPETTE (1995), que realizaram um estudo em prédios residenciais que apresentavam corrosão de armaduras em estágios adiantados.

Face as considerações realizadas anteriormente, foi selecionada uma obra que foi objeto de uma vistoria, onde foram realizadas medidas de carbonatação, medidas de teores de cloretos e realizada uma inspeção visual nas fachadas e nas áreas comuns do edifício, objetivando-se catalogar todas as manifestações patológicas observadas na estrutura.

7.2 Descrição da Estrutura

7.2.1 Histórico

O edifício encontra-se localizado em uma área tipicamente urbana a aproximadamente 3 km do mar, em um cruzamento de duas ruas com grande movimento de veículos. Trata-se de uma estrutura composta por um pavimento de garagem, um pilotis com mezanino e 13 pavimentos tipo. A mesma é composta por elementos de concreto armado convencional (lajes, vigas e pilares), tendo um forma triangular em planta (Figura 7.1). O prédio é residencial, não tendo havido nenhuma mudança de uso pelos ocupantes da estrutura.

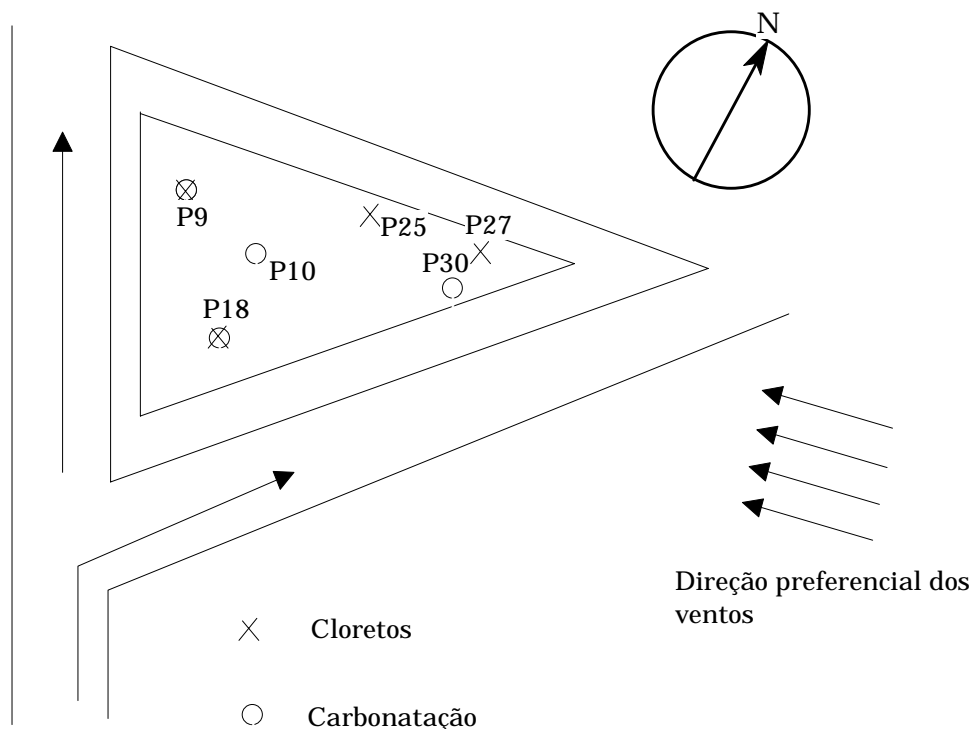


Figura 7.1 - Croquis em planta do prédio em análise, com a localização dos pontos de ensaio de cloretos e carbonatação

Durante a inspeção pode-se verificar que os pilares da edificação a partir do nível do mezanino são sacados da estrutura, revestidos por uma argamassa de cimento e saibro, com uma camada de pastilhas. No nível da garagem, os pilares não apresentam nenhum tipo de revestimento, apresentando apenas um tipo de pintura que tem função primordial de manter a estética, não se configurando em uma forma proteção ao concreto.

A vedação é composta por paredes de alvenaria com tijolos cerâmicos, tendo chapisco e emboço constituído por uma argamassa de saibro, com espessura bastante variável.

Segundo informações coletadas com o Síndico da edificação, as atividades de construção do edifício tiveram início em fevereiro de 1974, mas houveram interrupções consideráveis durante o seu período de construção. Em outubro do mesmo ano a construtora responsável pela execução do edifício entrou em processo de falência, deixando a obra apenas com as fundações concluídas e com os pilares da garagem concretados. Em maio de 1981 o imóvel foi comprado e a nova construtora deu continuidade a sua execução, com a conclusão do mesmo sendo realizada em setembro de 1983.

Em 1985, apenas dois anos após a entrega do edifício, realizou-se a primeira recuperação no mesmo, onde o laudo fornecido pela empresa que executou a inspeção na edificação identificou a presença de corrosão de

armaduras em diversos pilares e em grande parte dos outros elementos estruturais do prédio. Em 1986, após terminado o reparo, o Condomínio pediu a realização de um seguro do imóvel, onde a Seguradora negou-se a fazê-lo em virtude das condições que o edifício apresentava naquele momento.

7.3 Metodologia de Inspeção

7.3.1 Inspeções visuais

Com base em inúmeras visitas em campo realizou-se uma inspeção detalhada na estrutura. Foram executadas análises visuais nas fachadas e nas áreas comuns do edifício, anotando-se todas as anomalias existentes nos elementos estruturais em planilhas desenvolvidas especialmente para tal fim. Não se realizou uma vistoria nas áreas internas dos apartamentos, porém, através de informações fornecidas pelos moradores, havia uma grande quantidade de fissuras dentro dos mesmos.

A partir de tais análises, foram preenchidas planilhas de verificação de danos nos diversos elementos estruturais, sendo contabilizadas as manifestações patológicas por elemento, juntamente com um croquis do mesmo. Tais planilhas foram elaboradas baseadas em um trabalho desenvolvido na Universidade de Brasília por CASTRO (1995), que empregou a mesma metodologia em uma obra no Distrito Federal.

7.3.2 Ensaio de carbonatação

Foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação nos pilares localizados na garagem e no mezanino, por serem os locais mais críticos com relação à quantidade de CO₂ no ambiente. Tal medida foi feita com uma solução de fenolftaleína a uma diluição de 1 g do produto em 100 ml de álcool comum.

Foram escolhidos 4 pilares da estrutura, variando-se os pontos de medida com relação à orientação do edifício. Os pontos foram limitados a uma quantidade pequena em virtude do cuidado que se teve em não prejudicar os moradores com ruídos incômodos quando do momento da retirada do concreto.

7.3.3 Teores de íons cloreto

Foram retiradas amostras de concreto para determinação do teor de íons cloreto presente na estrutura. Tais amostras foram coletadas em 4 pontos diferentes da estrutura, onde em cada ponto foram extraídas porções de concreto

a 3 profundidades diferentes do elemento estrutural, a fim de se observar o comportamento da frente de penetração de cloretos.

Dos quatro pontos de extração que foram retiradas as amostras, um foi na garagem, dois do nível do mezanino e o último foi retirado de um pilar localizado na altura do 8º pavimento. O pilar da garagem, juntamente com um dos pontos do mezanino, não apresentavam revestimento, ao contrário dos outros dois pontos, onde os pilares estavam revestidos. Nestes pontos, a remoção dos revestimentos foi necessária para o início dos trabalhos de perfuração. As amostras foram retiradas com uma furadeira de impacto com broca de vídea. A fim de minimizar a possibilidade de uma contaminação das amostras no momento da retirada a diversas profundidades, estabeleceu-se a seguinte metodologia executiva:

- inicialmente perfurava-se a superfície do concreto com uma broca de diâmetro maior, até a profundidade desejada;
- antes de perfurar até a segunda profundidade, procedia-se a uma limpeza criteriosa do furo feito anteriormente e perfurava-se até a profundidade desejada com uma broca de diâmetro menor que a primeira;
- para perfurar até a terceira profundidade, alargava-se o furo entre a 1ª e 2ª profundidades com uma broca de diâmetro maior e perfurava-se com uma broca menor até a terceira e última profundidade.

As amostras foram coletadas sob a forma de pó, acondicionadas em embalagens adequadas (limpas e impermeáveis), lacradas e etiquetadas, estando prontas para serem levadas ao laboratório para análise. A metodologia analítica utilizada em laboratório foi àquela especificada na Norma NBR 9917 - Agregados para Concreto - Determinação de Sais, Cloretos e Sulfatos Solúveis.

7.3.4 Análise do grau de deterioração da estrutura

Atualmente, todas as informações que se tem a respeito dos índices de deterioração das estruturas de concreto são qualitativas, não havendo uma classificação quantitativa para se saber o grau de evolução dos danos e o momento adequado para se prever o trabalho de recuperação das estruturas.

CASTRO (1994), da Universidade de Brasília, desenvolveu uma metodologia para a manutenção de estruturas de concreto armado, destinada a edificações usuais, tendo por objetivo estabelecer uma quantificação para o grau de deterioração dos elementos estruturais isolados e da estrutura como um todo, baseando-se em parâmetros que consideram as manifestações mais freqüentes de danos, sua evolução e a influência do meio ambiente aonde a estrutura está inserida.

Contudo, uma consideração importante se faz necessária. Conforme observado no Capítulo 2, é extremamente difícil se realizar qualquer prognóstico com relação à vida útil das estruturas, em função da grande quantidade de fatores intervenientes e da dificuldade existente em se modelar a ação conjunta dos mesmos. Porém, com o conhecimento disponível atualmente, pode-se ter uma idéia do comportamento da estrutura a partir da realização de uma vistoria, baseando-se em aproximações simplificadas dos fatores que influenciam em cada processo de degradação. Desta forma, a metodologia aqui apresentada é um ponto de partida para se tentar inferir se há a possibilidade da quantificação do grau de dano em uma estrutura a partir de procedimentos simplificados, mas que deve ser analisada com reservas com relação ao grau de confiabilidade implícito nos resultados.

O trabalho baseia-se no preenchimento de planilhas durante as inspeções regulares realizadas na edificação. Tais informações são compiladas em um caderno de inspeção, a ser preenchido pelo profissional responsável pela vistoria, onde são coletadas informações a respeito das condições básicas da estrutura.

A estrutura da edificação em questão é dividida em famílias de elementos estruturais, a fim de se identificar grupos de características estruturais semelhantes. As famílias são divididas em pilares, vigas, lajes, cortinas, escadas e rampas, reservatório superior e inferior, blocos, juntas de dilatação e elementos de composição arquitetônica.

Feita tal divisão, é elaborada uma matriz para cada elemento da família onde estão listados os possíveis danos que podem ocorrer naquela família, juntamente com um fator de ponderação do dano. Tal índice, que varia em uma escala de 1 a 10, tem por finalidade mostrar a importância relativa de um dano em uma família, levando-se em consideração as condições de estética, segurança e funcionalidade do elemento estrutural. Como exemplo pode-se observar os fatores de ponderação do dano, para o caso de vigas e pilares, apresentados no Quadro 7.1.

Quadro 7.1- Famílias de elementos estruturais, danos e fatores de ponderação (F_p) (CASTRO, 1994)

PILAR		VIGA	
DANOS	F_p	DANOS	F_p
Desvio de geometria	8	Segregação	4
Recalque	10	Eflorescência	5
Infiltração na base	6	Esfoliação	8
Segregação	6	Desagregação	7
Eflorescência	5	Cobrimento deficiente	6
Esfoliação	8	Manchas de corrosão	7
Desagregação	7	Flechas	10
Sinais de esmagamento	10	Fissuras	10
Cobrimento deficiente	6	Carbonatação	7
Manchas de corrosão	7	Infiltração	6
Fissuras	10		
Carbonatação	7		
Presença de cloretos	10		
Manchas	5		

Vale salientar que o mesmo dano pode ter fatores de ponderação diferentes, dependendo da família aonde estes se encontram e das conseqüências que o dano possa causar na mesma.

Classificada a manifestação patológica, deve-se verificar seu grau de evolução. A determinação desse índice, denominado de fator de intensidade do dano (F_i), é realizada através de uma escala de gravidade do dano através de uma pontuação que leva em consideração a evolução da deterioração estrutural do elemento. Tal fator pode ser verificado para algumas manifestações patológicas no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 - Fator de intensidade do dano (F_i) (CASTRO, 1994)

DANOS	F _p	Fator de intensidade do dano (F _i)
Segregação	6	1 → Superficial e pouco significativa em relação às dimensões da peça; 2 → significativa em relação às dimensões da peça; 3 → profunda com relação às dimensões da peça com ampla exposição da armadura; 4 → perda relevante da seção da peça.
Lixiviação	5	1 → Início de manifestação; 2 → manchas de pequenas dimensões; 3 → manchas acentuadas em grandes extensões.
Esfoliação	8	2 → Pequenas escamações do concreto; 3 → lascamento de grandes proporções e exposição da armadura; 4 → lascamento acentuado com grande perda de seção.
Desagregação	7	1 → Início de manifestação; 2 → manifestações leves; 3 → perda acentuada de seção e esfarelamento do concreto; 4 → indícios de esfarelamento do concreto.
Cobrimento deficiente	6	1 → Menores que os previstos em Norma sem, no entanto, permitir a localização da armadura; 2 → menor que o previsto em Norma, permitindo a localização da armadura ou armadura exposta em pequenas extensões; 3 → deficiente com armaduras expostas em extensões significativas.
Manchas de corrosão	7	2 → Manifestações leves; 3 → grandes manchas e/ou fissuras de corrosão; 4 → corrosão acentuada na armadura principal, com perda relevante de seção;
Flechas	10	1 → Não perceptíveis a olho nu; 2 → perceptíveis a olho nu, mas dentro dos valores previstos em Norma; 3 → superiores em até 40% às previstas em Norma; 4 → excessivas.
Fissuras	10	1 → Aberturas menores do que as máximas previstas em Norma; 2 → estabilizadas, com abertura até 40% acima dos limites da Norma; 3 → aberturas excessivas estabilizadas; 4 → aberturas excessivas não estabilizadas.
Carbonatação	7	1 → Indícios superficiais; 2 → parcial, sem atingir a armadura; 3 → localizada, atingindo a armadura em ambiente úmido; 4 → generalizada, atingindo a armadura em ambiente úmido.
Presença de cloretos	10	2 → em elementos no interior sem umidade; 3 → em elementos no exterior sem umidade; 4 → em ambientes úmidos.
Manchas	5	2 → Manchas escuras de pouca extensão, porém significativas; 3 → manchas escuras em todo o elemento estrutural

Conforme pode-se observar, além de levar em consideração os aspectos relacionados à segurança, funcionalidade e estética do elemento estrutural, tal índice contempla a influência do meio ambiente em função das condições de exposição e proteção do elemento.

Feito isto, estabelece-se o grau do dano (D) no elemento estrutural. Tal fator é função do fator de ponderação do dano (F_p) e do grau de intensidade do dano (F_i), sendo facilmente observado pela análise da Figura 7.2.

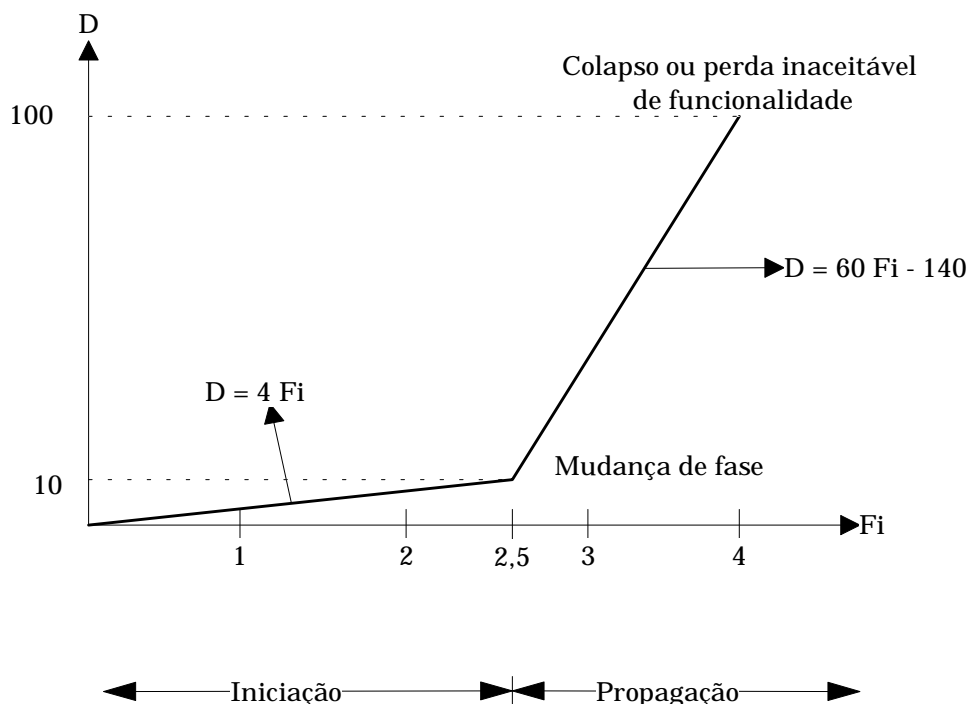


Figura 7.2 - Grau do dano (D) versus Fator de Intensidade do Dano (Fi) (CASTRO, 1994)

A primeira parte da reta, correspondente ao período de iniciação do dano, partiria do 0, que corresponde a ausência total de danos, até o ponto de coordenadas (2,5 ; 10). Isto quer dizer que, quando o valor de D estiver nessa parte do gráfico, não deve haver sinais de comprometimento do elemento estrutural. Por outro lado, para $D > 10$, o que equivale ao período de propagação do processo de degradação, a ação do dano se dá de forma mais rápida e aguda, indicando o estado crítico do elemento.

Assim, para um $F_p = 10$ (condição mais desfavorável da peça), o grau do dano (D) será dado pelas expressões:

$$D = 4 F_i \text{ para } F_i \bullet 2$$

$$D = 60 F_i - 140 \text{ para } F_i \bullet 3$$

Para danos com fatores de ponderação inferiores ao máximo, $F_p < 10$, o grau do dano será obtido através da multiplicação das expressões acima pelo fator $F_p/10$, resultando em:

$$D = 0,4 F_i \cdot F_p \text{ para } F_i \bullet 2$$

$$D = (6 F_i - 14) F_p \text{ para } F_i \bullet 3$$

A partir das expressões acima, se calcula o grau de deterioração de um elemento (G_{de}), através da fórmula:

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \text{ para } m \bullet 2$$

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} + \frac{\sum_{i=1}^{m-1} D_{(i)}}{m-1} \text{ para } m > 2$$

onde:

$D_{(i)}$ = grau do dano de ordem (i)

m = número de danos detectado no elemento.

Vale salientar que para dois danos no mesmo elemento, o grau de deterioração vai corresponder ao maior dano, pois se fosse feito qualquer tipo de média poderia-se estar indo contra a segurança; e, para três ou mais danos, adiciona-se ao maior dano a média dos demais danos, representando o efeito combinado entre os danos.

Com tais dados, obtém-se o valor do grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}), através da fórmula:

$$G_{df} = \frac{\sum_{i=1}^n G_{de(i)}}{n}$$

onde:

n = números de elementos em uma família com $G_{de} \bullet 15$

Adotou-se estabelecer que, para o cálculo do G_{df} , só seriam contabilizados os elementos que apresentem danos expressivos, isto é, assumindo-se a ocorrência simultânea de todos os danos possíveis com um fator de intensidade $F_i = 2,5$ (Figura 7.2), que corresponde à mudança de fase de iniciação para a propagação do dano, resultando em um valor de $G_{de} \bullet 15$. Tal procedimento foi criado para que o valor obtido para o G_{df} não seja mascarado por aqueles elementos que apresentem um menor grau de deterioração.

Assim, pode-se calcular o grau de deterioração da estrutura (G_d), que é função dos diferentes graus de deterioração das diversas famílias de elementos e de um fator de relevância estrutural (F_r) (Quadro 7.3), sendo dado pela expressão:

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_{r(i)} \cdot G_{df(i)}}{\sum_{i=1}^k F_{r(i)}}$$

onde:

k = número de famílias de elementos presentes na edificação;

F_r = fator de relevância estrutural de cada família;

G_{df} = grau de deterioração da família.

Quadro 7.3 - Fator de relevância (F_r) para as famílias de elementos (CASTRO, 1994)

Famílias de Elementos	F_r
Elementos não estruturais de concreto	1,0
Reservatório superior	2,0
Escadas, rampas, reservatório inferior, cortinas, lajes secundárias	3,0
Lajes, fundações, vigas secundárias, pilares secundários	4,0
Vigas e pilares principais	5,0

7.4 Resultados

7.4.1 Inspeções Visuais

Através das inspeções visuais verificou-se uma grande quantidade de problemas que a edificação apresentava. No nível da garagem observou-se que a maioria dos aparelhos de apoio apresentava um nível extremamente crítico de deterioração, apresentando fissurações com espessuras que variavam desde alguns poucos milímetros até 1,5 cm. Tais manifestações patológicas foram causadas pela expansão das armaduras devido ao processo corrosivo, que geravam grandes tensões de tração no concreto, ocasionando assim um esmagamento do topo dos pilares devido à transmissão inadequada de esforços.

As juntas de dilatação existentes no teto da garagem estavam totalmente danificadas, permitindo a passagem da água pelas mesmas. Tal condição aumenta consideravelmente a umidade do concreto, diminuindo a resistividade e propiciando melhores condições para a propagação da corrosão. Observou-se também a grande quantidade de manchas de coloração escura presente nas lajes, devido à presença de fungos que se instalavam nesse ambiente propício.

As vigas de contorno do mezanino apresentavam um quadro avançado de lixiviação do concreto. Sobre as vigas foram construídas calhas para o escoamento da água das chuvas. Contudo, tais elementos não tiveram uma impermeabilização adequada, deixando a água das chuvas carregarem grande parte do Ca(OH)_2 que, quando entravam em contato com o CO_2 do ar,

originavam CaCO_3 , chegando a formar pequenas estruturas de estalactites no fundo das vigas.

As vigas de contorno da edificação, principalmente àquelas que se localizavam entre o primeiro e sexto pavimentos da fachada norte, apresentavam um quadro de fissuração alto, concentrado onde fica a armadura negativa, com expulsão do revestimento.

Uma das mais graves constatações verificadas no trabalho foi o elevado número de pilares que apresentavam algum indício de degradação. No nível da garagem, muitos deles mostravam um quadro de fissuração elevado, muito provavelmente em função da expansão das armaduras devido ao processo corrosivo. A partir do nível do mezanino até o último pavimento havia uma enorme quantidade de fissuras em toda a extensão dos pilares. Tais fissuras tinham abertura variável, desde pequenas fissuras até aquelas que se intercomunicavam no elemento estrutural, ocasionando um lascamento de toda a camada de cobrimento da armadura.

Não se pode verificar a presença de certas manifestações patológicas, como segregação do concreto ou ninhos de concretagem nos elementos estruturais, visto que os mesmos encontravam-se revestidos.

Além disso, verificou-se a grande quantidade de defeitos que ocorreram durante a execução da estrutura. Houveram pontos onde o cobrimento das armaduras era insuficiente ou até mesmo inexistente, fazendo com que as mesmas estivessem em contato direto com os agentes agressivos presentes na atmosfera.

Observou-se em todos os pilares reparados anteriormente que as regiões que foram reconstituídas permaneciam intactas, não apresentando nenhum tipo de degradação. Porém, nas áreas que não foram tratadas nos mesmos pilares, o processo corrosivo se manifestava com uma grande intensidade.

7.4.2 Ensaio de Carbonatação

Os resultados do ensaio de carbonatação estão mostrados no Quadro 7.4.

Quadro 7.4 - Resultados do ensaio de carbonatação

Elemento Estrutural	Espessura de cobrimento (cm)	Espessura carbonatada (cm)
Pilar P9	2,40	0,05
Pilar P10	2,80	2,20
Pilar P18	2,40	1,20
Pilar P30	1,50	0,05

A partir dos dados mostrados na tabela pode-se verificar que o avanço da frente de carbonatação não chegou até a armadura. Mesmo aqueles pilares que se encontravam na garagem do prédio, onde a quantidade de CO_2 é maior em função da descarga dos veículos, não apresentaram profundidades de carbonatação maiores que o cobrimento de concreto.

7.4.3 Teores de Cloretos

Com relação aos teores de íons cloretos, os resultados das análises estão mostrados no Quadro 7.5.

Quadro 7.5 - Resultados das análises de cloretos*

Pilar P18	Pilar P27	Pilar P9	Pilar P25
1,393	0,91	0,525	0,756
1,386	0,74	0,581	0,455
1,526	1,06	0,668	0,714

* % em relação à massa de cimento

Os dados do Quadro 7.5 foram plotados em uma figura, conforme pode-se observar a seguir.

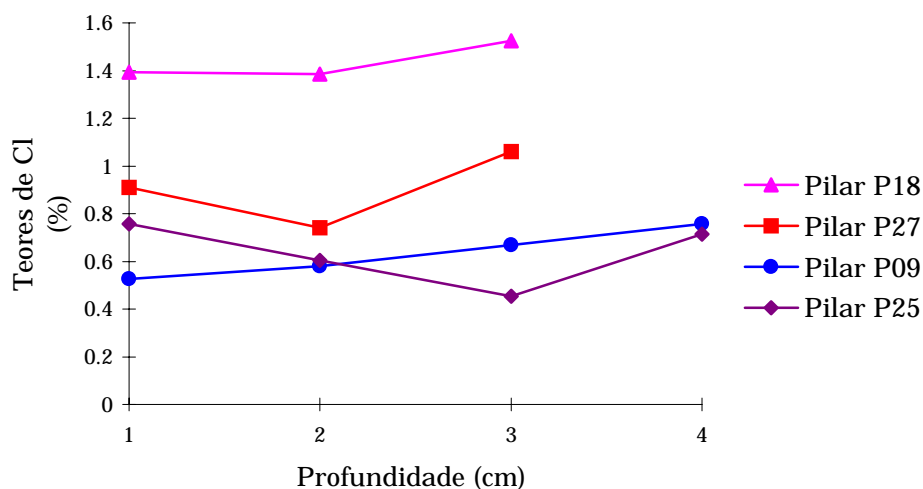


Figura 7.3- Curva de penetração dos íons cloreto nos elementos estruturais

Conforme pode-se observar pelo gráfico acima, em todos os pontos amostrados o teor de cloretos foi maior que àquele recomendado na literatura (HELENE, 1993), que é de 0,4% em relação à massa de cimento.

Entretanto, verifica-se que não há uma tendência clara com relação à possível origem dos cloretos na estrutura. Quando há uma ação exclusiva da agressividade ambiental, a quantidade de íons cloretos deve ser maior na

superfície do elemento, decrescendo à medida que se aproxima do núcleo da estrutura de concreto.

A configuração que pode ser verificada na Figura 7.3 pode ser devido a uma possível contaminação dos materiais de construção empregados na obra pelos cloretos presentes na atmosfera salina da região. Devido ao longo período de paralisação que ocorreu durante o processo executivo da estrutura, uma parte dos materiais de construção, bem como os elementos que já haviam sido concretados anteriormente, ficaram expostos à névoa salina proveniente do mar. Tal névoa pode ter se depositado nos materiais, caso os mesmos não tenham sido protegidos adequadamente, contaminando também boa parte da estrutura de concreto remanescente.

Outra forma pela qual pode-se admitir que tais cloretos penetraram na estrutura foi através da utilização de aditivos aceleradores de pega durante a concretagem. Tais aditivos adotam como ingrediente ativo o cloreto de cálcio (CaCl_2), que é adicionado à água de amassamento do concreto. Tal elemento dissolve-se na água liberando o íon cloreto (Cl^-), que destrói a camada passivadora e acelera permanentemente a corrosão, sem consumir-se (HELENE, 1993).

Ainda existe a possibilidade de que os íons cloretos tenham penetrado na estrutura quando da lavagem das pastilhas de revestimento dos pilares com ácido muriático, que é o ácido clorídrico (HCl) comercial. Uma grande quantidade de fabricantes e fornecedores de pastilhas para revestimento recomendam o emprego de tal material para limpeza das mesmas, não tendo idéia do efeito prejudicial que os cloretos apresentam em termos da durabilidade das estruturas. HELENE (1993) cita que tal procedimento deveria ser evitado sempre que possível e, caso tal providência não seja possível de ser tomada, deve-se prever mecanismos de proteção à armadura, tais como uma maior espessura de cobrimento, a especificação de um concreto com resistência mais elevada e um procedimento de cura mais adequado para o concreto.

Todos esses fatores, em conjunto ou isoladamente, podem ter sido os grandes iniciadores do processo corrosivo. Porém, para se ter uma certeza absoluta da origem do problema, seria necessária uma pesquisa mais detalhada no período de construção da estrutura, com uma verificação minuciosa nos diários de obra, planilhas de ensaio para controle de qualidade dos materiais entre outros documentos pertinentes à execução do empreendimento.

7.4.4 Análise do Grau de Deterioração da Estrutura

Os elementos estruturais vistoriados foram os pilares, as vigas da garagem e de fachada e os aparelhos de apoio no nível da garagem, em virtude

da dificuldade de acesso aos demais elementos estruturais localizados nos interiores dos apartamentos. Serão apresentados aqui alguns exemplos de como foram calculados os parâmetros, juntamente com os resultados da análise.

Foram vistoriados 44 elementos da estrutura, sendo as suas distribuições apresentadas no Quadro 7.6.

Quadro 7.6 - Distribuição dos elementos estruturais avaliados

Elemento estrutural	Número de casos
Pilares	18
Vigas	16
Aparelhos de apoio	10

No Quadro 7.7 observa-se os danos que ocorreram em um pilar. A grande incidência de manifestações patológicas foi relativa à presença de teores de cloretos muito altos juntamente com fissuração em uma intensidade máxima.

Quadro 7.7 - Danos observados no Pilar P09

DANOS	Fp	Fi	D
Desvio de geometria	8		
Infiltração na base	6		
Segregação	6	3	24
Lixiviação	5		
Esfoliação	8		
Desagregação	7		
Cobrimento deficiente	6		
Manchas de corrosão	7	2	5,6
Fissuras	10	4	100
Carbonatação	7	2	5,6
Cloretos	10	4	100
Manchas	5	2	4
Sinais de esmagamento	10		

Calculando-se o grau de deterioração do elemento, G_{de} , para o pilar P09, obtêm-se o valor de 123,2. O Quadro 7.8 mostra alguns limites para os diferentes tipos de deterioração de elementos isolados, que servem de parâmetro para que atitude tomar para restabelecer a segurança ou a funcionalidade da estrutura. Tais valores, como cita a autora do método (CASTRO, 1994), não devem ser encarados como absolutos, e sim como indicativos das providências a serem tomadas.

Quadro 7.8 - Classificação dos níveis de deterioração do elemento (CASTRO, 1994)

Nível de deterioração	G_{de}	Medidas a serem adotadas
Baixo	0 - 15	estado aceitável
Médio	15 - 50	observação periódica e necessidade de intervenção a médio prazo
Alto	50 - 80	observação periódica minuciosa e necessidade de intervenção a curto prazo
Crítico	> 80	necessidade de intervenção imediata para restabelecer a funcionalidade e a segurança.

Para o caso do pilar P09, o valor encontrado para o G_{de} foi muito maior que o limite recomendado pela metodologia, mostrando a necessidade imediata de intervenção no elemento.

Os resultados mostrados na Tabela 7.1 mostram que o grau de deterioração da estrutura foi considerado como crítico, conforme mostrado no Quadro 7.9, com uma necessidade imediata da condução de trabalhos de recuperação de estruturas, visando aumentar a vida útil da mesma.

Tabela 7.1 - Grau de deterioração da estrutura

Família de elementos	G_{df}	F_r	$G_{df} \times F_r$
Pilar	109,48	5	547,4
Viga	67,12	5	335,63
Aparelho de apoio	112,39	4	449,56
	Total	14	1332,59
		$G_d =$	95,2

Quadro 7.9 - Classificação dos níveis de deterioração da estrutura (CASTRO, 1994)

Nível de deterioração	G_{de}	Medidas a serem adotadas
Baixo	0 - 15	estado aceitável
Médio	15 - 40	observação periódica e necessidade de intervenção a médio prazo
Alto	40 - 60	observação periódica minuciosa e necessidade de intervenção a curto prazo
Crítico	> 60	necessidade de intervenção imediata para restabelecer a funcionalidade e a segurança.

7.5 Considerações Finais do Estudo de Caso

É bem conhecida a carência de informações existente na Região Nordeste de trabalhos que contemplem de forma efetiva o ramo da Patologia e Terapia

das Edificações. Tal Região representa uma grande área dentro do território nacional, envolvendo um total de 9 Estados que têm uma grande parte de suas capitais situadas nas condições mais agressivas ao concreto armado. Altas temperaturas e umidades relativas, além da presença de uma grande concentração de edificações localizadas na orla marítima, aliado ao baixo controle de qualidade que ocorre nas diferentes etapas do processo construtivo e o emprego de uma mão-de-obra desqualificada, são alguns dos fatores que contribuem para o aparecimento de toda uma gama de fenômenos que provocam a degradação das estruturas, comprometendo a vida útil das mesmas.

A fim de contribuir para preencher tal lacuna de informação, procurou-se realizar um estudo de caso em uma estrutura de concreto armado, a fim de identificar as origens, as formas de ocorrência e os fenômenos intervenientes em uma das mais graves manifestações patológicas que ocorrem em uma estrutura dessa natureza: a corrosão de armaduras.

Objetivou-se realizar o maior número possível de determinações e análises para se verificar o estado da estrutura, pois a realização de um correto diagnóstico do problema, com uma análise adequada das informações disponíveis, é um fator de sucesso para um trabalho de recuperação eficaz.

Os resultados das análises visuais mostraram que houve um efeito combinado de diversas manifestações patológicas que contribuíram para acelerar o processo de degradação da estrutura como um todo. Lixiviação do concreto, a presença de umidade excessiva e uma inobservância das especificações dos cobrimentos mínimos especificados foram alguns dos problemas que propiciaram o agravamento do quadro de corrosão de armaduras, diminuindo o pH do elemento, a resistividade e ausência de proteção física ao concreto, respectivamente.

Verificou-se que a carbonatação não foi o fator que iniciou o processo corrosivo, pois a frente de CO_2 não atingiu a armadura. Porém, ressalvas têm que ser feitas com relação à quantidade de dados coletados. Ainda que os ensaios de carbonatação tivessem sido realizados em locais da estrutura aonde o nível de CO_2 é considerado alto (garagem) e em elementos que efetivamente apresentaram problemas de corrosão de armaduras, seria necessária uma maior quantidade de verificações em outras áreas da edificação, principalmente no interior dos apartamentos, a fim de se obter mais dados para a realização das análises.

Através das determinações dos íons cloreto presentes na estrutura, constatou-se que os mesmos atingiram elevados teores dentro dos diversos elementos, onde os mesmos ficaram muito acima dos limites indicados na literatura. As possíveis origens e formas de contaminação da estrutura por tal elemento foram discutidas em detalhes no item 2.3.

Apesar da dificuldade existente em se determinar a vida útil das estruturas, conforme discutido anteriormente, ficou registrado que é possível se ter uma aproximação quantitativa do grau de deterioração de uma estrutura, mesmo sem o emprego de uma grande quantidade de métodos de ensaios e determinações. Tal análise é de fundamental importância, pois estabelece limites numéricos aceitáveis para a deterioração da estrutura e/ou seus elementos isolados, fornecendo subsídios para uma correta avaliação da deterioração das estruturas e indicando o momento mais adequado para a realização de reparos nas mesmas.

As constatações feitas em apenas um estudo de caso mostraram o comportamento das estruturas que apresentam problemas patológicos diversos (corrosão de armaduras, fissuração generalizada, entre outros) atualmente. Tais considerações servem de alerta à toda Indústria da Construção Civil, que deve se preocupar com a qualidade dos empreendimentos que estão sendo cada vez mais colocados no mercado. O emprego de um controle de qualidade adequado em todas as etapas da vida útil das edificações, desde a parte de projeto até a etapa de utilização, deixou de ser apenas uma estratégia de marketing para as empresas conseguirem atingir as vendas dos seus empreendimentos imobiliários para ser uma condição fundamental para que as obras continuem desempenhando as funções para as quais forem projetadas, com um mínimo de intervenções.

8. ANÁLISE DOS CUSTOS DE RECUPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Todas as atividades relacionadas à Engenharia têm como objetivo maior realizar as tarefas que lhe são propostas adequadamente, com um mínimo custo para a sua efetivação. No campo da Patologia e Recuperação de Estruturas, além das considerações de cunho técnico, tais como uma adequada escolha dos materiais e métodos de intervenção que serão empregados nas estruturas atacadas por problemas de degradação, um dos fatores considerados para a correção dos problemas é o custo da recuperação.

Na maioria das vezes, o engenheiro se vê diante de uma situação na qual o mesmo tem que escolher, entre várias alternativas disponíveis que podem ser empregadas para a recuperação de estruturas, aquela que represente uma adequada solução - tanto técnica quanto econômica - para o problema em questão.

Desta forma, a fim de se determinar qual o volume de recursos aplicado na atividade de recuperação de estruturas no Estado de Pernambuco, coletou-se os dados referentes aos custos de intervenção nos diversos tipos de obras analisadas. Catalogou-se tal informação em 146 das 189 obras que compõem o arquivo pesquisado. Em tais dados de recuperação estão anotados os valores referentes ao preço dos materiais e aos encargos relacionados à mão-de-obra necessária para a execução dos serviços, não se computando valores correspondentes à reposição de revestimentos, recomposição do acabamento e eventuais desperdícios que ocorrem durante a realização dos trabalhos.

Infelizmente não houve o registro das datas de construção das obras nos relatórios pesquisados, fazendo com que não possam ser realizadas considerações dos custos em função da idade das obras e da época da intervenção. Tal análise seria de extrema relevância, pois mostraria em que etapa da vida útil da obra houve um maior desembolso de recursos para a sua recuperação. Desta forma, no presente trabalho só serão realizadas as análises levando-se em consideração o entorno e a utilização a que a obra se destina.

8.1 Custos de Recuperação em Função do Entorno

Primeiramente realizou-se uma distribuição dos recursos alocados para a recuperação de estruturas em função do entorno onde as obras estavam inseridas, conforme pode-se observar pela Figura 8.1.

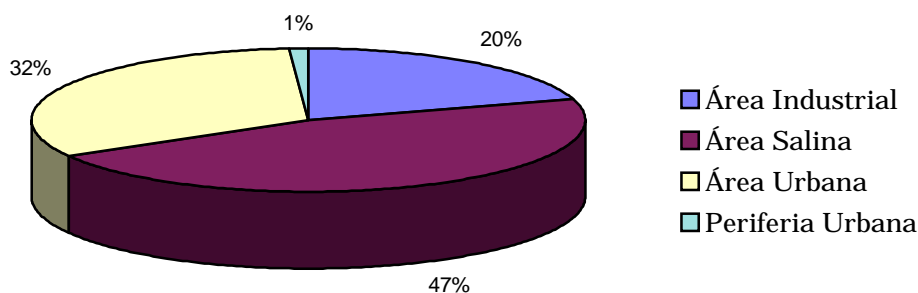


Figura 8.1 - Distribuição dos custos de recuperação em função do entorno

Pode-se verificar o elevado percentual que foi gasto na recuperação das obras localizadas na área salina (47%), seguido da área urbana (32%), da área industrial (20%) e da periferia urbana (1%). Pode-se dizer que quase metade dos custos de recuperação estrutural são direcionados para a correção dos problemas gerados pela corrosão de armaduras, que na grande maioria dos casos é provocada pela penetração dos agentes agressivos - no caso os íons cloreto - para o interior do concreto nas obras da área salina.

8.2 Custos de Recuperação em Função do Tipo de Obra

O montante financeiro gasto na atividade de recuperação estrutural em função do tipo de obra pode ser observado na Figura 8.2.

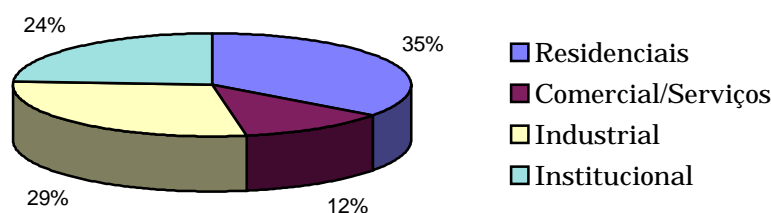


Figura 8.2 - Custos de recuperação das obras no estado de Pernambuco

Observa-se que o grande volume de recursos foi destinado à recuperação das edificações residenciais, com 35% dos custos totais. Logo após, verifica-se o grande montante financeiro que foi destinado à recuperação das obras industriais - 29% dos custos de recuperação - seguido das edificações institucionais (24%) e comerciais/serviços (12%). Através de uma análise da Tabela 8.1, tem-se que as maiores médias de recuperação foram encontradas para os grupos de obras industriais e institucionais, respectivamente. Nota-se que o volume de recursos gastos em tais tipos de obra foram altos, apesar do número pequeno de unidades que sofreram intervenção.

Tabela 8.1 - Custos de recuperação de estruturas em concreto armado no Estado de Pernambuco

Tipo de Obra	Custos (US\$)	Nº de obras	Média*
Residenciais	988.145,54	96	10.293,18
Comercial/Serviços	344.064,72	24	14.336,03
Industrial	807.379,65	13	62.106,13
Institucional	674.954,75	13	51.919,60
Total	2.814.544,66	146	19.277,70

* equivale aos custos de um determinado tipo de edificação dividido pelo número de obras

Tal fato pode ser explicado pela ausência de um adequado programa de manutenção em tais tipos de obra, onde as edificações chegam a graus de deterioração bastante significativos. Desta maneira, as formas de recuperação adotadas são geralmente mais onerosas, pois envolvem materiais e mão-de-obra altamente especializados para a sua execução.

Através de uma análise da Tabela 8.2, que mostra os custos por m² por tipo de obra, pode-se fazer algumas considerações:

Tabela 8.2 - Custos por metro quadrado das intervenções por tipo de obra

	Custos (US\$)	Área (m ²)	Custos/m ²
Residenciais	988.145,54	11.161,81	88,53
Comercial/Serviços	344.064,72	10.607,92	32,43
Industrial	807.379,65	3.702,62	218,06
Institucional	674.954,75	30.421,57	22,19
Total	2.814.544,66	55.904,54	50,35

- o maior custo por área foi verificado nas obras industriais (US\$ 218,06/m²). Tal valor pode ser considerado extremamente significativo, principalmente se for considerada a pequena área recuperada referente a tal tipo de obra. A explicação para esse valor se deve principalmente ao método de recuperação empregado. Nas obras industriais, como já discutido nos capítulos anteriores, verifica-se a presença de elevados graus de agressividade ambiental. Com a falta de uma manutenção preventiva em tal tipo de obra, a tendência é que os processos de degradação atuem mais intensamente, sendo que recuperações só foram realizadas quando a estrutura apresentava um alto grau de deterioração. Assim, com o aumento da área degradada em um elemento estrutural, houve a necessidade do emprego de mão-de-obra, materiais e técnicas de execução que garantissem um elevado desempenho das recuperações, o que representava, invariavelmente, um acréscimo de custo no serviço total;
- nas obras residenciais observou-se um valor de custo por área de US\$ 88,53/m², em um universo total de 96 casos catalogados (Tabela 8.1). Pode-se afirmar que a grande maioria das recuperações adotadas em tal tipo de obra foi relativa a serviços de reparo (Figura 8.3), que, em comparação com os reforços, têm um custo mais baixo;
- o valor encontrado para as obras comerciais/serviços (US\$ 32,43/m²) também pode ser explicado pelas mesmas razões encontradas para as obras residenciais; e
- no caso das edificações pertencentes ao poder público, o índice obtido (US\$ 22,19/m²) está intimamente ligado à falta de um controle executivo de tal tipo de obra, aliado à ausência de um plano de manutenção preventiva adequado.

Feitas as análises anteriores, procurou-se estabelecer qual o volume de recursos gasto nos diversos tipos de recuperação estrutural existentes. Tal informação está mostrada na Tabela 8.3 e na Figura 8.3.

Tabela 8.3 - Distribuição dos recursos, em US\$, em função do método de recuperação empregado

	Sistema de Reparo	Reforço Estrutural	Reforço de Fundação
Residenciais	877.455,49	89.435,28	11.254,77
Comercial/Serviços	230.790,32	47.622,40	65.652,00
Industrial	163.899,70	616.587,04	26.892,91
Institucional	601.904,27	73.050,48	-
Total	1.884.049,78	826.695,20	103.799,68
%	66,9	29,4	3,7

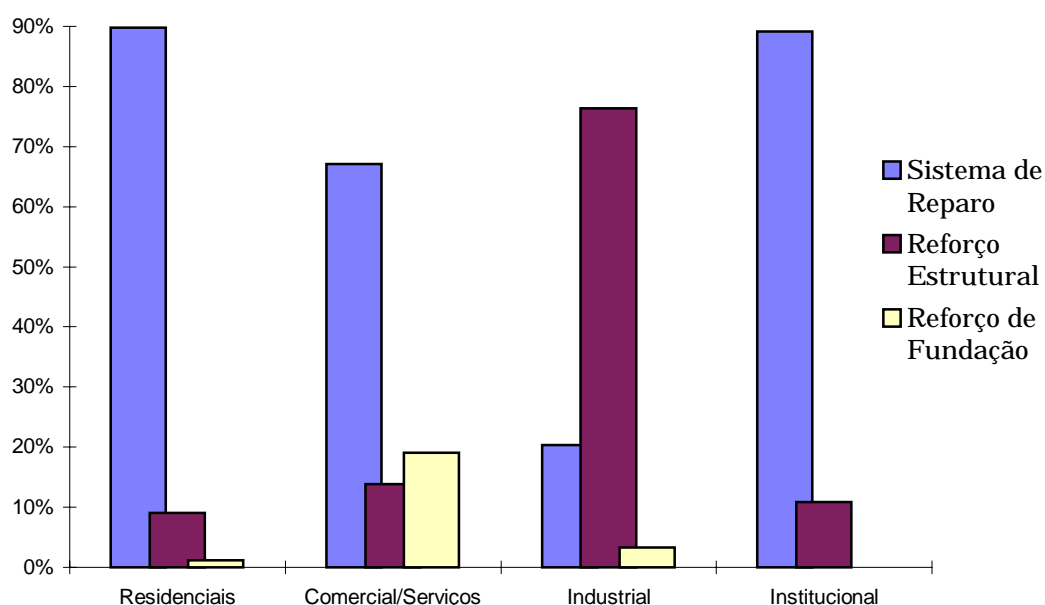


Figura 8.3 - Distribuição dos custos de recuperação nas edificações

O volume de recursos total ficou assim distribuído: as atividades de reparo foram responsáveis por 66,9% do valor gasto para a recuperação das estruturas, seguido do reforço estrutural (29,4%) e do reforço nas fundações (3,7%). Exceto nas obras industriais, a maior parte dos recursos foi empregado nos sistemas de reparo, que apresentaram índices acima de 89% nas obras residenciais e institucionais. Em tais tipos de obra verificou-se o extensivo uso dos produtos com base epóxi, tanto as argamassas quanto as injeções, visando restabelecer as condições iniciais do elemento estrutural.

Os custos relativos à utilização dos sistemas de reforço estrutural foram empregados em maior escala nas obras industriais (76,4% do total), seguido das obras comerciais/serviços (13,8%), institucionais (9,1%) e residenciais (9,1%). No

caso específico das obras industriais, observa-se que a grande maioria dos elementos estruturais estavam extremamente danificados, conforme já foi mencionado anteriormente. Assim, optou-se pelo concreto projetado, aliado ao emprego de nova armadura, como um dos métodos mais empregados para reforços emergenciais, juntamente com o encamisamento dos elementos atingidos por concreto convencional, de base graute ou projetado. Porém o custo de tais alternativas é extremamente alto, em função principalmente dos equipamentos necessários para a projeção e da mão-de-obra necessária para a realização dos serviços.

Dos recursos despendidos nos reforços nas fundações, as edificações comerciais foram responsáveis pelo grande percentual de utilização, onde empregou-se a injeção de nata de cimento para melhorar a capacidade resistente do solo sob as sapatas.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

De uma maneira geral, pode-se colocar que os fenômenos que regem a deterioração das estruturas são extremamente complexos, em virtude principalmente da interação existente entre os mesmos. Como discutido ao longo do presente trabalho, são dois os fatores que influenciam de maneira decisiva na durabilidade das estruturas: a qualidade do material (no caso o concreto), que é intimamente dependente dos procedimentos que são adotados nas diferentes etapas do processo construtivo das edificações e o meio ambiente aonde tais obras estarão inseridas, que governará o desempenho das mesmas ao longo da sua vida útil. Construir para garantir uma alta durabilidade não é uma tarefa extremamente difícil, mas exige um comprometimento sério por parte dos agentes envolvidos no processo de construção das edificações.

Como foi citado anteriormente (Capítulo 3), já foram realizados trabalhos de levantamento das manifestações patológicas e formas de reparo e reforço em todas as regiões do Brasil. Com o presente estudo, procurou-se fornecer algumas informações a respeito da durabilidade das estruturas de concreto armado na Região Nordeste, que se caracteriza por ser uma região extremamente carente de trabalhos de pesquisa em todas as áreas do conhecimento, principalmente na Engenharia Civil.

Seria extremamente importante para a Construção Civil como um todo a realização de uma análise comparativa das manifestações patológicas e das formas de recuperação das estruturas em relação ao cenário nacional. Porém, a confiabilidade dos resultados obtidos através de tal análise poderia ficar seriamente prejudicada, devido à diferença existente entre as formas de coleta e análise de dados – conforme discutido no Capítulo 6 – que foram empregadas nos trabalhos anteriores.

De qualquer modo, os resultados do presente trabalho se revestem de uma importância fundamental, pois é o primeiro estudo desta natureza realizado na região, onde tais conclusões devem ser objeto de reflexão por parte de todo o meio técnico-científico regional, a fim de que a ocorrência dos problemas aqui identificados seja extremamente reduzida nos empreendimentos futuros.

Assim, dentre os resultados obtidos, verificou-se que a grande maioria dos danos tiveram origem nas etapas de planejamento/projeto (43%) e execução (42%) do processo construtivo. Isso vem mostrar que a garantia de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto depende em grande parte dos profissionais diretamente envolvidos com a concepção e execução das obras civis, como os engenheiros e arquitetos. Tal informação serve de alerta para os profissionais da Região, a fim de que se possa reduzir consideravelmente tais percentuais nas obras futuras.

De acordo com os dados coletados, observa-se que há um quadro bem claro do atual estágio das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado na Região em estudo. Primeiramente verifica-se que grande parte dos danos que ocorreram ao concreto no estado fresco está relacionada a problemas executivos, como um cobrimento inadequado das armaduras (em função de deficiência na colocação dos espaçadores, problemas de vibração, entre outros), segregação do concreto e a presença de ninhos de concretagem, mostrando a falta de cuidado que há nesta etapa do processo construtivo.

Em função do elevado grau de agressividade ambiental, a corrosão de armaduras encontrou um ambiente altamente propício para a sua ocorrência, sendo responsável por um índice de 64% dos danos observados. Tal índice está relacionado principalmente a procedimentos inadequados estabelecidos tanto na etapa de planejamento/projeto, através da falta de especificação de um cobrimento adequado das armaduras, dosagem do concreto deficiente e uma inadequada estimativa da agressividade ambiental, quanto na etapa de execução, por falta de cuidado durante a produção da estrutura de concreto.

As fissuras ocasionadas pelos problemas estruturais foram responsáveis por uma grande quantidade de danos (16%). Tais fissuras também têm consequências graves na durabilidade das estruturas, pois são veículos de entrada de água e agentes agressivos para o interior da massa de concreto, fazendo com que a cinética dos fenômenos de degradação - especialmente a corrosão de armaduras - aumente significativamente.

Com relação ao entorno, observa-se que a grande maioria das obras encontra-se na área salina, onde as partículas de água do mar, contendo sais dissolvidos, inclusive cloretos em suspensão na atmosfera, são arrastadas pela força dos ventos e depositadas por impactação na superfície das estruturas de concreto. De acordo com HELENE (1993), a atmosfera circundante pode ter grande influência não só na redução do período de iniciação, contribuindo para a despassivação precoce da armadura, como também na taxa de corrosão durante o chamado período de propagação da corrosão. A velocidade e a quantidade de aço corroído é grandemente acelerada em atmosferas urbanas, industriais e marinhas (que apresentaram uma distribuição de 41,3%, 5,8% e 47%, respectivamente do total do entorno), como resultado de uma maior velocidade de redução da alcalinidade do concreto devida à presença de íons em suspensão ou dissolvidos no vapor d'água. Ao penetrarem no concreto, esses íons também contribuem para a diminuição da resistividade elétrica, aumentando a condutividade do eletrólito e, conseqüentemente, a taxa de corrosão. Além disso, deve-se considerar a presença constante das chuvas que ocorrem na Região, fazendo com que as estruturas permaneçam molhadas, propiciando o ambiente parcialmente saturado necessário para a iniciação do processo corrosivo.

Com relação às atividades de recuperação estrutural, como já foi discutido ao longo do Capítulo 5, os sistemas de reparo foram largamente empregados para a reabilitação de estruturas. Através de uma análise dos diferentes materiais empregados para a recuperação das estruturas no Brasil (CARMONA e MAREGA, 1988), na Amazônia (ARANHA, 1994) e no estado de Pernambuco (Figura 9.1) verificou-se o intensivo uso dos produtos de base epóxi – tanto as injeções de resina quanto as argamassas – para a recuperação das estruturas degradadas. Tais produtos foram mais empregados para correção de pontos localizados de corrosão de armaduras e fissuras provocadas pelos problemas estruturais.

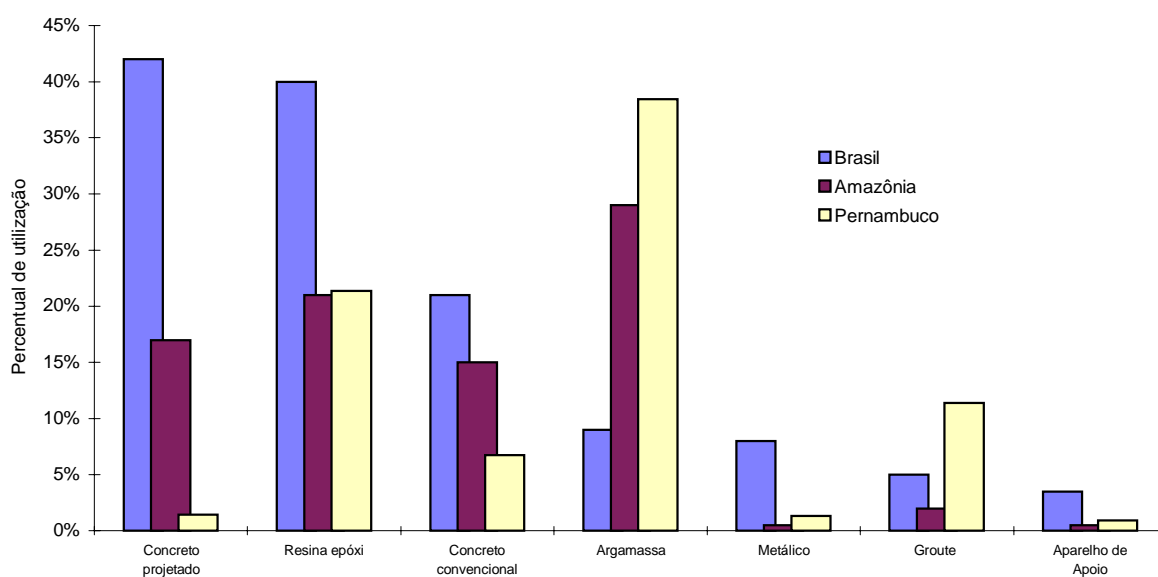


Figura 9.1 - Comparação das soluções para recuperação estrutural no Brasil (CARMONA e MAREGA, 1988), Amazônia (ARANHA, 1994) e Pernambuco

Observa-se também o baixo índice de utilização do concreto projetado como forma de recuperação, se comparado às outras regiões do país. Tal constatação se deve ao elevado custo de tal opção, que restringe o uso da mesma. De maneira contrária, o uso do groute foi maior no estado de Pernambuco do que nas demais regiões.

Com relação aos custos de recuperação, verificou-se que, em virtude do efeito evolutivo que se observa nas manifestações patológicas, aliada à falta de um programa de manutenção adequada, as pequenas manifestações, que poderiam ser corrigidas com o emprego de sistemas de reparo, evoluem ao ponto de levar o elemento a condições últimas de segurança estrutural, onde um reforço no elemento se faz necessário. Assim, quanto mais tempo passa, mais os danos progridem, exigindo uma quantia maior de recursos para a sua correção.

O estudo de caso realizado, apesar de não ser representativo do comportamento das estruturas que apresentam problemas patológicos, mostrou

o nível de dano que as manifestações podem causar em uma estrutura. De acordo com as análises efetuadas, observou-se que o fenômeno corrosivo atingiu um grau extremamente alto na estrutura em questão. Tal índice está relacionado principalmente ao baixo controle de qualidade estabelecido em algumas das etapas do processo construtivo, onde a falta de um controle dos materiais constituintes do concreto, aliado à ocorrência de cobrimentos das armaduras muito inferiores àqueles estabelecidos em norma e a falta de um adequado programa de manutenção da estrutura foram fatores que contribuíram sobremaneira para que os fatores de degradação atingissem níveis elevados de dano, chegando a comprometer a segurança estrutural da mesma.

As considerações aqui realizadas devem servir de alerta para os projetistas e construtores da região, a fim de que sejam especificados certos procedimentos, como a utilização de concretos com uma menor porosidade (baixas relações a/c) e se ter um cuidado especial com a execução, principalmente com relação ao lançamento e a cura do mesmo. Desta forma, se terá um concreto mais denso e, conseqüentemente, menos permeável, minimizando assim a presença de água e agentes agressivos no interior do mesmo que podem iniciar os processos de degradação.

10. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com o crescimento da indústria da Construção Civil observa-se que as estruturas de concreto estão sendo expostas cada vez mais a condições de utilização mais severas. Assim, as obras localizadas em áreas altamente agressivas, se não tiverem um adequado controle de produção e manutenção, tendem a deteriorar mais rapidamente. No decorrer do presente trabalho procurou-se identificar e correlacionar as diferentes formas de degradação, suas causas e origens. Todavia, verificou-se a extrema dificuldade em se obter relações diretas e simplificadas entre todos os fenômenos que regem a deterioração das estruturas. Como apresentado anteriormente, o ideal é que se tenha uma abordagem holística de tais processos, procurando-se explicar a interrelação existente entre as diversas formas de deterioração e o meio ambiente circundante nas mesmas. Porém, tal tarefa é extremamente difícil de ser realizada, em função das limitações existentes no conhecimento de todos os fatores envolvidos neste problema.

Desta forma, o presente trabalho procurou contribuir para o entendimento de tais processos de degradação. Entretanto, muitos estudos devem ser conduzidos dentro das diversas áreas da Construção Civil para que se tenha uma avaliação aproximada do comportamento global das estruturas quando

submetidas às condições de utilização. Alguns desses estudos estão descritos abaixo:

- Propor uma sistematização na coleta dos dados relacionados aos trabalhos de levantamento das manifestações patológicas e formas de reparo e reforço das estruturas a nível nacional;
- realizar trabalhos que privilegiem a influência do entorno nos diversos tipos de manifestações patológicas, visando uma classificação das áreas mais agressivas à durabilidade e vida útil das estruturas;
- avaliar mais detalhadamente a influência dos fatores ambientais no fenômeno corrosivo na região;
- verificar o comportamento de elementos de concreto armado quando submetidos a ensaios de desempenho de média e longa duração nos diversos tipos de ambientes predominantes na região Nordeste;
- avaliar os custos ao longo da vida útil (*life cycle costs*) das estruturas de concreto armado;
- realizar estudos sobre a utilização dos métodos probabilísticos objetivando-se a previsão da vida útil das estruturas;
- desenvolver estratégias de manutenção adequadas para as estruturas localizadas em áreas altamente agressivas, como as zonas industriais e marinhas;
- realizar um estudo procurando identificar os teores de cloretos presentes tanto nas estruturas existentes quanto no meio ambiente circundante das mesmas; e
- avaliar o desempenho dos diversos tipos de recuperação empregados nas estruturas ao longo do tempo.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTCIN, P. C. Durable Concrete – Current Practice and Future Trends. In: ***Concrete Technology: Past, Present and Future, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium***, ACI SP-144, 1994. p. 85-104.
- AL-AMOUNDI, O. S. Durability of Reinforced Concrete in Agressive Sabkha Environments. In: ***ACI Materials Journal***, v. 92, nº 3, mai-jun 1995. p. 236-245.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ***Standard Recommended Practice for Developing Short-Term Accelerated Test for Prediction of the Service Life Building Components and Materials***. E 632-82 Philadelphia, 1982.
- ANDRADE, C. ***Manual: Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras***. Madrid, 1988. 122p.
- ANDRADE, C., GONZÁLEZ, J.A. Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements. ***Werkstoffe und Korrosion***, v. 29, 1978, p. 515-519.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Tendencias Actuales en la Investigacion sobre Corrosion de Armaduras. In: ***Informes de la Construcción***, Madrid, v. 4, nº 398, 1988. p. 7-14.
- ANG, A.; TANG, W. ***Probability Concepts in Engineering Planning and Design***. 2v. v. 2, 1ª Ed., Ed. John Wiley and Sons, 1975. 409p.
- ARANHA, P.M.S. ***Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica***. Porto Alegre, 1994. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ASHTON, H. E.; SEREDA, P. J. Environment, Microenvironment and Durability of Building Materials. In: ***Durability of Building Materials***, v 1. 1982. p. 49-65.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. NBR 6118. Procedimento***. Rio de Janeiro, ABNT, 1978.
- BASHEER, P. A. M. et all. An Interaction Model for Causes of Deterioration and Permeability of Concrete. In: ***Concrete Technology: Past, Present and Future, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium***, 1994. p. 213-225.
- BJEGOVIC, D. et all. C-D-c-t Diagrams for Practical Design of Concrete Durability Parameters. In: ***Cement and Concrete Research***. vol 25, nº 1, USA, 1995, p. 187-196.

- BOB, C. Probabilistic Assessment of Reinforcement Corrosion in Existing Structures. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. **Proceedings**. Dundee, 1996. p. 27-28.
- BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B. The Permeability of Concrete in a Marine Environment. In: **Magazine of Concrete Research**, v. 36, nº 127, jun 1984. p. 67-80.
- CÁNOVAS, M.F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo Ed. PINI, 1988. 522p.
- CARMONA FILHO, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da Patologia no Brasil: Estudo Estatístico. In: **Trabajos Apresentados en la Jornada Español e Potuques sobre Estructuras y Materiales**. Madrid, 1988. Anais... Madrid: CEDEX/ICcET, 1988, p. 99-124.
- CASCUDO, O.; REPETTE, W. A Ação Deletéria de Cloretos em Estruturas de Concreto Armado de Edifícios Residenciais: Um Caso Real. In: 37ª Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto, Goiânia. **Anais**. IBRACON, 1995. p. 219-231.
- CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado**. Brasília, 1994. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990 Design Code**. Bulletin D'Information nº 203. Suíça, 1993.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Durable Concrete Structures**. Bulletin D'Information nº 183. Suíça, 1992.
- CUSENS, A. R. The Inter-relationship Between Research, Durability and Design Life. In: **Design Life of Buildings**. Thomas Telford, Londres, 1985. p. 211-223.
- 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**. Porto Alegre, 1988. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- DER KIUREGHIAN, A. Structural Reliability Methods for Seismic Safety Assessment: a Review. In: **Engineering Structures**, v. 18, nº 6, 1996. p. 412-424.
- DHIR, R. K.; JONES, M. R. (Eds.) **International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection**. Proceedings Dundee, 1996. 885p.
- DIAS, W. P. S. Durability Indicators of OPC Concretes Subject to Wick Action. In: **Magazine of Concrete Research**, v. 45, nº 165, dez. 1993. p. 263-274.

- EL-SAYED, H.A. et all. Some Aspects of the Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete in Marine Atmospheres. In: ***Durability of Building Materials***. v. 5, 1987, pp. 13-25.
- FIGUEIREDO, E.; ANDRES, P. ***Patologia das Obras Civas nas Indústrias de Celulose e Papel***. In: Simpósio sobre Patologia das Edificações: Prevenção e Recuperação. ***Anais***. Porto Alegre CPGEC, UFRGS, out. 1989. p. 283-301.
- FIGUEIREDO, E.J.P. ***Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas - Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado***. São Paulo, 1994. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- FUNAHASHI, M. Predicting Corrosion-Free Service Life of a Concrete Structure in a Chloride Environment. In: ***ACI Materials Journal***, v. 87, nº 6, nov-dez. 1990. p. 581-587.
- GERWICK, B. C. A Holistic Approach to Concrete Technology for Major Bridges. In: Concrete Technology: Past, Present and Future V. Mohan Malhotra Symposium, ***Proceedings*** SP-144, 1994. p. 41-59.
- GERWICK, B. C. The Economic Aspects of Durability - How Much Added Expense Can Be Justified? In: P. K. Mehta Symposium on Durability of Concrete. ***Proceedings***. Nice, 1994. p. 3-19.
- GJØRV, O. Performance and Serviceability of Concrete Structures in the Marine Environment. In: Odd. E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures. ***Proceedings***. New Brunswick, 1996. p. 259-279.
- HELENE, P. ***Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado***. São Paulo, 1993, 271 p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado. In: Seminário Internacional: Prevenção, Inspeção e Reparo de Estruturas de Concreto Atacadas Pela Corrosão de Armaduras. ***Anais***. Porto Alegre, RS. Agosto, 1995.
- HELENE, P. ***Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto***. PINI, 2ª ed. São Paulo, 1992. 213 p.
- HELENE, P. ***Revisão da NB-1 - Comentário: Critérios de Projeto***. 1995a. 5p.
- HOAR, T.P. (Coord.) ***Report of the Committee on Corrosion and Protection Deptº of Trade and Industry***. HMSO. Londres, 1991.
- IDORN, G. M.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N. Research Innovations for Durable Concrete. In: ***Concrete International***, v. 14, nº 7, jul 1992. p. 19-24.
- JAEGERMANN, C. Effect of Water-Cement Ratio and Curing on Chloride Penetration into Concrete Exposed to Mediterranean Sea Climate. In: ***ACI Materials Journal***, v. 87, nº 4, jul-aug, 1990. p. 333-339.

- JOHN, M.V. ***Avaliação da Durabilidade de Materiais, Componentes e Edificações: Emprego do Índice de Degradação***. Porto Alegre, 1987. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- KAMAL, H. K.; AİTCIN, P. C. (Eds.) ***P. K. Mehta Symposium on Durability of Concrete***. CANMET/ACI. Nice, 1994. 335p.
- KERSNER, Z.; ROVNANIKOVÁ, P.; TEPLÝ, B. Modelling of Concrete Carbonation in Presence of Mortar Coating - A Probabilistic Approach. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. ***Proceedings***. Dundee, 1996. p. 747-756.
- KRÓL, M.; HALICKA, A. Strategy of Restoration of Concrete Structures with Active Compatible Materials. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. ***Proceedings***. Dundee, 1996. p. 283-292.
- LI, C. Q. A Case Study on the Reliability Analysis of Deteriorating Structures. In: ***Proceedings of Institute of Civil Engineers, Structures and Buildings***. v. 110, ago, 1995. p. 269-277.
- LOO, Y. H. et all. A Carbonation Prediction Model for Accelerated Carbonation Testing of Concrete. In: ***Magazine of Concrete Research***. v. 46, nº 168, set. 1994. p. 191-200.
- MAILVAGANAM, N. P. ***Repair and Protection of Concrete Structures***. Boca Raton, CRC Press, 1992. 470p.
- MASLEHUDDIN, M. et all. Concrete Durability in a Very Agressive Environment. In: Concrete Technology: Past, Present And Future, V. Mohan Malhotra Symposium, ***Proceedings***, 1994. p. 191-211.
- MAYS, G. (Ed.) ***Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair, Protection***. London. E & FN Spon, 1992. 269p.
- MEHTA, P. K (Ed.) ***Concrete Technology: Past, Present and Future: V. Mohan Malhotra Symposium***. American Concrete Institute SP-144. San Francisco, 1994. 683p.
- MEHTA, P. K. (Ed.) ***Odd. E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures***. Proceedings. New Brunswick, 1996. 279p.
- MEHTA, P. K. Concrete Technology at the Crossroads - Problems and Opportunities. Concrete Technology: Past, Present And Future, V. Mohan Malhotra Symposium, ***Proceedings***. 1994 p. 1-30.
- MEHTA, P. K. Durability of Concrete - Fifty Years of Progress? In: Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto. (***Anexo aos Anais***). Porto Alegre, NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993. 33 p.
- MEHTA, P. K. High-Performance Concrete Technology for the Future. In: International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis, SC. ***Anais...*** 1996, p. 1-14.

- MEHTA, P. K.; BREMNER, T. W. Concrete in the Marine Environment – Some Lessons for the Future. In: Odd. E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures. **Proceedings**. New Brunswick, 1996. p. 175-189.
- MEHTA, P. K.; GERWICK, B. J. Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment. In: **Concrete International**, v. 4, nº 10, out. 1982. p. 45-51.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Ed. São Paulo. PINI, 1994. 580p.
- MIRCEA, D. et all. Long-Term Durability of Reinforced and Prestressed Elements in Agressive Environments. In: **ACI Materials Journal**. v. 91, nº 2, mar-abr. 1994. p. 135-140.
- MOKSNES, J.; SANDVIK, M. Offshore Concrete in the North Sea – A Review of 25 Years Continuous Development and Practice in Concrete Technology. In: Odd E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures. **Proceedings**. New Brunswick, 1996. p. 1-22.
- MORÁN CABRÉ, F. Estimación de la Seguridad Residual en Estructuras de Hormigón com Problemas Patológicos. In: **Informes de la Construcción**. v. 46, nº 434. dez, 1994. p. 39-51.
- NINCE, A.A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. Brasília, 1996. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UnB.
- NOVOKSHCHENOV, V. Deterioration of Reinforced Concrete in the Marine Industrial Environment of the Arabian Gulf – A Case Study. In: **Materials and Structures**, v. 28, nº 181, ago, 1995. p. 392-400.
- OBERHOLSTER, R. E. Pore Structure, Permeability and Diffusivity of Hardened Cement Paste and Concrete as Related to Durability: Status and Prospects. In: 8th International Congress in Chemistry of Cements, **Anais**. v. 1, Rio de Janeiro, 1986. p. 324-335.
- ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Mechanical Properties and Durability of Modified Portland Cement Repair Mortars. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. **Proceedings**. Dundee, 1996. p. 331-342.
- PAPADAKIS, V. G. et all. Mathematical Modelling of Chloride Effect on Concrete Durability and Protection Measures. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. **Proceedings**. Dundee, 1996. p. 165-174.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. In: **ACI Materials Journal**. v. 88, n. 4, jul-ago 1991. p. 363-373.

- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. In: *ACI Materials Journal*. v. 8, n. 2, mar-abr 1991a. p. 186-196.
- PERKINS, P. H. *Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures*. Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1986. 302p.
- PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M. Application of Reliability Analysis to Estimate the Service Life of Lightweight High-Strength Concrete Subject to Corrosion. In: International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis. *Anais...* 1996, p. 354-366.
- PRUDÊNÇIO Jr., L.; DAL MOLIN, D.; HELENE, P. (Eds.) *International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*. Florianópolis. Anais. 1996. 605p.
- RAHARINAIVO et al. Relationships Between Concrete Deterioration and Reinforcing-Steel Corrosion. In: *Durability of Building Materials*, v. 4, 1986. p. 97-112.
- REUNION INTERNATIONALE de LABORATOIRES D'ESSAIS et MATERIAUX. RILEM Draft Recommendation for Damage Classification of Concrete Structures. In: *Materials and Structures*, v. 27, nº 170, jul, 1994. p. 362-369.
- RIGDEN, S. R. Service Life Prediction of Concrete Bridges. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. *Proceedings*. Dundee, 1996. p. 705-714.
- RODRÍGUEZ, J. et al. Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete. In: *Magazine of Concrete Research*, 46, nº 167, 1994. p. 81-90.
- ROELFSTRA, P. E. et al. Modelling Chloride Penetration into Ageing Concrete. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. *Proceedings*. Dundee, 1996. p. 245-255.
- ROSTAM, S. Design Concepts for Durability and Performance. In: *Advanced Studies on Structural Concrete*. CEB Bulletin D'Information nº 221, Lisboa, Portugal, 1994, p. 173-191.
- ROSTAM, S. Durability of Concrete Structures - t^{hr} CEB - FIP Approach. In: Colloquium on the CIB-FIP MC 90. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1991, p. 369-430.
- SAKAI, K. Long-Term Performance of Concrete in a Marine Environment. In: Odd. E. Gj•rv Symposium on Concrete for Marine Structures. *Proceedings*. New Brunswick, 1996. p. 35-53.
- SANDBERG, P.J.P. et al. Cost-Effective Design of High Performance Concrete Structures Exposed in Saline Environment. In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. *Proceedings*. Dundee, Scotland. fev 1996. p. 779-789.

- SCHIESSL, P. (Ed.) ***Corrosion of Steel in Concrete***. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC. 1988. 97p.
- SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Instrumentation of Structures with Sensors - Why and How? In: International Conference: Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. ***Proceedings***. Dundee, 1996. p. 1-15.
- SEELEY, I. H. ***Building Maintenance***. Ed. MacMillan. 2ª Ed. London, 1987. 452 p.
- SHALABY, H. M.; DAOUD, O. K. Case Studies of Deterioration on Coastal Concrete Structures in Two Oil Refineries in the Arabian Gulf Region. In: ***Cement and Concrete Research***, v. 20, nº 6, 1990. p. 975-985.
- SHILSTONE, J. M. et al. Needed - Paradigm Shifts in the Technology for Normal Strength Concrete. Concrete Technology: Past, Present And Future, V. Mohan Malhotra Symposium, ***Proceedings***, 1994 p. 61-84
- SILVA FILHO, L. C. P. ***Durabilidade do Concreto à Ação de Sulfatos: Análise do Efeito da Permeação de Água e da Adição de Microssílica***. Porto Alegre, 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, D. A. ***Levantamento de Problemas em Fundações Correntes no Estado do Rio Grande do Sul***. Porto Alegre, 1993. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SITTER, W. R. Interdependence Between Technical Service Life Prediction. In: ***CEB-RILEM International Prediction of Service Life of Concrete Structure***. Bolonia, out, 1986.
- SOMERVILLE, G. The Interdependence on Research, Durability and Structural Design - Concrete. In: ***Design Life of Buildings***. Thomas Telford, Londres, 1985. p. 233-250.
- WEST, R. A Case Study to Illustrate Design and Construction Factors Affecting the Durability of Concrete Structures. In: ***Design Life of Buildings***. Thomas Telford, Londres, 1985. p. 25-33.
- WÖRNER, J.D.; KIEFER, D. Concrete Barriers for Environmental Protection. In: ***Safety and Performance Concepts***. CEB Bulletin D'Information nº 219, Lousanne, 1993, p. 99-112.
- ZHANG, M-H; GJØRV, O. Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete. In: ***ACI Materials Journal***, v. 88, nº 2, 1990. p. 150-158.